Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Analyse und Weiterentwicklung «traditioneller» Messkonzepte für Stauanlagen

Abbildung 1: Staumauer Nalps (Axpo Power AG 2020)

Motivation

Stauanlagen sind als besonders kritische Infrastruktur eingestuft, da sie von grosser wirtschaftlicher Bedeutung sind und ein grosses Schadenpotential aufweisen. Daher ist eine Überwachung notwendig, um frühzeitig Abweichungen des Bauwerkszustandes und –verhaltens vom Normalzustand zu erkennen.
In der Schweiz sind der Bau und Betrieb einer Stauanlage mit Gesetzen und Verordnungen festgehalten, dazu gehört auch die geodätische Überwachung. (Wieser et al. 2020: 437)

Ein Grossteil der Staumauern in der Schweiz wurden vor dem Jahr 1970 gebaut. Häufig stammt das Messkonzept auch aus dieser Zeit und wurde nicht überarbeitet.

Bestehendes Messkonzept

Messanlage Staumauer Nalps

- Besteht aus dem Aussennetz sowie Polygonzügen im Inneren der Mauer
- Hat 6 Kontrollgänge in der Staumauer, in 3 davon ein wird Polygonzug gemessen
- Hat einige Lote (Schwimm- und Hängelote), die teilweise durch mehrere Kontrollgänge hindurchgehen

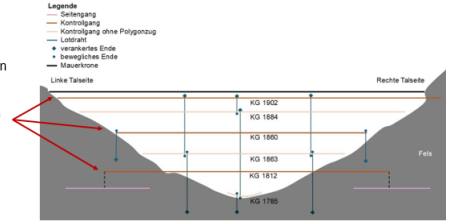

Abbildung 3: Schematische Skizze vom Längsschnitt der Staumauer basierend auf dem Plan «Geodätische Deformationsmessung Kontrollgänge – Höhenänderung» (Steiner 2020 Beilage 7)

Ansätze zur Verbesserung

Erweiterung der Messanlage
- Polygonzüge um die Anschlussvisuren auf die anderen Fixpunkte des Kontrollgangs erweitern
- Polygonzug erweitern – zusätzliche Punkte zwischen den bestehenden Punkten, die als Verknüpfungspunkte oder als Stationspunkte dienen
- Polygonzug neu anordnen – ausgehend von den Fixpunkten die Punkte neu anordnen

Anpassung der Messanordnung
- Stationierung auf den Fixpunkten
- Hin- und Rückmessung vom Polygonzug
- Nur einfache Messung vom Polygonzug
- Einfache Messung vom Polygonzug und wichtige Stationen ein zweites Mal messen

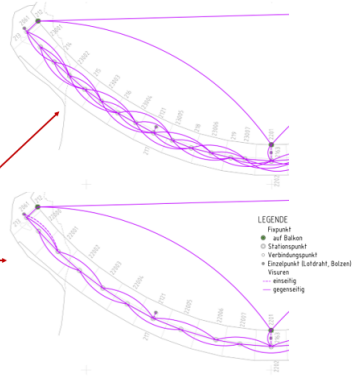

Abbildung 5: Ausschnitt vom Netzplan vom erweiterten Polygonzug mit zusätzlichen Punkten als Stationspunkte oben, Netzplan der neuen Punktanordnung vom Polygonzug unten

Variantenvergleich I

Variante	Genauigkeit (mm)	Zuverlässigkeit (mm)	Messzeit (h:min)	Materialkosten (CHF)
Bestehendes Messkonzept, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.2-0.5	0.4-1.1	5:00	-
Polygonzug erweitern, Stationspunkt, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.1-0.2	0.2-0.5	10:40	6902.40
Polygonzug erweitern, Verknüpfungspunkte, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.2-0.3	0.3-0.5	6:00	1774.10
Polygonzug erweitern, Verknüpfungspunkte, einfache Messung, wichtige Stationen 2x	0.2-0.4	0.4-0.8	4:00	1774.10
Polygonzug erweitern, Verknüpfungspunkte, nur einfache Messung, Teilnetzausgleich	0.2-0.5	0.6-1.2	3:00	1774.10
Polygonzug neu anordnen, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.2-0.3	0.3-0.5	8:00	5331.30
Polygonzug neu anordnen, einfache Messung, wichtige Stationen 2x, Teilnetzausgleich	0.2-0.4	0.3-0.8	5:00	5331.30
Polygonzug neu anordnen, einfache Messung, wichtige Stationen 2x, Vermessungskreisel	0.2-0.3	0.3-0.7	8:00 + Referenzmessung (ca. 4:00)	5331.30 + Anschaffungskosten Vermessungskreisel (ca. 300'000)

Tabelle 1: Vergleich der Varianten I

Vorgeschlagenes Messkonzept

Messanlage
- Lagerung auf den Fixpunkten vom Aussennetz
- Polygonzüge um die Anschlussvisuren auf die anderen Fixpunkte des Kontrollgangs erweitern
- Polygonzug erweitern – zusätzliche Punkte zwischen den bestehenden Punkten, die als Verknüpfungspunkte dienen

Messung
- Stationierung auf den Fixpunkten
- Einfache durchgängige Messung vom Polygonzug und wichtige Stationen ein zweites unabhängiges Mal messen

Auswertung
- Gesamtnetzausgleich

Instrumenten- und Technologieauswahl
- Tachymeter

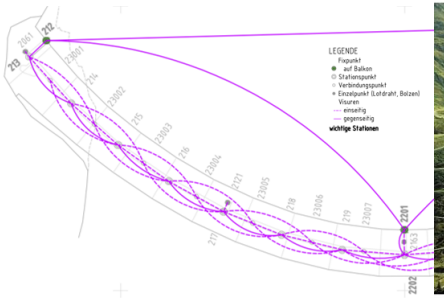

Abbildung 7: Ausschnitt vom Netzplan vom erweiterten Polygonzug mit zusätzlichen Punkten als Verknüpfungspunkte und die wichtigen Stationen in dicker Schrift

Abbildung 8: Lai da Nalps mit der Staumauer Nalps (Axpo Holding AG 2022)

Fazit

- Analyse zeigt klare Schwachstellen im bestehenden Messkonzept
- Erweiterter und neu angeordneter Polygonzug verbessert die Genauigkeit sowie die Zuverlässigkeit
- Gesamtnetzausgleichung statt Teilnetzausgleich der einzelnen Kontrollgänge erhöht die Aussagekraft der Verschiebungen
- Teure Technologien wie Laserscanning oder Vermessungskreisel sind wirtschaftlich nicht sinnvoll, da sie keine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit bringen
- Vorgeschlagenes Messkonzept bietet das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis
- Übertragung auf andere Bogenstaumauern möglich, sofern die Messanlage ähnlich ist

Abbildung 1: Staumauer Nalps (Axpo Power AG 2020)

Motivation

Stauanlagen sind als besonders kritische Infrastruktur eingestuft, da sie von grosser wirtschaftlicher Bedeutung sind und ein grosses Schadenpotential aufweisen. Daher ist eine Überwachung notwendig, um frühzeitig Abweichungen des Bauwerkszustandes und –verhaltens vom Normalzustand zu erkennen.
In der Schweiz sind der Bau und Betrieb einer Stauanlage mit Gesetzen und Verordnungen fest-gehalten, dazu gehört auch die geodätische Über-wachung. (Wieser et al. 2020: 437)

Ein Grossteil der Staumauern in der Schweiz wurden vor dem Jahr 1970 gebaut. Häufig stammt das Messkonzept auch aus dieser Zeit und wurde nicht überarbeitet.

Abbildung 2: Links ein Kontrollgang im Inneren der Mauer mit einem Betonsockel als Punktversicherung (Axpo Power AG 2019), oben rechts Pfeiler mit Dreifuss, Prismaträger und Prisma (Axpo Power AG 2024a) unten rechts ein Punkt beim Fenster (Axpo Power AG 2024b)

Ausgangslage & Ziel

- Als Case Studie dient die Bogenstaumauer Nalps bei Sedrun (GR), die im Jahr 1962 fertiggestellt wurde.
- Die Form der Kontrollgänge schränken die Überwachungsmessungen ein. Sie sind schmal und niedrig und die Krümmung schränkt die Sichtweite ein. Dazu ist die Verbindung zum übergeordneten Aussennetz nur durch wenige Punkte gegeben.
- Die Versicherung der Punkte erfolgt mit einem Betonsockel, Pfeiler oder einer Metallkonsole.

➢ Ziel ist die Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit in der Lage der geodätischen Überwachungsmessung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit.

Bestehendes Messkonzept

Messanlage Staumauer Nalps

- Besteht aus dem Aussennetz sowie Polygonzügen im Inneren der Mauer
- Hat 6 Kontrollgänge in der Staumauer, in 3 davon ein wird Polygonzug gemessen
- Hat einige Lote (Schwimm- und Hängelote), die teilweise durch mehrere Kontrollgänge hindurchgehen

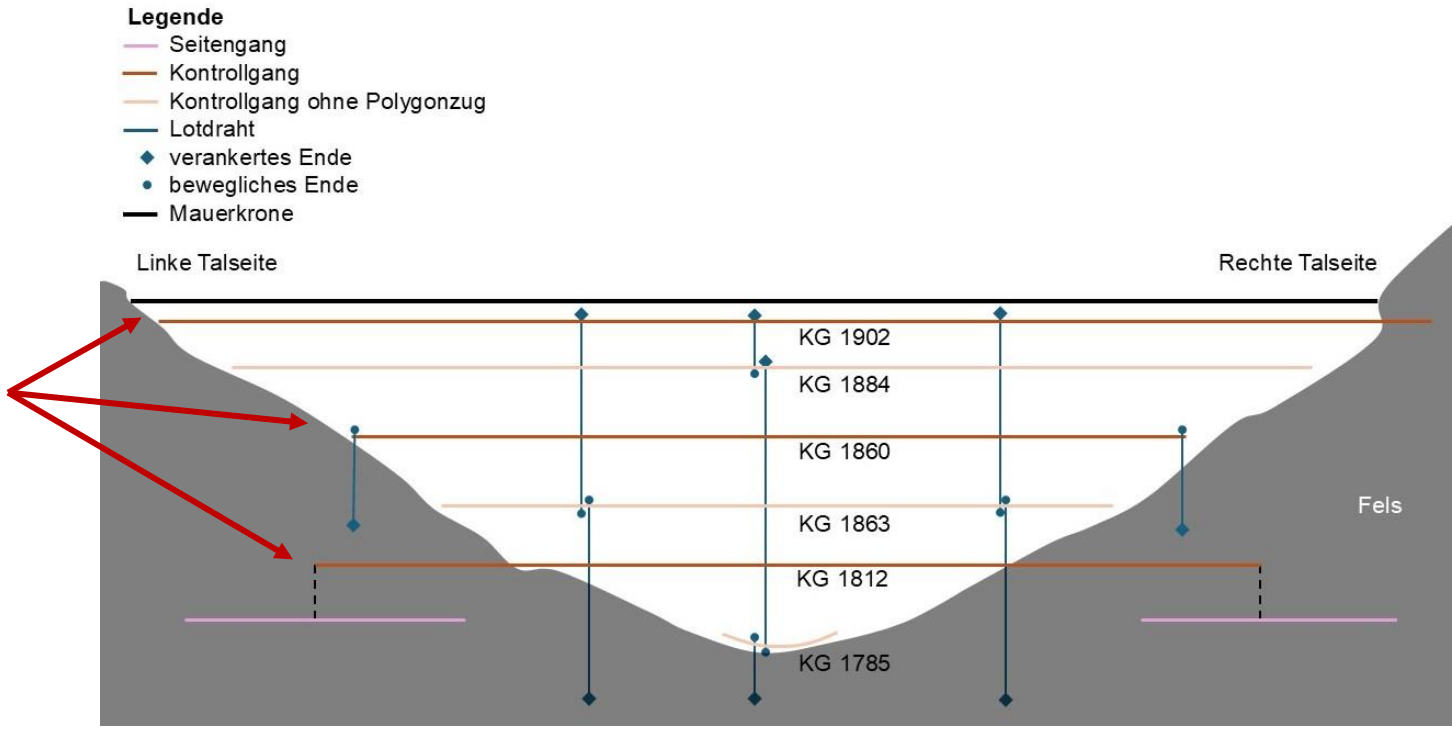

Abbildung 3: Schematische Skizze vom Längsschnitt der Staumauer basierend auf dem Plan «Geodätische Deformationsmessung Kontrollgänge – Höhenänderung» (Steiner 2020 Beilage 7)

© IGEO FHNW

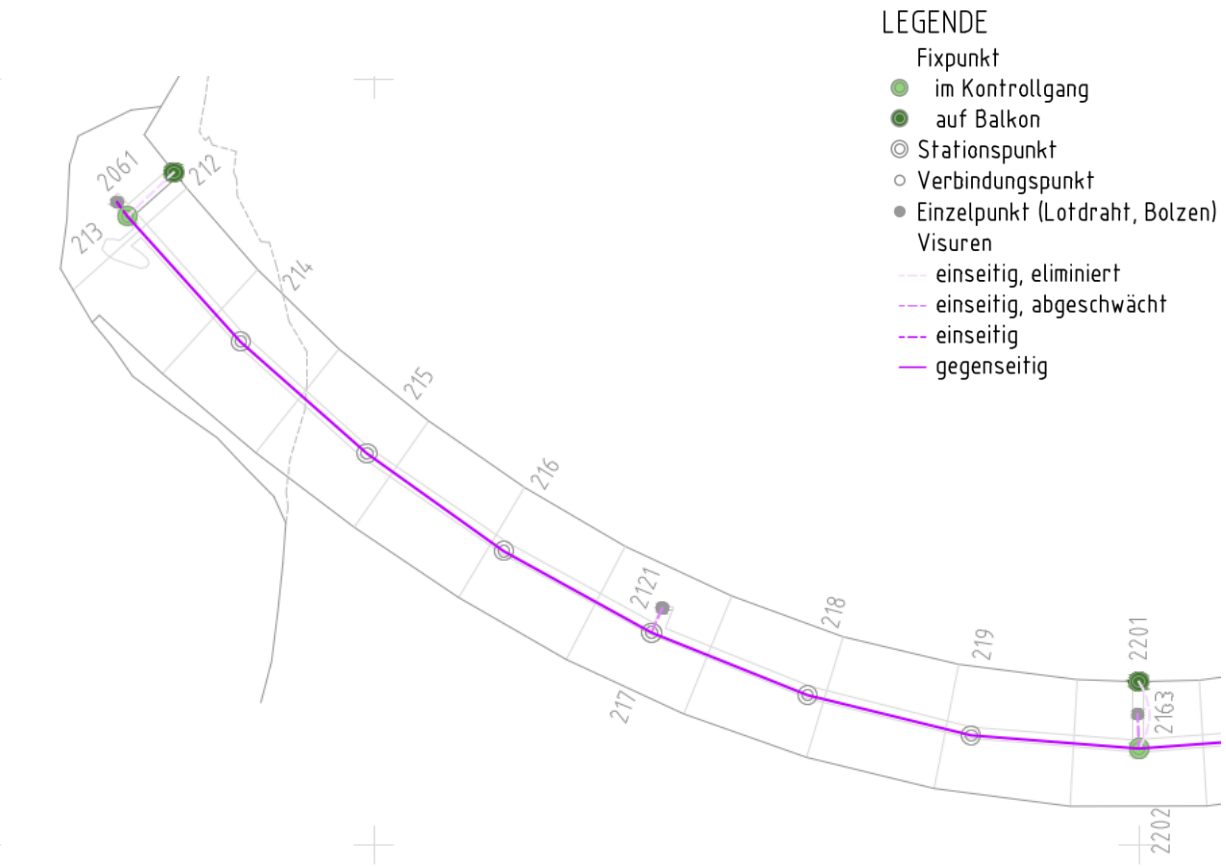

Abbildung 4: Ausschnitt vom Netzplan des bestehenden Messkonzept vom KG 1860

Bestehendes Messkonzept

Am Beispiel vom Kontrollgang KG 1860

Messanlage

- Fixpunkte an der Mauer sowie im Kontrollgang werden vom Aussennetz gemessen und bestimmt

Messung

- Einfacher Polygonzug ohne übergreifende Messungen
- Hin- und Rückmessung mit zwei unabhängigen Stationen pro Punkt

Auswertung

- Teilnetzausgleich – jeder Kontrollgang einzeln
- jeder Kontrollgang auf den eigenen Fixpunkten gelagert

Schwachstellen

- Keine übergreifenden Messungen
- Nicht Berücksichtigung der kurzen Visuren jeweils zwischen dem Fixpunkt im Kontrollgang und dem auf dem Balkon in der Netzausgleichung

© IGEO FHNW

Ansätze zur Verbesserung

Erweiterung der Messanlage

- Polygonzüge um die Anschlussvisuren auf die anderen Fixpunkte des Kontrollgangs erweitern
- Polygonzug erweitern – zusätzliche Punkte zwischen den bestehenden Punkten, die als Verknüpfungspunkte oder als Stationspunkte dienen
- Polygonzug neu anordnen – ausgehend von den Fixpunkten die Punkte neu anordnen

Anpassung der Messanordnung

- Stationierung auf den Fixpunkten
- Hin- und Rückmessung vom Polygonzug
- Nur einfache Messung vom Polygonzug
- Einfache Messung vom Polygonzug und wichtige Stationen ein zweites Mal messen

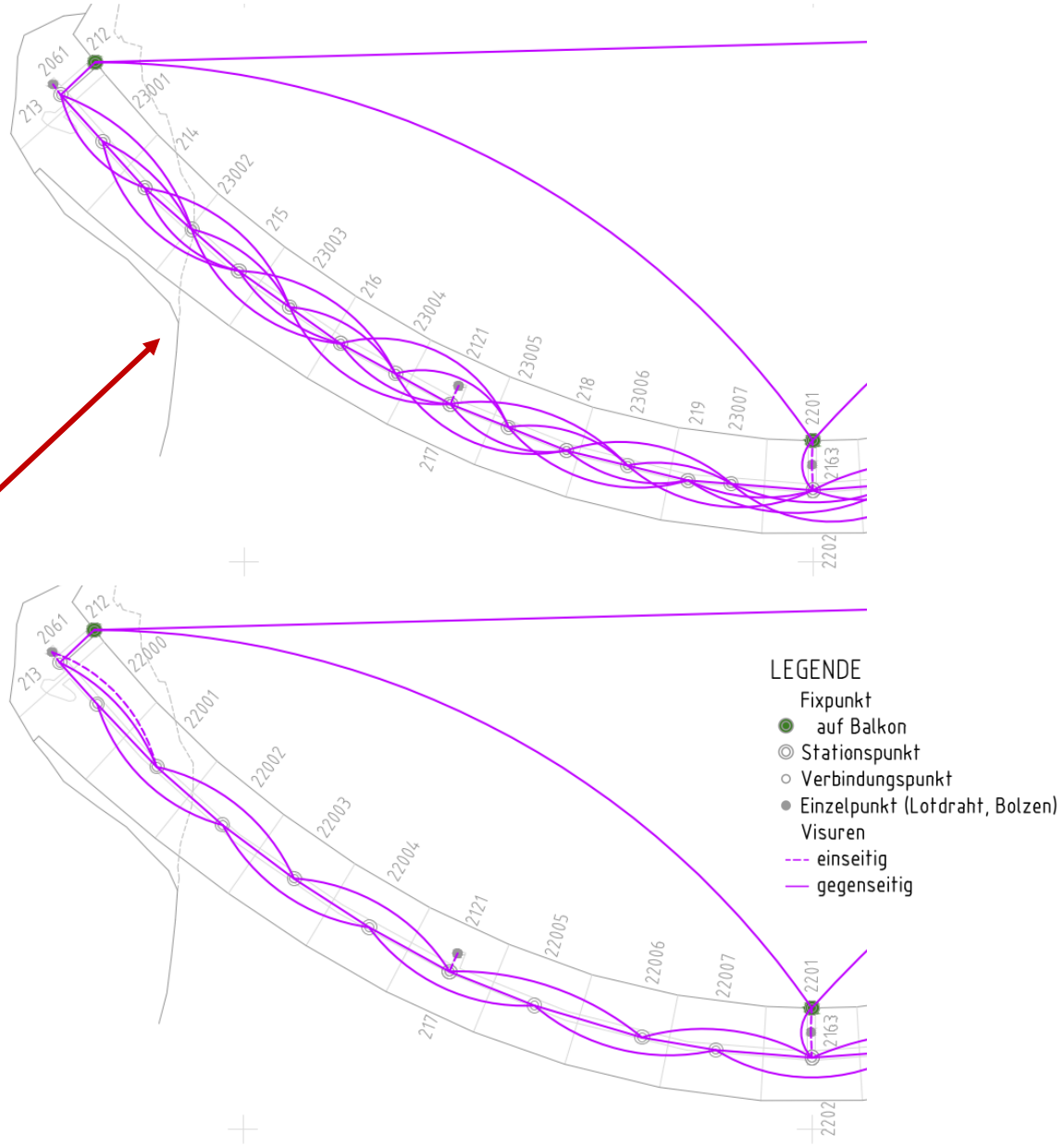

Abbildung 5: Ausschnitt vom Netzplan vom erweiterten Polygonzug mit zusätzlichen Punkten als Stationspunkte oben, Netzplan der neuen Punktanordnung vom Polygonzug unten

© IGEO FHNW

Ansätze zur Verbesserung

Auswertung

- Teilnetzausgleich – jeder Kontrollgang einzeln, Lagerung nur auf den Fixpunkten vom Kontrollgang auf dem Balkon
- Gesamtnetzausgleichung – Verknüpfung aller Teilnetze mit Verbindung über Lotdräthe und Aussennetz, Lagerung auf den Fixpunkten vom Aussennetz

Instrumenten- und Technologieauswahl

- Tachymeter
- Vermessungskreisel (Abb. 6)
- Photogrammetrie
- Laserscanning

→ Daraus sind verschiedene Varianten für eine neues Messkonzept ausgearbeitet worden

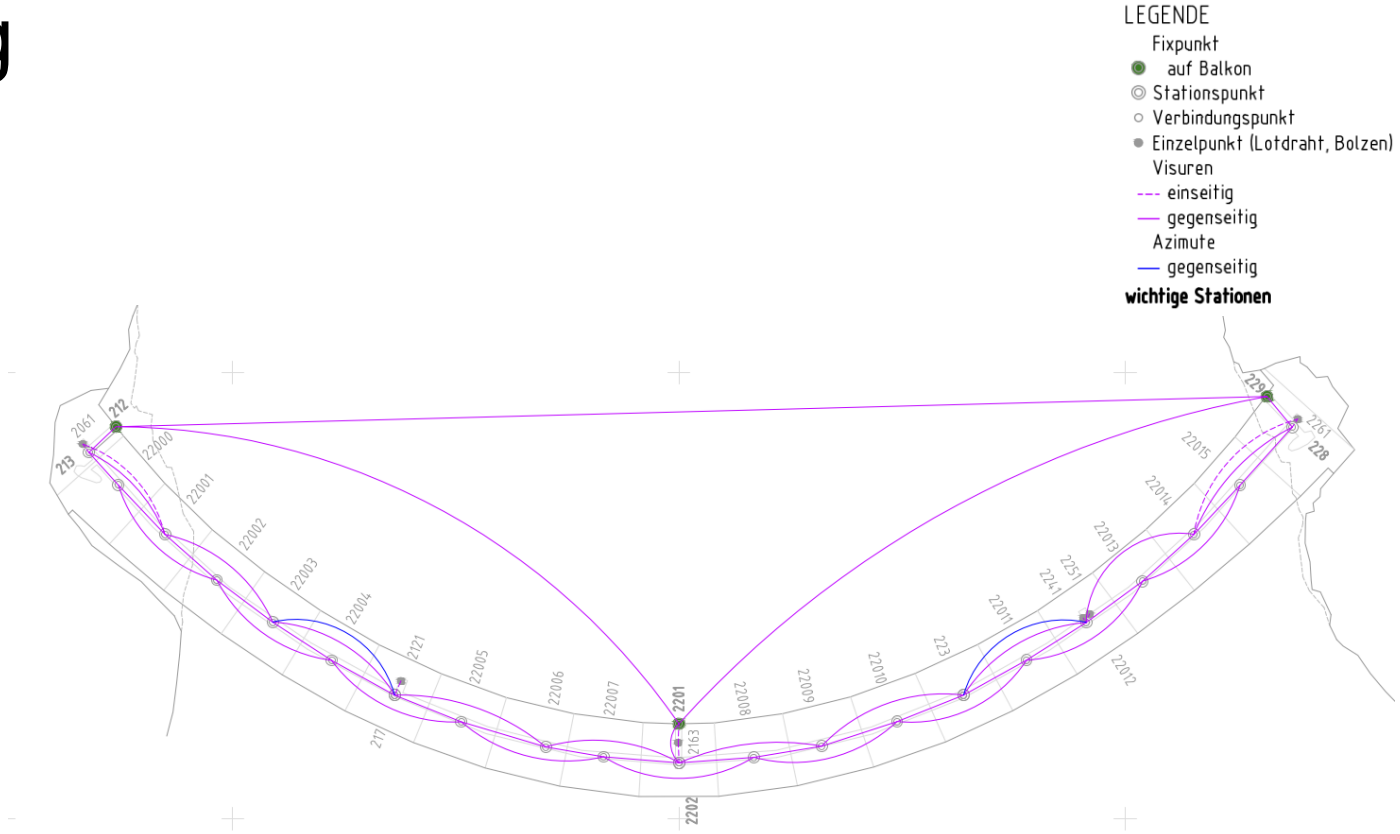

Abbildung 6: Ausschnitt vom Netzplan mit dem Polygonzug der neuen Punktanordnung sowie den beiden gegenseitigen Azimutmessungen mit einem Vermessungskreisel

© IGEO FHNW

Variantenvergleich I

Variante	Genauigkeit (mm)	Zuverlässigkeit (mm)	Messzeit (h:min)	Materialkosten (CHF)
Bestehendes Messkonzept, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.2-0.5	0.4-1.1	5:00	-
Polygonzug erweitern, Stationspunkt, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.1-0.2	0.2-0.5	10:40	6902.40
Polygonzug erweitern, Verknüpfungspunkte, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.2-0.3	0.3-0.5	6:00	1774.10
Polygonzug erweitern, Verknüpfungspunkte, einfache Messung, wichtige Stationen 2x	0.2-0.4	0.4-0.8	4:00	1774.10
Polygonzug erweitern, Verknüpfungspunkte, nur einfache Messung, Teilnetzausgleich	0.2-0.5	0.6-1.2	3:00	1774.10
Polygonzug neu anordnen, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.2-0.3	0.3-0.5	8:00	5331.30
Polygonzug neu anordnen, einfache Messung, wichtige Stationen 2x, Teilnetzausgleich	0.2-0.4	0.3-0.8	5:00	5331.30
Polygonzug neu anordnen, einfache Messung, wichtige Stationen 2x, Vermessungskreisel	0.2-0.3	0.3-0.7	8:00 + Referenzmessung (ca. 4:00)	5331.30 + Anschaffungskosten Vermessungskreisel (ca. 300’000)

Tabelle 1: Vergleich der Varianten I

© IGEO FHNW

Variantenvergleich II

Variante	Genauigkeit (mm)	Zuverlässigkeit (mm)	Messzeit (h:min)	Materialkosten (CHF)
Bestehendes Messkonzept, Hin- und Rückmessung, Teilnetzausgleich	0.2-0.5	0.4-1.1	5:00	-
Gesamtnetzausgleichung, Wahl der optimalsten Variante pro Kontrollgang sowie Aussennetz	0.4-0.6	0.8-1.0	-	-
Laserscanning, terrestrisch	≥ 1.8	-	-	Anschaffungskosten terrestrischer Laserscanner inkl. Zubehör (ca. 90’000)
Laserscanning, kinematisch	≥ 5	-	-	Anschaffungskosten kinematischer Laserscanner inkl. Zubehör (ca. 60’000)
Photogrammetrie	≥ 10	-	-	Anschaffungskosten Digitalkamera inkl. Zubehör (ca. 10’000)

Tabelle 2: Vergleich der Varianten II

Vorgeschlagenes Messkonzept

Messanlage
- Lagerung auf den Fixpunkten vom Aussennetz
- Polygonzüge um die Anschlussvisuren auf die anderen Fixpunkte des Kontrollgangs erweitern
- Polygonzug erweitern – zusätzliche Punkte zwischen den bestehenden Punkten, die als Verknüpfungspunkte dienen

Messung
- Stationierung auf den Fixpunkten
- Einfache durchgängige Messung vom Polygonzug und wichtige Stationen ein zweites unabhängiges Mal messen

Auswertung
- Gesamtnetzausgleich

Instrumenten- und Technologieauswahl
- Tachymeter

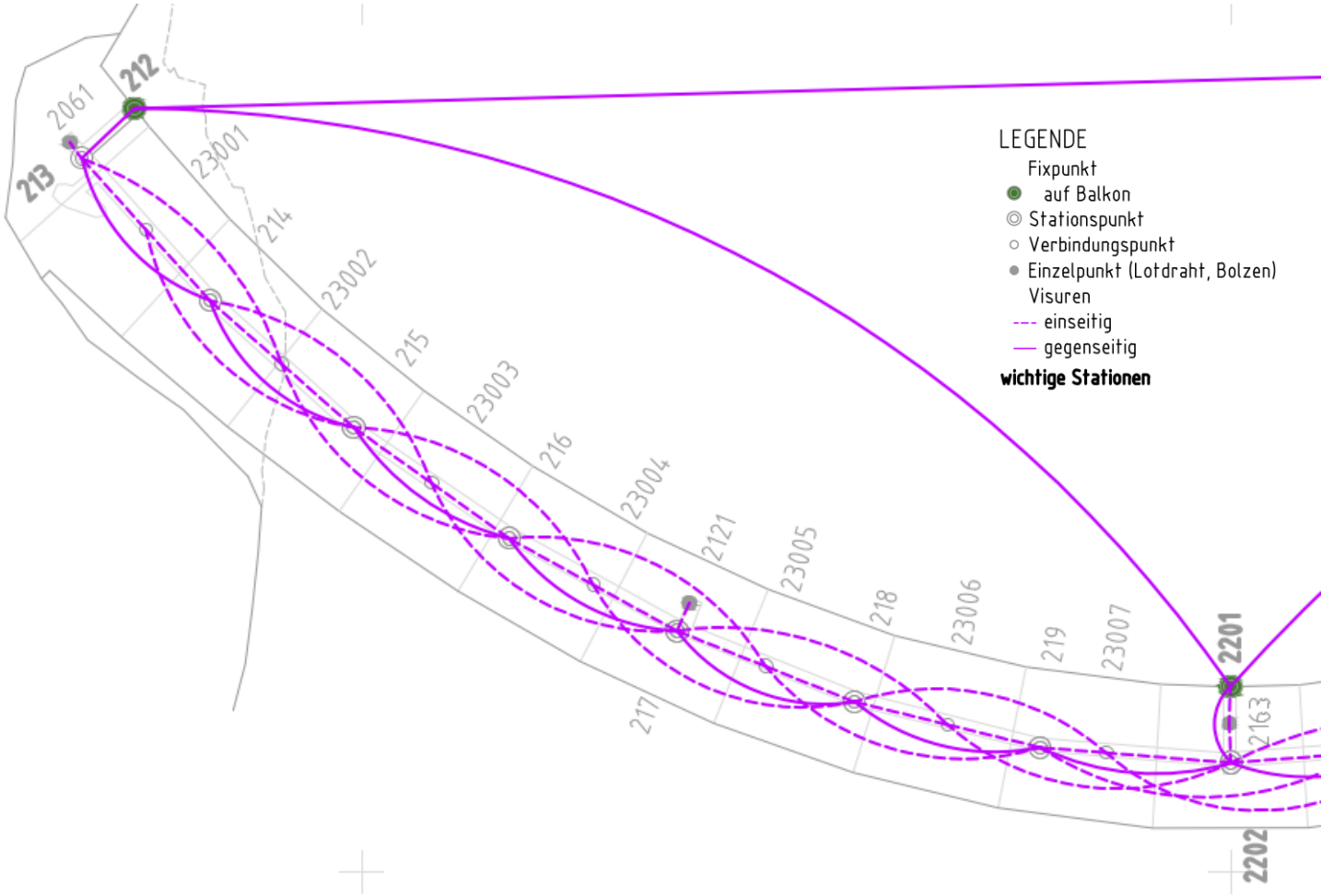

Abbildung 7: Ausschnitt vom Netzplan vom erweiterten Polygonzug mit zusätzlichen Punkten als Verknüpfungspunkte und die wichtigen Stationen in dicker Schrift

© IGEO FHNW

Abbildung 8: Lai da Nalps mit der Staumauer Nalps (Axpo Holding AG 2022)

Fazit

- Analyse zeigt klare Schwachstellen im bestehenden Messkonzept
- Erweiterter und neu angeordneter Polygonzug verbessert die Genauigkeit sowie die Zuverlässigkeit
- Gesamtnetzausgleichung statt Teilnetzausgleich der einzelnen Kontrollgänge erhöht die Aussagekraft der Verschiebungen
- Teure Technologien wie Laserscanning oder Vermessungskreisel sind wirtschaftlich nicht sinnvoll, da sie keine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit bringen
- Vorgeschlagenes Messkonzept bietet das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis
- Übertragung auf andere Bogenstaumauern möglich, sofern die Messanlage ähnlich ist

Quellen

- Axpo Holding AG (2020): *Mit allen Wassern gewaschen*. [https://www.axpo.com/ch/de/wissen/magazin/erneuerbare-energien/mit-allen-wassern-gewaschen.html; 23.5.2025].
- Axpo Power AG (2019): *Beispiel Grösse von UKG* Fotografie. Axpo Power AG.
- Axpo Power AG (2020): *Ansicht aussen* Fotografie. Axpo Power AG.
- Axpo Power AG (2024a): *2202* Fotografie. Axpo Power AG.
- Axpo Power AG (2024b): *302*Fotografie. Axpo Power AG.
- Steiner, Claudia (2020): *Kraftwerk Vorderrhein / Stauanlage Nalps, Geodätische Überwachungsmessung.* Internes Dokument. Baden: Axpo Power AG, Hydroenergie & Biomasse.
- Wieser, Andreas; Condamin, Sebastian; Barras, Vincent; Schmid, Lorenz und Butt, Jemil (2020): *Staumauerüberwachung – Vergleich dreier Technologien für epochenweise Deformationsmessungen*. *Ingenieurvermessung 20. Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, 2020*. Wichmann. S. 437–449. doi:10.3929/ethz-b-000404562. [https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/404562; 6.3.2025].