

Kwetsbaarheidsreductie van tijdsbepaling in de Digitale Infrastructuur (P102)

Hoe kan de afhankelijkheid van GNSS bij tijdsbepaling voor de digitale infrastructuur verminderd worden?



TNO 2026 R10357 – April 2026

Kwetsbaarheidsreductie van tijdsbepaling in de Digitale Infrastructuur (P102)

Hoe kan de afhankelijkheid van GNSS bij tijdsbepaling
voor de digitale infrastructuur verminderd worden?

Auteurs	Rob Smets, Marcel van der Lee
Rubricering rapport	TNO Publiek
Vastgesteld door	M. van Waveren
Vastgesteld d.d.	1 april 2026 (deze rubricering wijzigt niet)
Titel	TNO Publiek
Managementuittreksel	TNO Publiek
Samenvatting	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Aantal pagina's	58 (excl. voor- en achterblad en distributielijst)
Aantal bijlagen	2
Programmanaam	Vraaggestuurd Programma Veilige Maatschappij (VPVM)
Programmanummer	P102
Projectnaam	Zwakheden Tijdssignaal en GNSS
Projectnummer	060.66520

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

Managementuittreksel

Kwetsbaarheidsreductie van tijdsbepaling in de Digitale Infrastructuur

Programma

Programmanaam:
Vraaggestuurd Programma Veilige Maatschappij (VPVM)

Programmanummer: P102

Programmaplanning: Startdatum 1 januari 2022
Einddatum 31 december 2026

Programmabegeleider:
Bas ter Luun, Ron Hanoeman
JenV/Directie IKS

Programmaleider:
Gwen Jansen-Ferdinandus
TNO Resilience & Security

Project

Projectnaam:
Zwakheden Tijdssignaal en GNSS

Projectnummer: 060.66520

Projectplanning: Startdatum 31 augustus 2025
Einddatum 1 maart 2026

Projectbegeleider:
Sophie Keizer
Min EZ

Projectleider:
Marcel van der Lee
TNO Resilience & Security

Tijd- en frequentiesynchronisatie is noodzakelijk voor het correct functioneren van onze digitale infrastructuur. Vaak wordt deze tijd- en frequentieinformatie betrokken van satellietnavigatiesystemen, maar dat brengt kwetsbaarheden met zich mee. Uitval of verstoringen van de signalen van satellietnavigatiesystemen kunnen een aanzienlijke impact hebben op de digitale infrastructuur. De vraag is om deze kwetsbaarheden nader te duiden en kennis op te doen over wat er gedaan kan worden om de afhankelijkheid van satellietnavigatiesystemen voor tijd- en frequentieinformatie te verminderen.

Probleemstelling

Het Ministerie van EZ vraagt zich af hoe groot de afhankelijkheid – en dus de kwetsbaarheid – is van de digitale infrastructuur in Nederland ten aanzien van satelliet-gebaseerde tijd- en frequentiesynchronisatie. Het is voor EZ van belang om te kunnen inschatten of er overheidsmaatregelen nodig zijn om zwakke plekken in de tijd- en frequentievoorziening aan te pakken. Hierbij wordt gedacht aan het ontwikkelen van een redundante tijd- en frequentievoorziening die als alternatief kan dienen voor bestaande, satellietafhankelijke vitale dienstverlening.

TNO beschikt over expertise op het gebied van Positie, Navigatie en Timing. Voor Defensie loopt er reeds een kennisopbouwprogramma rondom dit thema. Daarnaast werkt TNO aan aanpalende onderwerpen waar tijdsynchronisatie een rol speelt, zoals R&D naar kwantumcomputing en kwantumcommunicatie en mobiele communicatie. Desondanks is de kennispositie beperkt over afhankelijkheden en kwetsbaarheden van de digitale infrastructuur voor verstoringen van satellietgebaseerde tijd- en frequentiesynchronisatie en over technische mogelijkheden om zwakke plekken in de tijd- en frequentievoorziening te mitigeren.

Beschrijving van de werkzaamheden

TNO heeft een verkennend onderzoek uitgevoerd om de kwetsbaarheden van de digitale infrastructuur voor verstoringen van satellietgebonden tijd- en frequentiesignalen nader te kunnen duiden en om kennis op te bouwen naar de mogelijkheden van een redundant-

tijdssignaal voor de digitale infrastructuur en de randvoorwaarden waaraan zo'n voorziening moet voldoen. In het verkennend onderzoek zijn gesprekken gevoerd met relevante Nederlandse kennis- en marktpartijen op het gebied van tijd- en frequentiesynchronisatie.

De volgende werkzaamheden zijn uitgevoerd:

- › Uitvoeren van een beknopte literatuurstudie naar de belangrijkste kwetsbaarheden van digitale infrastructuur voor verstoringen van satellietgebonden tijd- en frequentiesignalen?
- › Inventariseren middels gesprekken en literatuurstudie van de belangrijkste huidige technologische oplossingen om tijd- en frequentiesignalen te leveren aan de digitale infrastructuur.
- › Verkennen van technieken middels gesprekken en literatuurstudie die kunnen bijdragen aan het minder afhankelijk maken van digitale infrastructuur van GNSS-gebaseerde tijd- en frequentiesynchronisatie, bijvoorbeeld bij jamming en spoofing.
- › Opstellen van de belangrijkste eisen en wensen die aan zo'n voorziening zouden moeten worden gesteld (eerste – high level – inventarisatie).
- › Een niet-uitputtende verkenning van (markt)partijen die relevante apparatuur en diensten aanbieden.

Resultaten en conclusies

Het onderzoek gaat in op de kwetsbaarheden van GNSS bij tijd- en frequentiesynchronisatie. Er worden een aantal voorbeelden beschreven uit de literatuur en open bronnen van kwetsbaarheden van GNSS-tijdssignalen en de mogelijke gevolgen. Daarna wordt voor een aantal sectoren die veel gebruik maken van GNSS-tijdssynchronisatie (Mobiele Netwerken, Elektriciteitsnet, Co-locatie Datacenters en Cloud Service Providers), beschreven op welke wijze ze daar gebruik van maken en tot welke belangrijkste kwetsbaarheden op hoofdlijnen dat zou kunnen leiden.

Vervolgens wordt een beknopt overzicht gegeven van huidige technieken voor het leveren van tijdsignalen aan de Digitale Infrastructuur waarin eigenschappen van tijdbronnen en van tijddistributieprotocollen worden beschreven. Ook worden buitenlandse initiatieven beschreven om te komen tot het leveren van tijd- en frequentiediensten die onafhankelijk zijn van GNSS en wordt geschetst hoe een mogelijk toekomstig landelijk Tijd- en Frequentienetwerk eruit zou kunnen gaan zien.

Conclusies uit het verkennend onderzoek zijn:

1. GNSS als enige bron voor tijd- en frequentiesynchronisatie is kwetsbaar.
2. Organisaties kunnen zelf al veel doen om de weerbaarheid te vergroten tegen kortdurende uitval van GNSS.
3. Als de vereiste tijdnauwkeurigheid niet al te groot is zijn alternatieve bronnen voor tijd- en frequentieinformatie: NTP-servers, eLORAN of DCF77.
4. Het realiseren van een alternatief voor GNSS gebaseerde tijd- en frequentiesynchronisatie in de vorm van een landelijk dekkend PTP-aware glasvezelnetwerk (een tijd- en frequentie (TF) netwerk dat als back-up fungeert) kan de weerbaarheid tegen uitval van GNSS gebaseerde tijddiensten verder vergroten.
5. Er is in Nederland kennis en expertise aanwezig op het gebied van tijd- en frequentiesynchronisatie over de aspecten die van belang zijn voor de realisatie van een landelijke TF-netwerk: tijdbronnen, netwerken, benodigde apparatuur, benodigde dienstverlening en governance.

Toepasbaarheid

De in het verkennend onderzoek opgedane kennis kan door EZ gebruikt worden in het kader van de afweging naar de noodzaak van een door de overheid aangeboden redundant-tijdssignaal dat gebruikt kan worden binnen de digitale infrastructuur in Nederland.

Summary

Problem Statement

The Ministry of Economic Affairs (EZ) is seeking to understand the extent of the dependency—and thus the vulnerability—of the digital infrastructure in the Netherlands with respect to satellite-based timing. For EZ, it is important to be able to assess whether government measures are needed to address weaknesses in the time and frequency provisioning. In this context, consideration is being given to the development of a redundant time and frequency service that could serve as an alternative to existing satellite-dependent critical services.

TNO has expertise in the field of Positioning, Navigation and Timing (PNT). For the Ministry of Defence, a knowledge development program in this domain is already underway. In addition, TNO is active in related areas where time synchronization plays an important role, such as R&D in quantum computing and quantum communication, as well as mobile communications. Nevertheless, there is currently limited knowledge regarding the dependencies and vulnerabilities of the digital infrastructure to disruptions of satellite-based timing, and regarding the technical possibilities to mitigate weaknesses in the time and frequency supply.

Description of the Activities

TNO has carried out an exploratory study to better characterize the vulnerabilities of the digital infrastructure to disruptions of satellite-based timing signals, and to build knowledge about the possibilities for a redundant time signal for the digital infrastructure, as well as the boundary conditions such a provision would need to meet.

The following activities were carried out:

-) Conducting a concise literature review of the main vulnerabilities of digital infrastructure to disruptions of satellite-based timing signals.
-) Inventorying the main current technological solutions for providing time signals to the digital infrastructure.
-) Exploring techniques that can contribute to reducing the dependency of digital infrastructure on GNSS-based timing, for example in the case of jamming and spoofing.
-) Identifying the main requirements and desired characteristics for such a provision (an initial, high-level inventory).
-) Carrying out a brief, non-exhaustive exploration of (market) parties offering relevant equipment and services.

As part of the exploratory study, interviews were conducted with relevant Dutch knowledge institutions and market parties in the field of time and frequency synchronization.

Results and Conclusions

The study examines the vulnerabilities of GNSS with respect to time determination. A number of examples from the literature and open sources are described, illustrating vulnerabilities of GNSS time signals and their potential consequences. Subsequently, for several sectors that make extensive use of GNSS-based time synchronization (Mobile Networks, the Electricity Grid, Co-location Data Centers, and Cloud Service Providers), the study describes how GNSS timing is used and the main high-level vulnerabilities that may arise as a result. Next, a concise overview is provided of current techniques for delivering time signals to the digital infrastructure, describing characteristics of time sources and time distribution

protocols. Foreign initiatives aimed at delivering GNSS-independent time and frequency services are also described, and a possible future nationwide time and frequency (TF) network is outlined.

The main conclusions of the exploratory study are:

1. GNSS as the sole source for time and frequency synchronization is vulnerable.
2. Organizations can already take many measures themselves to increase resilience against short-term GNSS outages.
3. If the required time accuracy is not very stringent, alternative sources of time and frequency information include NTP servers, eLORAN, or DCF77.
4. Establishing an alternative to GNSS-based time and frequency synchronization in the form of a nationwide, PTP-aware fiber-optic network (a time and frequency network that functions as a backup) can further enhance resilience against disruptions of GNSS-based time services.
5. In the Netherlands, knowledge and expertise are available in the field of time and frequency synchronization for all aspects relevant to the realization of a national TF network: time sources, networks, required equipment, required services, and governance.

Inhoudsopgave

Managementuittreksel	3
Summary	6
Afkortingen	9
1 Inleiding	12
1.1 Achtergrond	12
1.2 Onderzoeksvragen	12
1.3 Aanpak	13
2 Kwetsbaarheid van GNSS bij tijdsbepaling	14
2.1 Kwetsbaarheden van GNSS-tijdsignalen	14
3 Huidige technieken voor het leveren van tijdsignalen aan de Digitale Infrastructuur ...	18
3.1 Principes van tijdsynchronisatie	18
3.2 Tijddistributieprotocollen: NTP, PTP, en White Rabbit	21
3.3 eLORAN en eLORAN-diff	23
4 Tijdsynchronisatie in mobiele netwerksector, energiesector en datacentra	24
4.1 Mobiele Netwerken	24
4.2 Elektriciteitsnetwerken	26
4.3 Co-locatie Datacenters	27
4.4 CSP (Cloud Service Providers)	30
5 Opties voor het verminderen van de GNSS-afhankelijkheid	31
5.1 Oplossingsrichting 1: Robuuster maken van GNSS-ontvangers	31
5.2 Oplossingsrichting 2: Verbeterde holdover en detectie van verstoringen	32
5.3 Oplossingsrichting 3: Een aanvulling op GNSS	32
5.4 Oplossingsrichting 4: Het netwerk omvormen tot klok	33
6 Buitenlandse initiatieven	34
6.1 Europese Unie	34
6.2 Verenigd Koninkrijk	37
6.3 Duitsland	38
6.4 Frankrijk	38
6.5 Zweden	38
6.6 Italië	39
6.7 Verenigde Staten	40
6.8 Zuid-Korea	41
6.9 China	41
7 Een mogelijk toekomstig landelijk TF-netwerk	43
7.1 Technische Realisatie	45
7.2 Beheer	45
7.3 Klant en business management	46
8 Conclusies	47
Bibliografie	49

Bijlagen

- A. Eerste aanzet tot eisen en wensen voor een landelijk glasvezel T&F-netwerk
- B. Marktpartijen in de tijd- en frequentiesector

Afkorting

Afkorting	Betekenis
3GPP	3rd Generation Partnership Project
AMFI	Algemeen Management en Functionele Informatie
AMS-IX	Amsterdam Internet Exchange
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BMCA	Best Master Clock Algorithm
BNC	Bayonet-Neill-Concelman connector
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CHIMERA	Chips Message Robust Authentication
CLONETS	CLOCK NETWORK Services
CME	Coronal Mass Ejection
CSP	Cloud Service Provider
C-TFN	Core Time/Frequency Network
DC	DataCenter
DCF77	Deutschland C-band Frankfurt 77,7 kHz
DCV	Distributed Common-View time transfer
dBW	decibel Watt
DG DEFIS	Directorate-General for Defence Industry and Space
DNS	Domain Name System
DSO	Distribution Service Operators
DU	Distributed Unit
eLORAN	Enhanced Long Range Navigation
ENTSO	European Network of Transmission System Operators
ERNP	European Radio Navigation Plan
ERTMS	European Rail Traffic Management System
EZ	Economische Zaken
FDD	Frequency Division Duplex
FOREST	Fiber-based Optical network for European Science and Technology
GBAS	Ground Based Augmentation System
GÉANT	De GÉANT Association is de samenwerkingsorganisatie van de Europese Nationale Onderzoeks- en Educatienetwerken (NRENs).
GLONASS	GLOBAL'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INRiM	L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
IKUS	Inventarisatie Kwetsbaarheden Uitval Satellietnavigatie
IoT	Internet of Things

Afkorting	Betekenis
IP	Internet Protocol
IPCEI-CIS	Important Project of Common European Interest: Cloud Infrastructure and Services
IT	Informatietechnologie
ITS	Internet Time Service
JRC	EU Joint Research Centre
KPN	Koninklijke PTT Nederland
MiFID	Markets in Financial Instruments Directive
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MoD	Ministry of Defence
MSCVDC	Multi-Source Common-View Disciplined Clock
NCTV	Nationaal Coördinator Terrorismedbestrijding en Veiligheid
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
NIC	Network Interface Card
NIST	National Institute of Standards and Technology
NMI	Nationaal Metrologisch Instituut
NOC	Network Operations Center
NPL	National Physical Laboratory
NREN	National Research and Education Network
NTC	National Timing Centre
NTP	Network Time Protocol
OC	Operationeel Centrum
OCO	Oven Controlled Oscillator
OCXO	Oven Controlled Crystal Oscillator
OPNT	Optical Positioning, Navigation and Timing
OSNMA	Open Service Navigation Message Authentication
PMU	Phasor Measurement Unit
PNT	Position, Navigation and Timing
PoP	Point-of-Presence
ppb	Parts per billion
PTP	Precision Timing Protocol
PTS	Zweedse Post- en Telecommunicatieautoriteit (Post- och Telestyrelsen)
RAN	Radio Access Network
R&D	Research and Development
REFIMEVE	Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne
RETSI	Resilient Enhanced Time Scale Infrastructure
RF	Radio Frequency
RFI	Radio Frequency Interference
RISE	Research Institute of Sweden
SFP	Small Form-Factor Pluggable
SIG-TFN	Special Interest Group on Time and Frequency Network
SiS	Signal in Space
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIDN	Stichting Internet Domeinregistratie Nederland
SLA	Service Level Agreement

Afkorting	Betekenis
SMA	Sub-Miniature Versie A
SMB	SubMiniature version B
SRB	Solar Radio Burst
SURF	Samenwerkende Universitaire RekenFaciliteiten
SyncE	Synchronous Ethernet
TA	Time Advance
TAAS	Time as a Service
TCO	Temperature Compensated Oscillator
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillator
TDD	Time Division Duplex
TDN	Time Delivery Node
T&F	Time and Frequency
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TOP-IX	TOrino Piemonte Internet eXchange
TSN	Time-Sensitive Networking
TSO	Transmission Service Operator
TWSTFT	Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer
UDP	User Datagram Protocol
USNO	United States Naval Observatory
UTC	Universal Time Coordinated
VK	Verenigd Koninkrijk
VM	Virtual Machine
VS	Verenigde Staten
VSL	Van Swinden Laboratorium - het Nationaal Metrologisch Instituut van Nederland
WR	White Rabbit

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In december 2024 heeft het Ministerie van Economische Zaken (EZ) via Stratix onderzoek laten uitvoeren naar de Vitaalbeoordeling Digitale Infrastructuur. Het rapport “Inventarisatie Kwetsbaarheden Uitval Satellietnavigatie II” (november 2022) brengt kwetsbaarheden in kaart die ontstaan bij uitval van satellietnavigatie. Omdat tijd- en frequentiesynchronisatie nauw verweven zijn met satellietnavigatiesystemen, ontstaan er afhankelijkheden die verder reiken dan alleen sectoren die direct gebruikmaken van satellietnavigatie. Een groot deel van de digitale infrastructuur in Nederland is namelijk op een of andere manier afhankelijk van tijd- en frequentie-informatie. Dit betekent dat uitval een aanzienlijke impact kan hebben op de digitale infrastructuur¹.

Het Ministerie van EZ vraagt zich daarom af hoe groot de afhankelijkheid – en dus de kwetsbaarheid – is van de digitale infrastructuur in Nederland ten aanzien van satelliet-gebaseerde timing. Het is voor EZ van belang om te kunnen inschatten of er overheidsmaatregelen nodig zijn om zwakke plekken in de tijd- en frequentievoorziening aan te pakken. Hierbij wordt gedacht aan het ontwikkelen van een redundante tijd- en frequentievoorziening die als alternatief kan dienen voor bestaande, satellietafhankelijke vitale dienstverlening. Zo’n redundante infrastructuur zal gestoeld moeten zijn op alternatieve beveiligingsprincipes.

Doel van dit verkennend onderzoek is het nader duiden van de kwetsbaarheden van de digitale infrastructuur voor verstoringen van satelliet gebonden tijdsignalen en het verkennen van de mogelijkheden van een redundant-tijdssignaal voor de digitale infrastructuur en het inventariseren van de randvoorwaarden waaraan zo’n voorziening moet voldoen.

De in het verkennend onderzoek opgedane kennisopbouw helpt EZ bij het beoordelen van de noodzaak van een door de overheid aangeboden redundant-tijdssignaal dat gebruikt kan worden binnen de digitale infrastructuur in Nederland.

1.2 Onderzoeksvragen

1. Wat zijn op hoofdlijnen de belangrijkste kwetsbaarheden van de digitale infrastructuur voor verstoringen van satelliet gebonden tijdsignalen?
2. Wat zijn nu de belangrijkste huidige technologische oplossingen om tijdsignalen te leveren aan de digitale infrastructuur, en welke (markt)partijen bieden hiervoor relevante apparatuur en diensten aan?
3. Welke technieken kunnen bijdragen aan het minder afhankelijk maken van digitale infrastructuur van GNSS-gebaseerde timing (Global Navigation Satellite System), bijvoorbeeld bij jamming en spoofing?
4. Wat zijn de belangrijkste eisen en wensen die aan een redundante tijd- en frequentievoorziening gesteld zouden moeten worden. Een voorziening die als alternatief kan dienen voor bestaande, satellietafhankelijke vitale dienstverlening.

¹ (Bron: De Staat van de Digitale Infrastructuur [80]) We beschouwen de digitale infrastructuur als het geheel aan schakels dat de eindgebruiker in staat stelt om toegang te krijgen tot digitale content en applicaties. Met andere woorden, de infrastructuur die nodig is om eindgebruikers toegang te geven tot de digitale wereld.

1.3 Aanpak

Om de eerste onderzoeksvraag te beantwoorden is een beknopte analyse uitgevoerd naar de belangrijkste kwetsbaarheden van digitale infrastructuur voor verstoringen van satelliet gebonden tijdsignalen. Daarna is geïnventariseerd wat de belangrijkste huidige technologische oplossingen zijn om tijdsignalen te leveren aan de digitale infrastructuur. Dit als invulling van de tweede onderzoeksvraag.

Als derde activiteit is een verkenning uitgevoerd naar technieken die kunnen bijdragen aan het minder afhankelijk maken van digitale infrastructuur van GNSS-gebaseerde timing, bijvoorbeeld bij jamming en spoofing.

Ten slotte zijn de belangrijkste eisen en wensen opgesteld die aan zo'n voorziening zouden moeten worden gesteld (eerste – high level – inventarisatie).

In het verkennend onderzoek zijn interviewgesprekken gevoerd met relevante Nederlandse kennis- en marktpartijen op het gebied van tijd- en frequentiesynchronisatie. Met de volgende organisaties is gesproken (met vermelding van hun rol op het gebied van tijdsynchronisatie):

-) VSL
 - Het Nationaal Metrologisch Instituut van Nederland. VSL levert in Nederland nauwkeurige kalibraties op het gebied van tijd en frequentie die direct herleidbaar zijn naar de nationale tijdstandaard en VSL beheert de Nederlandse tijd. (www.vsl.nl).
-) Vrije Universiteit Amsterdam
 - Voert wetenschappelijk onderzoek uit naar tijd- en frequentiesignalen over netwerken. (vu.nl)
-) Eurofiber
 - Aanbieder van zakelijk glasvezel (eurofiber.com).
-) OPNT
 - Aanbieder van apparatuur voor nauwkeurige tijddistributie (opnt.nl).
-) KPN
 - Mobiele Netwerkoperator (MNO) die daarmee behoefte heeft aan nauwkeurige tijdsynchronisatie. (kpn.com).
-) Odido
 - Mobiele Netwerkoperator (MNO) die daarmee behoefte heeft aan nauwkeurige tijdsynchronisatie. (www.odido.nl).
-) SIDN Labs
 - SIDN Labs is de onderzoeksafdeling van SIDN (organisatie DIE verantwoordelijk IS voor het .nl-domein).Doet onderzoek naar tijddistributie en beheert een eigen NTP-server. (www.sidnlabs.nl).
-) SURF
 - SURF is de ict-coöperatie van het Nederlandse onderwijs en onderzoek. Zij bieden een Time&Frequency dienst aan voor onderzoeksinstellingen in Nederland. Verder werkt SURF mee aan de realisatie van het Europese Time&Frequency netwerk voor onderzoeksinstellingen. (surf.nl).

De verkenning kende een beperkte omvang en diepgang en is uitgevoerd op een 'design-to-budget'-basis.

2 Kwetsbaarheid van GNSS bij tijdsbepaling

Dit hoofdstuk geeft in paragraaf 2.1 een aantal voorbeelden van kwetsbaarheden van GNSS-tijdssignalen en de mogelijke gevolgen. In de daaropvolgende paragrafen wordt voor een aantal sectoren die veel gebruik maken van GNSS-tijdssynchronisatie, beschreven op welke wijze ze daar gebruik van maken en tot welke belangrijkste kwetsbaarheden op hoofdlijnen dat zou kunnen leiden.

2.1 Kwetsbaarheden van GNSS-tijdssignalen

2.1.1 Behoefte aan tijdsynchronisatie

Allerlei sectoren in onze maatschappij hebben behoefte aan nauwkeurige tijd, al of niet als onderdeel van de digitale infrastructuur. Tabel 1 geeft een aantal voorbeelden van deze sectoren en hun tijdtoepassingen [1] [2]. Merk op dat een aantal van deze sectoren als vitaal zijn aangemerkt door de Rijksoverheid [3].

Tabel 2.1: Voorbeelden van de behoefte aan (nauwkeurige) tijd in diverse sectoren.

Sector	Voorbeelden van Toepassingen van Tijdsynchronisatie
Energie	Synchronisatie van de spanningsfrequentie.
Mobiele Telefoon	Synchronisatie van 4G/5G data- en spraakverkeer.
Datacentra	Aanbieden tijddienst aan klanten.
Onderwijs en Wetenschap	Wetenschappelijke proefnemingen.
Financiële sector	Tijdstempels van transacties.
Openbare orde en Veiligheid	Synchronisatie van C2000 communicatie.
Defensie	Synchronisatie van communicatiesystemen, Alternatieven PNT (Position, Navigation and Timing), Radar, en diverse specifieke defensietoepassingen.
Smart Manufacturing	Coördinatie tussen robotsystemen
Luchtvaart	Air Traffic Management (ATM), Berichtenuitwisseling tussen cockpit en ATC (Air Traffic Control), Radar.
Spoorvervoer	Synchronisatie van communicatiesystemen, ERTMS (European Rail Traffic Management System), Bovenleidingsystemen.
Gezondheidszorg	Radiologie.
IT	Beveiligingscertificaten.

De kern van tijdsynchronisatie is het gelijkzetten van klokken (disciplineren). Hiervoor is een referentietijdbron nodig, een distributiemechanisme (synchronisatieprotocol) om de tijdsignalen met behoud van nauwkeurigheid te communiceren en één of meer klokken aan

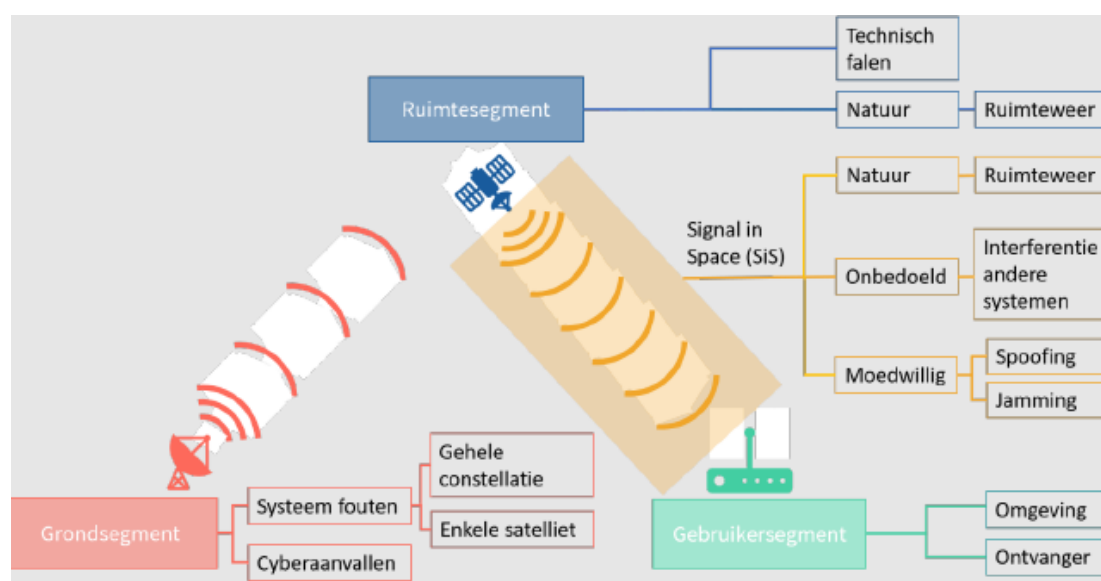
de kant van de gebruiker. Vaak wordt gebruik gemaakt van een extra *holdover* klok die bij wegvallen van de tijdsignaaldistributie nog enige tijd een voldoende nauwkeurig tijdsignaal kan produceren.

De officiële referentietijdbron in Nederland is de UTC(VSL) tijd (Universal Time Coordinated) die in Nederland door VSL wordt gemaakt. De wereldwijde UTC-tijd wordt in Parijs bepaald door het BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) op basis van de UTC tijden van de diverse landen wereldwijd.

2.1.2 GNSS Kwetsbaarheden en gevolgen bij verstoringen

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) is de verzamelnaam voor satellietnavigatiesystemen die naast positiebepaling ook nauwkeurige tijd leveren. Op dit moment zijn er vier wereldwijd opererende GNSS-systemen actief (GPS (Verenigde Staten), Galileo (EU), GLONASS (Rusland), Beidou (China)).

Gebruik van de GNSS-basisdiensten is gratis. In combinatie met de geringe kosten voor antennes en ontvangstapparatuur en de grote nauwkeurigheid en betrouwbaarheid is het niet verrassend dat hier veel gebruik van gemaakt. De tijdnaauwkeurigheid van GPS wordt officieel binnen een marge van 1µs (microseconde) van de UTC-tijd gehouden, maar in de praktijk wordt een nauwkeurigheid kleiner dan 10 ns (nanoseconde) bereikt [4].



Figuur 2.1: Overzicht van type dreigingen en verstoringen op de verschillende GNSS onderdelen (bron: IKUS II rapport [1]).

Omdat de signaalsterktes van de GNSS-signalen bij het aardoppervlak uiterst gering zijn², zijn deze gevoelig voor verstoringen. Dit kunnen natuurlijke verstoringen zijn door ruimteweer (zoals vormen van zonnestorm (bijv. CME's (Coronal Mass Ejection), Solar Radio Bursts' (SRB)) of verstoringen door menselijke oorzaken zowel onbedoeld als moedwillig. Zonnestormen kunnen effect hebben op de nauwkeurigheid van de tijdsignalen. Zo werd als gevolg van een zonnestorm in 2024 in Noorwegen een positieafwijking van enkele decimeters tot één meter gezien, wat overeenkomt met een tijdelijke timingfout van enkele nanoseconden. Bovendien viel bij meerdere GPS-satellieten kort het signaal helemaal weg [5].

² Signaalsterkte tussen -163 dBW en -152 dBW (bron GNSS Spoofing rapport, NLR [79]).

Een veel aangehaald voorbeeld van de kwetsbaarheid van GNSS-signaalontvangst is de vrachtwagenchauffeur uit de Verenigde Staten die in 2012 een GNSS-jammer in zijn truck gebruikte om te voorkomen dat zijn werkgever zijn positie kon zien. De jammer verstoorde een GNSS-systeem (GBAS, Ground Based Augmentation System) bedoeld om vliegtuiglandingen te ondersteunen. Dit gebeurde telkens als de chauffeur in de buurt van het vliegveld van Newark (VS) reed [6].

Een voorbeeld van een wereldwijde storing in het GPS-tijdsignaal is het incident op 26 januari 2016. Op die dag werd een GPS-satelliet uit dienst genomen en uitgeschakeld. Hierbij trad een fout op in een software-update bij de andere GPS-satellieten waardoor gedurende een aantal uren de GPS-tijd 14 nanoseconden versprong. Dit veroorzaakte wereldwijd storingsmeldingen bij veel sectoren zoals energie- en telecomproviders. De diensten van die sectoren werden gelukkig niet geraakt. Wel werden televisie- en radio-uitzendingen verstoord in het VK en Spanje [7] [8].

In diverse landen zijn studies uitgevoerd naar de kwetsbaarheid van GNSS-systemen en de gevolgen van uitval en verstoringen van zowel navigatie- als tijddiensten [9]. Twee studies komen met enorme schade: 5,2 miljard pond bij een vijfdaagse uitval in het Verenigd Koninkrijk [10], en 30-45 miljard dollar economische schade bij een 30-daagse uitval in de Verenigde Staten [11]. Een rapport uit Denemarken [12] heeft de gevolgen ingeschat voor acht sectoren en komt met significante gevolgen in twee sectoren (Land- en Tuinbouw en Transport) en efficiëntieverlies in twee andere sectoren (hulpdiensten en visserij). Voor drie andere sectoren worden geen grote gevolgen verwacht (Stroomvoorziening, Meteorologie en de IT-sector).

In Nederland is I&W nationaal beleidsverantwoordelijk voor plaats- en tijdsbepaling met behulp van GNSS dat is aangemerkt als vitaal proces. Het PNT-signaal is van belang voor navigatie in lucht- en scheepvaart, OV en transport, maar ook essentieel in onder andere elektriciteitsnetten, financiële diensten en mobiele netwerken. Door recente geopolitieke ontwikkelingen neemt het risico op verstoringen toe met potentieel maatschappij-ontwrichtende gevolgen. I&W werkt hier onder anderen ook in het IKUS traject. In Nederland zijn de IKUS I en II studies uitgevoerd naar GNSS-kwetsbaarheid en de gevolgen. Het IKUS I rapport uit 2016, [13] stelt dat kortdurende uitval van GNSS-signalen regelmatig voorkomt. Langdurige uitval, enkele uren tot enkele dagen is volgens het rapport echter vrij zeldzaam. Voor tijdwaarneming zal GNSS-uitval tot enkele dagen door het merendeel van de gebruikers volgens IKUS I nauwelijks worden opgemerkt, omdat interne kloksystemen in staat zijn om dit interval te overbruggen. Voor positiebepaling zal uitval van enkele minuten al kunnen leiden tot aanzienlijke verstoringen in onder meer de lucht- en de scheepvaart [13]. In de vervolgstudie IKUS II uit 2022 [1] staat dat: "PNT middels GNSS veelvuldig wordt (al dan niet bewust) ingezet in diverse (vitale) processen van de onderzochte sectoren. Zowel van positie- als van tijdsbepaling wordt gebruik gemaakt. Uitval kan zodoende verstrekende gevolgen hebben voor de Nederlandse maatschappij.". Waarbij wordt vermeld dat de Nationaal Coördinator Terrorismebestrijding en Veiligheid (NCTV) plaats- en tijdsbepaling door middel van GNSS in Nederland als een categorie B vitaal proces heeft geïdentificeerd. In deze categorie staat de infrastructuur die bij verstoring, aantasting of uitval de ondergrenzen van minstens één van de drie impactcriteria voor categorie B raakt:

-) Economische gevolgen: > ca. 5 miljard euro schade of ca. 1,0% daling reëel inkomen.
-) Fysieke gevolgen: meer dan 1.000 personen dood, ernstig gewond of chronisch ziek.
-) Sociaal maatschappelijke gevolgen: meer dan 100.000 personen ondervinden emotionele problemen of ernstig maatschappelijke overlevingsproblemen.

Op het gebied van tijdsynchronisatiekwetsbaarheden vermeldt het IKUS II rapport dat vrijwel alle sectoren een afhankelijkheid kennen van GNSS-tijdsbepaling. Bij het wegvallen van deze synchronisatie kan data niet of niet goed worden uitgewisseld waardoor systeemdegradatie plaatsvindt. Bij de energie- en telecomsector is het primaire proces in hoge mate afhankelijk van tijdsynchronisatie. Deze sectoren hebben veelal maatregelen genomen om de synchronisatie te handhaven bij GNSS-verstoringen [1].

Bij mobiele telefonienetwerken (4G/5G) heeft het uit synchronisatie raken van zendmasten tot gevolg dat de dekking en capaciteit van de masten vermindert. Om te voorkomen dat verbindingen helemaal wegvallen, kunnen de providers bepaalde services afschakelen. Afhankelijk van de genomen back-up maatregelen (nauwkeurigheid van holdover klokken, beschikbaarheid van alternatief tijddistributienetwerk) kan een netwerkprovider het afschakelen van services uitstellen en basisservices dagen [11] tot vele maanden in stand houden.

In elektriciteitsnetwerken wordt tijdsynchronisatie gebruikt voor diverse doeleinden zoals het time-stampen van foutmeldingen op verschillende plekken in het netwerk, het bepalen van de locatie van storingen en voor het stabiel houden van het netwerk [14]. Met de overgang naar meer 'smart grid' netwerken wordt veel gebruik gemaakt van van PMU's (Phasor Measurement Units) die op diverse plaatsen in het netwerk de stabiliteit van de elektriciteit meten [15]. Hiervoor maken ze standaard gebruik van GNSS-tijd. Als deze metingen wegvallen of verkeerde waardes aannemen kan dat leiden tot het niet opmerken van verstoringen in het elektriciteitsnetwerk, tot storingsmeldingen en in het slechtste geval tot een niet gewenste uitschakeling van centrales [16].

Een Engelse studie geeft aan dat bij zonnestormen zogenaamde 'Solar Radio Bursts' (SRB) het meest negatieve effect lijken te hebben op de propagatie van GNSS signalen. Op basis van historische data van SRB-events is geschat dat er in het komende decennium een kans bestaat van 3%-12% dat er een verstoring plaatsvindt waardoor het stroomnetwerk in het Verenigd Koninkrijk zou kunnen uitvallen³ [17].

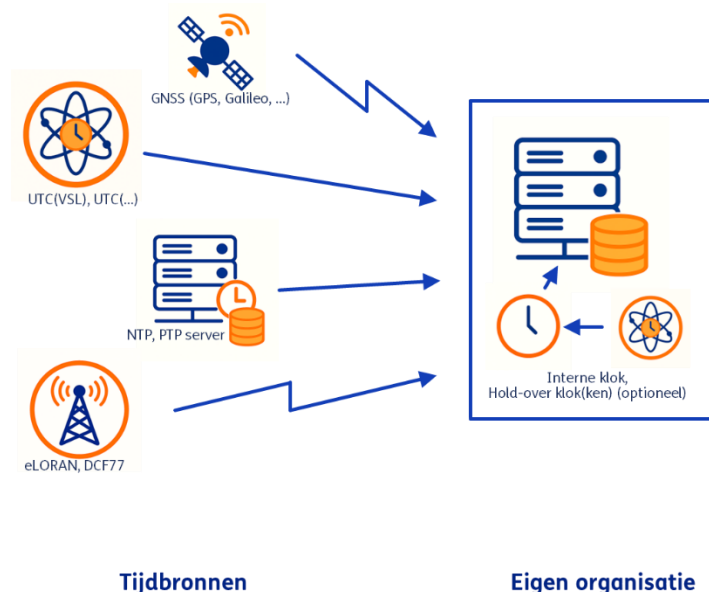
³ De SRB is dan zo hevig ($> 1 \cdot 10^6$ SFU) dat er een timing fout groter dan 100 μ s ontstaat waardoor de PMU's (Phasor Measurement Units) in het stroomnetwerk de frequentie van het net niet langer door middel van GNSS kunnen instellen. Hierbij is geen rekening gehouden met het aanwezig zijn van holdover klokken.

3 Huidige technieken voor het leveren van tijdsignalen aan de Digitale Infrastructuur

GNSS-systemen zoals GPS en Galileo maken gebruik van eigen protocollen die het mogelijk maken de positie van een GNSS-ontvanger te bepalen en als bijproduct een afgeleide van de tijd en de frequenties van de atoomklokken in de satellieten beschikbaar te maken. Om deze tijd en frequentie uiteindelijk op hun eindbestemming in de Digitale Infrastructuur te krijgen zijn protocollen nodig. De meest gebruikte technieken voor tijd- en frequentiedistributie worden in dit hoofdstuk beschreven.

3.1 Principes van tijdsynchronisatie

De basis van tijdsynchronisatie in de digitale infrastructuur is het regelmatig gelijkzetten (disciplineren) van de interne klokken van de computersystemen in de infrastructuur. Daarvoor zal een tijdbron worden gekozen die tijd en frequentie voldoende juistheid (*accuracy*) en nauwkeurigheid (*precision*) aanbiedt voor de toepassing van bijvoorbeeld de computersystemen. De juistheid geeft aan hoe dicht de tijd/frequentie bij de werkelijke tijd/frequentie ligt, terwijl de nauwkeurigheid aangeeft in hoeverre de geproduceerde tijden/frequenties variëren in. Als de tijdbron tijdelijk niet beschikbaar is kan gebruik worden gemaakt van een back-up in de vorm van één of meer holdover-klokken die weliswaar van mindere kwaliteit zijn dan de bronklok(ken), maar die voor de duur van de uitval een voldoende niveau van juistheid en nauwkeurigheid kunnen blijven bieden. Bronklokken zijn over het algemeen gedisciplineerd met de UTC-tijd wat de mogelijkheid biedt voor organisatie-overstijgende en internationale tijdsynchronisatie.



Figuur 3.1: Verschillende tijdbronnen.

Er is een grote verscheidenheid aan beschikbare soorten van klokken. Elk met hun eigen eigenschappen. Figuur 3.2 geeft een overzicht van een aantal veelgebruikte typen. Een combinatie van de meest nauwkeurige klokken (veelal cesiumklokken) worden gebruikt bij het bepalen van de UTC-tijd. GNSS-satellieten bevatten meerdere klokken (In de Galileo-satellieten wordt bijvoorbeeld een combinatie van een rubidiumklok en een Hydrogen-maserklok gebruikt [18]).

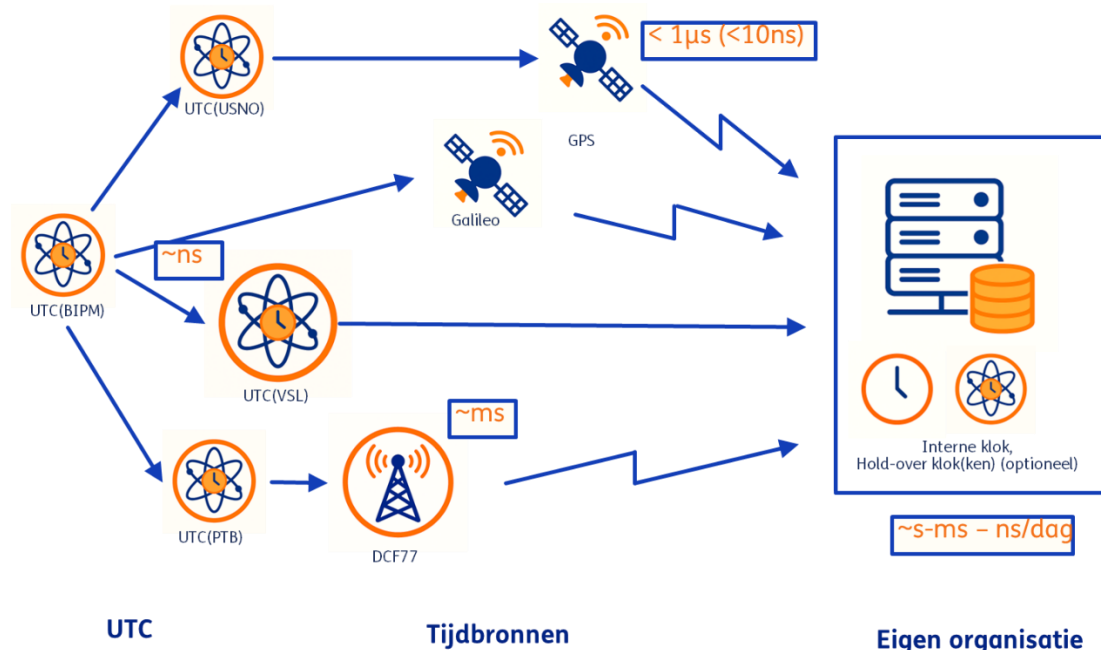
Afhankelijk van de toepassing worden TCXO en OCXO vaak gebruikt als holdover-klok.

Type klok	Nauwkeurigheid (typisch)
TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator)	± 10 ms/dag
OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator)	± 50 μ s/dag
Rubidiumklok (miniatuur)	± 1 μ s/dag
CSAC (Chip-Scale Atomic Clock)	< 1 μ s/dag
Hydrogen Maser	± 10 ps/uur
Cesiumstandaard	$< 5 \times 10^{-14}$ (frequentie)

Figuur 3.2: Veelgebruikte typen klokken en hun nauwkeurigheid.

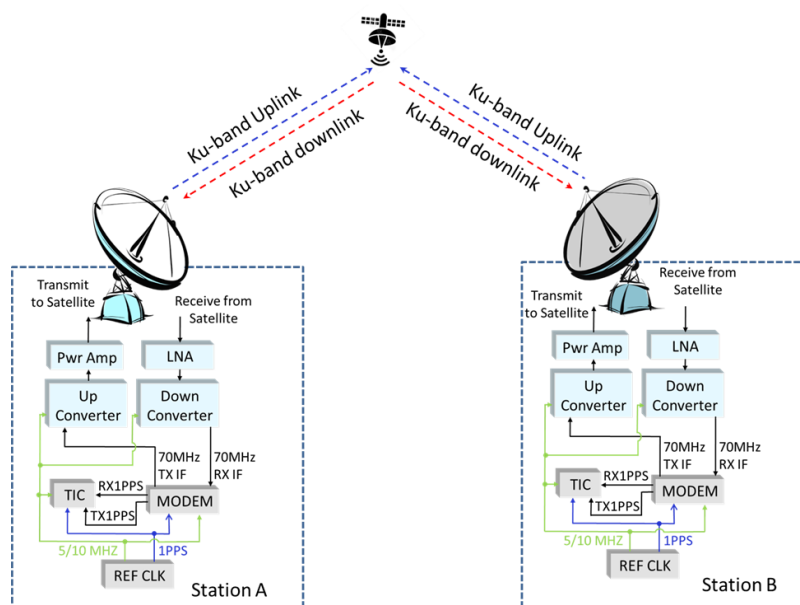
3.1.1 UTC-tijd

De UTC-tijd (Universal Time Coordinated) wordt bepaald uit een gewogen gemiddelde van ongeveer 450 atoomklokken in 70 landen. Zo bepaalt VSL in Nederland als officiële Nederlandse NMI (National Metrologisch Instituut) de Nederlandse UTC-tijd (UTC(VSL)). Ook bij ESA-ESTEC in Noordwijk wordt een UTC-tijd bepaald (UTC(ESA)) [19]. Het *Bureau International des Poids et Mesures International* (BIPM) in Parijs verzamelt de tijden van de deelnemende laboratoria uit de deelnemende landen en publiceert maandelijks het nieuwe gewogen gemiddelde. Daarnaast wordt de UTC-tijd gecorrigeerd om in de pas te blijven lopen met de aardrotatie. Dit kan zogenaamde schrikkelsecondes opleveren (de laatste keer was in 2016).



Figuur 3.3: Relatie van verschillende tijdbronnen met de UTC tijd en de nauwkeurigheden van de bronnen.

De UTC-tijden van de diverse deelnemende laboratoria worden uitgewisseld via Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT). Dat is een techniek die voornamelijk door NMIs gebruikt wordt om atoomklokken over grotere afstand via een satellietverbinding gesynchroniseerd te houden. Dit kan tot op nanoseconde niveau waarbij de beperkende factor de stabiliteit van de satellieten is naast de beschikbare satellietzendtijd en bandbreedte [20].



Figuur 3.4: TWSTFT principe (bron: [20]).

Nauwkeurige tijdsbronnen om binnen de digitale infrastructuur tijd en frequentie te synchroniseren zijn zelf ook weer gesynchroniseerd met de UTC-tijd. Tussen de

verschillende UTC-tijden kunnen uiterst kleine verschillen (orde ns) bestaan die periodiek worden gelijkgetrokken. Zo is GPS gedisciplineerd met UTC (USNO) en uiteindelijk met UTC(BIPM). De Nederlandse UTC tijd UTC(VSL) is gedisciplineerd met UTC(BIPM).

3.2 Tijddistributieprotocollen: NTP, PTP, en White Rabbit

Tijdsignalen kunnen door middel van diverse protocollen en interfaces geleverd worden. In deze paragraaf geven we een (niet-compleet) overzicht.

3.2.1 NTP

Het Network Timing Protocol is wellicht het meest gebruikte tijdprotocol op het Internet en stamt uit het begin van de jaren tachtig [21] [22]. GPS en wereldwijd gesynchroniseerde atoomklokken bestonden nog niet. De tijdbron bestond uit radiosignalen met de atoomtijd UTC afkomstig van lange golf radiozenders uit Colorado en Hawaï die door het U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST) beheerd werden voor de eerste versies van het NTP protocol. Over de jaren evolueerde het protocol naar NTPv5.

Tabel 3.1: Eigenschappen NTP protocol.

	NTPv1 (1985)	NTPv2 (1989)	NTPv3 (1992)	NTPv4 (2010)	NTPv5 (2019-heden)
Tijdsresolutie	Ca. 200us	Ca. 100us	Ca. 10us	Ca. 1us	< 1us
Nauwkeurigheid LAN	10-50ms	1-10ms	0.5-2ms	0.1-1ms	<0.1ms
Nauwkeurigheid WAN	50-200ms	10-100ms	5-50ms	1-10ms	0.5-5ms
Jitter	+/- 20ms	+/- 10ms	+/- 5ms	+/- 1ms	+/- 0.1ms
Tijdbron	RF / modem	RF / GPS (1 ^e gen) / Cesium	GPS, RF, Cesium, NIST klokken	GPS/Galileo, nationale tijdstandaarden	GNSS, PTP grandmaster, radio, cesium etc...
Opmerkingen	Beperkt door netwerklatentie en eenvoudige filters.	Betere timestamping, introductie van strata en klokfilters	Verbeterde algoritmes voor drift en offsetcorrectie.	Gebruik van nauwkeurige hardware timestamping, GPS-referenties.	Ondersteuning voor hardware-timestamps, PTP-integratie en NTS vermindert jitter
Beveiliging	Open Protocol Manipuleerbaar	Open Protocol Manipuleerbaar	Beide peers delen geheim; authenticatie van tijdstempels (MD5 verouderd)	Gebaseerd op X.509 certificaten met automatische sleutel uitwisseling	TLS1.3 + AEAD codering cookie gebaseerde authenticatie (NTS) en TLS1.3 key exchange.

NTP is toegankelijk via operating systemen, als tool of applicatie die draait op het operating systeem, en als firmware of hardware implementatie in bijvoorbeeld Internet of Things (IoT) toepassingen. Applicaties kunnen gebruik maken van systeemtijd, maar kunnen ook zelf tijd ophalen bij een NTP-server naar keuze.

Hierdoor is het niet altijd duidelijk welke NTP-server gebruikt wordt door een toepassing. Dit hangt af van de mate waarin de ontwerper het mogelijk heeft gemaakt NTP-servers te

specificeren en/of automatisch een NTP-server te kiezen die de beste performance heeft (bijv. op basis van Jitter). Naarmate toepassingen professioneler worden ingezet, ontstaan meer configuratie mogelijkheden. Er bestaan ook toepassingen waarbij de NTP-server 'hard-coded' is. Hier ontstaan risico's omdat de eigenaar van de NTP-server eenvoudig controle heeft over de tijd en daarmee makkelijk instaat is een toepassing te saboteren. Via internet is er een ruime keuze uit NTP-servers. Het is daarbij niet altijd transparant welk type tijdsbronnen daarbij gebruikt worden (of er bijvoorbeeld afhankelijkheid is van GNSS), wat de kwaliteit is van de geboden tijd en of moderne beveiligingsstandaarden worden ondersteund. Illustratief is dat zelfs grote cloudproviderorganisaties die transparantie niet altijd bieden [23].

3.2.2 PTP

Het Precision Timing Protocol is gedefinieerd in de IEEE1588 standaard. Er worden berichten verstuurd tussen een klok die als referentie dient en een klok die zo goed mogelijk deze referentie klok moet benaderen. (In vroegere standaarden wordt in verouderde terminologie gesproken over "Master Clock" en "Slave Clock").

Tabel 3.2: Eigenschappen PTP protocol.

	PTPv1 (IEEE1588-2002)	PTPv2 (IEEE1588-2008)	PTPv2.1 (IEEE1588-2019)
Juistheid (accuracy)	~1-10us	<1us	<1us met verbeterde stabiliteit
Nauwkeurigheid (precision)	Microseconde	Sub-microseconde	Sub-microseconde
Jitter	Minimaal	Verbeterd d.m.v. boundary clocks en transparent clocks	Verbeterd d.m.v. nieuwe netwerk-specifieke profielen
Technologie	Alleen software time stamping	Hardware time stamping op NICs en netwerk elementen	Hardware time stamping op NICs en netwerkelementen en verbeterde monitoring
Profiles	Geen	Telecom, Power, Automotive	Verdere verfijning voor meer sectoren en use-cases, zoals High-Accuracy (HA)
Tolerantie voor fouten	Geen	Boundary en Transparent Clocks reduceren fouten (BMCA)	Verbeterde redundantie en monitoring
Security	Geen	Basale integriteit controle	Authenticatie, bericht integriteit, replay bescherming
Schaalbaarheid	Laag (kleine LAN omgevingen)	Hoog door klok hiërarchie (meerdere domeinen in grote netwerken)	Verder verhoogd en geschikt voor ultra grote uitrol zoals in 5G en industriële automation

3.2.3 White Rabbit

Het White Rabbit Protocol is door CERN ontwikkeld voor o.a. synchronisatie van elementen in CERN's Large Haedron Collider infrastructuur. Het protocol is inmiddels verder ontwikkeld

en door een aantal leveranciers ook gecommmercialiseerd. Het heeft gediend als praktisch implementatie voorbeeld voor het gestandaardiseerde IEEE1588-2019 HA (High Accuracy) profiel.

Tabel 3.3: Eigenschappen White Rabbit protocol.

	White Rabbit (pre-2019)	PTPv2.1 HA (IEEE1588-2019)
Juistheid (accuracy)	200ps – 1ns	Sub-nanoseconde
Nauwkeurigheid (precision)	~20ps	Sub-nanoseconde
Frequentie synchronisatie	SyncE	SyncE
Timestamping	Hardware + fase detectie (ps-niveau)	Hardware en fase detectie
Delay asymmetrie	Automatische kalibratie en correctie	Automatische kalibratie en correctie
Interoperabiliteit	PTP extensie op WR netwerken	Universele standaard

Op dit moment wordt White Rabbit gebruikt in niche toepassingen zoals wetenschappelijke experimenten, energie infrastructuur en in telecomdiensten waar extreme nauwkeurigheid vereist is. Er is een grote community, de “White Rabbit Coalition” die dit protocol van nieuwe features voorziet. Hierbij kan gedacht worden aan het toevoegen van tijdkalibratiegegevens in het geheugen van bijv. een SFP zodat het management platform van een switch deze gegevens kan gebruiken voor het bijstellen van asymmetrie. Hierdoor worden onzekerheden omgezet naar corrigeerbare gegeven en gaat juistheid en accuratesse omhoog. Het is niet ondenkbaar dat deze features in de toekomst terug te zien zijn als amendementen en mogelijk als een nieuwe update van de IEEE1588 standaard.

3.3 eLORAN en eLORAN-diff

De eLORAN en eLORAN-diff systemen met bijbehorende protocollen maken gebruik van 100kHz grondgolven afkomstig van een aantal zenders. Iedere zender heeft een atoomklok. eLORAN-ontvangers ontvangen gesynchroniseerde signalen van meerdere zenders en kunnen aan de hand hiervan plaats- en tijdbepaling doen en de frequentie van een interne klok bijstellen. Experimenten met eLORAN ontvangers in Azië laten een juistheid van enkele honderden nanoseconde tot een microseconde zien met een precisie van enkele tientallen tot honderd nanoseconden [24].

eLORAN-diff systemen maken gebruik van een lokale ontvanger waarvan de positie zeer nauwkeurig bekend is en die ontvangst gegevens doorstuurt naar een centrale locatie. Deze informatie kan na verwerking gebruikt worden om correctiegegevens mee te sturen in de eLORAN signalen maar kan ook corrigerende informatie beschikbaar stellen aan ontvangers via een ander kanaal zoals het Internet. eLORAN-diff kan met deze technologie een tijd juistheid van 100ns behalen met een precisie van rond de 20ns [25].

Om in Nederland deze technologie te gebruiken zullen meer zenders in Europa operationeel moeten worden. Hierbij is het niet noodzakelijk dat er in Nederland zenders worden opgesteld (Er zijn argumenten om dit ook niet te doen). Engeland is hier het meest gevorderd in.

Tabel 3.4: Eigenschappen eLORAN.

	eLORAN	eLORAN-diff
Juistheid (accuracy)	0,1 – 1 μ s	100 ns
Nauwkeurigheid (precision)	10 – 100 ns	20 ns

4 Tijdsynchronisatie in mobiele netwerksector, energiesector en datacentra

4.1 Mobiele Netwerken

Bij een 4G-netwerk moeten de zendmasten met een nauwkeurigheid van $3\mu\text{s}$ worden gesynchroniseerd. [26]. 5G hanteert soortgelijke basiseisen: eveneens rond $\pm 1,5\mu\text{s}$ nauwkeurigheid voor tijdsynchronisatie tussen zenders. Bepaalde 5G-functies (zoals carrier aggregation en gecoördineerde multi-antenne (MIMO) transmissie) vereisen echter onderlinge timing tot minder dan een microseconde. In de praktijk betekent dit dat voor 4G het NTP-protocol volstaat voor de distributie van het tijdsignaal, maar dat voor 5G PTP in combinatie met PTP-aware netwerken nodig zijn. De vereisten voor toekomstige 6G netwerken zijn nog niet volledig vastgelegd, maar zullen naar verwachting vergelijkbaar of strenger zijn.

Een speciale situatie betreft private 4G/5G-netwerken. Dit zijn aparte netwerken voor bijvoorbeeld grote bedrijfsterreinen. Afhankelijk van de gekozen configuratie en de mate van integratie met de landelijke 5G-netwerken is ook hier tijdsynchronisatie van belang met vergelijkbare eisen als bij publieke mobiele netwerken [27].

De uitzondering is wanneer gebruik wordt gemaakt van extra mogelijkheden van private netwerken die nauwkeurigere tijdsynchronisatie vereisen voor toepassingen zoals smart-manufacturing die nauwkeurige tijdsynchronisatie vereisen.. Zo ondersteunt de 3GPP-standaard (vanaf Release 16) integratie van 5G met TSN. Time-Sensitive Networking (TSN) is een set van IEEE-standaarden (onder IEEE 802.1) die bedoeld zijn om betrouwbare en voorspelbare communicatie mogelijk te maken over Ethernet-netwerken. TSN is een opkomende technologie voor o.a. smart-manufacturing die het mogelijk maakt om machines gesynchroniseerd te laten samenwerken. Standaard wordt hierbij voor tijdsynchronisatie gebruik gemaakt van GNSS. Om de GNSS-afhankelijkheid te verminderen kan een back-up tijdvoorziening helpen [28] [29] [30].

Mobiele netwerken die gebruik maken van FDD (Frequency Division Duplex) kennen geen netwerk-brede eis m.b.t. de tijdsynchronisatie. Het Time Advance (TA) algoritme zorgt ervoor dat in stappen van ca. $0,5\mu\text{s}$ ieder mobiel device binnen $\pm 1\mu\text{s}$ nauwkeurigheid uitzendt. TDD (Time Division Duplex) daarentegen vereist netwerk-brede synchronisatie tussen alle cellen zodat uplink en downlink tijdsloten geen overlap kennen. Hiervoor is sub-microseconde tot 100ns tijd nauwkeurigheid vereist, afhankelijk van welke geavanceerde functies (zoals Beamforming, Coordinated Multi-point) actief zijn. In toekomstige netwerken zal TDD de norm worden omdat er dynamisch omgegaan kan worden met uplink en downlink data volumes.

Zowel voor FDD als TDD is een frequentie nauwkeurigheid nodig van +/- 50ppb (parts per billion)⁴.

De volgende klokken voldoen aan deze eis: Cesium (+/- 1ppb), Rubidium (+/- 50-5ppb), en high-grade OCXO (+/- 50-10ppb). Dit betekent dat de inzetbaarheid van deze klokken voor 5G niet universeel is. Cesium klokken kunnen centraal in de core worden opgesteld en dienen als primaire referentie. Rubidium kan worden ingezet als holdover klok in GNSS-ontvangers en als klok op cellen met grote dekking, capaciteit, en zendvermogen. OCXO-inzetbaarheid is beperkt tot die van radio-units voor korte-termijn stabiliteit. Zogenaamde TCXOs zijn niet geschikt als netwerkklok, enkel en alleen inzetbaar als klok in een mobiel device.

Synchronisatie kan dus worden bereikt door (a) gebruik te maken van centraal opgestelde GNSS-ontvangers. De GNSS-ontvangers worden bij voorkeur gebruikt om een lokale atoomklok te synchroniseren die dan als bron dient voor distributie naar de Distributed Unit (DU) vlak bij de zender. Een secundaire, GNSS-ontvanger kan lokaal worden geplaatst als redundantie. Er zijn ook (b) tijdsynchronisatie-architecturen waarbij de radiostations primair gesynchroniseerd worden vanuit een GNSS ontvanger bij routers die de DU (Distributed Unit) aanstuurt. [26]

Transport van de tijdinformatie over het netwerk tussen de router waar de GNSS-ontvanger op is aangesloten, gebeurt door middel van het PTP (Precision Timing Protocol). Voor mobiele netwerken is PTPv2 ondersteuning van de netwerkelementen (routers en switches) vereist. Dit kan of doordat routers en switches actief het PTPv2 protocol ondersteunen of doordat zij zo gekozen zijn dat ze transparant zijn voor het PTP-protocol en het PTP-protocol niet of zo min mogelijk nadelig beïnvloeden. Voor het transporteren van frequentie informatie wordt gebruik gemaakt van Synchronous Ethernet (SyncE).

De nauwkeurigheid en precisie van de tijd- en frequentie signalen is uiteindelijk terug te voeren naar atoomklokken in GNSS-satellieten.

Operators die kiezen voor centraal geplaatste Cesium klokken kunnen bij uitval van GNSS-ontvangers geruime tijd hun netwerk gesynchroniseerd houden. Hierbij kan gedacht worden aan maanden. De klokken zullen uiteindelijk zoveel afwijken dat de juiste zendfrequentie niet meer gegarandeerd kan worden of tijdsloten buiten hun guardband komen te liggen. Dit is het moment dat capaciteit moet worden teruggebracht zodat ten koste van de netwerk capaciteit (en daarmee het aantal gebruikers dat kan worden bediend) weer marge ontstaat. Uiteindelijk zullen zenders uitvallen en kan een mobiele service niet meer gegarandeerd worden. Als alternatief kan een operator er voor kiezen terug te vallen naar basis connectiviteit (voor spraak en data) waar minder strenge eisen voor gelden en die geleverd kan worden met tijd en frequentie informatie op basis van bijvoorbeeld een lokale OCXO-klok.

Een kwaadwillend persoon kan met de juiste kennis en gebruikmakend van zwakheden in de infrastructuur (delen van) het RAN-netwerk buitengebruik stellen en daarmee de capaciteit en dienstverlening in een mobiel netwerk negatief beïnvloeden.

Specifiek moet de aanvaller:

- kennis hebben van de opstelling van de GNSS-ontvangers en voldoende in de buurt kunnen komen om deze in voldoende aantal en mate te kunnen jammen, spoofen of meaconen.
- kennis hebben van het tijd transportnetwerk en in staat zijn de juiste werking van het PTPv2 protocol te verstoren, zonder dat hiermee de datastroom van en naar de DU unit

⁴ De ppb beschrijft de relatieve afwijking. 1 ppb afwijking is 1 miljardste deel per tijdseenheid. Dus 1 nanoseconde afwijking per seconde. Dit komt overeen met ongeveer 86 µs per dag.

- wordt verstoord. (Immers in dat laatste geval is het geen tijdaanval meer, maar een gewone aanval op de infrastructuur want geen data is ook geen radiosignaal).
- c. kennis hebben van het RAN-netwerk, de functies en de marges die het heeft.

De infrastructuur is met name kwetsbaar als de volgende zwakheden aanwezig zijn:

- a. Een goedkope of low-end GNSS-ontvanger. Deze is niet of in mindere mate in staat jamming, spoofing, en meaconing aanvallen te detecteren. Dure of high-end GNSS-ontvangers zijn beter in staat aanvallen te detecteren of te mitigeren.
- b. Het ontbreken van een centrale of lokale atoomklok die kan voorzien in een holdover tijd die voldoende lang is een aanval te doorstaan zonder dat er diensten worden afgeschakeld.
- c. Het tijdtransport netwerk voegt relatief veel jitter en onzekerheid toe waardoor een marginale verslechtering van het GNSS-signaal leidt tot een onbruikbaar PTPv2 signaal bij de DU.

Op dit moment zijn er twee 5G hoofdvarianten. (1) De 5G non-stand-alone variant kent een core conform de 4G standaarden, maar maakt gebruik van een NG-RAN. (2) de 5G stand-alone variant die gebruik maakt van een 5G core en het NG-RAN (Next Generation RAN). De E-UTRAN variant kent een aantal duplexmethodes die ieder andere eisen aan de synchronisatie stellen.

Voor private 5G-netwerken gelden vergelijkbare kwetsbaarheden. Omdat het hier om private netwerken gaat, is er minder inzicht hoe tijdsignalen worden verkregen. Worden deze private 5G-netwerken door grotere netwerk operatoren en service-providers beheerd, dan is de analogie met een publiek 5G-netwerk groot en zullen tijdsignalen vanaf een centrale op GNSS-signaal gesynchroniseerde klok geleverd kunnen worden.

4.2 Elektriciteitsnetwerken

Het beheer van het elektriciteitsnet verdelen we onder in het landelijk beheer door Tennet (Transmission Service Operator, TSO) en het regionale beheer door bedrijven zoals Enexis, Liander, en Stedin (Distribution Service Operators, DSO's). Hierbij is Tennet verantwoordelijk voor het bewaken van de 50Hz netfrequentie als Transmission Service Operator (TSO). TSO's en DSO's opereren hoog- en middenspanningsstations, onderstations, transformatorstations en doen dit middels de bediening van tijd- en frequentiegesynchroniseerde schakelaars, vermogensonderbrekers en sturen deze aan met o.a. SCADA-systemen en PMU's (Phasor Measurement Units).

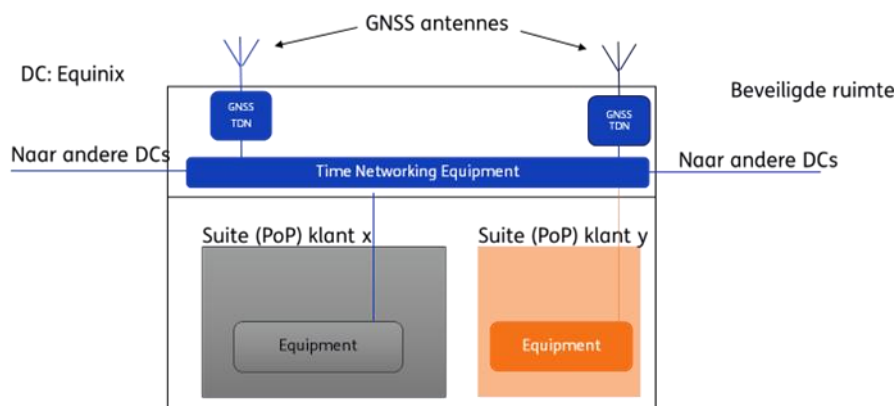
In de Europese verordening [31] opgevolgd door [32] is vastgelegd dat de "ENTSO for Electricity" (European Network of Transmission System Operators) verantwoordelijk is voor het opstellen van richtlijnen ("Establishment of network codes") voor het operationeel houden van een Europees intern elektriciteitsnetwerk. TSO's dienen zich te houden aan deze code. Hoewel in deze code geen implementaties en protocollen worden gespecificeerd, beschrijft de ENTSO wel een Common Information Model dat als basis dient bij het ontwikkelen van standaarden in IEC-werkgroepen.

TSO's en DSO's die bijvoorbeeld willen voldoen aan timestamp eisen in uit te wisselen berichten (ook metingen) zullen ervaren dat GNSS (GPS/Galileo), PTP of SyncE geaccepteerde implementaties zijn om dit soort timestamps te genereren. Om deze reden zien we bij TSO's en DSO's een vergelijkbare structuur als in het RAN van mobiele operators: centraal opgestelde GNSS-ontvangers en een eigen distributienetwerk - bij Tennet is dit AMFI (Algemeen Management en Functionele Informatie) - om tijd te leveren aan die

schakel- en meetapparatuur. Daar waar dit netwerk geen uitlopers heeft zien we GNSS-ontvangers.

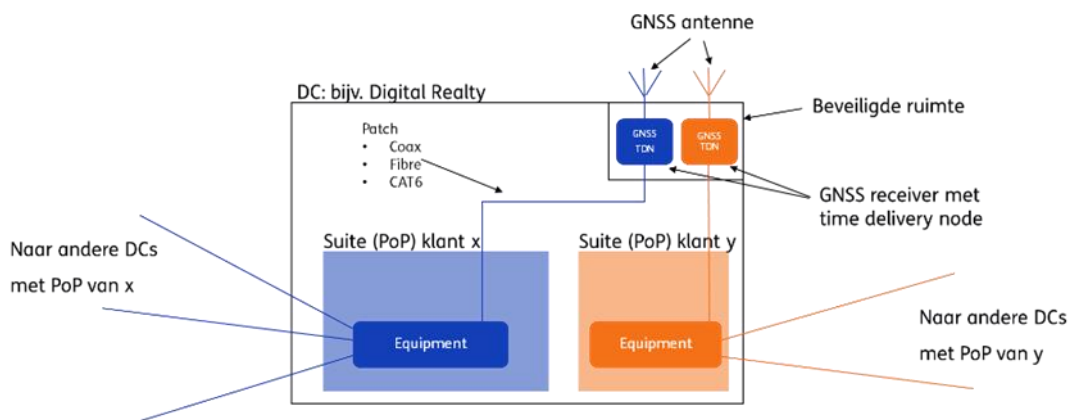
4.3 Co-locatie Datacenters

Datacenters spelen in de digitale infrastructuur een grote rol omdat zij bedrijven in staat stellen apparatuur te plaatsen in een beveiligde, geconditioneerde, operationeel betrouwbare omgeving. In deze paragraaf gaan we er vanuit dat het datacenter naast de co-locatiedienst de klant van deze dienst de mogelijkheid biedt een tijd en frequentie dienst af te nemen of de mogelijkheid biedt klanten GNSS-apparatuur te plaatsen.



Figuur 4.1: Co-locatie van twee klanten met eigen apparatuur en een eigen GNSS ontvanger met time delivery node (TDN) (DC=DataCenter, PoP=Point-of-Presence).

Figuur 4.1Figuur 4.1: Co-locatie van twee klanten met eigen apparatuur en een eigen GNSS ontvanger met time delivery node (TDN) (DC=DataCenter, PoP=Point-of-Presence). geeft een voorbeeld hoe twee klanten x en y in een datacenter hun eigen apparatuur opstellen en daarbij gebruik maken van de mogelijkheid om op het dak van het datacenter een GNSS-antenne te plaatsen en dicht daarbij eigen GNSS-apparatuur. Indien klant x en klant y niet nog bij andere datacentra een vergelijkbare opstelling hebben, zijn zij voorwaardelijk kwetsbaar voor een jamming/spoofing aanval. Het voorwaardelijke zit hem in de gebruikte GNSS-ontvanger die mogelijk kwetsbaarheden heeft voor een kwaadwillende. Bovendien is er in dit geval geen tweede of derde GNSS-ontvanger waarop terug gevallen kan worden.

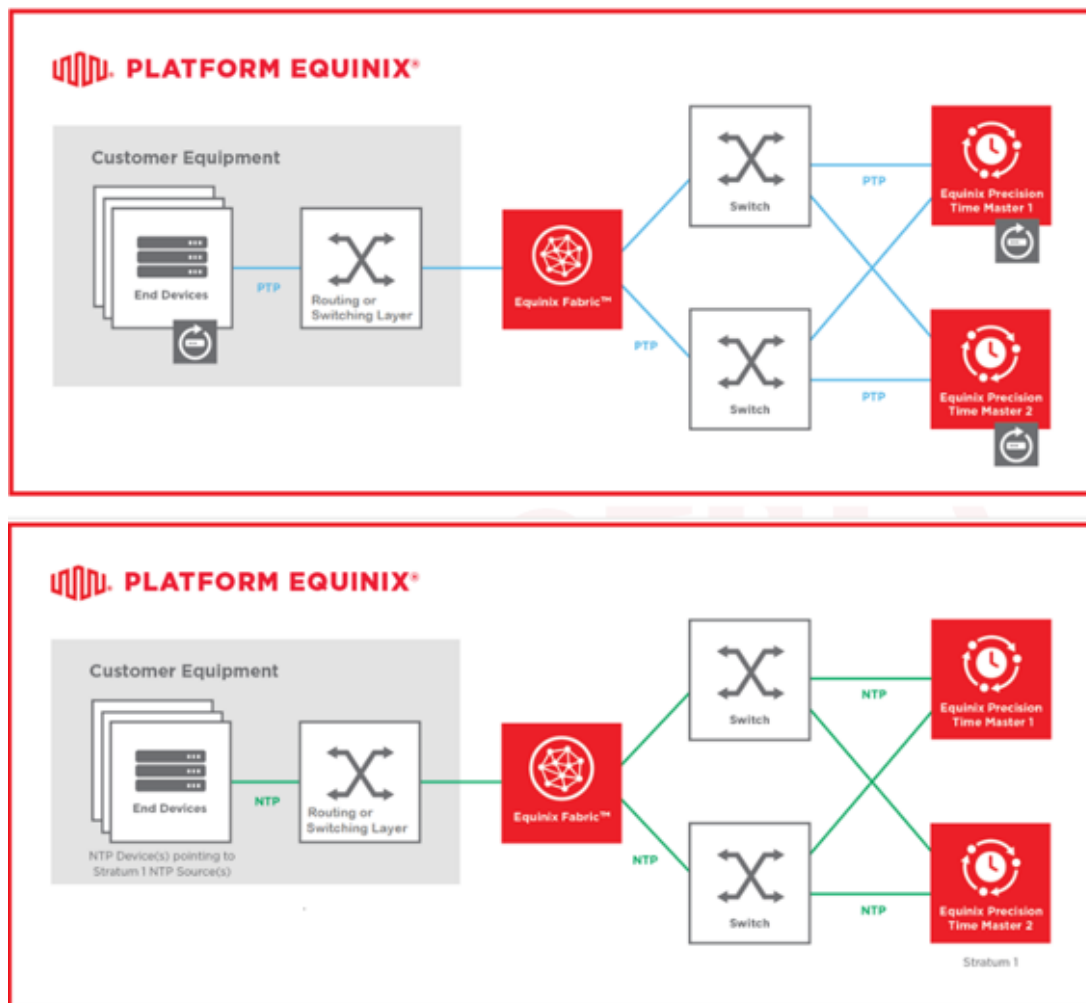


Figuur 4.2: Voorbeeld van een datacenter dat naast co-locatie voor klant x en y een tijd en Frequentie dienst aanbiedt.

Klant x en klant y kunnen in plaats van het plaatsen van eigen GNSS/TDN apparatuur ook gebruik maken van een tijd en frequentie dienst van het datacenter (Figuur 4.2). Hiertoe heeft het datacenter eigen GNSS/TDN apparatuur geplaatst in het betreffende datacenter, maar ook in naburige datacenters en heeft deze onderling verbonden met een netwerk geoptimaliseerd voor het transporteren van tijd. Het datacenter wordt nu tijd en frequentie serviceprovider en zal daarmee ook een operationeel centrum hebben ingericht om correcte levering integriteit van de infrastructuur te bewaken. Net zo belangrijk is dat de GNSS/TDN apparatuur gedeeld wordt met alle klanten. Dit geeft naast schaalvoordelen ook de mogelijkheid aan het datacentrum te investeren in een kwalitatief goed ontvanger met goede holdover klok specificaties en anti jamming en spoofing eigenschappen. Een aanvaller zal net als bij de mobiele operator en het elektriciteitsnetwerk veel kennis moet vergaren en dan geluk hebben dat hij/zij kan profiteren van een kwetsbaarheid in de GNSS/TDN apparatuur.

Figuur 4.3 laat zien hoe een PTP en of een NTP-dienst aan klanten geleverd kunnen worden als datacenter dienst. [33]. Middels een *switch fabric*⁵ kan een gebruiker kiezen uit diverse tijdsbronnen die op redundante wijze worden aangeboden.

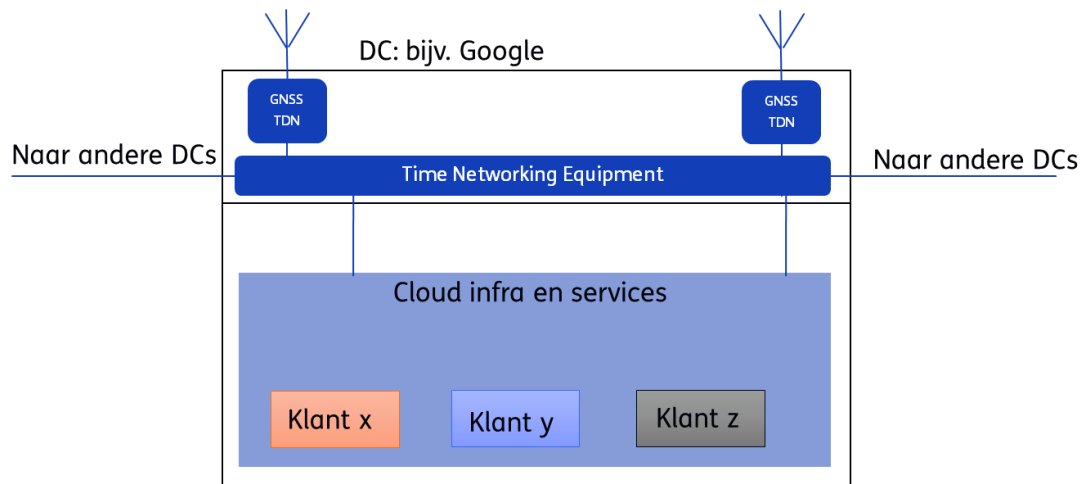
⁵ Een *switch fabric* is een aanduiding voor de verbindingen tussen knooppunten waarin netwerkswitches een rol spelen.



Figuur 4.3: NTP en PTP-diensten kunnen aan co-locatie klanten geleverd worden gebruikmakend van een fabric die per datacenter of cross-datacenter kwalitatief de beste tijd levert.
Bron: <https://docs.equinix.com/precision-time/>

4.4 CSP (Cloud Service Providers)

Cloud serviceprovider diensten verschillen van co-locatie diensten omdat hier geen sprake is van apparatuur van een klant, maar waarbij de dienst van de CSP bestaat uit louter en alleen het leveren van rekenkracht in de vorm van *baremetals*, VMs, container clusters, container run time omgevingen, databases, load-balancers, en code- of lambdafuncties. Onderdeel van deze service portfolio kan ook het leveren van een tijddienst zijn.



Figuur 4.4: Tijd- en frequentiedienst van een cloud serviceprovider volledig geïntegreerd met zijn cloud service delivery platform.

Figuur 4.4 geeft schematisch aan dat in navolging van de dienst beschreven in Figuur 4.3, tijd en frequentie informatie kan worden aangeboden aan afnemers van een grote diversiteit aan cloud-services. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat omdat veel van deze platformen gebruik maken van virtualisatie, de nauwkeurigheid en precisie op het service demarcatie vlak lager zullen zijn en op het niveau van een NTP-dienst (ms) uit kunnen komen. Naast het gebruik maken van eigen GNSS/TDN apparatuur door het datacenter kan het datacenter aanvullende tijdinformatie ophalen. Dit geldt ook voor de klanten die de diensten afnemen.

5 Opties voor het verminderen van de GNSS-afhankelijkheid

Willen we kritieke processen minder gevoelig maken voor kwetsbaarheden en zwakheden van op GNSS gebaseerde tijd en frequentie diensten, dan is er een aantal mogelijkheden om dit te bewerkstelligen. We hebben vier hoofdrichtingen geïdentificeerd:

1. GNSS-ontvangers kunnen robuuster gemaakt worden tegen jamming (verstoren van een GNSS-signaal), spoofing (het maken van een nep GNSS-signaal), en meaconing (het vertragen, verslechteren en opnieuw uitzenden van een bestaand GNSS-signaal).
2. GNSS-ontvangers kunnen uitgerust worden met een betere holdover klok. Voorwaarde is wel dat betrouwbaarder gedetecteerd kan worden dat er sprake is van een poging tot jamming, spoofing, en meaconing.
3. Een aanvulling op GNSS gebruiken. In dit geval zijn kritieke processen volledig onafhankelijk van GNSS.
4. Het tijddistributienetwerk omvormen tot klok. Het netwerk wordt de klok.

5.1 Oplossingsrichting 1: Robuuster maken van GNSS-ontvangers

Als GNSS-ontvangers moeilijker te verstoren of te misleiden zouden zijn, wordt het voor aanvallers ook complexer en kostbaarder pogingen te wagen om tijd en frequentie te verstoren.

Enkele richtingen waaraan gedacht kan worden en die ook in de praktijk geïmplementeerd zijn, zijn:

- a. Adaptieve antennesystemen bestaan uit meerdere antenne elementen en kunnen stoorbronnen tot in zekere mate verzwakken.
- b. Verbeteren van het dynamisch bereik van het RF front-end van de GNSS-ontvanger. De ontvanger kan nu sterke stoorsignalen verwerken zonder verzadiging.
- c. Selectieve filtering: smalle bandfilters rond de GNSS-frequenties onderdrukken interferentie van signalen buiten het GNSS-spectrum.
- d. Automatische hoogfrequent versterkingscontrole reduceert overbelasting door sterke signalen.
- e. Ondersteuning van meerdere GNSS-systemen en meerdere frequenties.
- f. Verbeterde correlatie-algoritmen die zwakke satelliet signalen blijven volgen en die sterke stoorsignalen niet invangen.
- g. Betere opstelling van de GNSS-antenne en EMC-afscherming tegen elektromagnetische interferentie.
- h. De GPS-extensie CHIMERA (Chips Message Robust Authentication) voorziet in robuustheid tegen meaconing.
- i. Galileo's OSNMA maakt gebruik van de verifieerbaarheid van informatie, maar is niet robuust tegen meaconing.

Niet alle ontvangers bezitten deze eigenschappen. Het is dan ook van belang bij aanschaf van een ontvanger te selecteren op de gewenste robuustheid.

5.2 Oplossingsrichting 2: Verbeterde holdover en detectie van verstoringen

In deze oplossingsrichting wordt feitelijk verstoring geaccepteerd, mits deze gedetecteerd kan worden. De manier om dit te beperken tot de GNSS-ontvanger en de verstoring niet de Digitale Infrastructuur te laten indringen is het stoppen met het corrigeren van de lokale klok in de GNSS-ontvanger en over te schakelen (holdover) op de door de GNSS-ontvanger gegenereerde klok. De GNSS-ontvanger komt in een holdover toestand en kan alleen nog maar vertrouwen op de lokale klok die dan ook in staat moet zijn om de duur van de aanval te kunnen overbruggen zonder dat de werking van toepassingen in de Digitale Infrastructuur nadelig wordt beïnvloed.

Als voorwaarde geldt dat de GNSS-ontvanger verstoringen moet kunnen detecteren met een bepaalde betrouwbaarheid. Niet detecteren is erger dan een verstoring detecteren die er niet is, zolang er met voldoende marge weer terug geschakeld kan worden op de door de GNSS-ontvanger gedetecteerde klok. Immers, het kost ook weer tijd om de holdover klok weer terug te zetten naar de GNSS-tijd en frequentie. De keuze voor holdover klok technologie is afhankelijk van de toepassing, maar in het algemeen moet men denken aan een Cesium of Rubidium atoomklok of een Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO).

Het kunnen detecteren van verstoringen is waar de betere ontvangers zich onderscheiden van de inferieure ontvangers. Enkele technieken die toegepast worden of kunnen worden zijn (zonder een compleet overzicht te geven):

- a. Goede monitoring van het RF front-end. Detectie van verzadiging kan duiden op jamming.
- b. Het doen van diverse consistentie checks. Zoals het oplossen van de pseudo range vergelijkingen op verschillende combinaties van satellieten en banden.
- c. Cross-GNSS systeem validatie
- d. Analyseren van multi pad patronen.
- e. Consistentie in ontvangen berichten
- f. Controle van ontvangen satelliet data met verwachte data.
- g. Signaal aankomst verificatie.

In deze oplossingsrichting zien we met name leverancier specifieke oplossingen. Het zal niet altijd even makkelijk zijn te analyseren hoe effectief deze oplossingen zijn.

5.3 Oplossingsrichting 3: Een aanvulling op GNSS

In aanvulling op GNSS is het ook mogelijk om naast een GNSS-ontvanger een tweede tijdbron te hebben in de vorm van een autonome atoomklok of een atoomklok die via bijvoorbeeld PTPv2.1 over een eigen glasvezelnetwerk gedisciplineerd wordt door een atoomklok van bijvoorbeeld een peer instelling of de nationale metrologie dienst. Uiteraard hoeft het niet bij een klok te blijven er kan gekozen worden om meerdere klokken “binnen handbereik” te hebben.

5.4 Oplossingsrichting 4: Het netwerk omvormen tot klok

Deze oplossingsrichting gaat het verst en maakt het mogelijk de tijd in het netwerk gelijk te stellen aan het gemiddelde van een aantal (atoom) klokken waarbij iedere atoomklok een correctie krijgt opdat alle klokken in het netwerk in de pas lopen. Dit concept wordt al toegepast voor het maken van bijvoorbeeld de Globale UTC tijd en de Europese tijd waarbij gebruik wordt gemaakt van bi-directionele satellietverbindingen. Er is geen reden waarom deze aanpak ook niet kan werken met een bi-directioneel glasvezelnetwerk. Het voordeel is nu dat zowel GNSS-ontvangers als interne en externe atoomklokken samen een gemiddelde tijd opleveren die overal in het netwerk geldt. Het maakt dan ook niet veel verschil meer van welke bron de tijd wordt betrokken, zolang de bronnen onderling niet te veel afwijken. Op GNSS gebaseerde bronnen kunnen verstoord worden, maar dit zal vrij snel opgemerkt worden omdat er een duidelijke afwijking van het gemiddelde zal ontstaan en de verstoorde GNSS-klok niet meer mee genomen wordt. Deze oplossing is niet alleen tegen GNSS-verstoring een effectieve maatregel, maar ook tegen andere (glasvezel) netwerk gerelateerde invloeden zoals een reguliere netwerkverstoring (denk aan glasvezel breuk) en netwerksabotage.

6 Buitenlandse initiatieven

In diverse Europese en niet-Europese landen lopen initiatieven om te komen tot het leveren van tijd- en frequentiediensten die onafhankelijk zijn van GNSS. De informatie is vergaard via een korte literatuurstudie (sneeuwbalmethode), wat een goed beeld geeft van initiatieven maar geen wereldwijd compleet beeld.

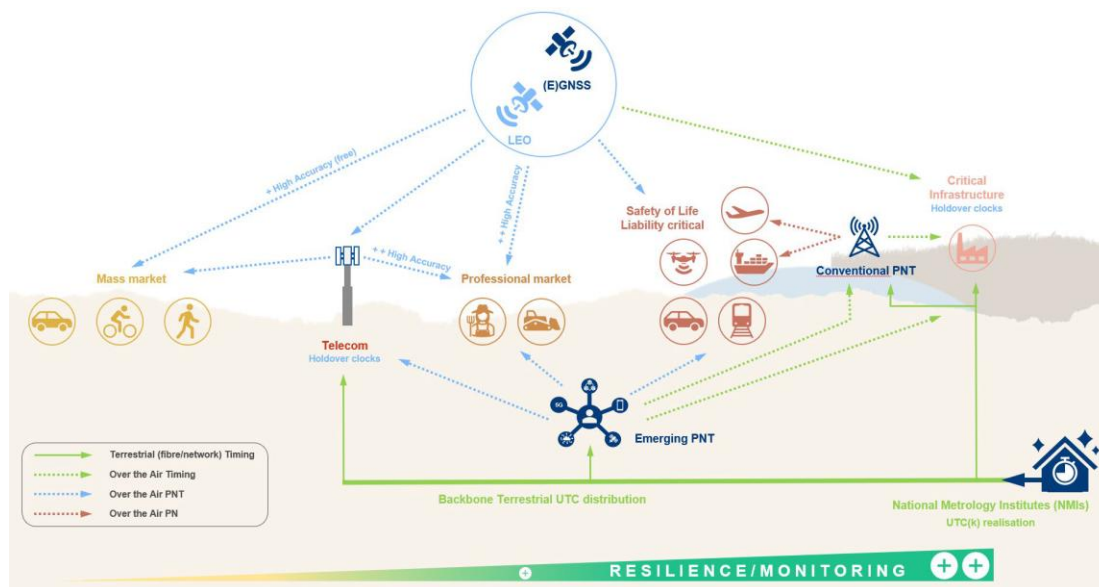
6.1 Europese Unie

Voor de EU is het aanbieden van PNT-diensten belangrijk, met als basis de diensten die geleverd worden door het Europese GNSS-systeem Galileo en het additionele grondnetwerk EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) dat de nauwkeurigheid van Galileo vergroot. De kwetsbaarheden van deze diensten hebben ook de aandacht van de Europese Commissie. In het European Radio Navigation Plan 2023 (ERNP) [34] opgesteld door DG DEFIS en JRC, wordt gepleit voor het meer resiliënt maken van de Europese GNSS diensten, tegelijkertijd met het ontwikkelen van andere technologieën om PNT-diensten ook bij GNSS-verstoringen toch te kunnen aanbieden. In het plan stelt men dat op het gebied van timing de EU al beschikt over volwassen technologie om zeer nauwkeurige timingdiensten te kunnen leveren, onafhankelijk van GNSS. Het netwerk van nationale metrologische instituten (NMI's) ziet men een fundamentele rol spelen bij de tijdsgeneratie, terwijl Europese bedrijven commerciële oplossingen zouden kunnen bieden voor tijdsdistributie.

In 2021-2022 heeft het Directorate General for Defence Industry and Space (DEFIS) van de Europese Commissie de Europese industrie uitgenodigd om demonstraties te verzorgen van state-of-the-art alternatieve PNT-platformen bij het EU Joint Research Centre JRC-Ispra. De conclusie die JRC hierna trok op het gebied van tijddistributie, was dat EU-bedrijven een uitstekende reputatie hebben op het gebied van tijdsoverdracht en tijdsgeneratie. De demonstratiecampagne bevatte een aantal tests en benadrukte de belangrijke rol van de NMI's in heel Europa, aangezien de meeste geteste technologieën er direct en indirect mee werken. In een test toonden OPNT, Seven Solutions en Locata aan dat ze naadloos kunnen omschakelen tussen meerdere Master Clock-signalen door middel van *voting*. Daarnaast ziet JRC de mogelijkheid om met behulp van de nauwkeurige tijd idealiter op nanosecondeniveau, ook robuuste positionering mogelijk te maken [35].

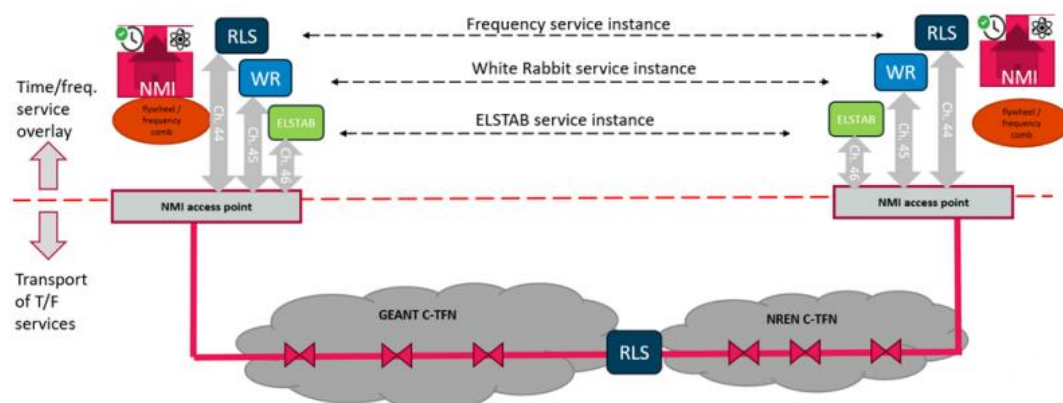
De EU zou volgens het ERNP moeten werken aan de ontwikkeling van een timingecosysteem en moeten zorgen voor een kosteneffectieve en resiliënte tijdsvoorziening voor relevante gebruikers (bijv. kritieke infrastructuur). Het ERNP-rapport [34] pleit voor een combinatie van technologieën (zowel ruimtegebaseerd als terrestrisch) voor de PNT-diensten. Hierbij zal in het kader van weerbaarheid ook een efficiënt monitoringsysteem nodig moeten zijn voor GNSS net als de nodige coördinatieprocedures tussen GNSS-aanbieders, Radio Frequency Interference (RFI)-instanties en overheden.

In het ERNP wordt een "system-of-systems"-aanpak voorgesteld om te komen tot een resiliënt PNT-systeem in de EU en wordt gepleit voor een marktgedreven benadering met de EU als verantwoordelijke voor de regelgeving [34]. Voor de tijddistributie voorziet men een terrestrische backbone tussen de Europese NMI's (Figuur 6.1).



Figuur 6.1: EU-PNT visieschets van het EU Joint Research Centre (bron: [9]).

Met behulp van EU-onderzoeksgelden hebben NMIs (National Metrology Institutes) en NRENs (National Research and Education Networks) samen met Europese industrie gewerkt aan een Europees extreem nauwkeurig tijd- en frequentienetwerk over glasvezel, gekoppeld aan Europese atoomklokken van de deelnemende NMI's, waarbij de tijd bepaald wordt door klokvergelijkingen. Het H2020 CLONETS project (CLOCK Network Services) [36] startte in 2016 geleid door Paris Observatory, gevolgd door het H2020 Design study project (CLONETS-DS) [37] onder leiding van GÉANT. Dit netwerk voor de onderzoekssector heeft inmiddels een lengte van meer dan 5000 km (Figuur 6.4) [38]. Op moment van schrijven ligt een vervolg subsidieaanvraag klaar voor het FOREST (Fiber-based Optical network for European Science and Technology) project [39], waarin 60 stakeholders uit 17 EU landen onder leiding van GÉANT deze infrastructuur verder willen doorontwikkelen en willen laten opnemen in de ESFRI⁶ Roadmap 2026.

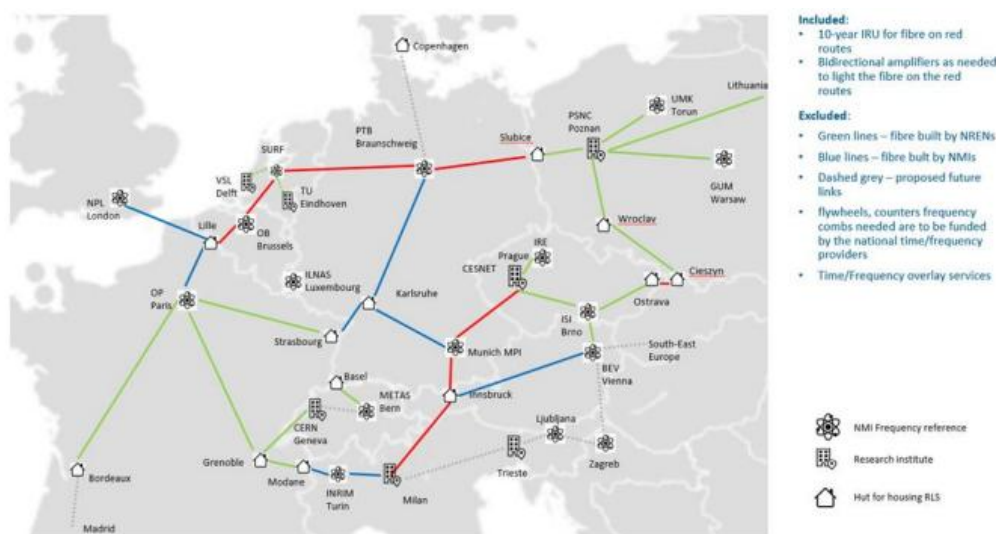


Figuur 6.2: Opbouw C-TFN netwerk (Core Time/Frequency Network) (bron: [40]).

⁶ ESFRI, the European Strategy Forum on Research Infrastructures, is a strategic instrument to develop the scientific integration of Europe and to strengthen its international outreach. (www.esfri.eu)

GN5-2 is de Horizon Europe-financieringscyclus voor het GÉANT-project (2025-2027). Het C-TFN (Core Time/Frequency Network) (Figuur 6.2) zal bestaan uit twee lagen: de tijd-/frequentiedienstlaag die eigendom is van en wordt beheerd door NMI's, en de dark-fibre transportlaag die eigendom is van en wordt beheerd door GÉANT en NREN's. Er wordt één operationeel centrum (OC) voorgesteld voor het gehele C-TFN.

Het C-TFN netwerk is in aanbouw (Figuur 6.3). Een eerste pilot-link is in het najaar van 2024 opgeleverd tussen Poznan (Polen) en Braunschweig (Duitsland). Het C-TFN richt zich op ultrasnelle netwerkdiensten zoals voorzieningen voor *quantum, time & frequency en fibre sensing*.



Figuur 6.3: Het C-TFN netwerk voor de onderzoekssector, in aanbouw (bron: [41]).



Length of the national T&F networks and cross-border connections

Network	Length (km)	DF	DC
TOTAL	29 369	18 767	10 602
AUSTRIA	746	730	16
BELGIUM	1 000	0	1 000
CZECH REPUBLIC	2 148	1 090	1 058
GERMANY	1 137	1 137	0
FRANCE	5 214	29	5 185
IRELAND	1 749	892	857
ITALY	2 843	2 587	256
THE NETHERLANDS	760	0	760
POLAND	7 035	7 035	0
SLOVAKIA	5	5	0
UNITED KINGDOM	1 035	1 035	0
Cross-border	5 697	4 227	1 470

ESFRI

DF: Dark fibre
DC: Dark channel

Figuur 6.4: Gerealiseerde lengtes van tijd- en frequentienetwerken voor de onderzoekssector (bron: [38]).

6.2 Verenigd Koninkrijk

In oktober 2023 heeft de Britse regering een tienpuntenplan gepubliceerd voor het vergroten van de PNT-weerbaarheid van de kritieke nationale infrastructuur in het Verenigd Koninkrijk en van essentiële diensten zoals defensie, hulpdiensten en de financiële sector [42]. Er wordt een National PNT-Office opgericht dat gaat vallen onder het Ministerie van Science, Innovation and Technology, en er gaat een PNT-crisisplan ontwikkeld worden. Op het gebied van tijd- en frequentiesynchronisatie wordt er een National Timing Centre (NTC) opgericht dat moet zorgen voor weerbaarheid en tegelijkertijd hoge kwaliteit van tijdsbepaling en -verspreiding (UTC(NPL)). Met een budget van 68 miljoen pond zal een nationale tijdinfrastructuur worden gerealiseerd door het National Physical Laboratory (NPL) [43]. De kern van het netwerk wordt gevormd door vier geografisch verspreide locaties die als bron dienen voor het tijdsignaal (Resilient Enhanced Time Scale Infrastructure (RETSI)) [44].

Er zal een gratis NTP-dienst worden geleverd over de infrastructuur en betaalde diensten voor de meer high-end diensten [45]. Verder is men in het VK begonnen met de realisatie van een gecertificeerde PTPv2 tijddistributiedienst naar de financiële sector [46]. Voor defensie wordt een aparte MoD-Time dienst opgezet. Daarnaast zal het NTC zich ook gaan bezighouden met innovatieve ontwikkelingen op het gebied van tijddistributie.

In Europa bestond tot 2015 een eLORAN netwerk. Het Britse eLORAN netwerk werd destijds uitgeschakeld en deels ontmanteld, maar wordt nu weer nieuw leven ingeblazen. Voor 71 miljoen pond wordt een eLORAN programma opgezet (UK National Enhanced Long-Range Navigation) dat met zes masten PNT-diensten gaat leveren voor op land, zee en in de lucht vanaf 2028 en dat in 2030 volledig operationeel moet zijn. In samenwerking met Frankrijk werkt het VK ook aan grensoverschrijdende signaaldekking [43] [47].

Op het gebied van space komt er in het VK een *Satellite Navigation Interference Monitoring System* (13 miljoen pond) plus een *Space Based Time Transfer R&D programme* (3 miljoen pond) [43].



Figuur 6.5: het geplande tijdnetwerk in het Verenigd Koninkrijk [48].

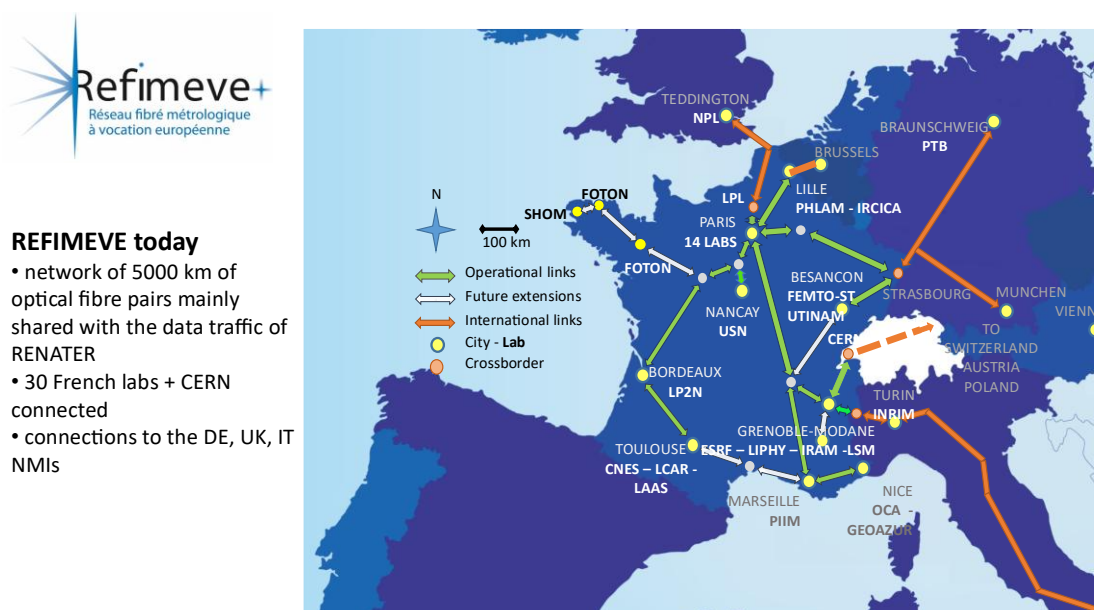
6.3 Duitsland

Sinds de zomer van 2025 biedt T Wholesale (onderdeel van Deutsche Telekom AG) een op PTP gebaseerde tijddistributiedienst aan. De dienst met de naam TimeSync biedt precieze tijd aan in verschillende kwaliteitsniveaus. De beschikbaarheid en precisie wordt via een SLA (Service Level Agreement) gegarandeerd [49].

De TimeSync dienst fungeert als back-up voor de GNSS-tijd en bestaat uit GNSS-tijd aangevuld met meerdere atoomklokken die fungeren als holdover klok. De dienst wordt uitgevoerd op verschillende locaties (vooralsnog drie locaties: Frankfurt, Düsseldorf en Hamburg) bij datacenters van Telehouse. Omdat Telehouse hun datacenters carrier-neutraal heeft opgezet en afspraken heeft met meer dan 400 data providers, is brede toegang via glasvezelverbindingen eenvoudig te realiseren [50] [51].

6.4 Frankrijk

Voor zover bekend wordt in Frankrijk geen commerciële PTP-tijddistributiedienst aangeboden. Wel is er voor de onderzoekssector het REFIMEVE-glasvezelnetwerk beschikbaar, waarbij het tijdsignaal van het Franse NMI (LTE – Paris Observatory-PSL) wordt aangeboden op het netwerk. Het REFIMEVE-project is gestart in 2012, en doelstelling is om in 2030 meer dan 30 onderzoekslaboratoria aangesloten te laten zijn op het netwerk dat een hoge precisie biedt ($< 1\text{ ns}$) [52]. Het REFIMEVE-netwerk heeft al connecties met andere landen en zal onderdeel gaan uitmaken van het geplande pan-Europese FOREST netwerk voor de onderzoekssector [38].



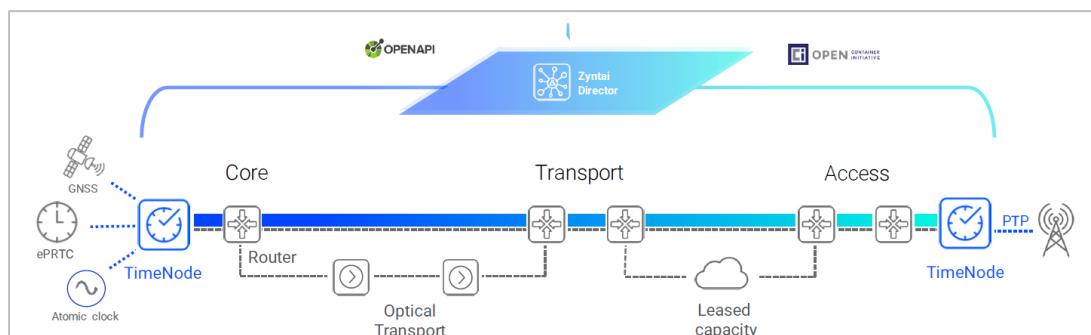
Figuur 6.6: Het Franse REFIMEVE netwerk (presentatie Chardonnet, at 2025 SIG-TFN meeting ISPRA [38]).

6.5 Zweden

Sinds 2015 is in Zweden de Netnod-Swedish Distributed Time Service operationeel. De dienst wordt gefinancierd door de Zweedse Post- en Telecommunicatieautoriteit (PTS) en gemonitord door RISE (Research Institute of Sweden) waaronder het Zweedse NMI valt. Netnod is een non-profit organisatie die zich richt op het versterken van vitale

internetinfrastructuur in Zweden. Zo beheren zij het Internet Exchange Point van Noorwegen, Zweden en Denemarken en beheren ze een DNS-rootserver [53] [54].

Netnod biedt een gratis NTP-dienst aan over het internet plus een PTP-dienst over glasvezel. De UTC-tijd wordt aangeleverd door RISE op zes knooppunten over het land en de distributie wordt verzorgd door Netnod. Voor het distribueren via PTP wordt geen dedicated hardware gebruikt, zoals gebruikelijk, maar wordt TimeNode software gebruikt van de Zweedse firma NetInsight [55], [56]. Deze software draait aan het begin en einde van elke verbinding en NetInsight claimt dat PTP-gebruik op alle reguliere IP-netwerken hiermee mogelijk wordt [57] [58].



Figuur 6.7: gebruik van TimeNode/Zyntai software van de firma NetInsight voor de distributie van PTP over IP-netwerken (bron: [57] pres. Van Tahmina Hoque, Precise Time as a Critical National service).

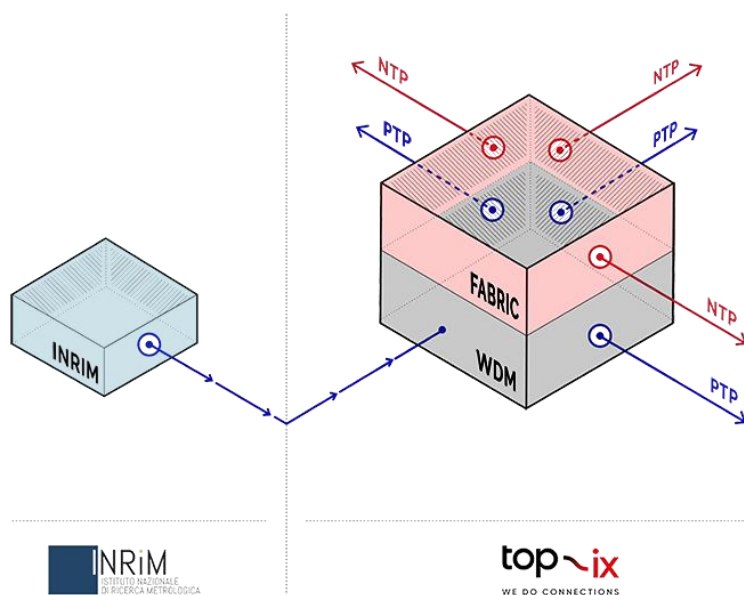
De Zweedse Post- en Telecommunicatieautoriteit (PTS) heeft voor de mobiele telefonie-operators de eis gesteld dat in het geval dat men als primaire tijdsbron GNSS of een bron buiten Zweden gebruikt dat men dan een redundante tijdsbron in Zweden moet hebben [58]. Hoewel dit geen verplichting inhoudt om de Netnod dienst te gebruiken, kan het in wel als een aansporing daartoe gezien worden. Voor de productie en de distributie van tijd is volgens een raming uit 2007 eenmalig ongeveer 2 M EUR nodig plus jaarlijks 1-2 M EUR.⁷ [59].

6.6 Italië

In Italië werkt TOP-IX (TOrinio Piemonte Internet eXchange), het internet exchange punt voor Noord-West Italië samen met INRiM (L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica), het Italiaanse NMI om een tijddienst aan te bieden dat gebruik maakt van het glasvezelnetwerk van TOP-IX [60] [61]. De tijddienst, TAAS (Time as a Service) biedt zowel NTP als PTP aan. Bij de PTP dienst richten ze zich vooral op de financiële sector. Door gebruik te maken van TAAS-PTP kan de financiële sector voldoen aan de MiFID II richtlijnen⁸ [62] [63].

⁷ Bedragen gecorrigeerd voor inflatie. Bedragen afkomstig uit [59] (<https://regeringen.se/rapporter/2007/10/sparbar-tid-och-frekvens---perfekt-tajmat/>)

⁸ MiFID II zijn EU-richtlijnen voor de financiële markt. Art.50 vereist het synchroniseren van klokken. De ESMA heeft het accuretesseenniveau bepaald. Er zijn twee niveaus 1 milliseconde afwijking van UTC en 100 microseconde afwijking van UTC.



Figuur 6.8: De Time-as-a-Service (TAAS) tijddienst van TOP-IX (bron: [60]).

6.7 Verenigde Staten

Het NIST (National Institute of Standards and Technology) in de Verenigde Staten biedt NTP-diensten aan (ITS en Authenticated NTP⁹), maar geen PTP-diensten.

Wel heeft het NIST heeft onderzocht hoe de tijd- en frequentievoorziening voor de publieke en private sector meer resiliënt kan worden uitgevoerd. Als proef heeft het NIST in 2020 een pilot Time-over-Fiber dienst opgezet tussen in eerste instantie het NIST-kantoor in Gaithersburg (Maryland) en een datacenter in McLean (Virginia) en daarna over een langere afstand tussen Mclean en Atlanta (Georgia) (700 km). Het Nederlandse OPNT was betrokken als leverancier bij deze pilot. De UTC(NIST) tijdsignalen werden via White Rabbit verstuurd waarmee een nauwkeurigheid van ongeveer 100 microseconden is bereikt [20] [64].

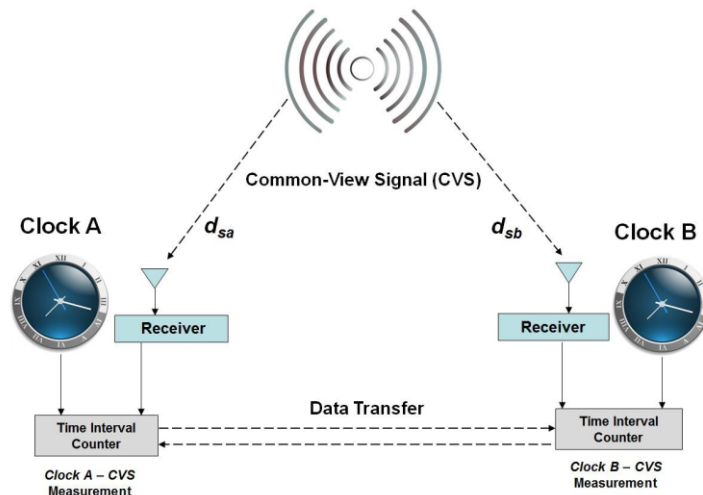
Met betrekking tot tijddistributie over glasvezel beveelt NIST het volgende aan [20]: *“Het is duidelijk dat tijdsdistributie via glasvezel een grote rol zal gaan spelen in toekomstige, resiliënt tijdsarchitecturen. We bevelen daarom aanvullend onderzoek aan om een optimale manier te bepalen voor de integratie van grootschalige tijdsdistributie in commerciële glasvezelnetwerken. De kosten van de benodigde hardware voor tijdsdistributie zijn niet belemmerend. Speciaal voor tijdsdistributie toegewezen of aangelegde glasvezelverbindingen brengen echter aanzienlijke terugkerende kosten met zich mee, en het vermogen van deze methode om op te schalen en voldoende gebruikers te bereiken om te voldoen aan de behoeften van kritieke infrastructuur, vereist nader onderzoek.”*

Het NIST heeft ook alternatieven uitgewerkt om nauwkeurige tijddistributie te kunnen realiseren. Zo heeft men via de Multi-Source Common-View Disciplined Clock methode (MSCVDC) klokken gedisciplineerd met een nauwkeurigheid van 10 ns door gebruik te maken van Loran-C als gemeenschappelijke “common-View” klok waar alle klokken hun verschiltijd van bepaalde waarna de verschiltijden via internet werden verstuurd naar het

⁹ ITS=Internet Time Service. Een stratum-1 NTP dienst. (<https://tf.nist.gov/tf-cgi/servers.cgi>). De NIST authenticated NTP Service biedt gecertificeerde tijd (<https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/time-services/nist-authenticated-ntp-service>).

NIST die uitrekende hoeveel elke klok voor- of achteruitgezet moest worden en dat terugstuurde.

NIST is positief over MSCVDC als nauwkeurige-tijddistributiemechanisme en beveelt aan om hier meer aandacht en gelden aan te besteden wat mogelijk kan leiden tot commercieel beschikbare producten [20].



Figuur 6.9: Het MSCVDC-principe. Als alternatief voor GNSS -tijd heeft het NIST C-LORAN gebruikt als Common-View signaal [20] (bron: NIST, Resilient Architecture for the Realization and Distribution of Coordinated Universal Time to Critical Infrastructure Systems in the United States).

6.8 Zuid-Korea

Sinds 2010 heeft Zuid-Korea regelmatig last van lokale GPS-verstoringen door Noord-Korea [65]. Deze duurden enkele dagen (4 dagen in 2010 tot aan 16 dagen in 2012) en troffen o.a. duizenden vluchten, honderden vaarbewegingen van schepen en meer dan honderd mobiele telefonie zendmasten. In antwoord op de jamming activiteiten van Noord-Korea heeft de Zuid-Koreaanse overheid in 2011 besloten tot het opzetten van een landelijk dekkend eLORAN systeem als backup navigatie- en tijddistributiesysteem. eLORAN is minder gevoelig voor jamming activiteiten dan GNSS. Twee al bestaande C-LORAN systemen werden omgebouwd naar eLORAN, en er werden drie nieuwe eLORAN stations bijgebouwd. Het eLORAN testbed systeem is operationeel sinds 2021 [66].

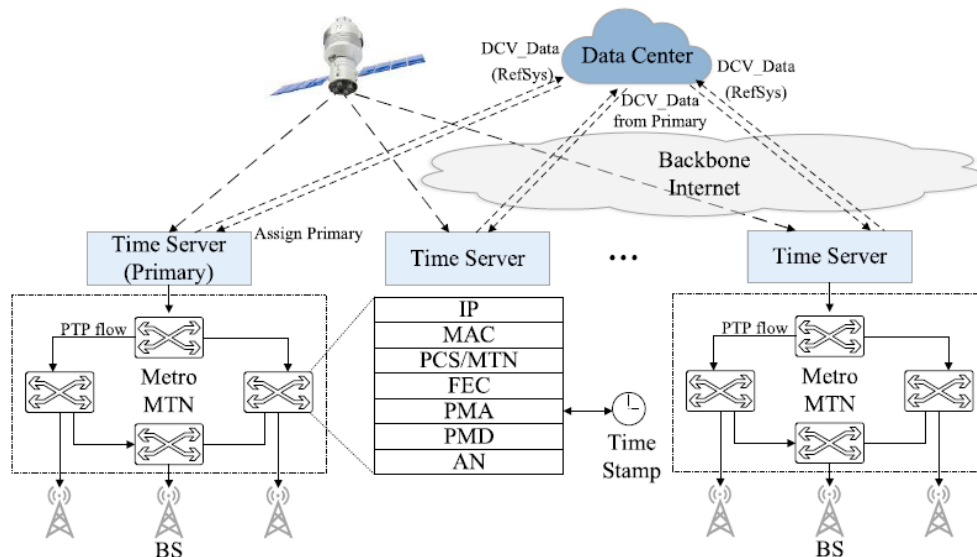
Bij eLORAN wordt de propagatie van de uitgezonden signalen beïnvloedt door de geografie van het landschap en weerseffecten. (Circa 0,5 -1 microseconde afwijking) [67] [68]. Door gebruik te maken van differential eLORAN (eLORAN-diff, zie hoofdstuk 3) en modellen die de weers-terrein-effecten voorspellen kan de afwijking teruggedrongen worden tot rond de 100ns [69].

6.9 China

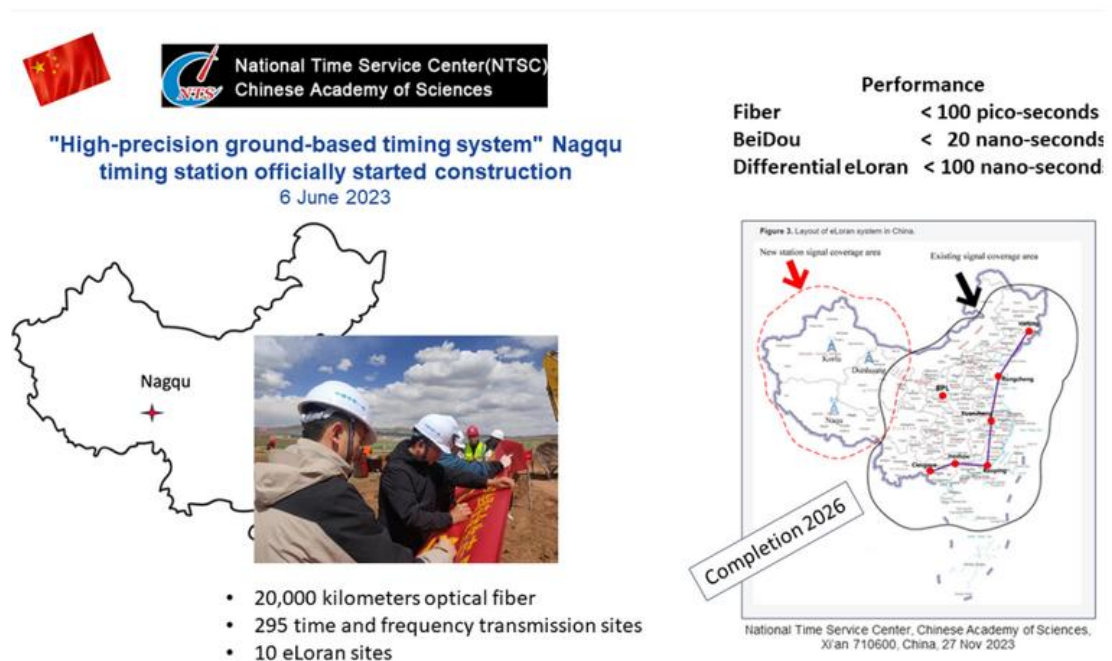
China bouwt aan een resiliente en robuuste PNT-architectuur waarin meerdere systemen een plek krijgen. Naast de BeiDou GNSS-systemen wordt gewerkt aan Low-Earth Orbit satellietssystemen en o.a. aan LORAN-C [70].

Als voorbereiding voor een landelijk "high-precision time network" is een experimenteel glasvezelgebaseerd tijdnetwerk gerealiseerd, een 3144 km lang netwerk tussen Xi-an en Beijing dat 21 nodes verbindt. Hierbij werd een nauwkeurigheid van 36ns bereikt [71] [72]. Het uiteindelijke landelijk netwerk zal bestaan uit een aantal regionale metropolitan PTP-

glasvezelnetwerken die met elkaar gesynchroniseerd worden via wat de Chinezen *Distributed Common-View time transfer* (DCV) noemen. Dit kan door middel van satellietverbindingen die tijdsignalen doorgeven [73]. Elk regionaal netwerk kent een eigen time-server. Via een algoritme wordt bepaald welke server de landelijke primary server wordt. Het landelijke netwerk moet uiteindelijk meer dan 20000 km aan glasvezelverbindingen bevatten en een nauwkeurigheid bereiken van 100ps [71].



Figuur 6.10: Architectuur van het Chinese National Time Synchronization Network (bron: Han e.a. IEEE, 2025 [73]).



Figuur 6.11: het Chinese High-Precision grondgebonden tijdnetwerk. [38] (bron: pres. REFIMEVE at 2nd SIG-TFN meeting).

7 Een mogelijk toekomstig landelijk TF-netwerk

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) bieden naast positiebepaling ook nauwkeurige tijd- en frequentiediensten (T&F-diensten). Deze T&F diensten zijn van belang voor o.a. mobiele telefonie, het elektriciteitsnet, de financiële sector en diverse andere diensten binnen de digitale infrastructuur van Nederland. Uitval van GNSS of verstoringen van de GNSS T&F signalen kunnen leiden tot grote verstoringen van diverse vitale processen, zeker als de verstoringen van langere duur zijn (orde van dagen). Een terugvaloptie in de vorm van een landelijke dekkend T&F glasvezelnetwerk (met een nauwkeurigheid in de orde van 10 ns-10 μ s) is dan een geschikte oplossing. Het Verenigd Koninkrijk en Zweden zijn in Europa ook bezig met een dergelijke oplossing. Daarnaast is de onderzoekssector in Europa ook bezig met een T&F-netwerk, maar dan met extreem grote tijdnauwkeurigheid specifiek voor onderzoeksdoeleinden. (Zie ook Hoofdstuk 6).

Uit gevoerde gesprekken met diverse partijen in het kader van dit onderzoek is een beeld naar voren gekomen hoe een landelijke redundant uitgevoerd T&F-netwerk eruit zou kunnen gaan zien.

Het T&F-netwerk zou moeten gaan bestaan uit redundant uitgevoerde bronklokken. Dat wil zeggen meerdere (meer dan twee) op UTC(VSL) gesynchroniseerde atoomklokken op verschillende locaties. Voor de tijd- en frequentiedistributie wordt gedacht aan distributie via glasvezel naar zo'n 15-30 locaties in heel Nederland. Gebruikers kunnen dan zelf één of meerdere verbindingen verzorgen van geschikte locaties in hun netwerk naar voor hen dichtstbijzijnde locaties in dit T&F-netwerk. Vergelijkbare TF-netwerken zijn of worden ook aangelegd in diverse andere landen: o.a. Verenigd Koninkrijk, Zweden, Italië, China.

Een landelijk dekkend tijd- en frequentie (TF)-netwerk zou een goede fallback-situatie opleveren voor als GNSS uitval of verstoringen. Een dergelijk netwerk zou dan bijvoorbeeld de UTC(VSL) tijd kunnen aanbieden via drie diensten:

- a. PTP-dienst voor zeer nauwkeurige tijd- en frequentiesynchronisatie;
- b. NTP-dienst voor mindere nauwkeurigheid, maar wel GNSS-onafhankelijk;
- c. Gecertificeerde tijddienst op basis van de Nederlandse UTC-tijd.

Door de groeiende behoefte naar zeer nauwkeurige tijd- en frequentiesynchronisatie ontstaat de wens naar PTP-diensten (in plaats van bestaande NTP-diensten) als alternatief voor GNSS. Om PTP-diensten bij gebruikers te brengen zijn PTP-aware glasvezelnetwerken¹⁰ nodig. Een dergelijk PTP-netwerk wordt in Nederland sinds kort (januari 2026) voor de onderzoekssector aangeboden door SURF. Buiten de onderzoekssector is AMS-IX van plan ook PTP-diensten aan te gaan bieden voor hun klanten.

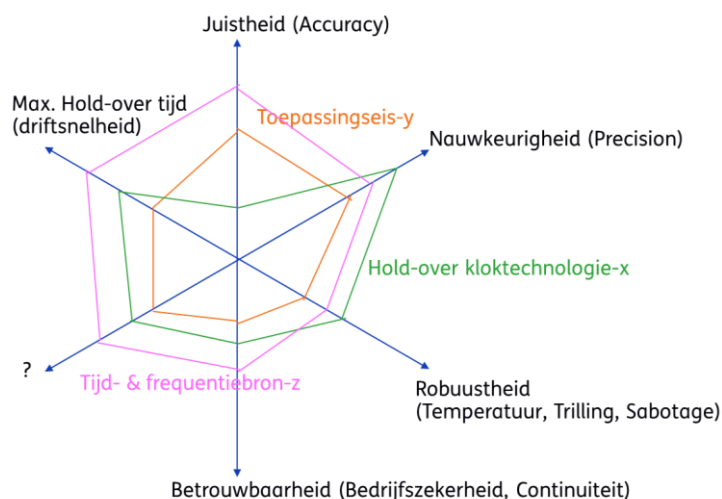
Gecertificeerde tijddiensten kunnen worden gebruikt om op een betrouwbare en te valideren wijze tijdstippen toe te kennen (*trusted timestamping*) aan transacties, logs, documenten, digitale handtekeningen etc.

¹⁰ PTP-aware netwerken zijn netwerken die switches en routers gebruiken die compliant zijn met IEEE 1588 PTP.

Een landelijke TF-netwerk moet vooral gezien worden als een back-up voor GNSS tijd- en frequentiesynchronisatie. En voor organisaties die zelf al een eigen TF-netwerk hebben aangelegd voor eigen intern gebruik kan het landelijk TF-netwerk dienen als een extra backup. In de gevoerde gesprekken werd gesuggereerd om de afname van de tijd voor bepaalde partijen binnen de kritische infrastructuur via nieuwe wetgeving te verplichten. Al verschilden de meningen daarover. Hierbij werd verwezen naar Zweden waar voor bepaalde sectoren de verplichting geldt om altijd tenminste één betrouwbare Zweedse tijdbron te hebben. Min of meer vergelijkbare TF-netwerken zijn of worden in Europa gerealiseerd in het Verenigd Koninkrijk, Zweden en Italië. In de eerste twee landen draagt de overheid ook financieel bij. Gezien het feit dat plaats- en tijdsbepaling door middel van GNSS door het NCTV als categorie B vitaal proces wordt beschouwd, en gezien de bestaande kwetsbaarheden van GNSS lijkt het zeker verstandig om de robuustheid van tijd- en frequentiesynchronisatie te vergroten door organisaties in Nederland aan te sporen hun weerbaarheid op dit gebied zelf te vergroten en door aanvullend een landelijk TF-netwerk te realiseren.

Bij het leveren van een redundante tijd- en frequentiedienst is het van belang te begrijpen voor welke doelgroepen deze dienst bedoeld is. Zo zullen in de financiële wereld andere eisen gesteld worden dan in de wereld van onderwijs en onderzoek en in de militaire sector bestaan andere eisen dan in de telecomsector. Omdat al deze werelden op dit moment gebruik maken van GNSS-systemen, zou het theoretisch mogelijk moeten zijn een netwerk te bouwen dat alle sectoren in Nederland zou kunnen bedienen. Hierbij moet een kanttekening gemaakt worden dat zowel voor relatief onnauwkeurige NTP-diensten als voor zeer nauwkeurige PTPv2 diensten GNSS-systemen gebruikt worden waarbij afhankelijk van deze nauwkeurigheid eenvoudige en daarmee goedkopere of juist meer complexe en daarmee duurder GNSS-ontvangers kunnen worden ingezet.

Een redundante tijd- en frequentiedienst zou ook deze eigenschappen kunnen bezitten en daarmee eenvoudige diensten goedkoper kunnen maken en complexe diensten duurder. Dit hoofdstuk beschrijft aan de hand van een aantal categorieën eisen en wensen. We maken onderscheid tussen een dienst die alle mogelijke sectoren bedient, een dienst die alleen de digitale sector bedient, en een dienst die de NMI-sector bedient.



Figuur 7.1: belangrijkste categorieën van eisen en wensen.

Aspecten van een dergelijk T&F-netwerk betreffen 1) de technische realisatie inclusief aanschaf benodigde apparatuur en daarnaast 2) beheer, en 3) klant en business management.

7.1 Technische Realisatie

Technische realisatie begint bij het beschrijven van de dienst, de bijbehorende service level objecten en de waarden die technisch gerealiseerd moeten worden om te voldoen aan de te realiseren operationele waarden die de gebruiker kan ervaren.

Omdat een landelijke dienst tijd- en frequentiesignalen moet kunnen leveren die een vervanging kunnen zijn voor signalen die met GNSS worden verkregen zal de technische realisatie minimaal moeten voldoen aan wat high-end GNSS ontvangers aan juistheid en nauwkeurigheid kunnen leveren.

Uit interviews is het beeld ontstaan dat de realisatie van een dienst die tijd- en frequentie signalen levert uit een aantal lagen zou kunnen bestaan. Figuur 7.2 laat deze keten zien.

Dienstlevering aan klant (protocol en opties)	PTPv2.1	PTPv2	PTPv1	NTP	Hold-off optie	Moni- tored	Gecertificeerd
Transport naar klant (afhankelijk van dienst)	PTPv2.1 / PTPv2 / PTPv1 / NTP						
Interne Dienstlevering	PTPv2.1						
Transport	≥ PTPv2.1 / optische klok						
Geo-diverse Tijd & Frequentie bron	UTC NL uit meerdere atoomklokken (minimaal redundant, beter gemiddeld)						

Figuur 7.2: Dienstopbouw voor levering tijd- en frequentiesignalen (voor het gemak laten we koppelingen tussen NMIs van verschillende landen even buiten beschouwing).

De onderste laag is verantwoordelijk voor het realiseren van een kwalitatief goede tijd- en frequentiebron. Hierbij wordt geo-diversiteit in achtgenomen door of uit een ensemble van bronnen de beste bron te kiezen of door alle bronnen met elkaar uit te middelen.

Een landelijk netwerk kan deze tijd- frequentie signalen distribueren naar locaties waar deze tijd- en frequentiesignalen als een intern halffabricaat uiteindelijk getransporteerd kan worden naar de klant locatie waar de feitelijke dienst aan de klant wordt aangeboden met het door de klant gevraagde protocol. Voorbeelden van locaties zijn datacenters en grote knooppunten van telecomproviders die vervolgens deze tijd kunnen transporteren naar de klant en daarbij gebruik maken van hun eigen infrastructuur.

In het geval van een gecertificeerde tijd- en frequentiedienst zal de implementatie van deze keten moeten worden nagelopen op correctheid en de aanwezigheid van monitoring functionaliteiten op punten waar interne dienstverlening plaatsvindt en op de plaatsen waar de dienstverlening aan de klant plaatsvindt.

7.2 Beheer

Onder beheer vallen alle processen en infrastructurele implementaties die gangbaar zijn in de huidige operaties van cloud en netwerk-operators, cloud en service-providers, en datacenters.

De complexiteit hiervan neemt wel toe bij het leveren van landelijke T&F-netwerkdiensten. Er zullen extra processen moeten worden ingericht met als doel het continue borgen en verbeteren van juistheid en nauwkeurigheid. De reden hiervoor is dat er operationeel veranderingen kunnen of moeten worden doorgevoerd (denk bijvoorbeeld aan het verhogen van de temperatuur in een datacenter) die van invloed zijn op de juistheid en nauwkeurigheid van de geleverde tijd- en frequentiesignalen. Deze extra processen hebben invloed op veel bestaande processen zoals foutdetectie, foutisolatie, change en life-cycle management, en management van leveranciers, standaardisatie lichamen en zelfs opensource-communities en coalities.

7.3 Klant en business management

Tijd- en frequentiesignalen die worden verkregen uit GNSS-ontvangers kennen een beschikbaarheid die in de afwezigheid van jamming, spoofing, en meaconing, hoofdzakelijk bepaald wordt door de beschikbaarheid van de GNSS-ontvanger of een netwerk van GNSS-ontvangers. Immers mocht een satelliet door technische redenen uitvallen, dan zijn er voldoende over voor de correcte werking van GNSS-ontvangers. In het geval van een glasvezelnetwerk dat voorziet in de levering van tijd- en frequentiesignalen, heeft uitval van een glasvezel grotere impact op de veerkrachtigheid en de beschikbaarheid van de dienstverlening. Waar een GNSS-ontvanger signalen van tientallen satellieten beschikbaar heeft, is dit voor een knooppunt in een glasvezelnetwerk voor een tijd- en frequentiedienst anders omdat het aantal glasvezels dat een knooppunt binnen komt vanwege aanleg kosten beperkter zal zijn (denk aan twee voor minimale redundantie op een kleine locatie tot minder dan 10 voor grote knooppunten).

Dit betekent dat een alternatief netwerk voor het leveren van tijd- en frequentiesignalen andere eisen stelt aan service en business management. Het zal vaak vanwege kosten niet mogelijk zijn om klanten van meer dan twee glasvezel aansluitingen te voorzien. Er zullen ook klanten zijn die nog niet beschikken over een glasvezel aansluiting en juist deze zullen moeten aanvragen.

Klantrapportage zal voor deze dienst ook andere vormen aannemen. Er zullen klanten zijn die continue monitoring zullen verlangen of proactief op de hoogte worden gesteld van problemen met de levering van tijd en frequentie diensten. Immers waar GNSS gratis is en de GNSS-operator niet op de hoogte is wie allemaal de GNSS-dienst gebruikt is dit voor een alternatieve dienst anders. Uit de interviews blijkt dat hier vaak te makkelijk tegen aan gekeken wordt, zowel door de klant als de leverancier.

Aan de zakelijke kant is het goed te realiseren dat de kennis bij klanten heel divers zal zijn. Waar bij sommige klanten experts op het gebied van tijd- en frequentie techniek aanwezig zijn (denk aan mobiele netwerk operatoren) zullen er ook klanten zijn waar deze kennis minimaal aanwezig is of waar men denkt de kennis te bezitten. Dit geldt ook voor een toekomstige TF-netwerk operator en TF-dienst leverancier. Hoewel uit de interviews blijkt dat in Nederland voldoende kennis aanwezig is van tijd- en frequentietechniek en van netwerken, zijn engineers die zowel kennis hebben van TF als van netwerken en alles wat bij TF en bij netwerken komt kijken geconcentreerd bij partijen als: VSL, AMS-IX, SIDN, OPNT, SURF, en KPN.

8 Conclusies

1. GNSS als enige bron voor tijd- en frequentiesynchronisatie is kwetsbaar.

Uit eerdere onderzoeken is al duidelijk geworden dat het gebruik van GNSS als enige bron voor tijd- en frequentiesynchronisatie kwetsbaar is voor uitval en verstoringen. Het NCTV heeft dit dan ook aangemerkt als een categorie B vitaal proces.

2. Organisaties kunnen zelf al veel doen om de weerbaarheid te vergroten tegen kortdurende uitval van GNSS.

De belangrijkste aspecten hierbij zijn:

- a. Het vergroten van de robuustheid van de GNSS-diensten. Fabrikanten kunnen diverse technieken toepassen om de kwetsbaarheid voor uitval en verstoring incl. jamming, spoofing en meaconing, te verminderen zoals het robuuster uitvoeren van de ontvangers en technieken gebruiken om verstoringen te kunnen detecteren. Diverse fabrikanten hebben dergelijke maatregelen geïmplementeerd. Door apparatuur van deze fabrikanten te gebruiken wordt de weerbaarheid tegen verstoring en uitval vergroot.
- b. Het vergroten van de robuustheid aan de gebruikerskant door het kiezen van een holdover klok met een voldoende grote hold-off tijd. (Lokale klokken kunnen i.p.v. een TCO-oscillator een OCO of een Rubidium/Cesium klok krijgen voor grotere hold-off tijd).

3. Als de vereiste tijdnauwkeurigheid niet al te groot is zijn alternatieve bronnen voor tijd- en frequentieinformatie: NTP-servers, eLORAN of DCF77.

- a. Als de vereiste tijdnauwkeurigheid in de orde van 1 ms of groter ligt, dan ligt gebruik van NTP-servers over internet als alternatieve (of primaire) bron voor de hand. Het is dan wel van belang om na te gaan welke tijdsbronnen gebruikt worden door de NTP-servers, en of ze niet alsnog GNSS als bron gebruiken.
- b. Voor GNSS-afnemers die geen toegang hebben tot glasvezelinternet en een nauwkeurige tijdsynchronisatie willen, is het te overwegen om eLORAN in te zetten (nauwkeurigheid 50-100 ns) eventueel met lokale correctie (eLORAN-diff) (nauwkeurigheid <50ns), of gebruik te maken van het Duitse DCF77 (standaard nauwkeurigheid plusmin 1-10 ms). Nederland heeft geen eigen eLORAN netwerk, maar Nederland gaat naar verwachting binnen het bereik van een vernieuwd Engelse eLORAN netwerk vallen.

4. Het realiseren van een alternatief voor GNSS gebaseerde tijd- en frequentiesynchronisatie in de vorm van een landelijk dekkend PTP-aware glasvezelnetwerk (een tijd- en frequentie (TF)-netwerk dat als back-up fungeert) kan de weerbaarheid tegen uitval van GNSS gebaseerde tijddiensten verder vergroten.

Door de groeiende behoefte naar zeer nauwkeurige tijd- en frequentiesynchronisatie ontstaat de wens naar PTP-diensten (in plaats van bestaande NTP-diensten) als alternatief voor GNSS. Om PTP-diensten bij gebruikers te brengen zijn PTP-aware glasvezelnetwerken nodig. Een dergelijk PTP-netwerk wordt in Nederland sinds kort (januari 2026) voor de onderzoekssector aangeboden door SURF.

Buiten de onderzoekssector is AMS-IX van plan ook PTP-diensten aan te gaan bieden voor hun klanten.

Een landelijk dekkend tijd- en frequentie (TF)-netwerk zou een goede fallback-situatie opleveren voor als GNSS uitval of verstoringen. Een dergelijk netwerk zou dan bijvoorbeeld de UTC(VSL) tijd kunnen aanbieden via drie diensten:

- a. PTP-dienst voor zeer nauwkeurige tijd- en frequentiesynchronisatie;
- b. NTP-dienst voor mindere nauwkeurigheid, maar wel GNSS-onafhankelijk;
- c. Gecertificeerde tijddienst

Vergelijkbare TF-netwerken zijn of worden ook aangelegd in diverse andere landen: o.a. Verenigd Koninkrijk, Zweden, Italië, China, waarbij in veel gevallen de overheid daar ook financieel bijdraagt.

Een landelijke TF-netwerk moet vooral gezien worden als een back-up voor GNSS tijd- en frequentiesynchronisatie. En voor organisaties die zelf al een eigen TF-netwerk hebben aangelegd voor eigen intern gebruik kan het landelijk TF-netwerk dienen als een extra backup.

5. Er is in Nederland kennis en expertise aanwezig op het gebied van tijd- en frequentiesynchronisatie op het gebied van de aspecten die van belang zijn voor de realisatie van een landelijke TF-netwerk: tijdbronnen, netwerken, benodigde apparatuur, benodigde dienstverlening en governance.

De kennis en expertise zit zowel bij het bedrijfsleven, bij universiteiten en bij non-profit organisaties of organisaties met een publieke taak zoals VSL, VSL, AMS-IX, SIDN. In het algemeen heeft elke organisatie zijn eigen specifieke kennis en zal de realisatie van een landelijk TF-netwerk waarschijnlijk een gezamenlijke inspanning van meerdere organisaties betekenen.

Bibliografie

- [1] EGNSS-Centre of Excellence, „Eindrapport IKUS-II, Inventarisatie Kwetsbaarheden Uitval Satellietnavigatie,” 2022.
- [2] CISA-Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, *CISA factsheet Time - The Invisible Utility*, CISA, 2019.
- [3] „NCTV - Aanpak Vitaal,” [Online]. Available: <https://www.nctv.nl/onderwerpen/v/vitale-infrastructuur/aanpak-vitaal>. [Geopend 12 Maart 2026].
- [4] „Timing Accuracy,” [Online]. Available: <https://endruntechnologies.com/products/time-frequency/timing-accuracy>. [Geopend 20 Jan 2026].
- [5] „GNSS impacts from the 10-11 May extreme storm,” Royal Observatory of Belgium, [Online]. Available: <https://www.sidc.be/article/gnss-impacts-10-11-may-extreme-storm>. [Geopend 20 Jan 2026].
- [6] „FCC Fines Operator of GPS Jammer That Affected Newark Airport GBAS,” Inside GNSS, 31 Aug 2013. [Online]. Available: <https://insidegnss.com/fcc-fines-operator-of-gps-jammer-that-affected-newark-airport-gbas/>. [Geopend 20 Jan 2026].
- [7] C. Curry, „The Impact of the GPS UTC Anomaly Event of 26 January 2016 on the Global Timing Community,” in *Proceedings of the 2017 Precise Time and Time Interval Meeting, ION PTTI 2017*, Monterey, California, 2017.
- [8] C. Whitty en M. Walport, „Satellite-derived Time and Position: A study of Critical Dependencies,” UK Government Office for Science, London, 2018.
- [9] L. Bonenberg, B. Motella, M. Paonni en J. Fortuny Guasch, „An Assessment of the Future EU Complementary Position Navigation Time (C-PNT) Ecosystem, JRC136355,” Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024.
- [10] „Economic impact to the UK of a disruption to GNSS,” LE London Economics, London, 2017.
- [11] A. O'Connor en et al., „Economic benefits of the Global Positioning System (GPS). RTI Report Number 0215471,” RTI International. Sponsored by the National Institute of Standards and Technology., 2019.
- [12] R. Flytkjær, „Denmark's economic vulnerability to a loss of satellite-based PNT,” London Economics, London, 2019.
- [13] „Synthese rapport, Inventarisatie Kwetsbaarheid Uitval Satellietnavigatie,” CapGemini Consulting in opdracht van Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016.
- [14] B. Moussa, M. Debbabi en C. Assi, „Security Assessment of Time Synchronization Mechanisms for the Smart Grid,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, nr. 3, pp. 1952 - 1973, 2016.
- [15] J. Allnutt en et al., „Timing Challenges in the Smart Grid, NIST Special Publication 1500-08,” National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [16] A. Silverstein en et al., „Time Synchronization in the Electric Power System, NASPI-2017-TR-001,” NASPI, 2017.
- [17] T. Etchells en et al., „Extreme space weather impacts on GNSS timing signals for electricity grid management,” *Space Weather*, vol. 22, nr. 10, 2024.

- [18] „How the Galileo atomic clocks work,” ESA, [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/How_the_Galileo_atomic_clocks_work. [Geopend 23 Feb 2026].
- [19] P. Waller, C. Plantard, E. Schoenemann, F. Reckeweg, G. Läufer, S. Mejri en A. Di Mira, *Report on UTC activities at the European Space Agency*, 2022.
- [20] J. A. Sherman en et al., „A Resilient Architecture for the Realization and Distribution of Coordinated Universal Time to Critical Infrastructure Systems in the United States, NIST Technical Note 2187,” 2021.
- [21] „<https://www.eecis.udel.edu/~mills/database/papers/history/historya.pdf>,” [Online].
- [22] „<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc958>,” [Online].
- [23] P. Huppert en et al., „BigTime: Characterizing Large Time Service Providers (Technical Report SIDN Labs 2025-12-01),” SIDN Labs, 2025.
- [24] J. Di en et al., „Timing Performance Testing and Regularity Analysis of eLoran System,” *Applied Sciences*, vol. 14, nr. 6580, 2024.
- [25] Y. Li, Y. Hua, B. Yan en W. Guo, „Research on the eLoran Differential Timing Method,” *Sensors*, vol. 20, nr. 6518, 2020.
- [26] S. Ruffini, M. Johansson, B. Pohlman en M. Sandgren, *Ericsson Technology Review*, Stockholm: Ericsson AB, 2021, p. 10.
- [27] H.J. Son, „7 Deployment Scenarios of Private 5G Networks,” NetManias, 2019. [Online]. Available: <https://www.netmanias.com/en/post/blog/14500/5g-edge-kt-sk-telecom/7-deployment-scenarios-of-private-5g-networks>. [Geopend 20 Jan 2026].
- [28] „5G-ACIA White Paper, Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications,” ZVEI, 2021.
- [29] L. Grosjean en et al., „5G-Enabled Smart Manufacturing. A Booklet by 5G-SMART.,” 5G-SMART project, 2022.
- [30] K. Wang, J. Sachs en J. Farkas, „How 5G integrates with TSN-based industrial communication systems,” Ericsson, 2021. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/2/how-5g-integrates-tsn-systems>. [Geopend 26 Jan 2026].
- [31] „<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/ALL/?uri=CELEX:32009R0714>,” [Online].
- [32] „<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0943-20240716>,” [Online].
- [33] „<https://docs.equinix.com/precision-time/>,” [Online].
- [34] „European Radio Navigation Plan 2023,” European Commission, 2023.
- [35] L. Bonenberg, B. Motella en J. Fortuny-Guasch, „Assessing Alternative Positioning, Navigation, and Timing Technologies for Potential Deployment in the EU, JRC132737,” Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.
- [36] „CLOCK NETWORK Services (CLONETS),” Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2017. [Online]. Available: <https://www.clonets.eu/clonets-home.html>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [37] „CLONETS-DS, CLOCK NETWORK Services - Design Study,” 2026. [Online]. Available: <https://clonets-ds.eu/>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [38] C. Chardonnet, *ESFRI Roadmap 2026, From a National Time & Frequency Network, REFIMEVE, to a European Research Infrastructure Fibre-based Optical network for European Science and Technology*, Refimeve, GEANT-SIG TFN Working Group, meeting-2-Ispra, 2025, 2025.

- [39] „FOREST Fiber Based Optical Network for European Science and Technology,” [Online]. Available: <https://forest-ri.eu/>. [Geopend 21 Jan 2026].
- [40] N. Quintin et al., „Distributing New Performant Time and Frequency Services over NREN Networks, GN43-456-257,” GÉANT Association on behalf of the GN4-3 project, 2020.
- [41] G. Roberts et al., „GÉANT Core -Time Frequency Network (GÉANT C-TFN) Net Dev Incubator Report (Public),” GÉANT, 2024.
- [42] „Guidance Positioning, Navigation and Timing: Overview,” [Online]. Available: <https://www.gov.uk/guidance/positioning-navigation-and-timing-overview#framework-for-greater-pnt-resilience>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [43] „Press release, Landmark government investment to safeguard the essential signals we all rely on,” Department for Science, Innovation and Technology, e.a., 19 Nov 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/news/landmark-government-investment-to-safeguard-the-essential-signals-we-all-rely-on>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [44] D. Jones e.a., „A new resilient time and frequency infrastructure for UTC(NPL),” in *9th Symposium on Frequency Standards and Metrology*, Kingscliff, NSW, Australia, 2023.
- [45] „NPLTime® Services,” [Online]. Available: <https://www.npl.co.uk/products-services/time-frequency/npltime>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [46] „NPL Time Certified,” National Physical Laboratory, [Online]. Available: <https://www.npl.co.uk/products-services/time-frequency/npltime/certified>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [47] D. Goward, „UK and France Renew Ties, Resilient PNT, eLoran a Key Part,” 2025.
- [48] „Animated Explainer for the National Timing Centre Programme,” 2024. [Online]. Available: <https://bloominmotion.com/portfolio/national-timing-centre/>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [49] „T Wholesale launches Telekom TimeSync,” Deutsche Telekom AG, 2025. [Online]. Available: <https://wholesale.telekom.com/newsroom/news/detail/t-wholesale-launches-telekom-timesync>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [50] „TimeSync: Precise, Reliable, and Secure Network Time Synchronization,” Deutsche telekom AG, 2025. [Online]. Available: <https://wholesale.telekom.com/global-connectivity/our-solutions/ip-connectivity/timesync>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [51] „Telekom TimeSync,” [Online]. Available: https://wholesale.telekom.com/fileadmin/user_upload/documents/global/downloads/TimeSync_-_Flyer_-_English.pdf. [Geopend 10 Feb 2026].
- [52] E. Cantin, O. Lopez, N. Cahuzac en et al., „REFIMEVE Fiber Network for Time and Frequency Dissemination and Applications,” in *Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and the European Frequency and Time Forum, held with ATF, the Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency (IEEE IFCS-EFTF 2023)*, Toyama, Japan, 2023.
- [53] „Tech info Time Direct & Remote,” NETNOD, 2026. [Online]. Available: <https://www.netnod.se/tech-info-time-direct-remote>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [54] „Swedish Distributed Time Service,” NETNOD, 2026. [Online]. Available: <https://www.netnod.se/swedish-distributed-time-service>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [55] „Zyntai: Over-the-top time synchronization,” NetInsight, [Online]. Available: <https://netinsight.net/sync/sync-solution/>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [56] *Datasheet Zyntai TimeNode*, NetInsight.

- [57] T. Hoque, „Precise Time as a Critical National Service,” in *WSTS Workshop on Synchronisation and Timing Systems*, San Diego, CA, USA, 2024.
- [58] P. Lindgren en K. Ahl, „Precise Time as a Critical National Service,” *Tecknexus 5G Magazine*, pp. 10-20, Feb 2024.
- [59] F. Olofsson, „Förutsättningar för att tillgängliggöra det nationella systemet för spårbar tid och frekvens (PTS-ER-2020:33),” PTS - Post- och telestyrelsen, 2021.
- [60] „Time as a Service,” TOP-IX Consortium, [Online]. Available: <https://www.top-ix.org/en/service/time-as-a-service/>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [61] „Top-IX,” TOP-IX, 12 April 2023. [Online]. Available: [https://www.top-ix.org/en/time-as-a-service-taas-aruba-and-top-ix-join-forces-to-offer-synchronisation-services/#:~:text=Increasingly%20stringent%20requirements%20related%20to,Time%20as%20a%20Service%20service](https://www.top-ix.org/en/time-as-a-service-taas-aruba-and-top-ix-join-forces-to-offer-synchronisation-services/#:~:text=Increasingly%20stringent%20requirements%20related%20to,Time%20as%20a%20Service%20service.). [Geopend 10 Feb 2026].
- [62] *Annex to the Commission delegated Regulation: supplementing Directive 2014/65/EU of the European Parliament and of the Council with regard to regulatory technical standards for the level of accuracy of business clocks (C(2016) 3316 final)*, Brussels: European Commission, 2016.
- [63] „Clock synchronisation under MIFID II,” [Online]. Available: <https://www.edmae.org/wp-content/uploads/2017/01/EDMA-Briefing-doc-on-MiFID-II-clock-sync-Nov-2016.pdf>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [64] „Time over Fiber,” NIST, 24 April 2023. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/time-services/time-over-fiber>. [Geopend 10 Feb 2026].
- [65] J. Seo en M. Kim, „eLoran in Korea – Current Status and Future Plans,” in *European Navigation Conference*, Vienna, Austria, 2013.
- [66] W. Kim, P.-W. Son,, S.G. Park,, S.H. Park en J. Seo, „First Demonstration of the Korean eLoran Accuracy in a Narrow Waterway Using Improved ASF Maps,” *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, vol. 58, nr. 2, pp. 1492-1496, 2021.
- [67] T. Kang et al., „Enhancing eLoran Timing Accuracy via Machine Learning with Meteorological and Terrain Data,” *IEEE Access*, nr. 13, pp. 112067 - 112080, June 2025.
- [68] K. Yin, J. Wu, R. Ning, Y. Chen, Q. Liu en K. Wang, „Preliminary Evaluation and Analysis of Differential Technology Performance of eLoran Timing System,” *Electronics*, vol. 14, nr. 789, 2025.
- [69] „Prediction of Time Delay in eLoran Data Acquisition Systems,” in *3rd International Conference on Cloud Computing, Big Data Application and Software Engineering (CBASE)*, Hangzhou, China, 2024.
- [70] D. Goward, „China leads world with plan for ‘comprehensive’ PNT,” *GPS-World*, 15 Nov 2019.
- [71] B. Liu, X. Guo, J. Che, Y. Zhou, T. Liu, R. Dong en S. Zhang, „Report on 3,143.6-km Time and Frequency Transfer Fiber Link with Ps-level Stability,” *Chinese Physics Letters*, vol. 42, nr. 014202, 2025.
- [72] X. Guo en et al., „Time Transfer in a 1839-km Telecommunication Fiber Link Demonstrating a Picosecond-Scale Stability,” *Chinese Physics Letters*, vol. 41, nr. 064202, 2024.
- [73] L. Han en et al., „Novel National High-Precision Time Synchronization System for Mobile Communication,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 18878 - 18889, 2025.

- [74] „<https://pedroc.co.uk/international/dutch-commercial-mobile-spectrum>,” [Online].
- [75] „<https://www.oscilloquartz.com/en/newsroom/press-releases/20171106-t-mobile-netherlands-deploys-oscilloquartz-synchronization-solution-in-nationwide-network>,” [Online].
- [76] „<file:///C:/Users/smetsrcj/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/321c1057-c7e3-48fa-8e5f-ca29eefe0619/osa-5420-series.pdf>,” [Online].
- [77] „<https://www.opnt.nl/news/accurate-time-synchronization-in-live-network-vodafone>,” [Online].
- [78] „https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/uploads/ucp2020_telefonica_synchronization_needs.pdf,” [Online].
- [79] J. v. Es, J. v. Bruggen-van Putten en H. Zelle, „GNSS Spoofing, NLR-CR-2019-001-PT-1-RevEd-1,” NLR, 2019.
- [80] „De staat van de digitale infrastructuur,” Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Den Haag, 2024.
- [81] „VSL,” [Online]. Available: <https://www.vsl.nl/>. [Geopend 12 maart 2026].

Bijlage A

Eerste aanzet tot eisen en wensen voor een landelijk glasvezel T&F-netwerk

In deze bijlage zijn mogelijke eisen en wensen verzameld die naar voren kwamen tijdens de gevoerde gesprekken met relevante Nederlandse kennis- en marktpartijen op het gebied van tijd- en frequentiesynchronisatie, en die naar boven kwamen tijdens het uitvoeren van de kennisopbouw bij de totstandkoming van dit rapport. De lijst is slechts een eerste prille aanzet en nog verre van volledig.

Als indeling voor de lijst is de driedeling uit Hoofdstuk 6 genomen: 1) Technische realisatie inclusief aanschaf benodigde apparatuur, 2) Beheer, 3) Klant- en businessmanagement.

De eisen zijn opgesteld volgens de MosCoW methodiek. Dat wil zeggen dat de prioriteit van de eisen is ingedeeld in vier categoriën:

- › (M) Must Have: Eisen waaraan voldaan moet zijn. In de formulering van de eis komt het woord "moet" voor.
- › (S) Should Have: belangrijke eisen, maar niet noodzakelijk. In de formulering van de eis wordt gebruik gemaakt van het woord "zeer wenselijk".
- › (C) Could have: Wenselijk, maar niet noodzakelijk. Er wordt gebruik gemaakt van het woord "wenselijk".
- › (W) Won't have: Eisen die mogelijk interessant kunnen zijn voor een mogelijke vervolgversie van het T&F-netwerk.

A.1 Technische Realisatie (TR)

TR 1 Tijdsbron: Het T&F-netwerk moet UTC tijd leveren. Zoals UTC(VSL).

TR 2 Redundante tijdbronnen: Het netwerk moet meerdere redundante tijdbronnen kennen die geografisch gescheiden zijn. (Geo-redundantie)

TR Beste Tijdsbron: Kwalitatief moet de beste tijdsbron in het netwerk gekozen worden voor de levering van de tijd- en frequentiedienst aan de gebruiker.

TR Tijdsbronmiddeling: het is wenselijk dat er gebruik wordt gemaakt van een middeling van de tijden van de verschillende tijdbronnen. In plaats van een keuze voor één beste tijdsbron, wordt via een algoritme een middeling van de tijdwaarden bepaald.

TR Inzage in bron en route: De gebruiker moet kunnen traceren welke bron en via welke route tijdlevering tot stand is gekomen.

TR 1 Functionaliteit: Het tijdsignaal dat geleverd wordt moet minimaal in staat zijn te voorzien in NTP, NTS, PTP, PTPv2, PTPv2.1, 1pps & 10MHz levering.

TR 2 Gecertificeerde tijd: Het is wenselijk dat het T&F-netwerk ook gecertificeerde tijd aanbiedt (eventueel tegen meerkosten).

TR Overschakeling van/naar GNSS: Aan de gebruikerskant moet naadloos (met beperkte jitter en artefacten op bijv. Een 10MHz signaal) kunnen worden overgeschakeld tussen GNSS en het alternatieve of tweede tijddistributienetwerk.

TR Inzage in kwaliteit van T&F-signaal: De gebruiker moet inzicht krijgen in de kwaliteit van het tijd/frequentiesignaal om een gegronde keuze te kunnen maken tussen het T&F netwerk of een GNSS signaal.

TR 2 Nauwkeurigheid: De nauwkeurigheid van het tijdsignaal moet minimaal gelijk zijn aan dat wat verkregen kan worden met een high-end GNSS ontvanger.

TR Koppelvlakken: Koppelvlakken moeten gebruikmaken van gestandaardiseerde formaten (denk hierbij aan Ethernet, IP, UDP, coax SMA, SMB, BNC (Dus wat al in gebruik is in de industrie))

TR Security: Een alternatief tijd- en frequentienetwerk en haar diensten moet secure zijn, zowel wat betreft infra en diensten.

TR Aansluiting?: De dienst aan de gebruiker moet voor zover mogelijk op dezelfde manier geleverd worden als nu het geval is.

) Omdat met een glasvezelnetwerk een hogere performantie in de dienstverlening kan worden bereikt en daarmee waarde wordt toegevoegd, is het in deze gevallen wel acceptabel dat de gebruiker aanpassingen maakt in de aansluiting. Denk aan het aanleggen van een glasvezel aansluiting en het plaatsen van een time delivery node.

TR Infrastructuur: Een alternatieve tijd en frequentie infra moet de best practices van huidige NTP, NTS, PTP en PTPv2.x timing bezitten.

TR Infrastructuur: Er moet een zo klein mogelijke impact zijn op de operaties van de operator en de provider die de tijddienst levert.

TR Infrastructuur: Tijd- en frequentiedistributie laat zich goed schalen. Providers kunnen hiervan gebruik maken mits men tot samenwerking bereid is. M.a.w. als provider A op locatie Q is en provider B kan op locatie R komen door tijd van locatie Q van provider A te gebruiken, dan hoeft niet iedere provider een volledig eigen netwerk te bouwen. Een federatieve aanpak zoals bijv. in IPCEI-CIS heeft schaalbaarheidsvoordelen.

A.2 Beheer (BEH)

BEH 1 NOC: Voor onderhoud/beheer/support zal er een Network Operations Center functionaliteit moeten zijn waarin T&F-netwerk expertise continu beschikbaar moet zijn.

BEH Kosten: De implementatie en het beheer moet kostenefficiënt worden uitgevoerd worden.

BEH Governance: De dienst moet future proof zijn. Hiermee wordt bedoeld dat binnen een periode van x-jaar de dienst voldoende precisie, nauwkeurigheid, en robuustheid moet kennen.

BEH Fysieke beveiliging van de locaties van de bronklokken: De locaties van de bronklokken moeten goed beveiligd zijn.

BEH 2 Monitoring: Er moet automatische kalibratie en verificatie (terugmeten middels een meetlus) plaats kunnen vinden.

BEH Borgen juistheid en nauwkeurigheid: Er zullen extra processen moeten worden ingericht met als doel het continue borgen en verbeteren van juistheid en nauwkeurigheid.

BEH Infrastructuur: Nieuwe paradigma's zoals bijv. bi-directionele simplex transmissie over een glasvezel paar mag geen problemen geven met field-engineering in het geval van fibers die aan elkaar gekoppeld moeten worden. (Traditioneel is er bij een onderbroken fiber paar altijd een fiber waar licht uitkomt en een fiber waar geen licht uit komt. Dit maakt het connecteren van een fiber paar makkelijk. Indien dit niet meer het geval is wordt het complexer een optische verbinding tot stand te brengen.)

BEH Infrastructuur: Automatische kalibratie moet plaats kunnen vinden. Het vervangen van een component in de verticale infrastructuur kan asymmetrie veroorzaken. Mits gecorrigeerd heeft dit een negatieve impact. Dit geldt in mindere mate voor de horizontale infrastructuur omdat hier beide optische signalen in eenzelfde fiber zitten.

BEH Infrastructuur: Automatische kalibratie moet bestaan uit een metingen maar mag ook uit administratieve opzoekacties in bijv. inventory databases waarbij onzekerheden gedetermineerd kunnen worden en na correctie als deterministisch de dienstverlening niet meer nadelig zal beïnvloeden.

A.3 Klant- en Businessmanagement

KB 1 Governance: Versnippering en technologische incompatibiliteit moet voorkomen worden door een goed en implementeerbaar governance model dat economisch aantrekkelijk is voor bedrijven en inwoners van Nederland en Europa.

KB 2 Geformaliseerde Kwaliteit van Dienstverlening: De kwaliteit van de aangeboden diensten moet volgens geldende normen professioneel worden ingericht en aangeboden (denk aan een dienst met een geformaliseerd contract, SLA, escalation mechanism, etc.)

KB Inzage geven in statusmonitoring: Klanten moeten geïnformeerd worden van de status van het T&F-netwerk. Het moet mogelijk zijn voor klanten die dat wensen om continue monitoringresultaten aan te bieden en proactief op de hoogte worden gesteld van problemen met de levering van tijd en frequentie diensten.

KB Aanbieden van meerdere redundante glasvezel aansluitingen: Het moet mogelijk zijn (wellicht tegen meerkosten) om voor klanten meerdere redundante glasvezelaansluitingen op het T&F-netwerk te realiseren.

Bijlage B

Marktpartijen in de tijd- en frequentiesector

Belangrijkste categorieën marktpartijen in de tijd- en frequentiesector:

- › Organisaties die als tijdsbron fungeren (zoals VSL, ESA);
- › Aanbieders glasvezel;
- › Aanbieders TFT apparatuur;
- › Aanbieders locaties voor rackruimte;
- › NOC Services (beheer);
- › Helpdesk (Service management);
- › Architecture/Design.

Onderstaande tabel geeft een aantal bekende producenten van klokken:

Producent / Merknaam	Specialisatie	Bekende producten / technologieën
Microchip Technology (voorheen Symmetricom)	Atoomklokken, GPSDO's, rubidium, CSAC's	SA.45s CSAC, XPRO rubidium, TimeProvider-serie
Orolia / Safran	GNSS-tijdservers, rubidiumklokken, resilient timing	SecureSync, mRO-50, VersaPNT, White Rabbit-oplossingen
Meinberg (Duitsland)	NTP/PTP-tijdservers, GPS-ontvangers, IRIG-systemen	LANTIME-serie, M3000, SyncFire, IMS-platform
Brandywine Communications (VS)	Draagbare tijdservers, militaire timing	PTU (Portable Timing Unit), GPS-2031, IRIG-distributie
Oscilloquartz / ADVA	Telecom timing, PTP Grandmasters, SyncE	OSA 5430, OSA 3300, ePRTC-oplossingen
Stanford Research Systems (SRS)	Rubidiumklokken, GPSDO's	PRS10, FS725, FS740
EndRun Technologies	Compacte NTP/PTP-servers, GPSDO's	Meridian II, Tempus LX, Ninja Time Server
Spectratime (onderdeel van Orolia)	Rubidium en maserklokken voor ruimtevaart en defensie	Space-qualified rubidiumklokken, masers
VREMYA-CH (Rusland)	Cesium- en rubidiumstandaarden	VCH-100, VCH-101, VCH-501

Distributielijst

TNO Publiek › TNO 2026 R10357

De distributielijst is als separaat bestand bijgevoegd.

Defence, Safety & Security

Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
www.tno.nl