nagra.

Arbeitsbericht NAB 10-14

Aufbau und Betrieb eines eigenständigen CORS-GNSS Netzes

Kurzbericht (für interessierte Dritte)

Dezember 2013

M. Studer, M. Zanini

BSF Swissphoto AG

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

nagra.

Arbeitsbericht NAB 10-14

Aufbau und Betrieb eines eigenständigen CORS-GNSS Netzes

Kurzbericht (für interessierte Dritte)

Dezember 2013

M. Studer, M. Zanini

BSF Swissphoto AG

KEYWORDS

NaGNet, GNSS, GPS, Permanentstation, Geodynamik, Technik, Konzept, Realisierung, Inbetriebnahme, Wartung, Betrieb, BSF

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Forschungsaktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht zwingend mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

"Copyright © 2013 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.
Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Tabellenverzeichnis II

Figurenverzeichnis III

Zusammenfassung 1

1 **Ausgangslage** 3
1.1 Ausgangslage 3
1.2 Zielsetzung 3
1.3 Beschrieb AGNES (swisstopo) 3
1.4 Konzept Nagra CORS-GNSS Netz 4

2 **Konzeptionierung, Realisierung und Inbetriebnahme** 7
2.1 Standortwahl 7
2.1.1 Allgemeines 7
2.1.2 72h-Testmessung 7
2.1.3 Untergrund 10
2.2 Standortsicherung 10
2.3 Messpfeiler bzw. Gittermast 10
2.4 Fundation / Mikro-Bohrpfähle 12
2.5 Rückversicherung des Antennenreferenzpunktes 13
2.5.1 Lagekontrolle Fundament 15
2.5.2 Kontrolle Verkippung und Setzung des Fundaments 15
2.5.3 Maststabilität / Rückversicherung ARP 16
2.5.4 Messfrequenz der Rückversicherungsmessungen 16
2.6 GNSS-Empfänger 16
2.7 GNSS-Antennen und Montageplatten 18
2.7.1 Absolutkalibrierung der GNSS-Antennen 19
2.7.2 Definition der Antennenhöhen 19
2.7.3 Radomes 20
2.8 Energieversorgung 20
2.8.1 Netzanschluss 20
2.8.2 Solarstromversorgung 20
2.9 Blitz- und Spannungsschutz 21
2.10 Einfriedung und Kabine 21
2.11 Datentransfer und Kommunikation 22
2.11.1 Kommunikation 22
2.11.2 GSM-Fernsteuerung 22
2.12 Datenmanagement und Netzmonitoring 22
2.12.1 Rechenzentrum und Software 23

2.12.2 Datenlogging GNSS-Empfänger ... 23
2.12.3 Erstellung RINEX-Daten ... 24
2.12.4 Datenlieferung ... 24
2.12.5 Qualitätskontrolle ... 24
2.12.6 Backup ... 25
2.12.7 Kundenportal ... 25
2.12.8 Auswertungen der swisstopo ... 26
2.13 Stationswarte ... 27
2.14 Inbetriebnahme ... 27

3 **Betrieb und Wartung** ... 29
3.1 Betrieb des Netzes ... 29
3.2 Service-Abonnement für Hard- und Software ... 30
3.3 Wartung ... 30

4 **Literaturverzeichnis** ... 31

Anhang: Nagra CORS-GNSS - Richtlinie zur Erkundung von Stationsstandorten ... 1

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Messgenauigkeiten der Rückversicherungsmessungen: ... 15
Tab. 2: Grenzwerte Qualitätsparameter ... 25
Tab. 3: Verfügbarkeit der ersten NaGNet Wochenlösung pro Station ... 27

Figurenverzeichnis

Fig. 1: Übersichtskarte mit AGNES- und Nagra-Stationen 4
Fig. 2: Aufbau der Testmessungsinstallation 8
Fig. 3: Beispiel eines Horizontprofils (Skyplot) 8
Fig. 4: Beispiel grafische Auswertung: Signal-Rausch-Verhältnis auf der L1-Phase mit überlagertem Horizontprofil 9
Fig. 5: Beispiel grafische Auswertung: Code Multipath vs. Elevation für GPS 10
Fig. 6: Technische Zeichnung des Gittermasten 11
Fig. 7: Skizze Fundament ohne Bohrpfähle 12
Fig. 8: Skizze Fundament mit 3 eingebundenen Bohrpfählen 13
Fig. 9: Leica GRX1200+ GNSS-Empfänger 17
Fig. 10: Chokering-Antenne mit ARP und Offset der Phasenzentren L1 und L2 19
Fig. 11: Definition der Antennenhöhe 20
Fig. 12: Foto der Kabine von aussen 21
Fig. 13: Startseite Kundenportal 26

Zusammenfassung

Im vorliegenden Ausführungsbericht ist dokumentiert, welches die Anforderungen des Auftraggebers (Nagra) bei der Planung, Implementierung und dem Betrieb des Nagra GNSS[1]-CORS[2]-Netzes (NaGNet[3]) sind und wie diese durch den Totalunternehmer (BSF Swissphoto AG) umgesetzt wurden.

Im ersten Kapitel wird die Ausgangslage und Zielsetzung des gesamten Projekts dokumentiert. Das primäre Ziel des Betriebs eines Messnetzes mit insgesamt 11 GNSS-Stationen (9 in der Nordschweiz und 2 in Süddeutschland) während mindestens 15 bis 20 Jahren ist die langfristige Überwachung und Quantifizierung der rezenten Krustenbewegungen. Dazu werden GNSS-Signale mit einer Aufzeichnungsrate von 30 Sekunden registriert und durch die swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) im Rahmen der automatisierten AGNES[4]-Auswertungen analysiert. Das sekundäre Ziel dieses Systems ist, die Grösse, Richtung und Charakteristik kurzzeitiger, relativ rascher Bewegungen (co-seismische Bewegungen) zu bestimmen und zu analysieren. Dazu werden an jedem Standort zusätzlich die GNSS-Signale mit einer Frequenz von 10 Hz gespeichert. Im Falle eines Erdbebens werden diese Rohdaten ausgelesen und ausgewertet.

Das zweite Kapitel befasst sich mit dem Konzept, der Realisierung und der Inbetriebnahme der Stationen. Dabei wird beschrieben, welche Rahmenbedingungen bei verschiedenen Aspekten wie Standortwahl, Bau, Hardware, Energieversorgung, Kommunikation, Datenmanagement, Software, etc. beachtet werden mussten und wie diese umgesetzt wurden.

Im dritten Kapitel wird der Betrieb des GNSS-CORS-Netzes beschrieben. Dieser wurde soweit automatisiert, dass – ausser bei Störfällen – keine manuellen, wiederholten Arbeiten anfallen. Verschiedene Softwarepakete übernehmen die automatisierte Funktionskontrolle des Systems und führen Qualitätsuntersuchungen durch. Bei Unregelmässigkeiten oder der Überschreitung von Grenzwerten wird das Wartungspersonal umgehend informiert.

---

[1] GNSS = Global Navigation Satellite System

[2] CORS = Continuously Operating Reference Station

[3] NaGNet = Arbeitsbezeichnung des permanenten GNSS-Netzes der Nagra

[4] AGNES = Automatisches GNSS-Netz Schweiz

1 Ausgangslage

1.1 Ausgangslage

Für die geologischen Synthesen für die Rahmenbewilligungsgesuche sind von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) insbesondere für das HAA-Lager fundierte Aussagen unter anderem über junge Krustenbewegungen bzw. zur geodynamischen Langzeitentwicklung zu machen. Eine wichtige Basis für diese Aussagen liefern Deformations- bzw. Hebungsraten in der direkten Umgebung der Standortgebiete.

Ziel dieses Projekts sind somit langfristige Positionsmessungen mit hochpräzisen GNSS-Permanent-Messstationen. Hierzu wird das bestehende und seit Jahren erfolgreich betriebene GNSS-Netz der swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) in der Nord-Schweiz und in Süddeutschland gezielt verdichtet.

In diesem Zusammenhang hat die Nagra nach einem aufwändigen Submissionsverfahren Ende 2009 die Firma BSF Swissphoto AG mit Sitz in Regensdorf-Watt als Totalunternehmer beauftragt.

1.2 Zielsetzung

Bisherige Messungen zeigen, dass die meisten horizontalen Bewegungsraten bezüglich eines beliebigen Referenzpunkts in der Schweiz kleiner als 1 mm/Jahr sind. Signifikante Aussagen über geodynamische Vorgänge sollen nach den ersten fünf Jahren Betriebszeit vorliegen. Die angestrebte Wiederholbarkeit (= Standardabweichung) von Wochenlösungen soll im Bereich von 1 mm in der Lage und 3 mm in der Höhe liegen. Weitere Betriebsjahre werden notwendig sein, um robuste Aussagen über die gemessenen Vertikalbewegungen zu erhalten.

Zusätzlich zur langfristigen Überwachung und Quantifizierung der rezenten Krustenbewegungen besteht auch das Ziel, Grösse, Richtung und Charakteristik kurzzeitiger, relativ rascher Bewegungen (co-seismische Bewegungen) zu bestimmen und zu analysieren.

Diese Ziele verlangen höchste Anforderungen an Antennen, Empfänger, Auswahl und Bau der Stationen und grösste Sorgfalt während der Betriebsphase.

1.3 Beschrieb AGNES (swisstopo)

Das *Automatische GNSS-Netz Schweiz* (AGNES) ist ein multifunktionales Referenznetz für Anwendungen in der Landesvermessung, Wissenschaft (Atmosphäre / Geodynamik) und für den Positionierungsdienst swipos®. Der mittlere Abstand zwischen den über das gesamte Territorium der Schweiz verteilten 32 Stationen beträgt ca. 70 km.

Die Antennenmasten der AGNES-Stationen wurden nach Möglichkeit auf Fels fundiert. Einige AGNES-Stationen mussten allerdings auf quartären Sedimenten und/oder Gebäuden bzw. hohen Masten installiert werden. Diese Gegebenheiten können sich für geodynamische Fragestellungen als suboptimal erweisen, auch wenn für den Positionierungsdienst keine negativen Auswirkungen erkennbar sind.

Die Hardware der AGNES-Stationen umfasst die GNSS-Antenne, den GNSS-Empfänger, einen Stationsrechner, die erforderlichen Kommunikationsmittel und eine USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung). Die Antennen werden durchwegs ohne Radome (Schutzhaube aus Kunst-

stoff) betrieben. Sämtliche Antennen wurden absolut kalibriert. Diese individuellen Kalibrationswerte werden für die geodätischen Auswertungen höchster Genauigkeit benötigt. Für die swipos®-Positionierungsdienste werden vom Hersteller bestimmte Typenwerte verwendet.

Die AGNES-Stationen sind über das Kommunikationsnetzwerk der Bundesverwaltung mit der AGNES-Zentrale in Bern verbunden. Diese Verbindung dient unter anderem der Remote Control (Fernbedienung) der AGNES-Stationen und dem Datentransfer in die Zentrale.

Aus den weitgehend automatisierten Auswertungen des *Permanent Network Analysis Centers* (PNAC) bei swisstopo werden täglich Stationskoordinaten geschätzt, welche (akkumuliert zu Wochenlösungen) als Zeitreihen dargestellt werden. Dabei können die Wiederholbarkeiten sowohl der Stationskoordinaten und -höhen als auch der Länge der Basislinien dargestellt werden.

Typischerweise liegen die Wiederholbarkeiten der Stationskoordinaten der Wochenlösungen des AGNES-Netzes im Bereich von 1-3 mm in der Lage und 2-5 mm in der Höhe. Die Auswertungen des PNAC liefern damit die perfekte Langzeitüberwachung von AGNES, indem kleinste Veränderungen der Stationskoordinaten detektiert werden können. Zusätzlich werden im Zusammenhang mit der Bestimmung von GNSS-Meteowerten stündliche Koordinatenlösungen berechnet, welche sogar eine near-real-time Überwachung der Stabilität der AGNES-Stationen ermöglichen.

1.4 Konzept Nagra CORS-GNSS Netz

Das Nagra CORS-GNSS Netz soll Beobachtungsdaten zur Auswertung mittels *post-processing*, in Kombination mit gleichzeitig erfassten Beobachtungen aus dem AGNES und dem benachbarten Ausland, liefern. Zu diesem Zweck wurde ein Netz von 9 Stationen in einem mittleren Abstand von ca. 20 km im nördlichen Mittelland der Schweiz und 2 Stationen auf deutschem Boden im grenznahen Gebiet errichtet (siehe Fig. 1).

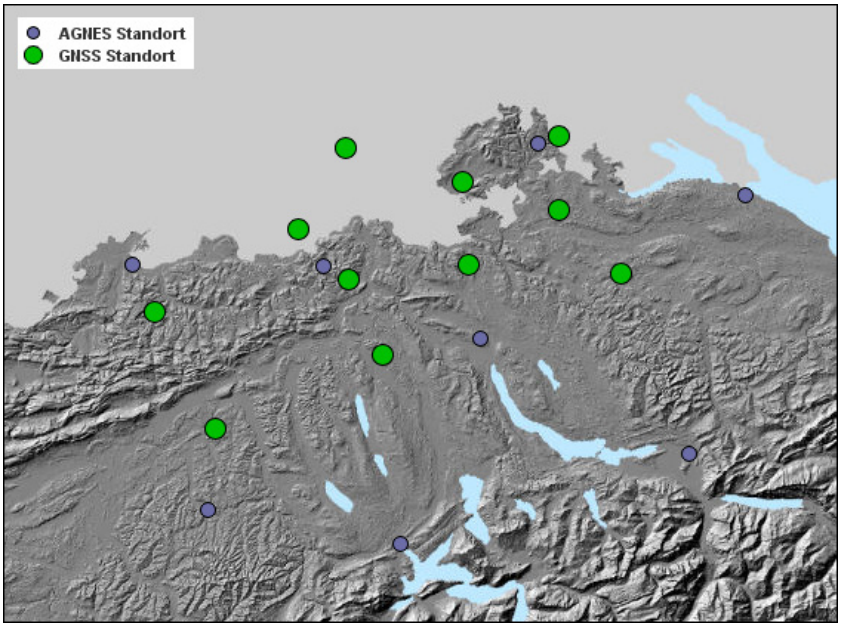

Fig. 1: Übersichtskarte mit AGNES- und Nagra-Stationen

Die Standorte der 11 Stationen wurden vorrangig in Abhängigkeit der Geologie durch einen von der Nagra beauftragten Geologen in enger Zusammenarbeit mit der Nagra festgelegt.

Die installierte Hardware orientiert sich bezüglich Leistungsdaten generell am state-of-the-art für CORS-GNSS Komponenten. Das RINEX-Format gilt als Standard für die Datenspeicherung, Datenverarbeitung und -archivierung der GNSS-Messdaten. Generell produzieren die Messstationen und/oder die Betriebs- und Datenzentrale RINEX–Stundenfiles und -Tagesfiles.

Das GNSS-Netz ist mittels DSL oder GSM-Mobilfunktechnik an das Internet angeschlossen. Die Stromversorgung wird über einen Anschluss an das örtliche Netz oder mit Solarstromversorgung gewährleistet.

In der Betriebs- und Datenzentrale wird das GNSS-Netz einem permanenten Monitoring (Netzbetrieb und Qualitätskontrolle der Rohdaten) unterworfen und die auf den FTP-Server übermittelten Daten gespeichert bzw. verwaltet. Die RINEX-Daten werden für den Nutzer (swisstopo) zur weiteren Verarbeitung bereitgehalten.

Die im Hinblick auf geodynamische Untersuchungen angestrebten Wiederholbarkeiten für die Bestimmung der Stationskoordinaten aus Wochenlösungen des Nagra CORS-GNSS liegen im Bereich von 1 mm in der Lage und 3 mm in der Höhe. Auf diese Zielsetzung hin und unter Beachtung der sehr langfristigen Untersuchungsdauer wurden sowohl der Bau und die Materialisierung der Stationen als auch die Wahl der Hard- und Software ausgerichtet. Entsprechend wurden alle Komponenten dimensioniert und installiert. An die Stabilität und Dauerhaftigkeit der Messstationen wurden höchste Ansprüche gestellt. Beim GNSS-Equipment sind Messgenauigkeiten an der Trägerphase im unteren Submillimeterbereich erforderlich. Schliesslich erfordern auch der Betrieb und die Wartung höchste Sorgfalt und Zuverlässigkeit.

2 Konzeptionierung, Realisierung und Inbetriebnahme

2.1 Standortwahl

2.1.1 Allgemeines

Bei der Planung aktiver Raumbezugspunkte für geodynamische Untersuchungen sind geologische, geodätische, topografische, konstruktive und elektrotechnische Kriterien sowie ergänzende Randbedingungen untereinander abzuwägen. Mit Blick auf die geodynamischen Untersuchungen wurden pro Messstation mehrere potentielle Standorte aus geologischer und technischer Sicht vorgeschlagen. Zusätzlich wurde bei Standorten im Lockergestein der oberflächennahe geologische Untergrundaufbau bzw. hinsichtlich Fundamentierung die Tiefenlage tragfähiger Schichten mittels einer Rammsondierung erkundet. Die endgültige Festlegung des Standorts wurde unter Beihilfe von Testmessungen durchgeführt. Das Ziel war es, stationsspezifische Fehlereinflüsse bereits in der Phase der Detailkonzipierung zu minimieren.

Die langfristige Stabilität der aktiven Referenzstationen muss durch die Auswahl eines geeigneten Standortes aus geologischer und geodätischer Sicht sowie einer zweckmässigen Konstruktion (Messpfeiler) für die Antennenaufstellung gewährleistet sein. Die im **Anhang** beigefügte Richtlinie wurde bei der Standortauswahl berücksichtigt. Folgende Punkte wurden besonders beachtet:

- Die Standorte der Referenzstationen wurden so ausgewählt, dass die Stabilität der GNSS-Antennen langfristig gesichert ist, langfristig eine möglichst vollständige Horizontfreiheit im Grundsatz gewährleistet ist sowie Einflüsse von Fremdstrahlungen und Mehrwegausbreitungen der Satellitensignale (Multipath durch Reflektionen) vermieden werden. Die zukünftige Entwicklung der Umgebung wurde bei der Standortevaluation berücksichtigt.
- Die definitive Standortwahl wurde durch eine Testmessung über mindestens 72 Stunden Dauer unterstützt, um die Qualität des Standorts bezüglich des Empfangs der Satellitensignale zu überprüfen. Hierfür wurden ausführungs- und typgleiche GNSS-Antennen verwendet, die auf der geplanten Höhe fixiert wurden. Die Satellitensignale wurden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die Testmessungen wurden hinsichtlich Quantität und Qualität der Signale resp. Messungen ausgewertet (erwartete/realisierte Messungen, Signal to Noise Ratio auf allen Frequenzen, Code Multipath, Cycle Slips, etc.).

2.1.2 72h-Testmessung

An jedem potentiellen Standort wurde vor der Detailplanung des Messpfeilers und der Einreichung des Baugesuchs die GNSS-Standortqualität mittels einer 72-stündigen Testmessung beurteilt. Es wurde vereinbart, dass die Rohdaten für die Testmessungen mit 1 Hz geloggt werden, da diese Daten für die Qualitätsbeurteilung des Standorts ausreichen. Damit die Sensoren trotzdem im für den Betrieb vorgesehenen 10 Hz-Bereich getestet wurden, wurde auf dem Dach der BSF Swissphoto AG von jedem Empfänger-Antennenpaar eine mehrstündige 10 Hz-Messung gespeichert und analysiert.

Für die Testmessung wurden typengleiche GNSS-Empfänger und -Antennen eingesetzt, die auch für den späteren Betrieb vorgesehen waren. Die Messung fand auf der geplanten Antennenhöhe, d.h. in der Regel auf 2.5 m Höhe statt. Als temporäre Antennenbefestigung wurde ein massiver Holzpfahl mit einer zweifach im rechten Winkel versteiften Holzkonstruktion verwendet, da die Standard-Vermessungsstative nicht auf eine Höhe von 2.5 m ausgezogen werden können. Die Anordnung der Testmessung sieht wie folgt aus (Fig. 2):

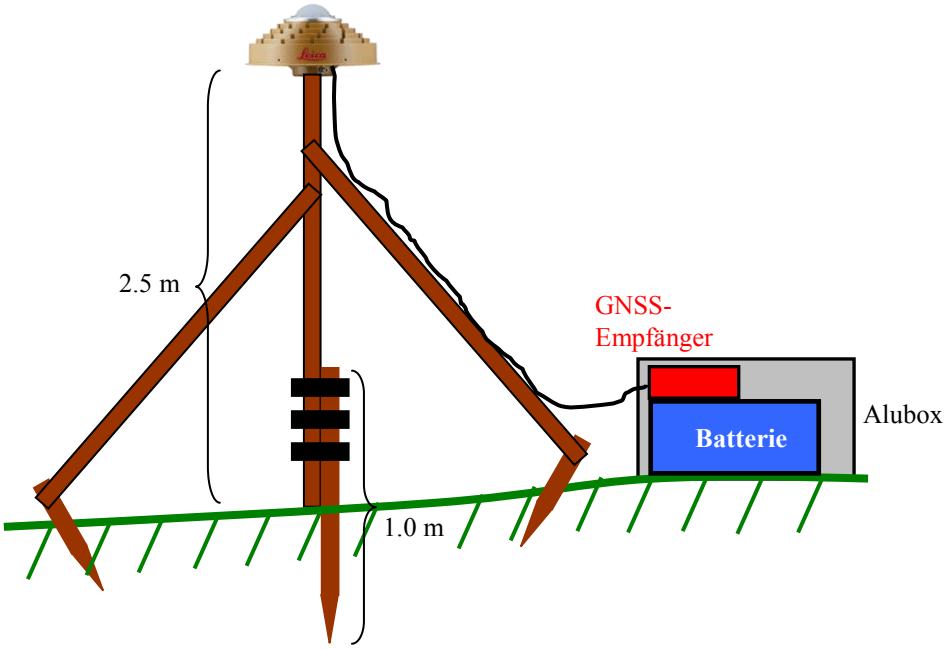

Fig. 2: Aufbau der Testmessungsinstallation

Gleichzeitig mit der Testmessung wurde mit einem Tachymeter das Horizontprofil (auch „Skyplot“ genannt) aufgenommen, damit festgehalten ist, bei welchen Richtungen welche Abdeckungen gegenüber dem Horizont bestehen (Fig. 3).

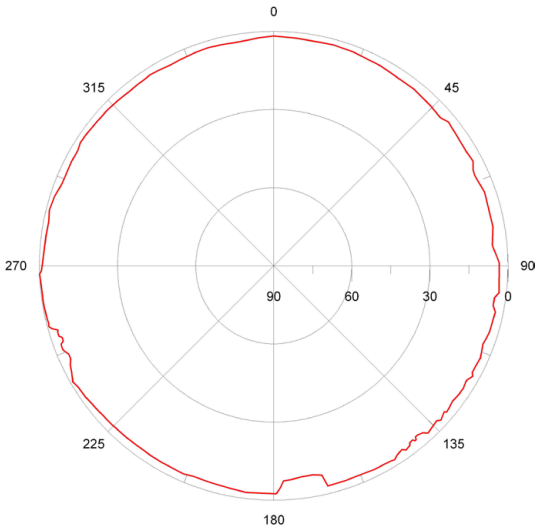

Fig. 3: Beispiel eines Horizontprofils (Skyplot)

Die Auswertung der Testmessungen erfolgte mit der Software *Leica SpiderQC*. Damit können Qualitätsparameter wie „Vollständigkeit der Daten“, „Signal-/Rausch-Verhältnis“, „Cycle Slips“ und „Code Multipath“ analysiert und tabellarisch sowie grafisch dargestellt werden.

In einer ersten Auswertung wurden die Daten mit einer **Elevation >10°** untersucht, um die Qualitätsparameter wie Datenvollständigkeit (*data completeness*) usw. ohne den Einfluss von allfälligen Horizontabdeckungen zu untersuchen.

In einer zweiten, rein grafischen Darstellung der Qualitätsparameter wurden die Rohdaten bis auf den **0°-Horizont** untersucht und die daraus entstehenden Skyplots mit dem Horizontprofil überlagert. Dabei erkennt man, bei welchen minimalen Elevationen überhaupt noch Signale empfangen werden. Bei dieser grafischen Auswertung liegen keine zahlenmässig klar definierten bzw. vereinbarten Grenzwerte vor, sondern sie soll einen visuellen Überblick über alle empfangenen Signale bzw. deren Qualitätsparameter geben und vor allem den Einfluss des Horizonts zeigen.

Die *SpiderQC*-Auswertungen sowie die GNSS-Standortqualität wurden in Form eines Kurzberichts dokumentiert. Die folgenden 2 Grafikbeispiele illustrieren die grafischen Auswertungen dieser Testmessungen am Beispiel der Station Murgenthal (Fig. 4 und 5).

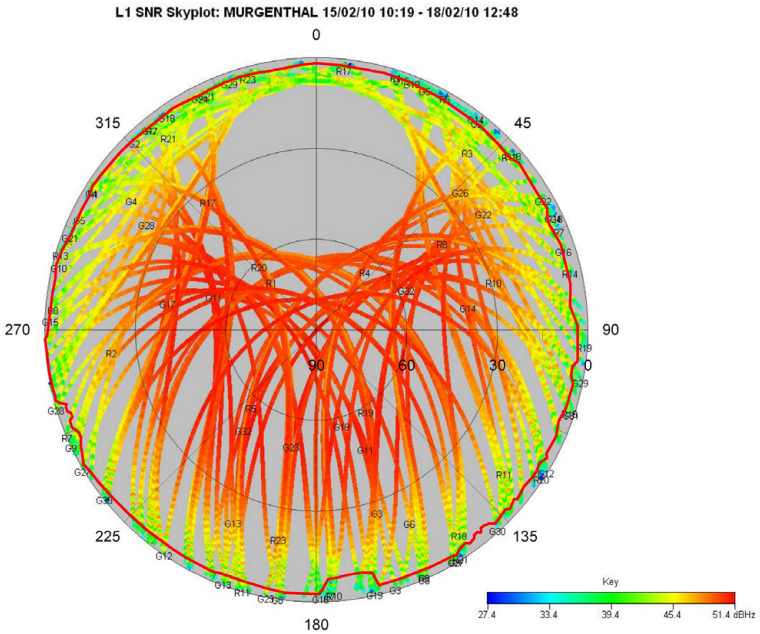

Fig. 4: Beispiel grafische Auswertung: Signal-Rausch-Verhältnis auf der L1-Phase mit überlagertem Horizontprofil

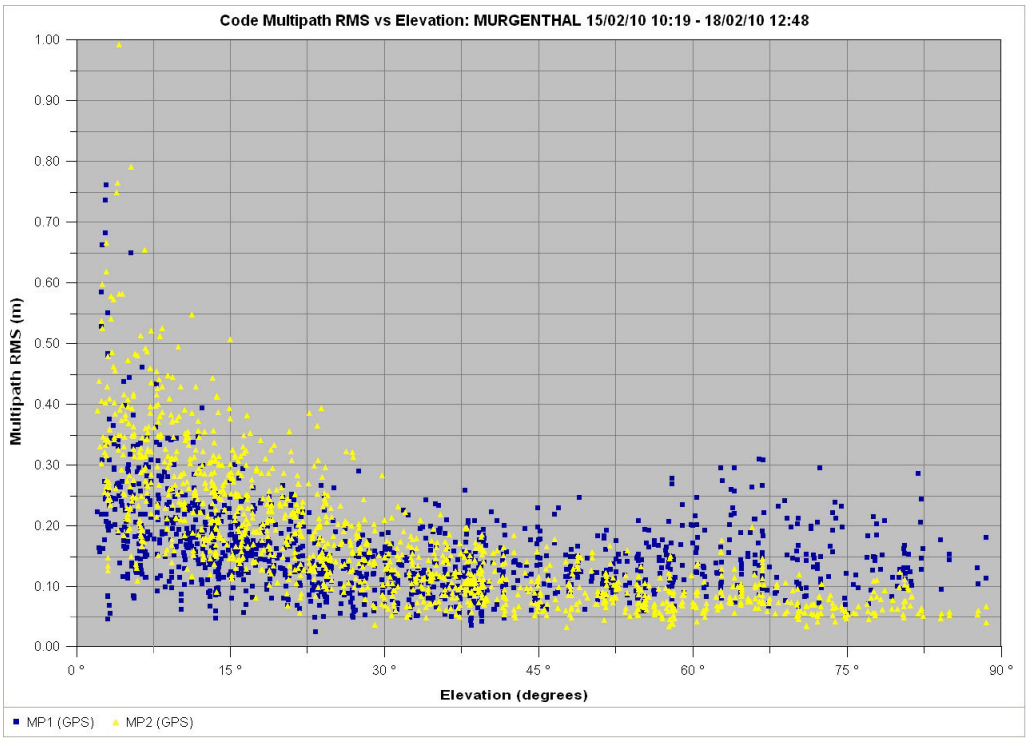

Fig. 5: Beispiel grafische Auswertung: Code Multipath vs. Elevation für GPS

2.1.3 Untergrund

Bevor die GNSS-Testmessungen durchgeführt wurden, wurde jeder potentielle Standort mittels Rammsondierungen untersucht.

Diese Art der Sondierung ermöglicht eine Aussage über die Setzungsanfälligkeit des Untergrundes bzw. ab welcher Tiefe ausreichend tragfähiger Untergrund ansteht. Anhand der einzelnen Erkundungsergebnisse wurde über die Fundamentausführung im Detail (tiefes Flachfundament, Einsatz von Mikrobohrpfählen, etc.) entschieden.

2.2 Standortsicherung

Aufgrund der Kontaktaufnahme mit den Grundstückseigentümern in der Phase der GNSS-Standortauswahl konnten nicht alle GNSS-Stationen gleichzeitig verwirklicht werden.

Erst wenn ein Standort hinsichtlich Geologie und Testmessung als „geeignet“ dokumentiert wurde, erfolgte die Einreichung eines Baugesuchs.alle elf eingereichten Baugesuche wurden fristgerecht erteilt.

2.3 Messpfeiler bzw. Gittermast

Der Messpfeiler wurde so konzipiert, dass eine maximale Stabilität (Beibehaltung einer fixen Position in drei Dimensionen) gewährleistet und negative Bodeneigenschaften eliminiert werden. Der Oberboden ist hauptsächlich für die Bewegung des Pfeilers verantwortlich (z.B. Schwindung und Ausbreitung des Bodens anhand des Wassergehalts, Frostaufbruch, Bodenverwitterung) – tiefe Fundamente und/oder Verankerungen erhöhen die Stabilität des Pfeilers. In

der Ausschreibungsphase wurde von zwei möglichen Pfeilermonumenten ausgegangen: Betonpfeiler auf einem Fundament für das Lockergestein und Gittermasten auf anstehendem, oberflächlichem Fels.

Aufgrund der guten Erfahrungen der swisstopo wurden anstelle von Betonpfeilern generell Gittermasten auf massiven Betonfundamenten verwirklicht. Beim Bau der Messpfeiler wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- Die elastischen/periodischen Bewegungen und Schwankungen des Antennenreferenzpunkts (ARP) gegenüber lokalen Referenzpunkten sollten maximal 1 mm in der Lage und 2 mm in der Höhe betragen (bspw. in Folge Temperatur- oder Windeinflüssen).
- Die plastischen, langzeitlichen lokalen Bewegungen sollten mittels Rückversicherungsmessungen überprüft werden und dürfen maximal 0.5 mm/Jahr in Lage und Höhe betragen (bspw. Verkippung des Fundamentes).
- Die Messpfeiler sollten ca. 2.5 m hoch sein.
- Der Bereich unterhalb der Antenne bzw. der Montageplatte sollte möglichst reflexionsfrei ausgeführt werden.
- Dem Langzeitschutz gegen Witterungsschäden sollte besondere Beachtung geschenkt werden.

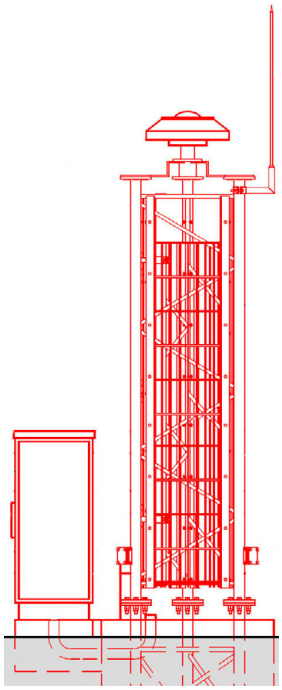

Fig. 6: Technische Zeichnung des Gittermasten

2.4 Fundation / Mikro-Bohrpfähle

Der Schwerpunkt des Messpfeilers muss sich unterhalb der Frostlinie befinden. Der Gittermast sollte deshalb auf einem Flachfundament und einem darauf aufgesetzten Sockel bis an die Geländeoberfläche stehen. Je nach Tragfähigkeit des Untergrunds (erkundet mittels Rammsondierungen) kam eine der beiden folgenden Fundationen zum Einsatz:

A) Falls bis in maximal 4 m Tiefe eine tragfähige Bodenschicht angetroffen wurde (wie bei 3 Stationen der Fall), wurde das 2 x 2 x 0.3 m grosse Flachfundament direkt darauf aufgesetzt (Fig. 7). Darauf wurde ein 1 x 1 m grosser Mastsockel zentrisch aufgesetzt, damit dieser Sockel schliesslich ca. 10 cm über der Geländeoberkante zu liegen kam. Flachfundament und Sockel wurden mit Bewehrungsstahl gemäss Fig. 7 ausgestattet, geschalt und dann betoniert. Vor dem Ausgiessen des Sockels mit Beton wurde auf den obersten ca. 70 cm der 80 cm hohe Mastfuss mit der Bewehrung verbunden. Auf diesen Mastfuss mit 3 Abschlussflanschen, der möglichst horizontal einbetoniert wird, wurde nach dem Aushärten des Betons der eigentliche Gittermast aufgesetzt.

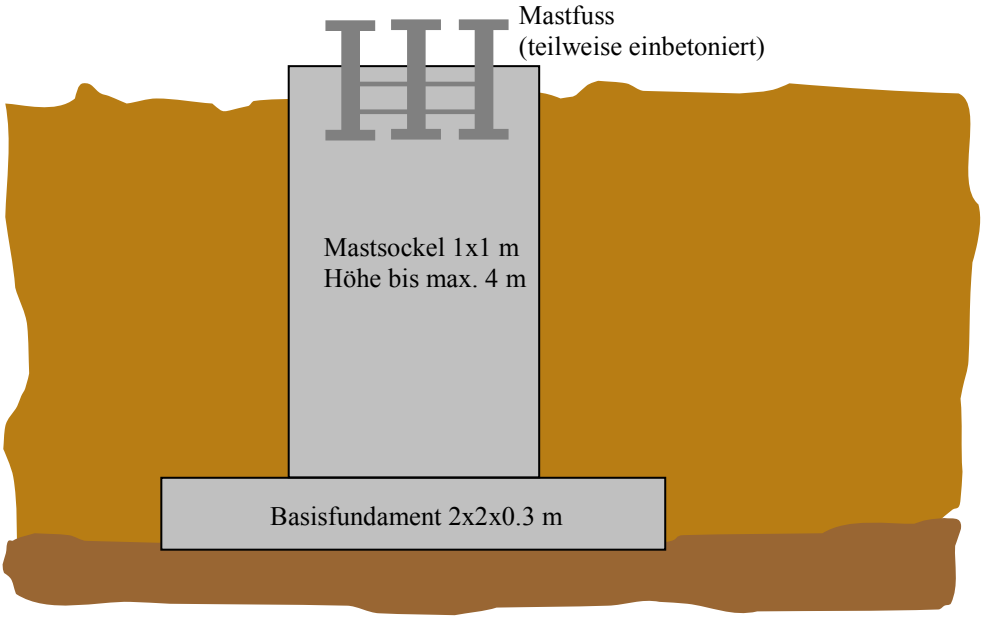

Fig. 7: Skizze Fundament ohne Bohrpfähle

B) Falls bis in einer Tiefe von maximal 15 m eine tragfähige Bodenschicht angetroffen wurde (wie bei den restlichen 8 Stationen der Fall), wurden ab der Geländeoberfläche 3 Mikro-Bohrpfähle in einem Abstand von ca. je 1.35 m und einer Auslenkung von 10° aus der Vertikalen in den Boden gebohrt, sodass jeder Bohrpfahl mindestens 3 m in die tragfähige Bodenschicht eingebunden werden konnte (Fig. 8). Es wurden sogenannte Anker-Verpressbohrpfähle mit 32 mm Durchmesser ausgeführt. Nach dem Aushärten der Anker wurde in der Regel eine Baugrube mit einer Endtiefe von ca. 1.5 m rund um die Bohrpfähle ausgehoben und damit die obersten 1.5 m der Bohrpfähle freigelegt. Die Bohrpfähle wurden bis auf ca. 20 cm abgeschnitten und eine Abschlussplatte von ca. 10 x 10 cm aufgeschraubt. Diese Platte wurde mit der Bewehrung des Flachfundaments verbunden und dann wurde analog zum Fall A) ein Flachfundament von 2 x 2 m Grundfläche und einer Höhe von 30 cm betoniert. Darauf aufgesetzt folgte wiederum der 1 x 1 m grosse Mastsockel bis an die Oberfläche mit eingesetztem Mastfuss des Gittermastes.

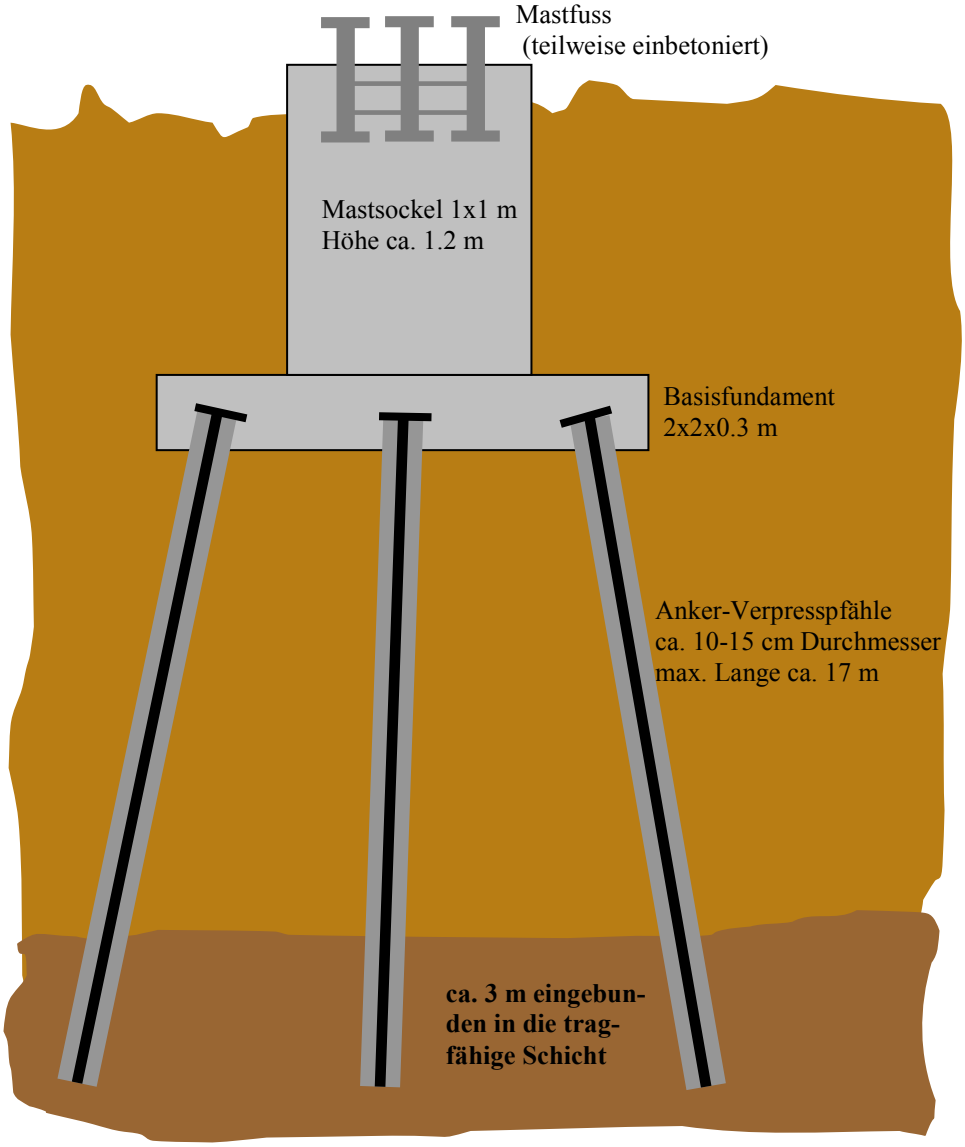

Fig. 8: Skizze Fundament mit 3 eingebundenen Bohrpfählen

2.5 Rückversicherung des Antennenreferenzpunktes

Folgende Anforderungen bezüglich der Rückversicherung des Antennenreferenzpunkts (ARP) wurden gestellt:

Die Antennenreferenzpunkte sollten zur Kontrolle der Stabilität vermessungstechnisch rückversichert werden, um lokale Bewegungen überwachen und allenfalls eine mögliche Rekonstruktion sicherstellen zu können. Ebenfalls überprüft und dokumentiert werden sollen lokale, langzeitliche Bewegungen (Lage und Höhe). Zur Rückversicherung sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Auswahl von mindestens 3 stabilen, stationierbaren Punkten im Abstand von 2 bis 50 m vom ARP, die eine Einmessung auf einfache Weise erlauben.

- Die Rückmarken sollten gleichmässig verteilt sein (Azimut und Distanz); sie sollen (insbesondere im Lockergestein) bautechnisch unabhängig resp. getrennt vom Fundament der Messstation sein; evtl. sind weitere externe, nicht stationierbare Rückmarken sinnvoll, um die erforderliche Genauigkeit der lokalen Einmessung garantieren zu können.
- Mindestens zwei der Rückmarken sollten Visuren zu mindestens zwei stabilen, langfristigen und gut anzielbaren Fernzielen ermöglichen.
- Die Rückmarken sind dauerhaft in festem Grund (Mauern, Fels, Gebäude etc.) mit Bolzen zu versichern.
- Bei Gittermasten ist zusätzlich das Zentrum unterhalb des ARP zu vermarken.
- Die lokalen Einmessungen sind mit hoher Zuverlässigkeit und Submillimetergenauigkeit durchzuführen (relativer mittlerer Fehler der Koordinaten bezüglich den Rückmarken < 0.5 mm in der Lage und der Höhe).
- Dokumentation der Einmessung/Wiederholungsmessungen.
- Durchführung der Einmessung/Wiederholungsmessungen:
    - Einmessung der Rückversicherungen in Lage und Höhe mit Azimuten, Höhenwinkeln, Distanzen bzw. Spannmassen, Nivellements;
    - Abgabe aller Roh- und aufbereiteten Messdaten in digitaler Form;
    - Dokumentation der Instrumentennummern, Gerätekonstanten und -parameter (Additionskonstanten, Massstabsfaktoren);
    - Abgabe der Ausgleichungsrechnung, Deformationsanalyse, Fehlerrechnung und Resultate der lokalen Koordinaten in CH1903+/LV95 (inkl. Ausweis für relative mittlere Lage- und Höhenfehler oder Messunsicherheit);
    - Berechnung und grafische Darstellung der Koordinaten-/Höhendifferenzen resp. Verschiebungen und Begründung ihrer Ursachen.

Diese Anforderungen konten nur teilweise erfüllt werden. So musste auf stationierbare Rückversicherungsmarken verzichtet werden, da bei keinem Standort innerhalb von 50 m rund um die Station fester Untergrund (Fels) vorliegt. Es wurde deshalb das folgende Messkonzept für die Rückversicherungsmessungen angewendet:

- Lagekontrolle (Horizontalverschiebung) des Fundaments mittels Tachymetrie;
- Kontrolle von Verkippung und Setzung des Fundaments mittels Präzisionsnivellement;
- Kontrolle der Maststabilität / Rückversicherung ARP mittels Tachymetrie.

Zur Lagekontrolle wurden nicht stationierbare Punkte in einigen hundert Meter Entfernung eingemessen. Dies erlaubte die Lagekontrolle mit einer Genauigkeit von ± 1 mm (Tab. 1). Die restlichen Bewegungen (Verkippung, Setzung, Maststabilität) liessen sich präziser einmessen. Trotzdem konnten die gestellten Genauigkeitsanforderungen an die Wiederholungsmessungen von ± 0.5 mm nicht vollständig erfüllt werden.

Tab. 1: Messgenauigkeiten der Rückversicherungsmessungen:

Messaufgabe	**Messmethode**	**Einfache Standard-abweichung [mm]**
Lagekontrolle des Fundaments	Tachymetrie	± 1
Setzung des Fundaments	Präzisionsnivellement	± 0.5
Verkippung des Fundaments	Präzisionsnivellement	< 0.5
Maststabilität / Rückversicherung ARP	Tachymetrie	± 0.5

2.5.1 Lagekontrolle Fundament

Falls in einer Entfernung von maximal 300 bis 350 m in verschiedenen Richtungen Gebäude, andere feste Einrichtungen oder anstehender Fels vorgefunden wurden, zu denen vom GNSS-Standort eine Sichtverbindung existiert, dann konnten an diesen Strukturen Rückversicherungspunkte materialisiert werden, die eine **tachymetrische Lagekontrolle des Fundaments** im Bereich von ± 1 mm erlauben. Damit diese hohe Genauigkeit erreicht werden konnte, mussten ideale meteorologische Bedingungen vorherrschen, d.h. optimalerweise bedeckter Himmel und gleichmässige Temperatur entlang dem jeweiligen Messstrahl „Instrument – Prisma bei Rückversicherung“.

Da die Aussage einer Horizontalbewegung aus 2 Messkampagnen (Null- und Folgemessung) abgeleitet wird, muss fehlertheoretisch die Einzelmessgenauigkeit (einfache Standardabweichung) von ± 1 mm mit dem Faktor $\sqrt{2}$ multipliziert werden, was eine Genauigkeit von ± 1.4 mm ergibt. Vermessungstechnisch statistisch signifikant sind Deformationen aber erst, falls diese den 2.5fachen Wert der Messgenauigkeit übersteigen. D.h. mit dieser Messmethode kann eine Horizontalbewegung des Fundaments erst bei der Überschreitung von ± 3.5 mm statistisch signifikant nachgewiesen werden. Ein allfälliger Trend einer Verschiebung kann allerdings bereits im Bereich von wenigen Millimetern erkannt werden, wenn mehrere Folgemessungen eine Entwicklung zeigen, die in Summe noch nicht den statistisch signifikanten Wert von ± 3.5 mm erreicht.

2.5.2 Kontrolle Verkippung und Setzung des Fundaments

Mittels einem **Präzisionsnivellement** zwischen dem Fundament und idealerweise 2 Fixpunktgruppen in unmittelbarer Umgebung wurde die **Höhenlage und Verkippung des Fundaments** überprüft.

Durch das Präzisionsnivellement (bei einer mittleren Nivellementstrecke von 500 m) konnte die relative Höhe bzw. Höhenänderung des Fundaments bezüglich der Nullmessung mit einer Genauigkeit von ± 2 mm (2.5-fache Standardabweichung) kontrolliert werden.

Zusätzlich konnte durch die Analyse der relativen Höhenunterschiede von den vier Eckpunkten des Fundaments beobachtet werden, ob sich das Fundament einseitig setzt bzw. kippt.

2.5.3 Maststabilität / Rückversicherung ARP

Zusätzlich wurde der ARP zentrisch auf dem Fundament vermarkt. Bei der Tachymetermessung der Lagekontrolle des Fundaments wurde des Weiteren noch ein Messpunkt bzw. Prisma beim Mastkopf eingemessen, welches zentrisch unter der Antenne bzw. dem ARP montiert wurde. Durch die Analyse der 3D-Beziehung dieses Punkts bezüglich der 4 Punkte beim Mastfundament konnte abgeleitet werden, ob sich der Mast bezüglich dem Fundament auf eine Seite kippt oder stabil bleibt.

2.5.4 Messfrequenz der Rückversicherungsmessungen

Derzeit werden halbjährliche Messungen der Rückversicherungspunkte durchgeführt; diese finden zur Erfassung von klimatischen Extremen im Winter sowie im Sommer statt.

Bei grösseren Deformationen oder bei auftretenden Unsicherheiten bei den Kontrollmessungen wird die Messfrequenz erhöht, damit die Eigenbewegungen der Station klar von grossräumigen Bewegungen unterschieden werden kann.

2.6 GNSS-Empfänger

Generell wurde qualitativ hochwertiges und langlebiges Equipment eingesetzt, um die angestrebten Messgenauigkeiten zu erbringen und die Wartungskosten zu minimieren. Die eingesetzte Hardware (Antenne, Empfänger) muss von den internationalen Institutionen (IAG-EUREF, UNAVCO, EPN, NGS) für den Einsatz als CORS-GNSS-Stationen anerkannt sein. Die Empfänger erfüllen folgende minimale Anforderungen:

Beobachtungsleistungen:

- Geodätische GNSS-Empfänger mit genügend Kanälen, für den Empfang aller geforderten Signale von allen sichtbaren Satelliten (all-in-view im Sinne Messung aller theoretisch sichtbaren Satelliten);
- Identische Empfänger an allen Stationen;
- Datenrate (sampling) variabel wählbar zwischen mind. 10 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 5 s, 15 s, 30 s;
- GNSS Empfangs- und Verarbeitungsfähigkeiten:
    - GPS: L1 C/A, L1 und L2 P, L1 and L2 Phasen (auch unter AS), L2C, L5, IOC/FOC;
    - GLONASS: L1 C/A Code, L1 P and L2 P, L1 und L2 Phasen;
    - Vorbereitet für GALILEO und COMPASS ohne Antennenwechsel.
- Leistungsdaten:
    - Aufzeichnung der vollen Trägerphasen für alle (auch künftige) Wellenlängen, mit und ohne anti-spoofing;
    - Mind. 99% der erwarteten resp. theoretisch empfangbaren Daten empfangen;
    - Messgenauigkeiten (rms) an der Trägerphase auf L1/L2 im unteren Submillimeterbereich;
    - Möglichst geringes Rauschen.

Andere Features und Spezifikationen:

- Die Empfänger sind mit ausreichendem lokalem Zwischenspeicher bzw. mit einem internen Ringbuffer für die Speicherung der Messdaten zu versehen;
- Datenaufnahme (cut off) bei all-in-view tracking bis ≥ 0° über dem Horizont;
- Synchronisierung der aktuellen Momentaufnahme mit der wahren GPS-Zeit innerhalb ± 1 ms und externer Zeit-Input;
- Korrekte Produktion von RINEX-Files (korrekte und vollständige Header-Informationen, alle verlangten Messungen zu allen sichtbaren Satelliten, verlangte Datenrate) als Stunden- und als Tagesfiles; alternativ kann/muss die Erzeugung der RINEX-Files auch in der Betriebs- und Datenzentrale möglich sein;
- Kein Glätten der Beobachtungen durch Empfänger resp. dieses kann ausgeschaltet werden;
- Fähigkeit zur Aufzeichnung von Daten von Neigungssensoren (tilt);
- Abschaltbarer Code- und Trägerwellen-, bzw. Multipath-Filter;
- Schnittstellen:
    - Log- und Outputfiles in mehreren Formaten gleichzeitig;
    - Raw, RINEX, BINEX, RTCM SC104, etc.;
- Steuerungs- und Kontroll-Interface:
    - Empfänger/Server mit Internet-Konnektivität (http und FTP) über TCP;
    - Konfiguration über Netz durch Upload von Konfigurationsfiles;
    - Alternativer Zugriff auf den Empfänger-Speicher über FTP/Internet für den manuellen Datendownload bei allen Datenraten (bis 10 Hz);
- Energieverbrauch 3-10 W;
- Energiemanagement: Fähigkeit für Fernsteuerung und Neustart in derselben Konfiguration nach Stromausfall;
- Umweltbedingungen: Robustheit gegen Hitze/Kälte (-40 bis +60 °C) und Langlebigkeit (MTBF ~60‘000 Stunden).

Aufgrund dieser Spezifikationen wurden Messgeräte der Leica Geosystems AG ausgewählt. Es handelt sich dabei um die **Leica GRX1200+** GNSS-Serie.

Bei einer Vielzahl von Landesvermessungsämtern weltweit sind hunderte derartige GNSS-Referenzempfänger für CORS-Netze erfolgreich in Betrieb. Die Leica Geosystems betreibt dazu für Europa eine Webseite, auf der sämtliche Leica-GNSS-Referenzstationen aufgeführt sind, deren Daten bezogen werden können: http://smartnet.leica-geosystems.eu

Fig. 9: Leica GRX1200+ GNSS-Empfänger

Der Empfänger wird mit einer 8 GByte-CompactFlash-Karte als lokales Speichermedium betrieben. Auf dieser Karte werden einerseits die stündlich in die Datenzentrale übertragenen 30 Sekunden-Daten gespeichert und 7 Tage vorgehalten. Diese 7 Tage benötigen mit den aktuell empfangbaren Satelliten ca. 20 MByte Speicherplatz. Der Ring-Buffer-Speicher mit den 10 Hz-Daten, der 10 Tage Daten abdeckt, reserviert auf der Karte den dafür notwendigen Speicherplatz von 5.2 GByte.

2.7 GNSS-Antennen und Montageplatten

Antenne:

- Bei allen Stationen kommen baugleiche Chokering-Antennen zum Einsatz;
- Die Antennen wurden individuell und absolut gemäss den Richtlinien der EPN und CORS kalibriert;
- GNSS Empfangsfähigkeiten:
  - GPS: L1 C/A, L1 und L2 P, L1 and L2 Phasen (auch unter AS), L2C, L5, IOC/FOC;
  - GLONASS: L1 C/A Code, L1 P and L2 P, L1 und L2 Phasen;
  - Vorbereitet für GALILEO und COMPASS ohne Antennenwechsel;
- Es werden keine Radomes (Schutzhauben) verwendet;
- Ein absolutes Kalibrationsmodell für die Variation der Phasenzentren (IGS Antennenmodell) ist vorhanden.

Montageplatten:

- Zwischen der Antenne und dem Messpfeiler ist eine Montageplatte installiert, um die Antenne in den 3 Dimensionen ausrichten zu können;
- Nach der festen Montage weisen die Antennen höchstens ein Spiel von 0.1 mm an der Antennenspitze auf;
- Der Antennenreferenzpunkt (ARP) kann genau eingemessen werden (Rückversicherungen), ohne dass die Antenne demontiert werden muss;
- Die Exzentrizität (Hochwert, Rechtswert, Höhe) der primären Vermarkung zum ARP wurde vermessen und in den Stationsprotokollen und den Dateiköpfen der RINEX-Files mit einer Genauigkeit im Submillimeterbereich dokumentiert;
- Die Antennen wurden nivelliert und mittels der Nordreferenzmarkierung nach geografisch Nord ausgerichtet;
- Das Antennenkabel ist möglichst kurz, um Signalverluste zu minimieren.

Als GNSS-CORS-Antennen wurde die **AR25-Chokering-Antennen** von Leica Geosystems gewählt. Diese Antenne unterstützt alle aktuellen und in naher Zukunft geplanten Signale der Satellitensysteme GPS, GLONASS, Galileo und Compass.

Die Leica AR25 wurde für viele Anwendungen entwickelt, insbesondere für Permanent-Referenzstationen, Monitoring, Seismik sowie wissenschaftliche und atmosphärische Beobachtungen. Sie ist eine robuste Hochleistungsantenne mit sehr guten Voraussetzungen für eine lange Lebensdauer [2].

2.7.1 Absolutkalibrierung der GNSS-Antennen

Aus technischen Grenzen ergeben sich beim Bau der Antennen Abweichungen zwischen dem geometrischen Zentrum (inkl. Höhenbezugspunkt) und dem elektrischen Empfangszentrum einer Antenne. Diese Abweichungen lassen sich durch Kalibrierverfahren bestimmen und in Form eines Korrekturdatensatzes bei der Auswertung berücksichtigen. Jede Antenne weist bauarttypische aber auch individuelle Abweichungen auf [1].

Der genaue Punkt, von welchem die Position mit der Auswertung von GNSS-Basislinien bestimmt wird, ist das Phasenzentrum der GNSS-Antenne. Dieses ist weder ein physischer Punkt noch stabil. Für jede Antenne verändert sich das Phasenzentrum in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Satelliten-Signals auf die Antenne. Die Variation des Phasenzentrums ist somit von der Elevation und vom Azimut der Satelliten abhängig. Durch Echtzeitkalibrierungsprozeduren werden die Phasenvariationen von GNSS-Antennen azimut- und elevationsabhängig mit Submillimetergenauigkeit bestimmt. Die Angaben beziehen sich auf den Antennenreferenzpunkt (ARP) (Fig. 10).

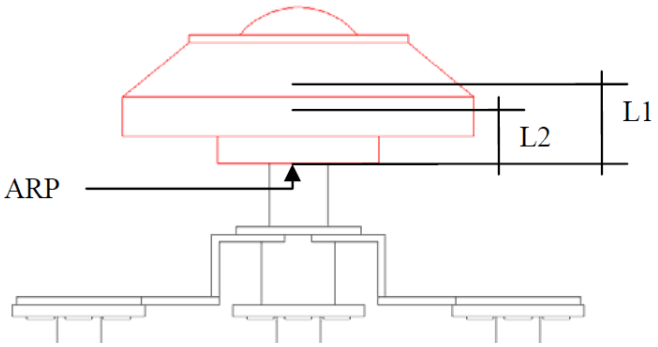

Fig. 10: Chokering-Antenne mit ARP und Offset der Phasenzentren L1 und L2

Sämtliche Antennen wurden bei der Firma Geo++ in Deutschland absolut kalibriert.

Die mit diesem Verfahren ermittelten Korrekturwerte je Antenne werden in die Auswertesoftware der swisstopo eingelesen und jeweils automatisch berücksichtigt.

2.7.2 Definition der Antennenhöhen

Analog zu allen AGNES-Stationen werden generell keine Antennenhöhen verwendet bzw. als Antennenhöhe 0.000 m definiert. Der sogenannte Antennenreferenzpunkt in der Höhe (Fig. 11) befindet sich an der Unterkante der eigentlichen Antenne Ein generisches Antennenmodell ist vorhanden, wird jedoch nicht verwendet. Die beiden vertikalen Phasenzentrums-Offsets L1 und L2 (Fig. 10) werden bei der Absolutkalibrierung (siehe Kap. 2.7.1) individuell bestimmt und bei der Auswertung berücksichtigt.

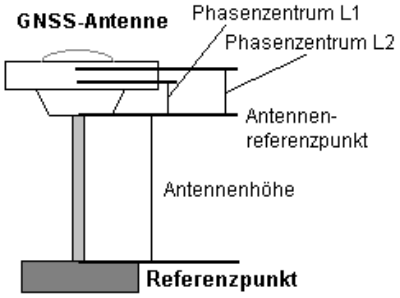

Fig. 11: Definition der Antennenhöhe

2.7.3 Radomes

Wie bei durchwegs allen AGNES-Stationen – die u.a. auch für den realtime-swipos®-Positionierungsdienst verwendet werden – wird auf Radomes verzichtet, da man damit ganzjährig ein Qualitätsgewinn mit einem etwas besseren Signal-Rauschverhältnis und geringeren Phasenzentrumsvariationen erzielt. Die im Schweizer Mittelland gelegentlichen Schneeablagerungen führen allerdings zu Fehlern von mehreren Zentimetern, die im Zuge der Routine-Auswertung korrigiert werden müssen.

2.8 Energieversorgung

Die Energieversorgung der Stationen wurde durch einen Netzanschluss (230 V) sichergestellt; einige wenige Stationen sind mittels Solar-Modul ausgerüstet. Bei Stromausfall steht eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) bereit.

2.8.1 Netzanschluss

Die Energieversorgung wurde von unten durch das Fundament in die Kabine eingeführt. Für den Betrieb wurde ein Anschluss 230 V 1x13 A verwirklicht. Das GNSS-Equipment und das DSL-Modem werden über eine USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung) gespiesen. In der Kabine wurde ein Frostwächter installiert. Die Temperatur in der Kabine darf aufgrund der USV-Batterien 0°C nicht unterschreiten.

2.8.2 Solarstromversorgung

Falls die Energieversorgung ab dem lokalen Stromnetz aufgrund zu langer Distanzen zu unverhältnismässigen Installationskosten geführt hätte, wurde eine Solarstromversorgung installiert.

Die Befestigung der Solarpanels wurde auf dem Fundament der Kabine neben dem Gittermast vorgenommen. Damit besteht keine direkte bautechnische Verbindung zum Gittermast und allfällige Schwingungen aufgrund von Windkräften übertragen sich nicht auf den Mast bzw. die GNSS-Messungen.

Neben dem Panel braucht es noch einen Solarregler, einen Spannungsregler und 12 V-Batterien. Die Batterien sind frostsicher (solange sie mindestens teilweise geladen sind), womit keine Heizung in der Kabine notwendig ist, wie das beim Netzanschluss und zugehöriger USV der Fall ist. Die Dimensionierung der Anlage musste für jeden Standort individuell berechnet werden.

2.9 Blitz- und Spannungsschutz

Der Empfänger, die Antennen, das Antennenkabel sowie weitere Hardware (Energieversorgung etc.) sind vor Spannungsspitzen und Blitzschlag (EMP) geschützt. Ein entsprechender Überspannungsschutz (SPD) wurde installiert.

Am Gittermast wurde ein Blitzfangstab installiert. Ein Erdband ist in das Fundament bzw. in die Baugrube eingelegt und mit dem Mast und der Kabine jeweils mittels eines Kupferdrahts verbunden. Die Armierung und die Mikropfähle sind leitend verbunden. Die Antennenkabel wurden nach Eintritt in die Kabine an ein Blitzschutzmodul angeschlossen. Dieses Modul leitet Überspannungen ab und schützt damit den GNSS-Empfänger vor einer Überspannung. Allfällige Überspannungen von der Netzzuleitung werden in der USV abgeleitet. Die USV ist mit der Kabinenerde leitend verbunden.

2.10 Einfriedung und Kabine

Der Zaun soll wie alle übrigen Installationen möglichst keine Beeinflussung (u.a. Multipath-Effekte) auf die Messungen verursachen; entsprechend wurden Zaun-Abstand und -Materialisierung gewählt.

Um unnötige Reflexionen zu vermeiden und trotzdem einen Anfahrschutz zu gewährleisten, wurde ein Holzlattenzaun um die Antennenanlage gebaut.

Der Zaun wurde angrenzend an das Mastfundament (aber nicht verbunden) installiert. Der Abstand zum Fundament ist situationsbedingt und wurde im Grundsatz auf das Minimum beschränkt.

Das gesamte Equipment ist in einer doppelwandigen Kabine untergebracht. Sie bietet somit maximalen Schutz für Komponenten wie Umwelteinflüsse. Diese Kabine wurde für den Einsatz im Aussenbereich konzipiert und bietet solide, verwindungsfeste Profiltechnik. In jeder Kabine ist ein Lüfter installiert, der mit einem Thermostat gekoppelt ist und automatisch die Lüftung einschaltet. In der Kabine befindet sich ausserdem noch eine kleine Elektroheizung. Diese ist mit einem eigenen Thermostat ausgestattet und heizt die Kabine bei einer Unterschreitung der Kabineninnentemperatur von 0°C. Die Kabine ist auf einem Betonsockel aufgesetzt, der mit dem Mastfundament verbunden ist (siehe Fig. 12).

Fig. 12: Foto der Kabine von aussen

2.11 Datentransfer und Kommunikation

Der Datentransfer und die Kommunikation erfüllen folgende Anforderungen:

- Alle CORS-GNSS-Messstationen sind mittels einer angemessen dimensionierten Datenleitung und einem DSL-Router / GSM-Modem an das Internet angeschlossen;
- Es erfolgt ein stündlicher Datentransfer der Rohdaten zur Betriebs- und Datenzentrale;
- Alle GNSS-Empfänger können vom Büro aus mittels eines Web-Managers via Internet konfiguriert werden.

2.11.1 Kommunikation

Die Kommunikation zwischen dem Rechenzentrum (Betriebs- und Datenzentrale) und den GNSS-Empfängern im Feld erfolgt via Internet (TCP/IP). Wenn möglich, wurde ein Festnetzanschluss via DSL realisiert. Falls ein Festnetzanschluss aus technischen Gründen zu aufwändig war, wurde das GNSS-Equipment mittels einer GSM-Anbindung an das Rechenzentrum angeschlossen (bei 3 Stationen der Fall).

Aufgrund der kleinen Datenmenge des stündlichen Datentransfers (< 100 KByte) ist die GSM-Mobilfunktechnik trotz geringerer Datenübertragungsrate (GPRS: 50 kBit/s) für den Datentransfer geeignet und hat mit einer Ausnahme keine Nachteile gegenüber einem DSL-Internetanschluss. Die Ausnahme betrifft den Download der 10 Hz-Daten im Falle eines Erdbebens, der via GSM-Mobiltechnologie aufgrund der grossen Datenmenge (ca. 70 MByte pro Datei) kaum möglich ist. In diesem Fall müssen die Daten vor Ort auf einen Datenspeicher kopiert werden.

2.11.2 GSM-Fernsteuerung

Es kann vorkommen, dass die elektronischen Geräte vor Ort (GNSS-Empfänger, DSL- oder GSM-Modem) nicht mehr ansprechbar sind und mittels eines Stromunterbruchs neu gestartet werden müssen. Mit Hilfe einer GSM-Fernsteuerung ist es möglich, vom Büro aus per Anruf oder SMS den Strom zu unterbrechen und damit die Geräte wieder neu zu starten.

2.12 Datenmanagement und Netzmonitoring

Die Betriebs- und Datenzentrale

- sammelt die Messdaten von allen Stationen in Form von stündlichen und täglichen RINEX-Files;
- erstellt und verwaltet pro Messstation die stündliche und täglichen RINEX-Files (jeweils mit 30-Sekunden Daten);
- prüft deren Qualität und Vollständigkeit und archiviert die Daten im RINEX-Format (inkl. Backup);
- stellt die RINEX-Stundenfiles am Ende jeder vollen Stunde (plus ca. 1 Minute) für den Download auf dem FTP-Server bereit. Tagesfiles werden innerhalb von einer Stunde nach Mitternacht auf dem FTP-Server bereitgestellt;
- betreibt ein Netzmonitoring- und Qualitätssicherungsprogramm, das die Datenqualität verifiziert und Pre-Processing-Probleme aufdeckt;

- stellt die Software für Fernwartungsmöglichkeiten und manuellen Datendownload zur Verfügung;
- alarmiert, wenn die Basislängen-Differenzen 3 cm in der Lage und/oder 6 cm in der Höhe überschreiten;
- ist mit einer automatischen Alarm-Funktion (Watchdog) bei Strom- und Kommunikationsproblemen ausgestattet;
- führt automatisch Statistiken durch und dokumentiert diese.

Nachträgliche Veränderungen der konstruktiven Verhältnisse und der elektromagnetischen Einflüsse sind grundsätzlich nicht erlaubt, um durch lange kontinuierliche Zeitreihen eine ausreichende Datenbasis für ein umfassendes Stationsmonitoring bereitstellen zu können.

2.12.1 Rechenzentrum und Software

Das Rechenzentrum befindet sich in einem Serverraum eines Rechenzentrums. Dieses professionell geführte Rechenzentrum verfügt über alle State-of-the-art-Sicherheitsvorkehrungen wie gesicherten Zutrittsschutz, Brand- und Überschwemmungsschutz, Schutz vor Stromausfall, Backups.

Auch bei der Software wurde auf Produkte der Leica Geosystems gesetzt, welche optimal auf den Betrieb der Leica GNSS-Empfänger abgestimmt sind. Als Netzmonitoring-Software wird ***Leica GNSS Spider*** eingesetzt. *Leica GNSS Spider* ist eine integrierte Softwarelösung zur zentralen Kontrolle und zum Betrieb einzelner Referenzstationen oder Netzwerke von Stationen. Die Software erfüllt alle oben beschriebenen Anforderungen und kann sehr vielfältig konfiguriert werden. Für die Qualitätskontrolle der Daten wird ***Leica SpiderQC*** eingesetzt.

2.12.2 Datenlogging GNSS-Empfänger

Standardmässig werden von den GNSS-Empfängern folgende Daten aufgezeichnet:

GPS: L1- und L2-Phasen, C1- und C2-Codes
GLONASS: L1- und L2-Phasen, C1-Codes

Derzeit sind noch keine Galileo-Signale empfangbar (Stand März 2013). Das L5-Signal wird nur von einem GPS-Satellit ausgesendet, der zurzeit allerdings als „unhealthy“ deklariert wird. GLONASS-Satelliten senden keinen C2-Code aus und bei den GPS-Satelliten sind auch nur 8 in der Lage, dieses Signal auszusenden.

Für die Datenspeicherung auf dem GNSS-Empfänger kommt ein sogenanntes Doppel-Logging zur Anwendung:

- Beim **Primary Logging** erfolgt alle **30 Sekunden** eine Messung und die Daten werden auf eine 8 GByte grosse Compact-Flash-Karte (CF-Karte) geschrieben. Diese Daten werden **stündlich** vom Spider-Server automatisch abgerufen und zentral verwaltet, verarbeitet sowie anschliessend der swisstopo via FTP-Server geliefert.
- Das sekundäre Logging wird als **Ring Buffer** bezeichnet und die Messfrequenz liegt bei **10 Hz**. Die Daten werden auf derselben CF-Karte wie die Primary Logging-Daten gespeichert. Das Datenvolumen von 10 Tagen beträgt ca. 5.2 GByte. Diese Daten werden **nicht** in das Rechenzentrum übertragen. Die Daten, welche im Falle eines Erdbebens co-

seismische Auswertungen erlauben, werden 10 Tage vor Ort gespeichert und dann automatisch überschrieben.

2.12.3 Erstellung RINEX-Daten

Beim Primary Logging werden die GNSS-Daten im binären Leica-Datenformat (*.MDB) auf dem GNSS-Empfänger gespeichert. Die dabei erzeugten Dateien enthalten immer die Messungen einer ganzen Stunde. Auf dem Spider-Server werden die heruntergeladenen Stundendaten zuerst in ein temporäres Verzeichnis geschrieben. Durch die Definition von sogenannten „File Products“ definiert der Anwender, was mit diesen Rohdaten geschehen soll. Für jede Messstation wurden folgende Produkte definiert.

- „Stundendaten“: 30 Sekunden-Messungen einer gesamten Stunde. Die automatische Erstellung erfolgt jeweils zur vollen Stunde.
- „Tagesdaten“: 30 Sekunden-Messungen eines gesamten Tages. Die automatische Erstellung erfolgt jeweils um Mitternacht (UTC- Zeitzone).
- MDB-Daten: Kopie der Rohdaten, nur für interne Zwecke.
- Event-Log: Logfiles der Software *Leica GNSS Spider*, nur für interne Zwecke.

Die Stunden- und Tagesdaten liegen sowohl als komprimierte (UNIX- und HATANAKA-Kompression) als auch als unkomprimierte RINEX-Dateien vor. Die komprimierten RINEX-Daten werden der swisstopo geliefert, die unkomprimierten RINEX-Daten werden für die Software *Leica SpiderQC* (Qualitätskontrolle) benötigt. Jedes RINEX-Produkt besteht aus 3 Dateien: GNSS-Messungen, GPS-Navigationsdatei, GLONASS-Navigationsdatei.

2.12.4 Datenlieferung

Nachdem die Stunden- und Tagesdaten im komprimierten RINEX-Format erstellt wurden, erfolgt ein automatischer Transfer der Dateien auf den FTP-Server. Von dort aus überträgt die swisstopo die Daten automatisch stündlich auf ihren eigenen Server.

Die Lieferung der Daten wird stündlich überprüft. Inhalt dieser Prüfung ist, ob und in welchem Lieferfriststatus die Daten auf dem FTP-Server vorhanden sind.

2.12.5 Qualitätskontrolle

Die Qualitätskontrolle umfasst folgende Tests:

- Termingerechte Lieferung der Daten (Data Delivery)
- Vollständigkeit der Daten (Data Completeness)
- Qualität der Daten (Cycle Slips, Signal to Noise Ratio, Code Multipath RMS)
- Archivierung der Daten

Ausser den beiden Tests für die termingerechte Lieferung und der Archivierung der Daten werden die Tests mit der Software ***Leica SpiderQC*** durchgeführt. Die Software analysiert automatisch jede Stunde (bei Stundendaten) bzw. täglich (bei Tagesdaten) die neusten RINEX-Daten bezüglich vordefinierter Grenzwerte (vgl. Tab. 2) und erstellt ein ausführliches Protokoll im HTML-Format. Diese Protokolle sowie die Resultate aller oben aufgeführten Tests werden auf den Web-Server kopiert und stehen auf dem Kundenportal zur Verfügung (vgl. Kap. 2.12.7).

Tab. 2: Grenzwerte Qualitätsparameter

Qualitätsparameter	Allgemein	GPS	GLONASS
Data Delivery < 9 Tage	> 99%		
Data Completeness	> 99%		
Data Completeness		> 99%	> 99%
Cycle Slips		< 0.1 %	< 0.1 %
Signal to Noise Ration		> 38 dBHz	> 38 dBHz
Code Mulipath		< 0.5 m	< 0.5 m

2.12.6 Backup

Folgende Daten werden stündlich auf ein Backup-Laufwerk kopiert:

- Stundendaten: komprimierte RINEX-Daten und QC-Protokolle
- Tagesdaten: komprimierte RINEX-Daten und QC-Protokolle

Diese Daten werden täglich auf einem externen Backup-Server gespiegelt und wöchentlich auf ein Backup-Tape kopiert.

2.12.7 Kundenportal

BSF Swissphoto AG stellt ein webbasiertes Kundenportal zur Verfügung. Dieses Portal ist eine zentrale Plattform für alle projektrelevanten Informationen:

- Übersicht des aktuellen Zustands
- Standortbezogene Informationen
- Qualitätskontrolle
- PNAC-Grafiken der swisstopo
- Log-Bücher
- Dokumente
- Kontakte

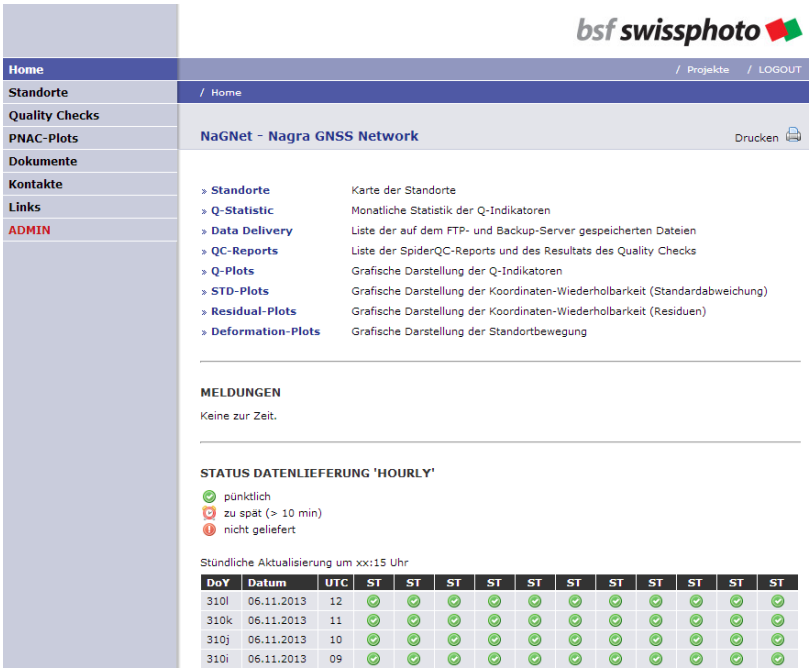

Fig. 13: Startseite Kundenportal

2.12.8 Auswertungen der swisstopo

Die swisstopo wertet die stündlich eintreffenden RINEX-Daten automatisch aus, indem jeweils aus den letzten 8 Stunden eine Stundenlösung berechnet wird. Diese Auswertung erfolgt jedoch nur unter folgenden Bedingungen automatisch:

- Die Daten einer Station müssen spätestens 10 Minuten nach der vollen Stunde auf dem FTP verfügbar sein und
- von den letzten 8 Stunden müssen mindestens die letzte sowie 5 weitere Stunden für die Auswertung verfügbar sein. Falls z.B. nur die aktuellste Stunde fehlt, wird keine Stundenauswertung durchgeführt.

Die Berechnung genauer Koordinaten jeder Station mit den Tagesdaten erfolgt mit einer Verzögerung zwischen 14 und 21 Tagen, da für die Berechnung die präzisen Satellitenbahndaten notwendig sind. Dies bedeutet, dass bei einem Unterbruch der Kommunikation zwischen GNSS-Empfänger und Rechenzentrum bis zu 14 Tage Zeit bleiben, die vor Ort registrierten Daten nachträglich auszuwerten und der swisstopo zur Verfügung zu stellen. Unmittelbar vor der definitiven Auswertung überprüft das System der swisstopo, ob auf allen FTP-Servern, von denen ihre Systeme automatisch RINEX-Daten beziehen, neuere bzw. grössere Dateien verfügbar sind. Falls dies der Fall ist, werden diese Daten automatisch heruntergeladen und für die Auswertung verwendet.

2.13 Stationswarte

Vor Ort wurden Stationswarte unter Vertrag genommen, die in unmittelbarer Nähe der Station wohnen. Die Aufgaben der Stationswarte sind wie folgt:

- Monatliche Überprüfung der GNSS-Station;
- Meldung von allfälligen Schwierigkeiten;
- Periodischer Unterhalt der GNSS-Station und des Schutzzaunes hinsichtlich Beeinträchtigung durch Grasbewuchs oder ähnlichem;
- Nach Bedarf Umgebungspflege der Sträucher und Bäume, sofern der freie Horizont beeinträchtigt wird.

2.14 Inbetriebnahme

Der Aufbau des GNSS-Netzes begann im Sommer 2010 mit dem Bau der ersten Stationen und dauerte rund zwei Jahre. Die Inbetriebnahme des GNSS-Netzes erfolgte in Etappen mit der Fertigstellung der einzelnen GNSS-Stationen. Tabelle 3 gibt einen Überblick ab wann für jede GNSS-Station die Wochenlösungen im PNAC-Auswertezentrum berechnet wurden. Das vollständige GNSS Netz steht seit Juni 2012 zur Verfügung.

Tab. 3: Verfügbarkeit der ersten NaGNet Wochenlösung pro Station

Station	**Beginn Wochenlösungen**
MRGT	05.10.2010
HGGL	05.10.2010
STDL	03.11.2010
SLTB	22.02.2011
BZBG	22.02.2011
HCHS	03.05.2011
LFNB	03.05.2011
TRLK	03.05.2011
BCKL	14.06.2011
WLCH	08.03.2012
THYN	29.06.2012

3 Betrieb und Wartung

3.1 Betrieb des Netzes

Der Betrieb des CORS-GNSS Netzes und der Messstationen erfolgt automatisch:

- Die RINEX-Files werden auf einem FTP-Server zur Verfügung gestellt.
- Die Logfiles der einzelnen Messstationen und andere Metadaten werden gemäss der CORS- und EPN-Richtlinien strukturiert und bewirtschaftet und auf dem FTP-Server zur Verfügung gestellt.
- Bei Problemen (z.B. Strom- und Kommunikationsunterbrüche; Übersteigung von tolerierbaren Messgenauigkeiten), wird das Wartungspersonal sofort alarmiert.
- Es wird eine Datenarchivierung bzw. -sicherung der RINEX-Daten und eine redundant gelagerte Backupsicherung mit regelmässigen Kontrollen durchgeführt.

Um sicherzustellen, dass

- die GNSS-Empfänger, der Rechner für die Prozessierung und die dafür notwendigen Software-Module korrekt laufen,
- die Qualität der Daten den Anforderungen entspricht und
- die Standorte keine signifikanten Verschiebungen aufweisen,

werden

- Funktionstests,
- Qualitätskontrollen und
- Basislinienberechnungen

durchgeführt. Sollte einer dieser Tests negativ ausfallen, so erfolgt eine interne Meldung via E-Mail und/oder SMS. Die zuständige Person analysiert das Problem und leitet die notwendigen Schritte ein, um die Störung zu beheben.

Das Backup erfolgt auf verschiedenen Stufen:

- stündlich: Download der RINEX-Daten durch die swisstopo. Archiviert werden nur die Tagesdaten.
- stündlich: Kopieren der RINEX-Daten und QC-Protokolle auf das Backup-Laufwerk.
- täglich: Sichern des Backup-Laufwerks auf einen externen Backup-Server (Harddisk).
- wöchentlich: Sichern des Backup-Servers auf Band.

3.2 Service-Abonnement für Hard- und Software

Es wurde ein Service-Abonnement mit einer Dauer von 5 Jahren für die Hard- und Software der CORS-GNSS Stationen bzw. des Netzes abgeschlossen. Das Abonnement beinhaltet folgende Punkte:

- Alle benötigten Software-Updates bzw. Upgrades für ein eigenständiges, vollständiges und funktionsfähiges CORS-GNSS Netz mit Schwerpunkt auf die geodynamische bzw. geodätische Beobachtung.
- Alle Hardwareteile und -komponenten für ein vollständiges und funktionsfähiges CORS-GNSS Netz.

3.3 Wartung

Die grundlegendsten Kontroll- und Unterhaltstätigkeiten auf der Messstation werden durch einen Stationswart durchgeführt. Generell werden pro CORS-GNSS Station jährlich mehrere Begehungen und Überprüfungen durch das Wartungsteam geplant bzw. durchgeführt.

Über sämtliche Begehungen und Stationsüberprüfungen wird ein Logbuch geführt. Alle Problemmeldungen und dessen Behebungen bzw. Massnahmen sind ebenfalls im Logbuch dokumentiert.

4 Literaturverzeichnis

[1] http://www.geopp.de/index.php?bereich=5&kategorie=34& artikel=97&seite=2 (Stand 31.03.2013)

[2] Leica Geosystems-Prospekt „Leica AR25 GNSS Chokering-Antenne für alle Satelliten-signale“, Ausgabe 2010

Anhang: Nagra CORS-GNSS - Richtlinie zur Erkundung von Stationsstandorten

nagra

NAGRA CORS-GNSS – Richtlinie zur Erkundung von Stationsstandorten

Ein wichtiger Gesichtspunkt für die Auswahl einer Lokalität für eine permanente GNSS Station stellt der offene Himmelkreis - möglichst ohne Hindernisse grösser als 3 Grad aus der Horizontalen (Inklination) - dar. Es ist zu bedenken, dass grosse und dichte Baumgruppen in unmittelbarer Nähe des Standorts zu Signalverlusten beitragen können wie dies auch Gebäude verursachen. Berücksichtigen Sie die Auswirkungen von Blätterwerk falls die Erkundung in der lauffreien Zeit durchgeführt wird. Falls junge, den Horizont gegenwärtig nicht beeinträchtigende Bäume vorhanden sind, so ist deren Grössenwachstum über die Jahre zu beobachten/abzuschätzen. Flache Oberflächen (vertikal oder horizontal) in der Nähe der Antenne können ernsthafte Mehrweg-Interferenzen verursachen. Als Faustregel soll folgendes gelten: ein eingeschossiges Gebäude sollte mindestens 20 m, grössere Gebäude entsprechend weiter entfernt von der Antenne sein. Folgende potentielle Verursacher von permanenten Reflexionen können Maschendrahtzaun, metallische Objekte in der Nachbarschaft sowie von temporären Reflexionen auf Grund von parkierenden Fahrzeugen, passierende Fahrzeuge, Baugerüste usw. sein.

Um die Richtung und Distanz zu den Hindernissen festzustellen, sollte für jede Station ein Hindernis-Diagramm aufgenommen werden. Dieses soll auch potentielle Quellen für Radio Interferenzen wie Radio- und Fernsehsender, Mikrowellen-Emitter oder andere Sendeanlagen wie Richtstrahl einschliessen. Idealerweise sollten GNSS Stationen minimal 1km von derartigen Infrastrukturen entfernt aufgestellt werden.

Wetterbedingungen sind generell kein Faktor der Standortwahl weil die Automation das vordringliche Ziel darstellt und Unterhaltsbesuche in Schönwetterperioden vorgenommen werden können. Das lokale Klima wird hauptsächlich die Auswahl von Ausrüstung und Standards diktieren. Beispielsweise muss in einer schneereichen Umgebung die Schneeansammlung auf der Antenne berücksichtigt werden und allenfalls der Einsatz eines Radomes in Betracht gezogen werden.

Ebenfalls in Betracht zu ziehen ist der einfache Zugang und die klar geregelte Erlaubnis zum Zutritt seitens des Eigentümers und des Besitzers. Dabei müssen allfällige Zugangsrechte von Dritten ebenfalls geregelt werden. Namen und Nummern der Kontaktpersonen müssen gut dokumentiert werden.

Stationsuntergrund

- Lokale Geologie – die Nähe zu Verwerfungen, Rutschgebieten, Flächensenkungen, Senkungen/Hebungen infolge Grundwasserspiegel etc.;
- Fels-Fundationen werden vorgezogen;
- Standorte im Erdreich oder in Schwemmgebieten verlangen eine extensivere Versicherung.

Horizontabdeckung

- Faustregel: minimiere Hindernisse über 3 Grad.

Standortsicherheit, Eigentum und Zugangsberechtigung

- Der Standort muss sicher sein, nicht im Baugebiet und über die lange Zeit der Nutzung zugänglich

Multipath/Mehrweg Einflüsse

- Faustregel: der Standort sollte möglichst 20m von reflektierenden Quellen entfernt sein
- Antennenhöhe: generell ca. 1.3 - 1.8 m ab Boden

Radio Frequenz Interferenzen (RFI)

- Faustregel: Standort sollte mindestens 1 km von einem starken Sender (Mikrowellen, Radio und Fernsehen) entfernt sein, unabhängig von deren Betriebsfrequenz;
- Der Sende- und Empfangsbereich von Richtstrahlantennen ist zu meiden.

Gemeinsame Standortnutzung mit andern Instrumenten

- Die Standortinfrastruktur (Standort, Elektrizität und Kommunikation) kann gegebenenfalls mit anderen Messstationen (z.B. Meteo- oder seismischen Stationen) gemeinsam genutzt werden. Dies verlangt jedoch eine entsprechende Koordination mit deren Betreiber.