

Bestimmung von Spritzbetonstärken im Oberwasserstollen des Kárahnjúkar Hydro-Electric Projects*

Markus Rennen und Markus Schäfer

Zusammenfassung

Das Kárahnjúkar Hydro-Electric Project im isländischen Hochland gehört weltweit zu den größten Ingenieurprojekten der letzten Jahre. Im ca. 40km langen, TBM vorgetriebenen Oberwasserstollen stellte sich zum Abschluss des Projektes die Frage nach der effizienten Überprüfung der abschnittsweise applizierten Spritzbetonauskleidung. Im vorliegenden Artikel wird das Projekt allgemein vorgestellt und speziell das eingesetzte Laser-Scanner-Verfahren erläutert, das insbesondere ohne Vorab-Scan und ohne Festpunkte zur Scan-Referenzierung auskam und dennoch repräsentative Stärken, Volumen etc. lieferte.

Summary

Located in the Icelandic highlands the Kárahnjúkar Hydro-Electric Project represents one of the largest recent engineering projects worldwide. In the final stages the question arose how to verify the structure of the sectionwise applied shotcrete coating in the approximately 40km TBM driven headrace tunnel. The article at hand provides an introduction to the project itself as well as it explains a laser scanner based procedure that obtained representative shotcrete thickness, volume etc. without a pre-shotcrete reference scan and allowed sufficient geo-referencing without connection to the tunnel traverse points.

1 Vorgeschichte

Kárahnjúkar ist der Name einer Bergspitze im abgelegenen nordöstlichen Hochland Islands. Danach benannt ist eines der größten Wasserkraftprojekte Europas, das für ca. fünf Jahre bis zu 2000 Menschen aus aller Welt in der sonst leeren subarktischen Region beschäftigt hat.

Begünstigt durch seine geographische Lage, ist Island reich an erneuerbaren Energiequellen. Rund 90% der isländischen Haushalte werden geothermal beheizt. Die



Abb. 1: Projektübersicht

Energieversorgung wird fast vollständig aus Wasserkraft (73,4%) oder Geothermalkraftwerken (26,5%) gedeckt. Laut Staatlicher Energiebehörde Orkustofnun sind aber, mit einer 2006 installierten Kapazität von 1584 MW und tatsächlich generierten 9920 GWh, nur etwa 20–25% der unter technischen und umweltpolitischen Gesichtspunkten realistischen natürlichen Energiequellen erschlossen. Der Gedanke, energieintensive Industrie nach Island zu verlagern, ist daher naheliegend. Bereits in den 1970er-Jahren wurde unter diesem Aspekt im Raum Reykjavík eine Aluminiumhütte in Betrieb genommen, eine weitere wurde im nicht weit entfernten Hvalfjörður Ende der 1990er-Jahre fertiggestellt.

2002 einigten sich der isländische Staat, Landsvirkjun – mit rund 72 % Marktanteil Islands größter Energieversorger – und Alcoa Inc. eine weitere Aluminiumhütte an der isländischen Ostküste zu errichten. Die Energieversorgung wird durch das eigens dafür errichtete Großkraftwerk gesichert. Baubeginn war im Sommer 2003.

2 Das Kárahnjúkar Hydroelectric Project

Das Kárahnjúkar Hydroelectric Project (HEP) besteht im Wesentlichen aus zwei nördlich des Vatnajökull Gletschers gelegenen Reservoirbereichen, deren Wasser unterirdisch zu einem im Tal befindlichen Turbinenkraftwerk abgeführt wird.

* Überarbeitete Fassung des gleichnamigen Vortrages beim 79. DVW-Seminar »Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008)« am 6. und 7. November 2008 in Fulda. Die Seminarbeiträge sind als Band 54 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden.



Abb. 2:
Kárahnjúkar Hauptdamm

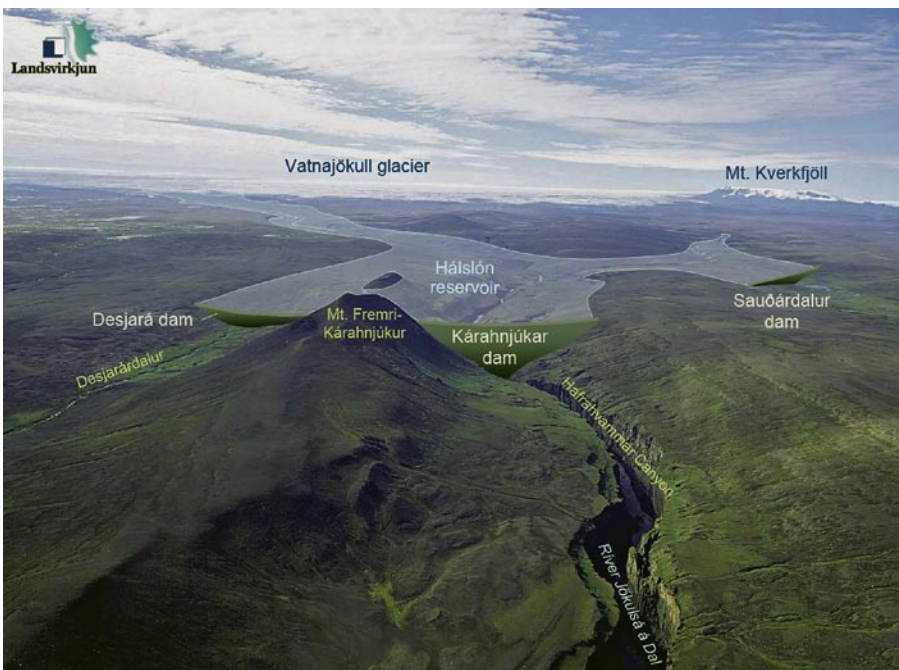


Abb. 3: Übersicht Hálslón Reservoir

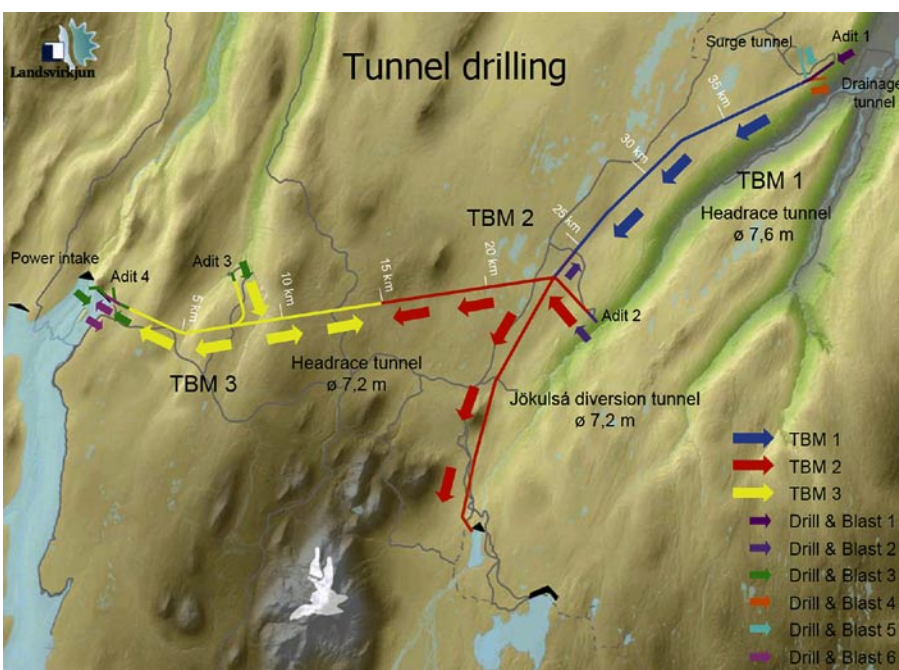


Abb. 4: Tunnelübersicht

Das Projekt wird vom Hálslón-Reservoir dominiert, das sich im höchsten Füllstadium (625 m Meereshöhe) auf einer Fläche von 57 km² ausdehnt und etwa 2 km³ Wasser vorhält. Gespeist wird es vom Gletscherfluss Jökulsá á Dal, der am Kárahnjúkar-Massiv in eine dort ca. 120 m tiefe aber nur ca. 90 m breite Schlucht, die Hafrahvammagljúfur, eintritt.

An dieser Stelle wurde in etwa dreijähriger Arbeit der 198 m hohe, an der Krone rund 700 m lange und ca. 8,4 Mio. m³ mächtige Kárahnjúkar Hauptdamm errichtet (Abb. 2). Es handelt sich dabei um einen Steinschüttdamm mit wasserseitig außenliegender Betonabdichtung, einen sogenannten »Rock-Filled Concrete-Faced Dam«.

Flankiert wird der Hauptdamm von zwei je 1100 m langen und 68 m bzw. 29 m hohen Satteldämmen (siehe Abb. 3).

Das Wasser wird durch einen fast 40 km langen Oberwasser- oder Triebstollen (Headrace-Tunnel) abgeführt. Da der Zufluss der Jökulsá á Dal als Gletscherfluss von Schmelzwasseraufkommen abhängt und daher saisonbedingt stark variiert, kann der Wasserspiegel im Hálslón-Reservoir, vor allem am Ende des im Hochland bis in den Mai hineinreichenden Winters, bis zu 75 m absinken. Um Druckengpässe ausgleichen zu können, wurde daher ein weiterer Reservoirbereich geschaffen, in dem zwei Staudämme von

600 m bzw. 1700 m Länge und 37 m bzw. 26 m Höhe zwei durch Tunnel und Kanäle miteinander verbundene Reservoirs aufstauen. Von der niedriger gelegenen Ufsarlón wurde ebenfalls ein ca. 13 km langer Tunnel (Jökulsá Diversion) aufgeföhren, der den vom Hálslón-Reservoir kommenden Headrace-Tunnel etwa in der Mitte trifft.

Das vorgefundene Gestein besteht aus schwach einfallenden Basaltlavadecken mit eingeschalteten Lagen von Sedimentgesteinen und Moberg-Formationen, in denen der deutlich überwiegende Teil des Tunnels mit Hartgesteintunnelbohrmaschinen aufgeföhren wurde (siehe Abb. 4), der verbleibende Teil mittels Sprengvortrieb. Insgesamt wurden – eingerechnet aller Zugangsstollen, Zwischenangriffe etc. – etwa 72 km Tunnel aufgeföhren.

Im gesamten Projekt wurden drei Robbins Tunnelbohrmaschinen (TBM Durchmesser $2 \times 7,2$ m, $1 \times 7,6$ m) zeitgleich betrieben. TBM 2 wurde dabei nach Erreichen des Kulminationspunktes im Headrace-Tunnel abgebaut und für den weiteren Vortrieb im Jökulsá Diversion Tunnel erneut installiert.

Der Oberwasserstollen weist auf 40 km mit etwa 100 m Fallhöhe ein recht geringes Gefälle auf, mündet aber am Tunnelende

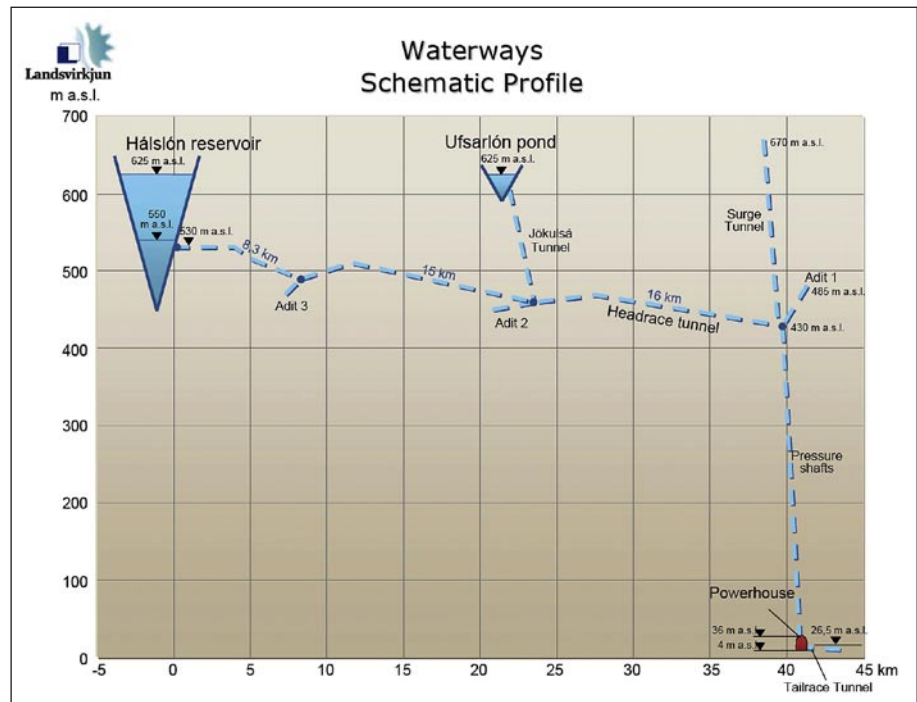


Abb. 5: Schematisches Profil der Oberwasserstollen

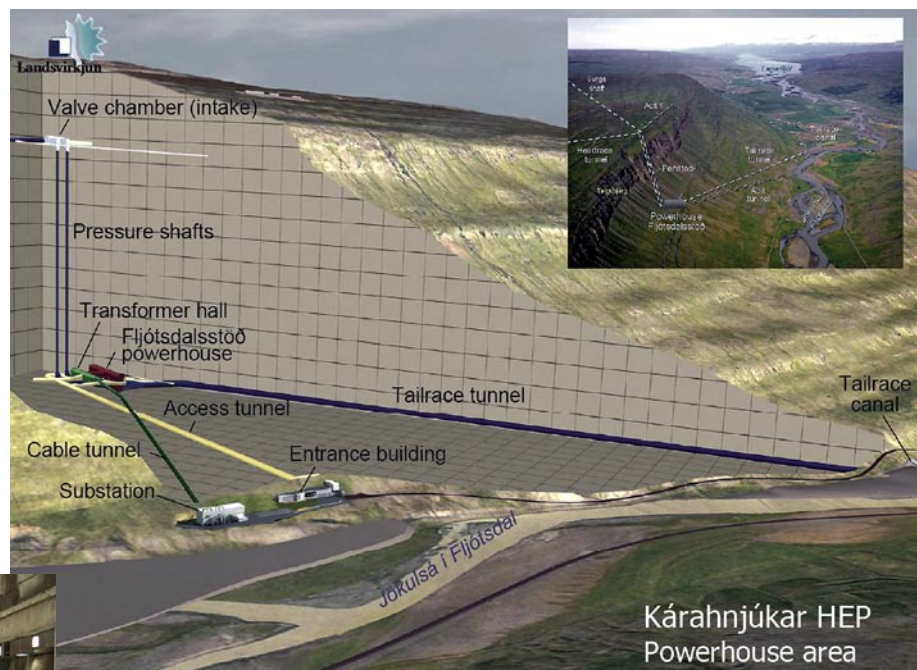


Abb. 6: Schematische Darstellung der Druckschächte und der Turbinenhalle



Abb. 7:
Turbinenhalle

in zwei stahlausgekleidete lotrechte Druckschächte von 420 m Höhe (Abb. 5 und Abb. 6). An deren Ende wird das Wasser auf sechs 115 MW-Turbinen umgeleitet (Abb. 7). Insgesamt wird das Kárahnjúkar Kraftwerk damit also 690 MW Kapazität haben und pro Jahr etwa 4600 GWh Elektrizität erzeugen.

3 Verhältnisse und Vermessungsarbeiten im Headrace-Tunnel

Etwa 35,5 km der 39,6 km des Headrace-Tunnels wurden mittels TBM aufgeföhren. Die Vermessungsarbeiten beschränkten sich im Wesentlichen auf konventionelle Aufgaben und Methoden, z. B. kontinuierliches Erweitern und Überprüfen des Tunnelpolygons.

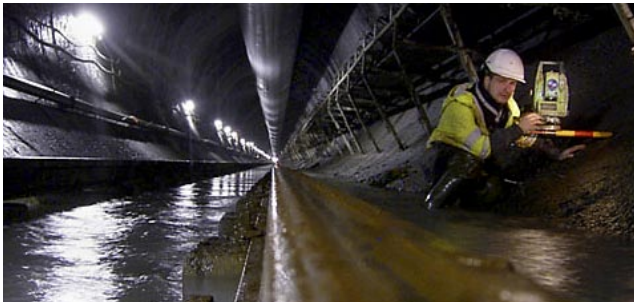


Abb. 8: Konventionelle Vermessungsarbeiten im Headrace-Tunnel und Konsolenfestpunkte

Zu Beginn wurden starre Konsolen eingesetzt. Es zeigte sich jedoch nach kurzer Zeit, dass aufgrund des permanenten Tunnelbetriebs die Lebensdauer dieser stabilen Festpunkte gegen Null ging. Im weiteren Verlauf wurden daher Zylinder installiert in die für die Dauer der Messung abnehmbare Konsolen eingesetzt werden konnten (siehe Abb. 8).

Außer in lokalen Störungszonen, in denen instabile Felsbedingungen Stahlbogenausbaue mit Spritzbetonverkleidung bedingte, war im Headrace-Tunnel prinzipiell kein statischer Ausbau erforderlich. Dennoch wurde bei Bedarf bereits während des Vortriebs direkt hinter dem Bohrkopf Spritzbeton appliziert, um vor herabfallendem oder ausbrechendem losen Gestein zu schützen und damit die Sicherheit des TBM-Personals zu gewährleisten. Im endgültigen Ausbau wurde abschnittsweise Spritzbeton aufgebracht, um in den entsprechenden, durch die Felsstruktur bedingten Bereichen, die Erosion der Tunnelwand im späteren wasserführenden Betrieb zu vermeiden. Letztendlich sind etwa 15 km des Tunnels mit Beton ausgekleidet. Um die langjährige Betriebsdauer zu gewährleisten, ist es wichtig, vor der Freigabe des Tunnels ausreichende Spritzbetonstärken nachzuweisen.

Das Aufbringen dieser Spritzbetonschicht war vorgesehen für den Zeitraum nach dem Rückbau aller tem-

porären Tunnelinstallationen, da zuvor das Förderband, die Ventilation, Strom- und Wasserversorgung etc. große Teile der Tunnelwände verdeckte. Zum Nachweis der Spritzbetonstärke waren sowohl regelmäßige als auch willkürlich verteilte Kernbohrungen mit vertraglich vereinbarter Stichprobendichte vorgesehen. Bereits während der Vortriebsphase kam es jedoch durch geologische Störungszonen, massive Wassereinträge (z. B. Abb. 9) mit



Abb. 9: Arbeitsbedingungen nach Wassereintruch im Headrace-Tunnel

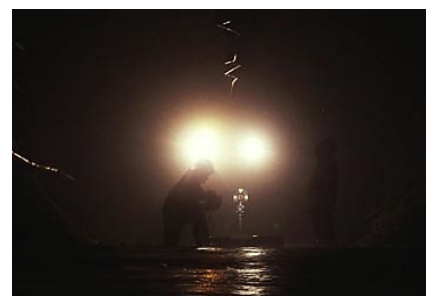


Abb. 10: Zieltafelmontage während der Profilmessung mit Totalstation

Wassertemperaturen von zum Teil über 50 °C und nicht zuletzt aufgrund logistischer Probleme – bedingt durch die harschen Winterbedingungen, die z. B. den Schuttbetrieb nur eingeschränkt zuließen – zu erheblichen Verzögerungen.

Mit dem Näherücken des Abnahmeterrnins war abzusehen, dass es nicht möglich sein würde, die verlangte Anzahl an Bohrungen durchzuführen und effiziente Alternativen waren gesucht.

4 Nachweis der Spritzbetonstärken

4.1 Profilmessung mittels Totalstation

Der naheliegendste Ansatz war, vorhandene Ressourcen zu nutzen und regelmäßige Profile mittels Leica Totalstation und Amberg TMS zu messen. Als Herausforderung stellte sich die Wiederherstellung der tatsächlichen (as-built) Tunnelachse dar, da nicht davon auszugehen war, dass der de-facto-gebohrte Tunnel in seiner Lage exakt dem Design entsprach. Damit konnten auf die Festpunktkoordinaten bezogene Profilmessungen nicht zu korrekten Spritzbetonstärken führen. Aus diesem Grunde wurde vor einem Spritzbetonabschnitt, also im Bereich mit »sauberen« Tunnelwänden, eine Halterung mit horizontal verschiebbarem Dreifuß quer über die Schienen fixiert. Darauf konnte zunächst die Totalstation installiert

werden und mittels horizontaler Visuren senkrecht zur Tunnelachse der Dreifuss iterativ in die horizontale Tunnelmitte gerückt werden. Eine Zenitvisur lieferte, den Tunneldurchmesser als bekannt vorausgesetzt, den vertikalen Bezug zur aktuellen Tunnelachse. Das Verfahren wurde im »sauberen« Bereich hinter dem Spritzbetonabschnitt wiederholt. Auf diese Weise waren zwei Anschlusspunkte mit Bezug zur wahren Tunnelachse rekonstruiert (Abb. 10).



Abb. 11:
Z + F Imager
5003 im
Einsatz im
Headrace-
Tunnel

An jeder beliebigen Stelle zwischen den beiden Festpunkten konnte nun ein Stativ aufgestellt oder wie in unserem Fall, wegen des teilweise hohen Wasserstandes, eine Gerätehalterung auf den Schienen montiert und mittels TMS Profile gemessen werden. Die Messungen wurden anschließend auf die Designtunnelachse transformiert, um die gemessene Tunneloberfläche mit dem nackten Designquerschnitt zu vergleichen. Das Verfahren als solches funktionierte ausgezeichnet und lieferte Messwerte in höherer Dichte als die Bohrungen es getan hätten.

Letztendlich kam es jedoch nicht über die Testphase hinaus, da es erforderte, dass für die Dauer der Messungen im entsprechenden Abschnitt der Schienenverkehr gestoppt wurde, was von keiner Seite akzeptiert wurde.

4.2 Konzept mit Laserscanner

Alternativ kamen jetzt nur noch Verfahren infrage, die nur sehr kurze Aufstellungszeiten erforderten. Im Mai 2007 wurden daher gemeinsam mit der inmetris3D Tests mit einem Zoller+Fröhlich Imager 5003 Laserscanner durchgeführt. Bei mittlerer Auflösung konnte so die Aufstellungsdauer auf 1 min 40sec plus Auf- und Abbau reduziert werden. Die einzelnen Scans wurden mittels Standardzieltafeln, die während aufeinanderfolgender Scans temporär angebracht wurden, aneinander angeschlossen (registriert) (Abb. 13).

Angesichts des Tunneldurchmessers von 7,2 m bzw. 7,6 m mussten die Zielmarken in Abständen von wenigen Metern (ca. 3 m) angebracht und die Abstände zwischen den Scannerstandpunkten relativ kurz gewählt werden (ca. 7–8 m). Andernfalls wären die Zieltafeln in zu spitzem Winkel anvisiert worden und die Identifizierung im Postprocessing nicht mehr möglich. Nebeneffekt der kurzen Schrittweiten war natürlich eine enorm hohe Scanauflösung (Abb. 14).

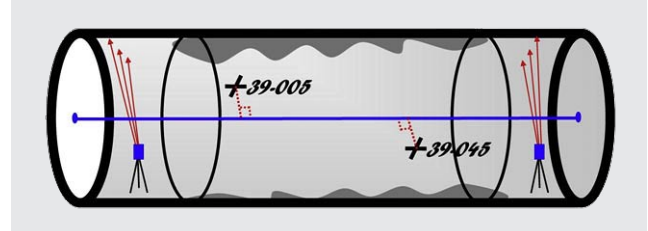


Abb. 12: Verfahren der Referenzierung (Erläuterung im Text)

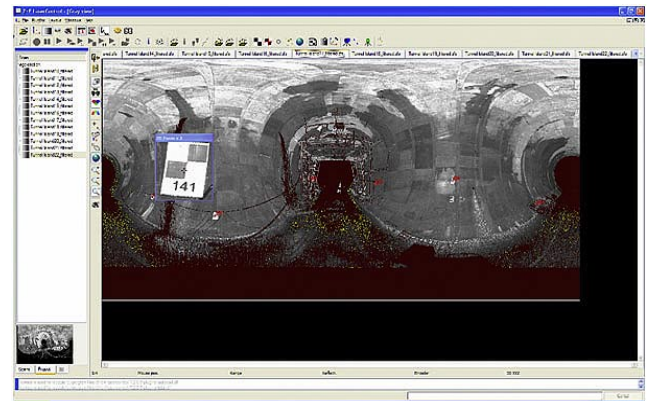


Abb. 13: Registrierung über konventionelle, temporäre Zielmarken

Ein weiteres Problem, das es zu bewältigen galt, war die absolute Referenzierung im Tunnel. Nach der Applikation von Spritzbeton waren insbesondere in den für die Messungen interessanten Bereichen die Konsolenhalter unter dem Spritzbeton verschwunden. Den jeweils nächsten Punkt zu nutzen scheiterte daran, dass dieser häufig auch zerstört war oder aufgrund der inzwischen demonitierten Tunnelventilation die Sichtweite nicht mehr ausreichend war. Die patentierte »Amberg Methode« konnte somit nicht zum Einsatz kommen.

Der Gedanke war nun, dem Verfahren mit Totalstation folgend, den gescannten Abschnitt auf »saubere« Bereiche vor und nach dem Spritzbeton auszudehnen (Abb. 12). Mittels der Software CYCLONE konnten dann diese Bereiche ausgeschnitten und dort ein Zylinder approximiert werden.

Die Ausgleichung liefert einen Modellzylinder mit as-built Durchmesser, sowie Mittelachspunkte bzw. Achsorientierung. Da auf jeder Seite ein Zylinder erzeugt wird, wird auch auf beiden Seiten eine Achse erzeugt. Für im Design gradlinige Tunnelabschnitt konnte also die Kollinearität der Achsen und somit die Gradlinigkeit des Tunnelabschnittes selbst geprüft werden.

Da der Scan auch Intensitätswerte lieferte, konnten die mit Sprühfarbe aufgetragenen Stationierungsmarkierungen deutlich im Scanbild identifiziert werden (Abb. 15). Innerhalb der Z+F Laser Control Software wurden die Stationierungsmarkierungen digitalisiert, d.h. ihre lokalen Koordinaten bestimmt und mittels CAPLAN auf die zuvor erhaltene (lokale) Tunnelachse projiziert (Abb. 12). Ebenfalls mittels CAPLAN konnten die Projektkoordina-

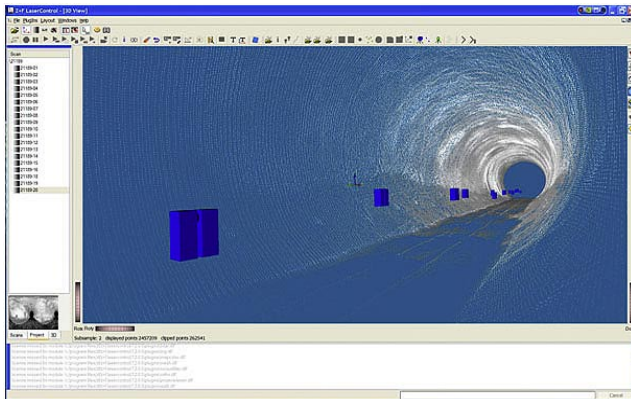


Abb. 14: Anordnung der Scannerstandpunkte

ten dieser Achspunkte mit Hilfe ihrer Stationierung auf der Design-Achse interpoliert werden.

Dieses Verfahren nimmt in Kauf, dass die Absolutlage der Stationierung längs der Tunnelachse, optimistisch formuliert, unsicher ist und lateral sicherlich falsch. Allerdings soll in diesem Verfahren ja die gescannte Oberfläche im Verhältnis zur tatsächlichen Achse bestimmt werden. Die absolute Lage ist nur insofern interessant, als dass mit ihrer Hilfe die Geometrie der Designelemente bestimmt werden kann, d.h. ob es sich im fraglichen Abschnitt um einen gradlinigen Tunnel handelt oder eine Kurve (Klothoiden kamen im Tunneldesign nicht vor). Relativ zueinander passten die Stationierungsmarken im Allgemeinen besser als 5 cm.

Mittels der beiden identischen Punkte konnte nun zunächst die Tunnelachse ins Projektsystem transformiert werden. In der Horizontalen reichte ein Festpunkt während der zweite nur der Orientierung diente (Maßstab 0 ppm), während sich die Orientierung der lokalen z-Achse durch sorgfältiges Horizontieren von selbst erledigte.

Die Scanszene wurde dann transformiert, indem die zuvor exportierten lokalen Koordinaten der Zieltafeln in CAPLAN mit transformiert und anschließend als Festpunkte wieder in die Laser Control Software importiert wurden.

Zur Analyse der Spritzbetonstärken sollte die Amberg Software TMS Office dienen. Im Vergleich des vorab eingegebenen Tunneldesigns mit der Scanoberfläche werden dabei Über- und Unterprofile farbcodiert ausgegeben. Während Überprofile Fehlstellen, Hohlräume oder Risse repräsentieren, kann Unterprofil als Spritzbetonstärke interpretiert werden.

Ziemlich bald stellte sich heraus, dass das Einlesen von bereits orientierten Scans in TMS Office nicht oder nur eingeschränkt möglich war. Die originären Scan-Files des Z+F zfs-Formats konnten nur ohne Orientierung geladen werden. Zur Orientierung verlangte die Software zusätzliche Totalstationsbeobachtungen nach dem Amberg-Verfahren. Zu Beginn wurde deshalb versucht, die orientierten Scans ins CYCLONE pts-Format zu konvertieren. Der Zeit-

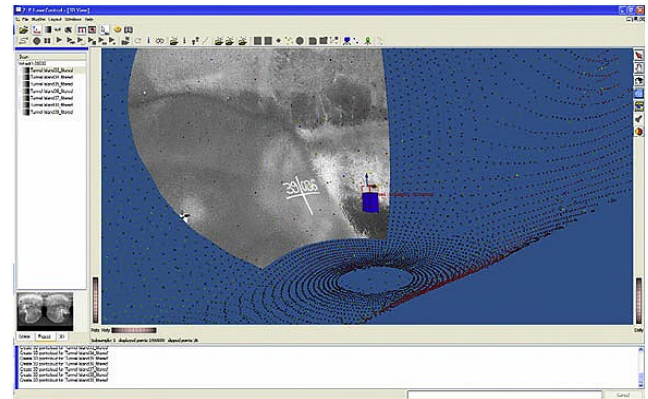


Abb. 15: Digitalisierung der Stationierungsmarkierungen mittels Laserscan Intensitätsbild

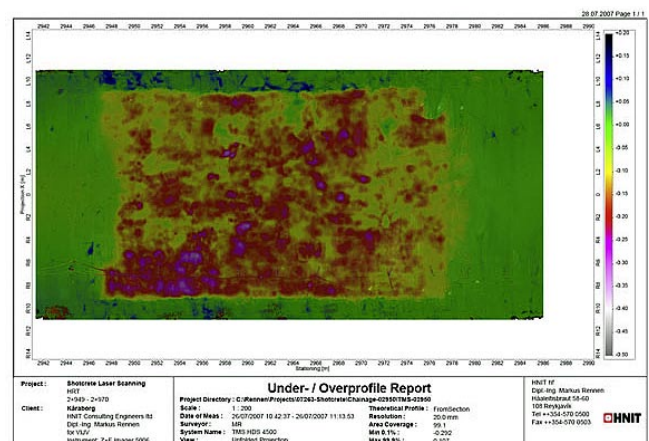


Abb. 16: Farbcodierter Plot von Über- bzw. Unterprofil

aufwand und die erzeugten File-Größen waren aber enorm. An dieser Stelle zeigten sich beide Hersteller, Zoller + Fröhlich und Amberg, sehr kooperativ und flexibel. Aufgrund unserer Anfrage wurde sowohl die Amberg-Software modifiziert als auch das Header-Format der zfs-Files geändert und so innerhalb weniger Tage (und etlicher zwischenzeitlicher Test-Versionen) der direkte Import ermöglicht.

Die Eingabe des Tunneldesigns sowie die anschließenden Analysen erfolgten dann nach TMS Standard. Dabei wurde in TMS je zu Beginn und am Ende des Scanabschnittes ein Kreisprofil mit dem zuvor bestimmten Durchmesser erzeugt und der Querschnitt dazwischen interpoliert. Die gescannte Oberfläche konnte anschließend mit der Zylinderoberfläche verglichen und die orthogonalen Abstände farbcodiert als abgerollte Oberfläche (Abb. 16) oder Profilschnitte (Abb. 17) dargestellt werden. Darüber hinaus bietet TMS auch interaktive Ansichten, die kontinuierliche Untersuchungen ermöglichen

und mittels lizenzfreiem Point Cloud Viewer auch dem Tunnelpersonal digitalen Zugriff erlauben.

4.3 Beurteilung

Aufgrund der hohen Punktdichte konnte der as-built Zylinder (Durchmesser und Achse) auch dann mit Standard-

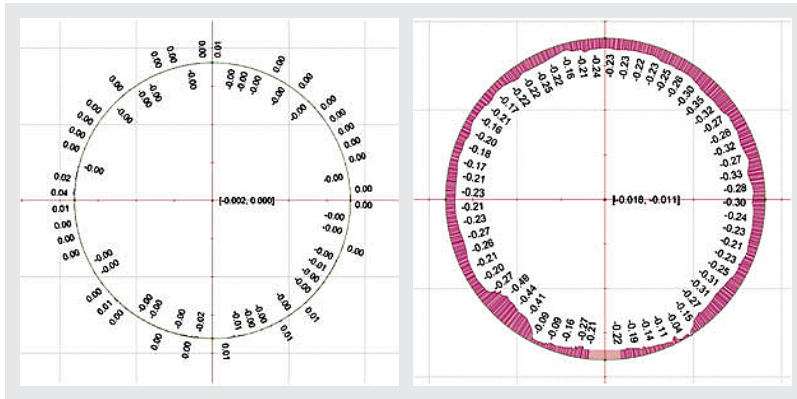


Abb. 17: Scan am Referenzprofil links und rechts im Spritzbetonprofil (Beispiele aus unterschiedlichen Tunnelabschnitten)

abweichungen im Bereich weniger Millimeter bestimmt werden, wenn die generell glatte Tunnelwand gelegentlich von Rissen durchzogen war. Ein Beispielpprofil ist in Abb. 17 (links) zu sehen.

Während der Testphase wurden zunächst Tunnelteilstücke gescannt, in denen zumindest stichprobenweise Stärkentests vorlagen. Die Übereinstimmungen waren hervorragend, so dass die Scans als repräsentativ angesehen werden konnten. Wie bereits oben erwähnt, funktioniert das vorgestellte Verfahren nicht nur in gradlinigen, sondern auch in gekrümmten Tunnelabschnitten. Für den Oberflächenvergleich ist aber vorauszusetzen, dass das angewandte Model (gradliniger oder verbogener Zylinder) für den Verlauf des gescannten Tunnelabschnittes den gebohrten Tunnel repräsentiert (naturgemäß versagt das Verfahren im Sprengvortrieb). Grundsätzlich kann die TBM-Trajektorie bzgl. der Richtung als träge angesehen werden. Im Projekt wurden Tunnelabschnitte zwischen ca. 30 m und 150 m erfasst, wobei ein Minimum von etwa 5–10 m unverkleidete Tunnelwand auf jeder Seite mit-gescannt wurden. Da der Spritzbeton nicht überall das komplette Tunnelprofil abdeckte bzw. nicht die gesamte Länge des Scanabschnittes, gab es bei längeren Abschnitten im Allgemeinen. Kontrollmöglichkeiten dieses Kriteriums. In schlussendlich 40 gescannten Abschnitten kam es zweimal zu einem horizontalen Ausweichen, das aber aufgrund der im Profil freiliegenden Bereiche sofort erkannt werden konnte.

Sozusagen als Abfallprodukt ergaben sich Spritzbetonvolumina. Vertragsgemäß wurde der Spritzbeton nach angeliefertem Beton minus eines geschätzten Rückpralls

(Rebound) abgerechnet. Im Verlauf des Projekts kam es aber zu Diskrepanzen zwischen dem prognostizierten Volumen und dem abgerechneten, die durch die Stärkentests nicht behoben werden konnten. Der Scan bot nun ausgezeichnete Möglichkeiten, die Volumen nachzurechnen. In den Testbereichen bestätigten Vergleiche mit der Volumendatenbank die Ergebnisse des Scans.

Dabei konnte nicht nur das Gesamtvolumen des auf-gebrachten Spritzbetons im Scanabschnitt sondern eben auch das Volumen in Profilausschnitten berechnet werden. Damit stand erstmalig ein Werkzeug zur Verfügung, Volumen selektiv im angeordneten Bereich nachzuprüfen bzw. Volumen außerhalb dieses Bereiches zu identifizieren. Abb. 17 (rechts) zeigt z.B. wie der Rebound im unteren Tunnelbereich akkumuliert.

4.4 Praktischer Einsatz

Nachdem die Testphase abgeschlossen und als erfolgreich beurteilt worden war, mussten, angesichts des Termindrucks, die eigentlichen Messungen bereits im Juli 2007 durchgeführt und zum Ende des gleichen Monats abgeschlossen werden. Dazu wurden von den Tunnelingenieuren gleichmäßig über den gesamten Headrace-Tunnel verteilte, repräsentative und/oder streitige Abschnitte ausgewählt.

Während im Mai noch ein Z+F Imager 5003 eingesetzt wurde, konnte im Juli ein neuer Z+F Imager 5006 genutzt werden (Abb. 18). Da beim Imager 5003 eine externe (und nicht wasserfeste) Batterie sowie als Steuer- und Speichereinheit ein Laptop erforderlich sind, war der effiziente Einsatz unter harschen Tunnelbedingungen unrealistisch (siehe Abb. 11). Der

Imager 5006 dagegen verfügt sowohl über interne Batterie als auch Steuer- und Speichereinheit. Nicht unwesentlich ist ebenfalls, dass er in einem wasserdichten Pelicase geliefert wird. Abgesehen von den Zieltafeln muss also nur noch das Gerät selbst und ein Stativ transportiert werden. Da die Strecken zwischen den Scanabschnitten zu Fuß in zum Teil hüfthohem Wasser absolviert wurden, wurde die gesamte Ausrüstung auf einer schwimmfähigen Karre transportiert. Aus Sicherheitsgründen bestand dabei das Personal aus zwei Personen, die Scannerbedienung als solche hätte auch von einer Person bewältigt werden können. An Personal vor Ort stand während der



Abb. 18: Z + F Imager 5006 im Headrace-Tunnel

Juli-Messung nur ein Vermessungsingenieur zur Verfügung, Unterstützung wurde von je nach Verfügbarkeit wechselnden Assistenten geleistet.

Aufgrund der limitierten Schrittweite erforderte ein repräsentativer 50 m-Spritzbetonabschnitt durchschnittlich ca. neun Scans. Die Tagesleistung war dabei im Wesentlichen durch den Transport zum Tunnelabschnitt sowie die Abstände zwischen den Scanabschnitten begrenzt.

Während der Scans musste darauf geachtet werden, dass in sehr nassen Bereichen die Zieltafeln dichter gesetzt wurden, da die laminierte Oberfläche im nassen Zustand derart reflektiert, dass die Zielmarken im Postprocessing nicht mehr identifiziert werden können. Generell zeigte sich, dass der Scanner auch in Bereichen gute Ergebnisse lieferte, die zunächst zu dunstig oder zu nass wirkten.

Da sowohl die Feldarbeit als auch das Processing von einer Person geleistet werden musste, spielte auch die Rechenleistung eine Rolle. Nach Abschluss der Datenakquisition mussten zunächst die Scans registriert werden. Die Anfangs- und Endscans eines Abschnittes wurden dann an inmetris3D übermittelt, wo die Zylinderachsen bestimmt wurden. Nach Erhalt der Achsen konnten die Zielmarken und damit die Scans transformiert, das lokale Tunneldesign in TMS eingegeben und die Scans in TMS eingelesen werden. Auf einer Dell Precision M65 Workstation dauerte das Prozessieren eines einzelnen Scans ca. neun Minuten, d.h. für einen durchschnittlichen 50 m-Abschnitt mehr als 80 Minuten, für den längsten Abschnitt mit 31 Scans mehr als 4½ Stunden. Anschließend wurden in 50 cm-Abständen Profile im pdf-Format sowie ein farbcodierter Plot der Differenzen generiert, was wiederum angesichts der großen Anzahl der Scans mit nicht unerheblicher Rechenzeit verbunden war.

Zum Abschluss des Projektes waren 40 in etwa gleichmäßig verteilte Headrace-Tunnel-Abschnitte, mit einer Gesamtlänge von etwas mehr als 2600 m, in mehr als 460 Scans gescannt worden. Legt man 15 km Spritzbeton zugrunde, so sind gute 17 % der Oberfläche überprüft worden.

5 Fazit

Es ist natürlich unstrittig, dass der Vergleich von Scans vor und nach Spritzbetonanwendung zu exakten oder exakteren Zahlen, sowohl in Stärken als auch Volumen führt, dass solche Verfahren in allen Tunnelgeometrien funktionieren (auch Sprengvortrieb oder Kavernen) und ebenfalls, dass effizientere Positionierungsverfahren (z.B. das *Amberg Verfahren*) eingesetzt werden können. Aufgrund der Umstände kam im vorliegenden Fall jedoch

keines dieser Verfahren in Frage und es musste improvisiert werden, um überhaupt zu Ergebnissen zu kommen.

Es wurde gezeigt, dass abschnittsweise ein Tunnelmodell erzeugt werden konnte, das als repräsentative Referenz für die gescannte Oberfläche genutzt wurde.

Das improvisierte Verfahren konnte technisch realisiert und ohne Einschränkungen für den Tunnelbetrieb umgesetzt werden.

Vergleiche mit vorab bestimmten und akzeptierten Spritzbetonstärken und -volumen bestätigten korrekte und vor allem aufgrund der hohen Repräsentationsdichte unstrittige Ergebnisse. Der effiziente Feldeinsatz sowie die zeitnahe Auswertung führten dazu, dass letztendlich zuverlässig und repräsentativ überprüft werden konnte, ob die Vorgaben erfüllt worden waren und somit der Tunnel termingerecht zum Fluten freigegeben werden konnte.

Natürlich stellen die gesammelten Scannerdaten eine ausgezeichnete 3D Dokumentation dar, die auch weiterführende z.B. hydraulische Rauhigkeitsuntersuchungen ermöglicht.

Dank

Unser Dank gilt allen, die mitgeholfen haben das Projekt erfolgreich abzuschließen, speziell den Mitarbeitern von Zoller+Fröhlich, von Amberg Technologies und denen, die gemeinsam mit uns nass geworden sind.

Literatur

- Landsvirkjun: www.landsvirkjun.com/EN/category.asp?catID=80
 Orkustofnun (Icelandic National Energy Authority): Energy Statistics in Iceland 2007, <http://www.os.is/page/energystatistics>, 2007.
 Pétursson, G., Leist, B.: Kárahnjúkar Hydroelectric Plant – Headrace-Tunnel Excavation by Tunnel Boring Machines Through Fault Zones, Felsbau 5/2006, Oktober 2006, Austrian Society for Geomechanics, VGE Verlag, 2005.
 Pétursson, G.: Kárahnjúkar Hydroelectric Project, Presentation Technical Seminar Sept. 17th–18th 2007, Grand Hotel Reykjavík

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Markus Rennen
 HNIT Consulting Engineers
 Háaleitisbraut 58–60, 108 Reykjavík, Island
 mr@hnit.is

Dipl.-Ing. Markus Schäfer
 inmetris3D Partnerschaftsgesellschaft
 Rebenring 33, 38106 Braunschweig
 markus.schaefer@inmetris3d.de