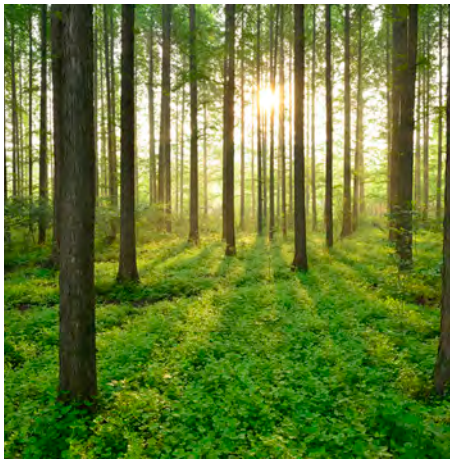
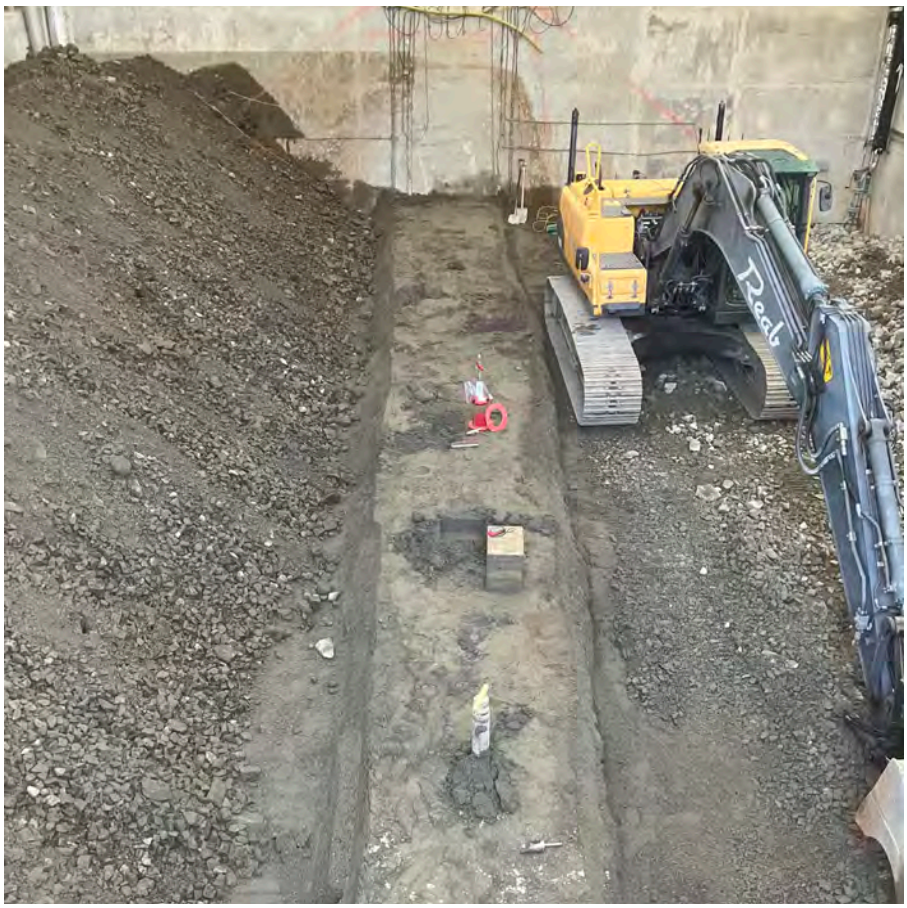
DOCUMENTATION FROM THE DISMANTLING OF THE ÄLVKARLEBY TEST EMBANKMENT DAM

REPORT 2026:1150



DAM SAFETY



Energiforsk

Documentation from the dismantling of the Älvkarleby test embankment dam

JOHAN LAGERLUND AND SAIMA RIAZ

ISBN 978-91-7673-[XXX-X] | © Energiforsk April 2025

Energiforsk AB | Phone: 08-677 25 30 | E-mail: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Foreword

The aim of this project has been to thoroughly inspect and document the dismantling of the Älvkarleby test dam, hoping that this would reveal some final details and insights of its construction and function after nearly 5 years of experiments.

This project was carried out within Energiforsks research and development programme for dam safety, which is focused on contributing to the strategic and ongoing work with dam safety to strengthen the long-term development of Swedish hydropower.

The authors of the report are Johan Lagerlund and Saima Riaz from Vattenfall R&D. The reference group consisted of Johanna Sipola Äijä from Vattenfall, Jonas Hammarson from Fortum, Carl-Oscar Nilsson and Andreas Rick from Uniper, Henrik Arver from Vattenregleringsföretagen and Maria Bartsch from Svenska kraftnät.

The authors of the report are responsible for all results and conclusions in the report.

The picture of the cover was provided by the authors.

Summary

The Älvkarleby test dam was built in 2019 and served as a national and international test bed until the fall of 2024. After 4.5 years of operation, the dam was dismantled and thoroughly documented. The dismantling process revealed multiple instances of internal erosion, including signs of material displacement and seepage pathways, indicating potential vulnerabilities in the dam's structural integrity.

The Älvkarleby test dam was originally constructed as a test bed for identifying defects in a zoned embankment dam using non-destructive testing methods. A single research team was responsible for designing and building the dam, embedding five intentional defects within the core soil. The locations of these defects were known only to this team. Multiple other research teams attempted to locate these defects using various non-destructive techniques, including resistivity, fiber optics, seismic methods, pore pressure measurements, strain cables, surface scanning, and ground-penetrating radar. The dam was also subjected to drilling and grouting operations, as well as rapid regulation of the water reservoir.

Prior to dismantling, cone penetration testing and water level measurements were conducted on the core soil at full reservoir conditions. These tests revealed significant inhomogeneity in the core soil, particularly in terms of soil stiffness and that the water level in the core soil was higher than in the reservoir. Following these measurements, the reservoir was drained, and the dam was left undisturbed for three weeks before dismantling commenced.

Excavation occurred between 16 September and 3 October 2024, nearly five years after the dam's completion. The dismantling process was carried out in 40 cm increments, beginning with the filter zones and concluding with the core soil. All findings were meticulously documented and mapped. Key investigation points included the installed defects, abutments, suspected damage locations identified by the research teams, and areas where grout material had been injected.

Defects that permitted higher seepage flows exhibited minor changes in particle size distribution, and the fine filter downstream of these defects showed signs of washout. The other installed defects remained unchanged. Significant internal erosion was observed at the base of the vertical defect, where three pipes had formed—one of which traversed the entire core soil. These pipes developed along the boundary between core soil layers and were filled with sandy, gravelly eroded moraine.

A large "sinkhole" with an estimated volume of approximately 300 liters was discovered in the core soil. It was filled with the same type of sandy, gravelly soil found beneath the vertical defect. Beneath the "sinkhole", a very wet and soft zone was identified, likely caused by the installation of four pre-tensioned strain cables running through the core soil in an upstream–downstream direction. Additional sandy, gravelly zones were found in the lower third of the dam, some connected to the downstream filter and others appearing independently. Extensive signs of initiated erosion were found between core soil layers.

Grout material injected in November 2022 performed effectively in boreholes where low injection pressures were used. In contrast, boreholes subjected to high pressures—intended to fracture the core soil—did result in fracturing. These fractures consistently propagated upstream into the boundaries between core soil layers. The mechanical properties of the grout material and core soil were found to be very similar. Boreholes grouted at low pressure behaved as intended, with surrounding core soil remaining firm. In contrast, boreholes with fractures had ungrouted upper sections, resulting in soft surrounding core soil.

Pore pressure gauges installed in one section of the dam enabled settlement measurements at various depths. Overall, core soil settlement reached up to 3.5%, with the bottom 25 cm experiencing settlements as high as 15%.

Undisturbed core samples were extracted both vertically and horizontally from different levels of the core soil and tested for hydraulic conductivity. Horizontal samples were taken from the center of core soil layers and across boundary zones. In the upper part of the core soil, horizontal hydraulic conductivity in boundary zones was nearly 14 times greater than the vertical hydraulic conductivity. At the bottom of the core soil, this difference ranged from 2 to 4 times. Horizontal hydraulic conductivity through the center of a core soil layer was approximately 3 times higher in the upper part of the dam, but similar to the vertical hydraulic conductivity in the lower half of the dam.

Water content and density measurements varied widely due to the inhomogeneous nature of the core soil. Each core soil layer was found to be hard and brittle at the top, but soft and wet at the bottom. Sieving of the downstream fine filter revealed significant enrichment of fines, with some locations showing more than double the original fine material content.

Overall, the dam exhibited significantly more damage than expected for a structure only five years old and operated for 4.5 years under a maximum hydraulic gradient of 3. Four primary factors are suspected to be the main drivers behind the anomalies observed in the dam:

1. Inadequate compaction during construction.
2. Inherent weaknesses in the core soil, particularly at layer boundaries.
3. Use of fine filter material that did not conform to the design specifications.
4. Coarse filter separated during construction.

Appended to this report is a diary documenting the excavation process, written in Swedish. It reflects daily observations and hypotheses and has not been edited since its creation. Also appended is a paper presented at EurCOLD's Working Group on Internal Erosion and Overtopping in Brno, 2025.

Keywords

Internal erosion, Embankment dams, Grouting, Hydraulic conductivity, Particle size distribution..

Sammanfattning

Älvkarleby testdamm byggdes 2019 och har använts som en nationell och internationell forskningsanläggning fram till hösten 2024. Efter 4,5 års drift grävdes dammen ut och dokumenterades. Resultat från utgrävningen avslöjade flera fall av inre erosion.

Den ursprungliga avsikten med testdammen i Älvkarleby var att identifiera skador med hjälp av icke-destruktiva provningsmetoder. Ett team designade och byggde dammen med fem i tätjorden inbyggda defekter. Defekternas positioner var endast kända för detta team. Flera andra forskarteam försökte lokalisera defekterna med sina egna icke-destruktiva metoder, såsom resistivitetsmätning, fiberoptik, seismik, portrycksmätningar, töjningskablar, ytskanning och georadar. Dammen utsattes även för borrning, injektering samt snabb reglering av vattenmagasinet.

Före utgrävningen utfördes konpenetrationstester och mätningar av vattennivåerna i tätjorden vid full reservoarnivå. Resultaten visade att tätjorden var mycket inhomogent vad gäller styvhet samt att vattennivån i tätjorden låg högre än i reservoaren. Därefter tömdes magasinet, och dammen lämnades i tre veckor innan utgrävningen påbörjades.

Utgrävningen ägde rum mellan den 16 september och 3 oktober 2024, nästan fem år efter att dammen färdigställdes. Dammen demonterades i steg om 40 cm. Varje steg inleddes i filterzonerna och avslutades med tätjorden. Varje fynd dokumenterades och kartlades noggrant. Särskilt viktiga undersökningspunkter var de installerade defekterna, anslutningar, platser med misstänkta skador som identifierats av forskarteamen samt det injekteringsbruk som injekterats i dammen.

De installerade defekter som tillät högre genomströmning genom tätjorden visade mindre förändringar i partikelstorleksfördelningen och finmaterialet i finfiltret nedströms defekterna hade spolats ur. Övriga inbyggda defekter visade inga förändringar. I botten av den vertikala defekten påträffades omfattande inre erosion. Tre horisontella pipes hade bildats där, varav en gick helt igenom tätjorden. Pipingen hade utvecklats i gränszonen mellan tätjordslager, och skadorna var fyllda med sandigt, grusigt eroderat tätjordsmaterial.

Ett stort ”sjunkhål” hittades i tätjorden med en total volym på cirka 300 liter. ”Sjunkhålet” var inte tomt, utan fyllt med samma typ av sandigt, grusigt material som påträffades under den vertikala defekten. Under sjunkhålet identifierades ett mycket vått och mjukt område. Den troliga orsaken till detta område var installationen av fyra förspända töjningskablar som gick genom tätjorden i uppströms–nedströms riktning. Sandiga, grusiga zoner hittades på flera platser i den nedre tredjedelen av tätjorden. Vissa av dessa zoner anslöt nedströms finfilter, medan andra tycktes ha bildats oberoende. Initierad inre erosion påträffades på flera ställen i gränszonen mellan tätjordslager, vilket indikerar att denna del av tätjorden är svag.

Injekteringsbruket som injekterades i november 2022 fungerade mycket bra i de hål där låga injekteringstryck hade använts. I de hål där höga injekteringstryck hade använts, med syfte att spräcka tätjorden, hade denna faktiskt spräckts. Sprickplanens orientering var alltid uppströms och in i gränszonen mellan tätjordslagren. De mekaniska egenskaperna hos tätjorden och injekteringsbruket var mycket lika. De hål som injekterats med lågt tryck fungerade nästan exakt som avsett, och tätjorden runt dessa hål var hård. Runt de hål där uppspräckning hade skett hade de övre delarna av hålet inte injekterats, vilket gjorde att tätjorden runt dessa hål var mjuk.

De installerade portrycksmätarna i en sektion av dammen möjliggjorde sättningsmätningar av tätjorden på olika nivåer. Totalsättningarna i tätjorden var generellt upp till 3,5 %, men i de nedersta 25 cm uppmättes relativa sättningar på upp till 15 %.

Ostörda kärnprover från olika nivåer i dammen, tagna både vertikalt och horisontellt, testades för hydraulisk konduktivitet. Horisontella prover togs både från mitten av ett tätjordslager och genom gränszonen där två lager möts. Den horisontella hydrauliska konduktiviteten genom en gränszon var nästan 14 gånger högre i toppen av dammen jämfört med den vertikala hydrauliska konduktiviteten. I botten av dammen var skillnaden 2 till 4 gånger. Den horisontella hydrauliska konduktiviteten genom mitten av tätjordslagren var nästan 3 gånger högre i toppen, men likvärdig med den vertikala i den undre halvan av dammen.

Vattenkvots- och densitetsmätningar gav mycket varierande resultat på grund av tätjordens inhomogenitet. Det konstaterades att varje enskilt tätjordslager var hårt och sprött i toppen men mjukt och vått i botten. Siktning av nedströms finfilter visade en betydande anrikning av finmaterial. På vissa platser hade mängden finmaterial mer än fördubblats jämfört med det ursprungliga innehållet.

Sammanfattningsvis hade dammen mycket mer omfattande skador än vad som förväntades av en damm som bara varit i drift i 4,5 år med maximala gradienter på 3. Fyra primära faktorer misstänks vara orsaken bakom den funna inre erosionen:

1. Otillräcklig packning under byggtiden.
2. Svagheter i tätjorden, i synnerhet vid pallskiften.
3. Använt finfiltermaterial skiljde sig från designen.
4. Separerat grovfilter vid byggtiden.

Bifogat till denna rapport finns dagboken från tiden då dammen grävdes ut. Denna dagbok är på svenska och presenterar arbetet och uppkomna teorier efter varje arbetsdag. Dagboken har inte redigerats sedan den skrevs. Slutligen bifogas en artikel som skickats in och presenterats vid EurCOLDs arbetsgrupp för inre erosion och överströmning i Brno 2025.

List of content

1 Introduction 10

1.1 Purpose of the report 11

2 Design of the dam 12

3 Plan for dismantling 15

3.1 Prior to the dismantling 15

3.2 During the dismantling 16

3.3 After dismantling 20

4 Prior to the dismantling 21

4.1 CPT 21

4.2 water levels 23

5 The crest 25

6 Built-in defects 30

6.1 Horizontal permeable zone 30

6.1.1 Horizontal permeable zone at left abutment 30

6.1.2 Horizontal permeable zone at centre 35

6.2 Concrete cube 40

6.3 Vertical permeable zone 45

6.4 wooden cube 51

7 Internal erosion 56

7.1 “Large Sinkhole” 56

7.2 Under the large sinkhole. 68

7.3 “Horizontal piping” 76

7.4 “Sandy zone” 89

7.5 “right abutment” 99

8 Injection grouting 104

8.1 Injection grouting hole 1 104

8.2 Injection grouting hole 2 113

8.3 Injection grouting hole 3 120

8.4 Injection grouting hole 4 130

8.5 Injection grouting hole 5 138

8.6 Injection grouting hole 6 152

8.7 Water content and particle size distribution of grout materials. 156

9 Pore pressure gauges 159

10 Other observations 176

10.1 Inhomogenus core soil 176

10.2 Boundary zone core soil and fine filter 187

10.3 Sandy patches 190

10.4 Anomaly of core soil at right abutment 194

10.5 The abutments 197
10.6 Top shape of a layer of core soil 203
10.7 Bottom of downstream coarse filter 207

11 Sampling 211

11.1 general sieving 211
11.2 Hydraulic conductivity 212
11.2.1 Vertical hydraulic conductivity 212
11.2.2 Horizontal hydraulic conductivity 213
11.2.3 Comparison vertical horizontal hydraulic conductivity 213
11.3 Dry Density and water content 214
11.3.1 Dry density 215
11.3.2 Water content 216

12 Conclusive remarks for future dismantling projects 218

13 Conclusions 219

14 Referenser 221

Appendix A: Dismantlig diary 222

14.1 16th of September 2024 222
14.2 17th of september 2024 228
14.3 18th of september 2024 234
14.4 19th of september 2024 245
14.5 20th of september 2024 258
14.6 23rd of september 2024 271
14.7 24th of september 2024 287
14.8 25th of september 2024 303
14.9 26th of september 2024 324
14.10 27th of september 2024 341
14.11 30th of september 2024 357
14.12 1st of october 2024 376
14.13 2nd of october 2024 399

Appendix B: Paper to EurCOLD's Working Group on internal erosion 428

1 Introduction

In 2019 a test rig containing an experimental embankment dam was constructed as a collaboration between Vattenfall AB and research groups from Luleå University of Technology (LTU), Uppsala University (UU), Lund University (LU) and HydroResearch AB. The dam was constructed at the Vattenfall R&D Laboratory in Älvkarleby.

Most of the large-scale hydropower dams in Sweden were constructed before 1970. These embankment dams were typically built as zoned embankment dams with a moraine core, sandy gravel filters, and shoulders made of earth or rockfill. As time progresses, dams age due to internal erosion and other contributing factors. Consequently, identifying suitable and reliable non-destructive testing methods to detect defects in embankment dams has been the overarching goal of the experimental dam project. Therefore, ensuring scalability and applicability to full-scale dams was crucial.

The project had two primary objectives. First, to evaluate the feasibility of detecting six embedded defects in a zoned embankment dam using non-destructive geophysical methods. Second, to investigate the mechanical and geotechnical behavior of the dam during initial impoundment and throughout long-term operation. The experimental dam at Älvkarleby was designed in accordance with the Swedish dam safety guidelines (RIDAS, 2012). The six embedded defects were engineered to remain stable over time, as the project's main focus was not on studying degradation or internal erosion, but on identifying anomalies within the dam structure.

The project was initially launched by the Vattenfall Hydro R&D program “Dam Safety and Infrastructure” and was conducted from 2018 to 2024. The test rig and embankment dam was designed, constructed, maintained, and funded by Vattenfall AB. Several components of the dam's instrumentation and associated monitoring equipment were procured by Vattenfall. Participating researchers were encouraged to secure additional financial support from sources such as Energiforsk, other funding agencies, and their respective institutions. Vattenfall aimed to share the testing infrastructure to increase the total value of the investment. This arrangement ultimately resulted in more than doubling the funding available for research.

The design of the project was based on insights gained from a previous blind-test conducted in Rössvattnet, Norway in 2003, where the potential of geophysical methods i.e., resistivity, self-potential, and temperature surveying was evaluated on a rockfill embankment dam (Johansson, 2005). The Rössvattnet embankment dam had a central moraine core supported by rock fill and included built-in defects. A desktop sensitivity study, based on the material properties and modeling of the construction materials, indicated that detecting small defects through single campaign surveys would not be feasible. Nevertheless, geophysicists were able to identify defect locations by employing a monitoring approach that analyzed changes over time. The Norwegian blind-test dam did not follow the conventional design of a rockfill embankment dam, as it lacked filters separating the impermeable core from the shoulder material (rock fill).

Synthetic pre-modelling of the Älvkarleby dam was conducted by researchers using various methods, e.g., electrical resistivity and tomography, thermal response modelling, and 2D and 3D seismic modelling, prior to finalizing the embankment dam design. Temperature finite element modelling, along with resistivity and seismic analyses, yielded promising results; therefore, monitoring equipment was installed in the dam. The pre-modelling was based on the characteristics of the six defects, e.g., size, hydraulic conductivity and porosity, although their locations were unknown to the researchers. Consequently, the final selection of sensor technologies and installation strategies was guided by synthetic modelling studies conducted in 2018 to ensure that the defects could be expected to be detectable using the chosen methods. The following geophysical methods were employed in the Älvkarleby experimental dam:

- Electrical resistivity method
- Fiber optic methods
    - Distributed Temperature Sensing (DTS)
    - Distributed Acoustic Sensing (DAS)
    - Distributed Strain Sensing (DSS)
- Seismic investigations
- Ground penetrating radar (GPR) investigation.

In addition to the geophysical installations, conventional embankment dam monitoring, e.g., seepage via Thomson weirs, reservoir water levels, temperatures, pore pressures in the core, turbidity of seepage, and deformations (geodetic, inclinometer and strain) was conducted

A workshop was held in Älvkarleby in June 2022 with participants from Vattenfall and the research groups. During the workshop, the research groups presented their findings, including interpreted positions of the defects. Following their presentations, the locations of the six built-in defects were revealed to the research groups for the first time. Thus, all measurements and interpretations, including publications, up to that point were based solely on blind data.

After completing the primary objective of identifying defects through geophysical measurements, the test dam was subjected to both rapid regulation and drilling and grouting.

1.1 PURPOSE OF THE REPORT

After 4.5 years of dam operation (September 2024), it was dismantled. This report presents the planning, sampling, testing, and findings from the dismantling process. No conclusions are provided, only findings from the dismantling and results from geotechnical testing.

2 Design of the dam

Cross-section of the dam with its zones and heights is shown in Figure 1.

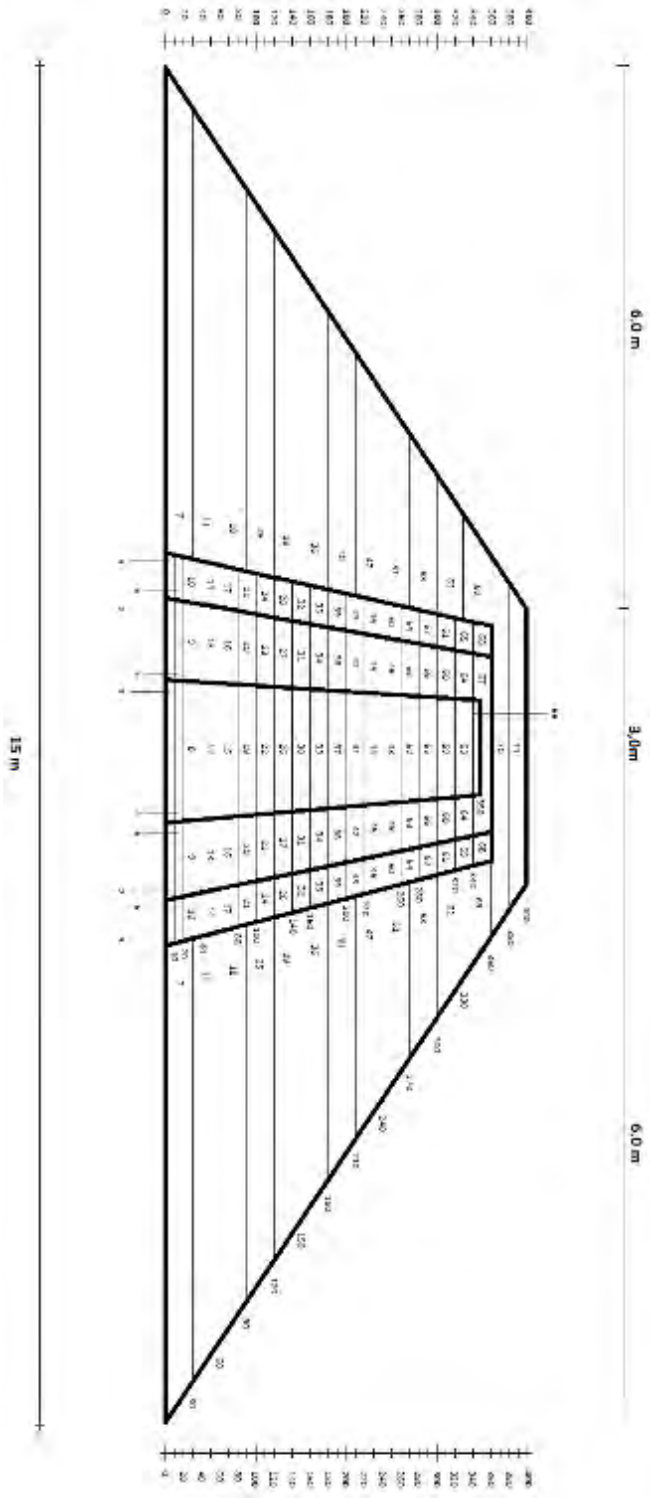


Figure 1. Cross-section of the dam. The dam was 20 m long at the bottom and 21 m at the crest. Abutments leaning with a 1:8 H:V-ratio.

The two bottom layers of core soil and both filters were each 10 cm thick. The remaining overlaying layers were each 20 cm thick. Structural fill was placed in 30 cm thick layers.

The dam consisted of a central core soil composed of 0/20 mm moraine with a fine content of approximately 30 weight-%. Surrounding the core soil was a 0/16 mm fine filter. Outside the fine filter was a 4/64 mm coarse filter, followed by a 32/150 mm structural fill. All dimensions are shown in Figure 1 and the mean particle size of all materials involved is presented in Figure 2.

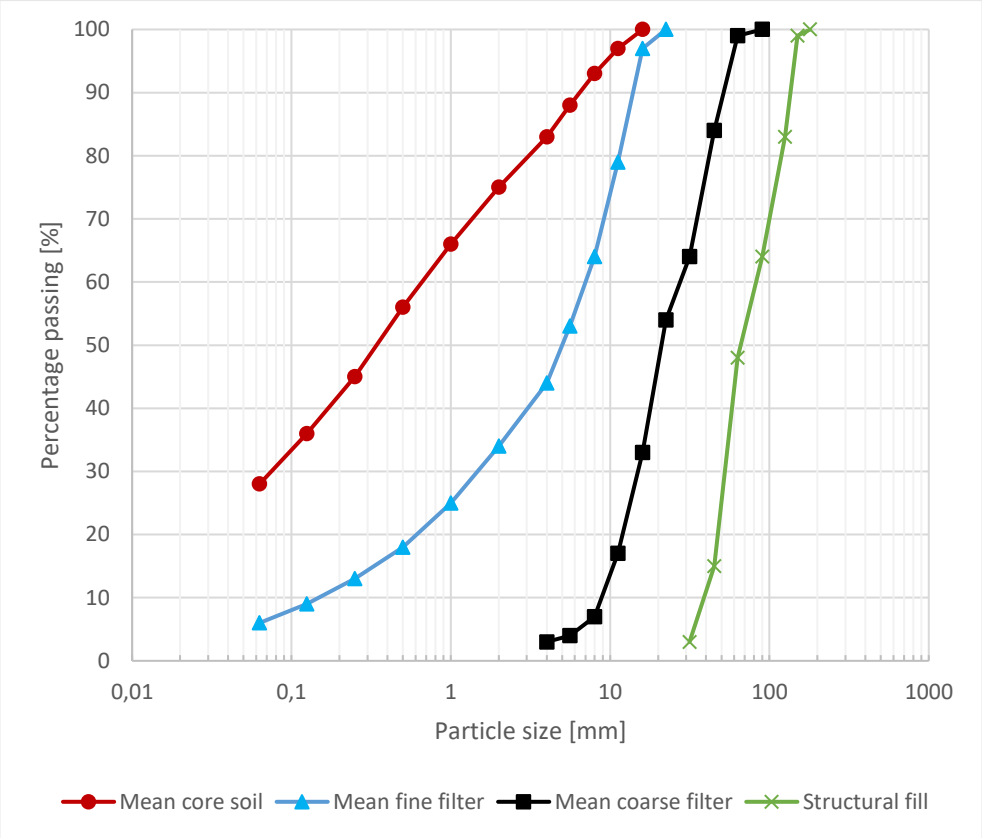


Figure 2. Mean particle size distribution of core soil, filters and structural fill of the dam.

During construction in October–November 2019, sieve analyses were conducted on the materials used in each individual layer, as shown in Figure 1. This involved a total of 36 sieve analyses for the core soil, 36 for the fine filter, and 36 for the coarse filter. Supplier data was used for the structural fill. A detailed breakdown of the particle size distribution for the core soil and fine filter is presented in Figure 3 and Figure 4. These figures include the variations observed across all analyses.

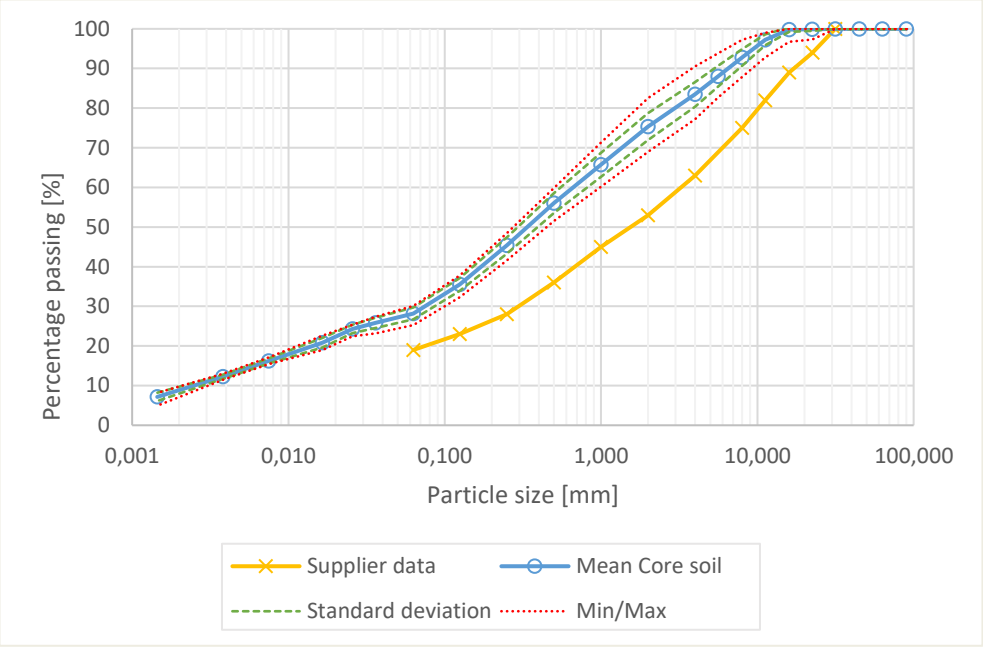


Figure 3. Variation of particle size distribution for the core soil.

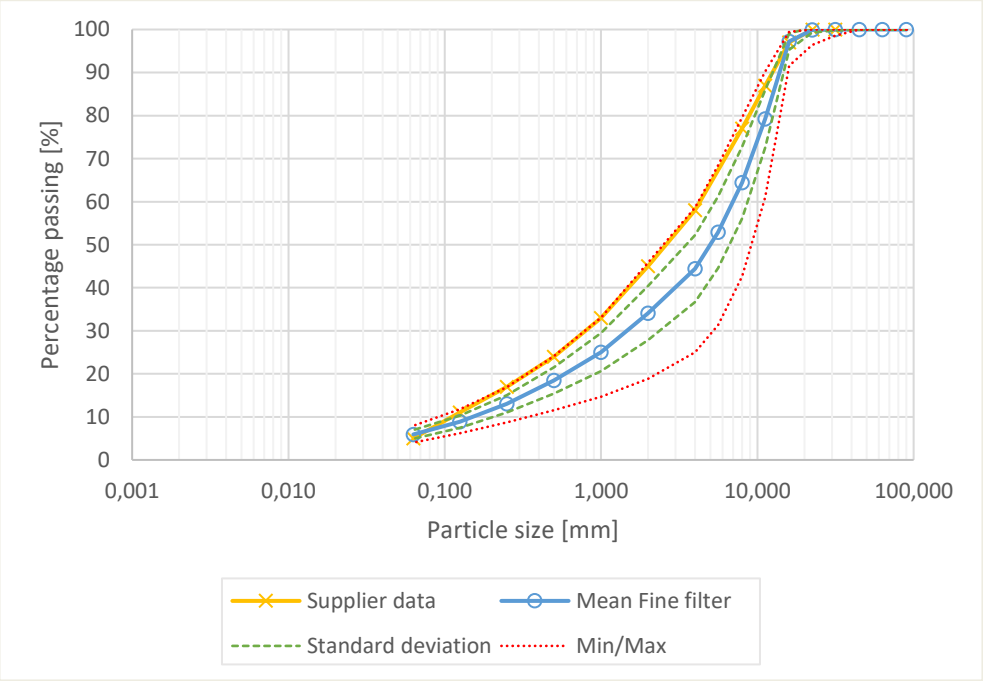


Figure 4. Variation of particle size distribution for the fine filter.

Throughout this report, the term "level" is used to refer to the distance from the very bottom of the dam to the point of observation. For example, level 100 cm indicates a position 100 cm above the concrete base on which the dam was founded. The dam crest was at level 400 cm, and the core soil crest at the time of construction was at level 347 cm. The water reservoir level during most of the dam's lifetime was at level 328 cm.

3 Plan for dismantling

Activities prior, during and after the dismantling is presented in this section.

3.1 PRIOR TO THE DISMANTLING

- Cone penetration testing (CPT)of the core soil at full water reservoir.
- Measurements of water levels in the core soil.
- Reservoir drained.

This work was done with a 3 ton drilling rig. CPT only took place in the core soil. Prior to CPT sounding, structural fill and filter zone above the crest had to be removed, see Figure 5.

Figure 5. CPT sounding of the core soil from the crest. Note that the structural fill and the fine filter on the crest has been removed.

3.2 DURING THE DISMANTLING

The dam was dismantled in ~40 cm thick layers, progressing from abutment to abutment and starting with the structural fill, finishing with the core soil, see Figure 6. An 18-ton excavator was used to remove the soil materials.

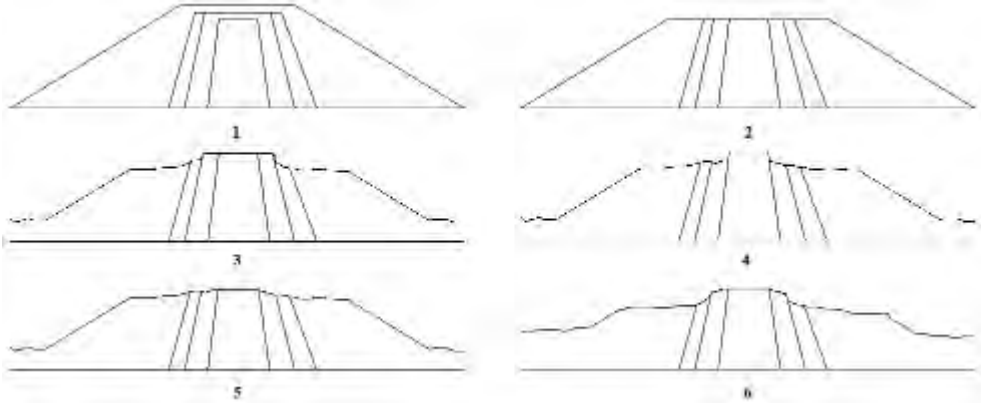


Figure 6. Dismantling sequence.

1. Original dam viewed from the side.
2. Crest material removed, revealing the top of the core soil.
3. Approximately 40 cm of up- and downstream coarse filter removed from left to right across the full length of the dam.
4. Approximately 40 cm of up- and downstream fine filter removed from left to right across the full length of the dam. Sampling conducted on the downstream fine filter prior to removal.
5. Approximately 40 cm of core soil removed from left to right across the full length of the dam. Testing and sampling of the core soil conducted.
6. Step 3 – 5 repeated.

Note: where internal erosion and grouting material were found, manual excavation was carried out. Manual excavation was also carried out around the installed defects.

During dismantling, soil materials from the downstream fine filter, core soil, and identified defects were sieved according to ISO 17892-4:2016. The downstream fine filter material was extracted as close as possible to the core soil within the "Christmas tree pattern" of the core soil., see Figure 7.

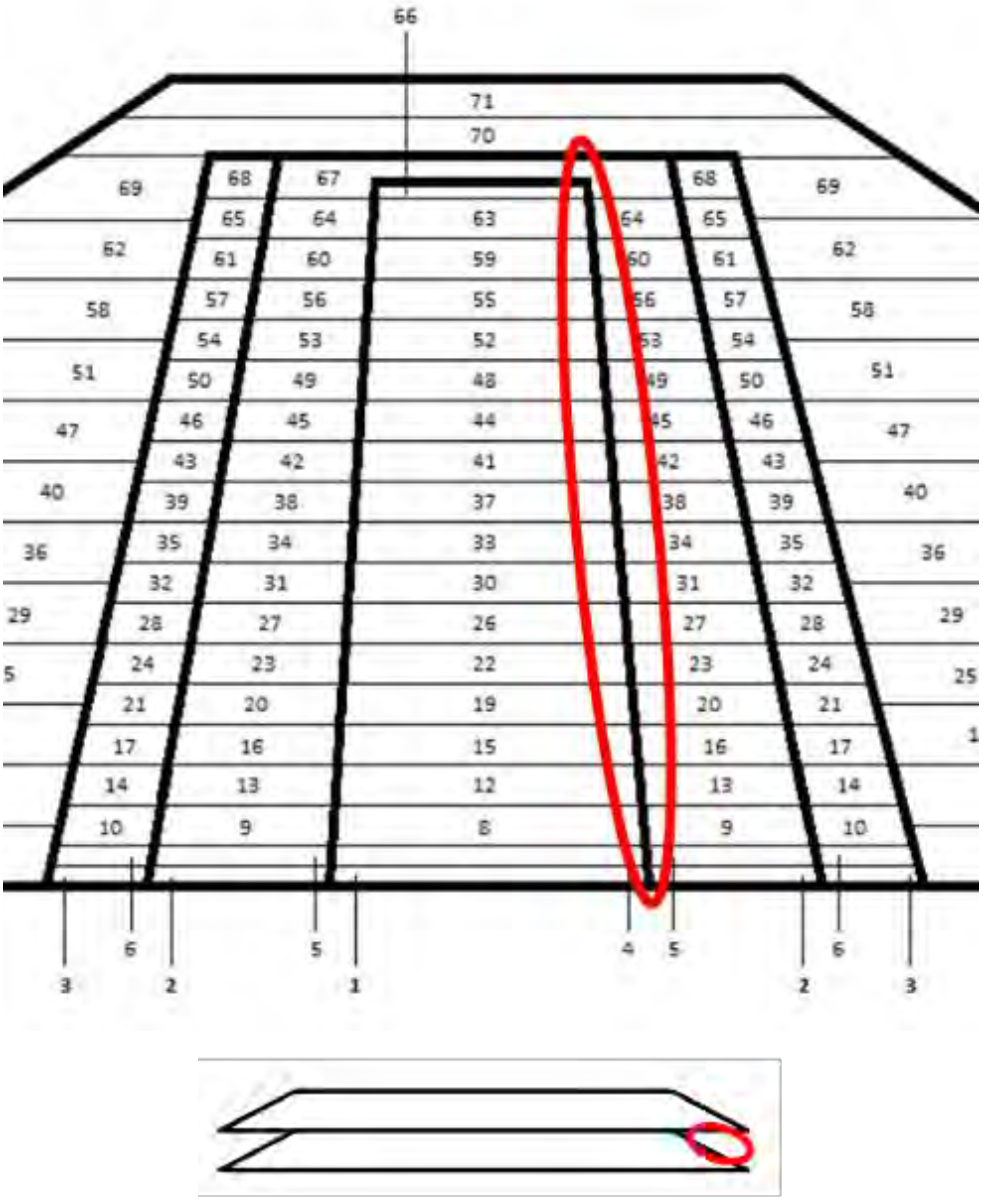


Figure 7. Zone of interest for the extraction of downstream fine filter material (top). Two layers of core soil enhanced at the bottom. Red circle marks where fine filter core soil material was extracted.

Density and water content of the core soil was tested according to standards SS 027110 (water volumetric testing) and SS-EN ISO 17892-1:2014/A1:2022.

Height positioning of findings when needed was done using an optical levelling instrument.

Documentation of findings were done with cameras.

Undisturbed samples from the core soil were manually extracted using steel tubes, 170 mm long and 50 mm in diameter. The steel tubes were open at both ends, with the bottom end sharpened. The sharpened end of the tube was placed on the core

soil. A steel cap covered the top of the tube, and a hammer was used. Samples were extracted either from the core soil at the left abutment or at the center of the dam.

Three types of core soil samples were extracted:

- Vertical samples, see Figure 8.
- Horizontal samples, see Figure 9. The horizontal samples were extracted either from the center of a core soil layer or from the boundary zone between two layers, see Figure 10.

Figure 8. Vertical core sampling.

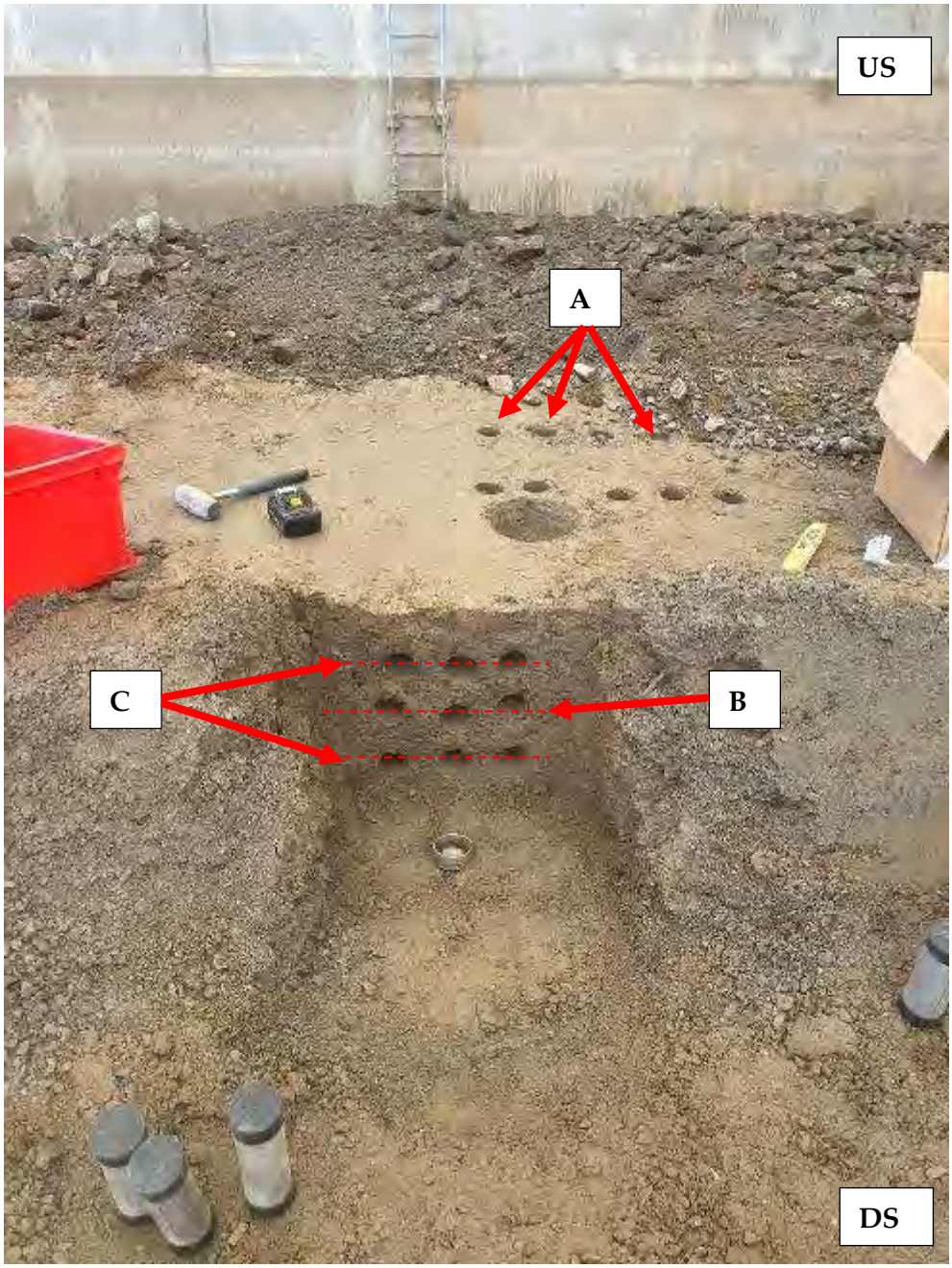


Figure 9. Horizontal core soil sampling. See Figure 10 as reference to point A, B and C.

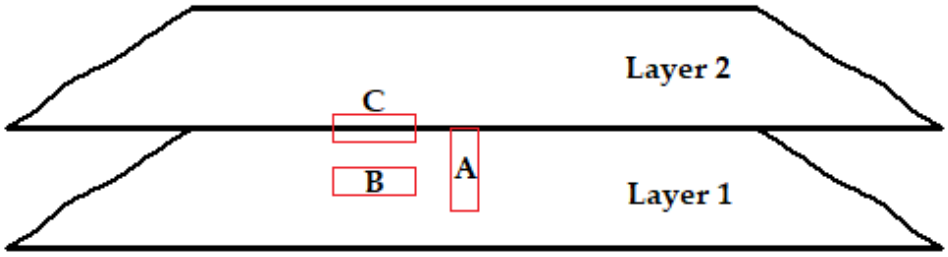


Figure 10. Orientation of extraction of core soil samples. A is vertical sample, B is horizontal sample from the center of the layer. C is horizontal sample from the layer boundary.

These samples were sealed and placed in a cooling facility before testing.

3.3 AFTER DISMANTLING

Apart from sieving, hydraulic testing was performed on the extracted, undisturbed core soil samples in accordance with standard SS-EN ISO 17892-11:2019 (flexible wall permeameter). Triaxial testing is scheduled to be performed in accordance with standard ASTM D7181-20 (consolidated drained) and is therefore not included in this report.

4 Prior to the dismantling

Before the lowering of the reservoir, CPT was performed at both abutments and in the centre of the dam. Two CPT soundings were made at each location, i.e. upstream and downstream of the centre line of the dam, see Figure 11.

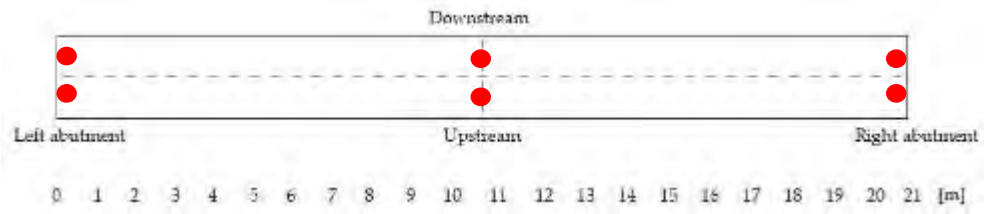


Figure 11. Location of CPT holes viewed from above. Only the core soil is visualized.

4.1 CPT

Results presented in Figure 12 to Figure 14.

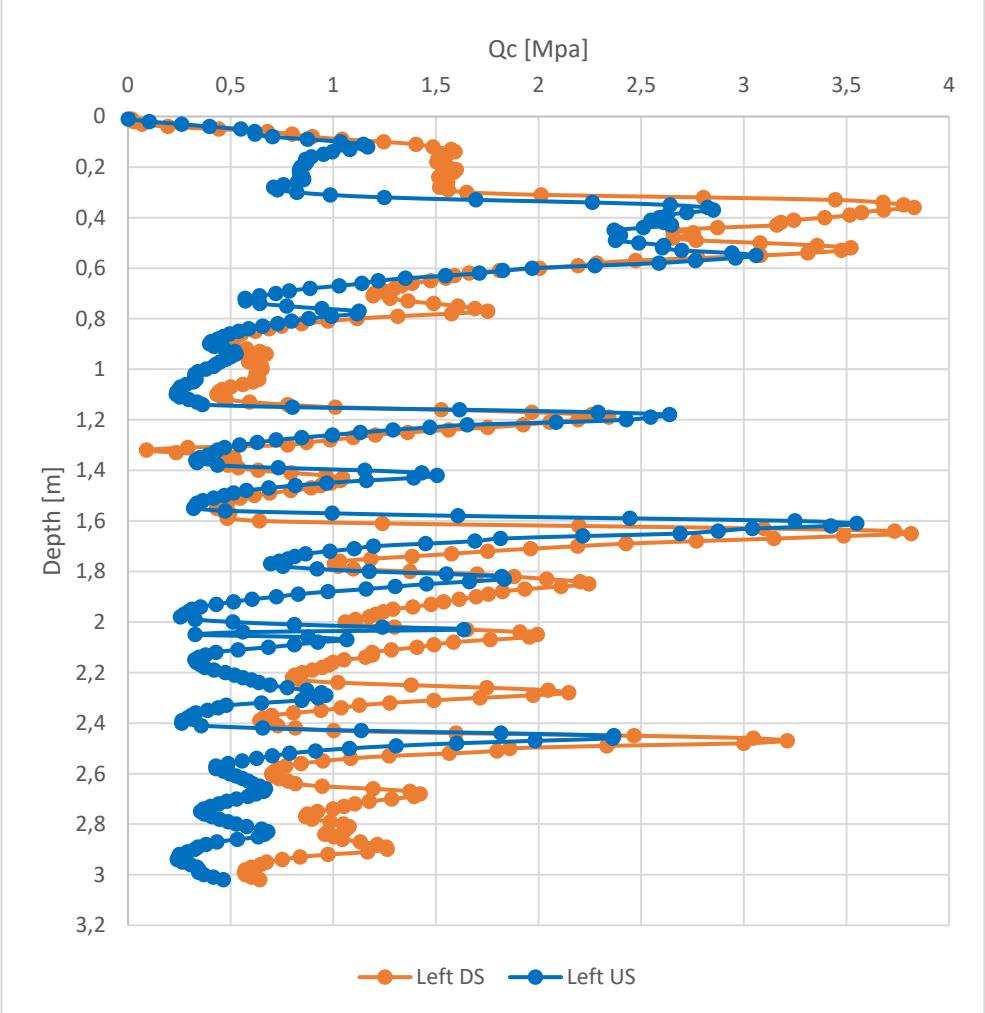


Figure 12. Measured cone tip resistance, Q_c, versus depth in the core soil at the left abutment.

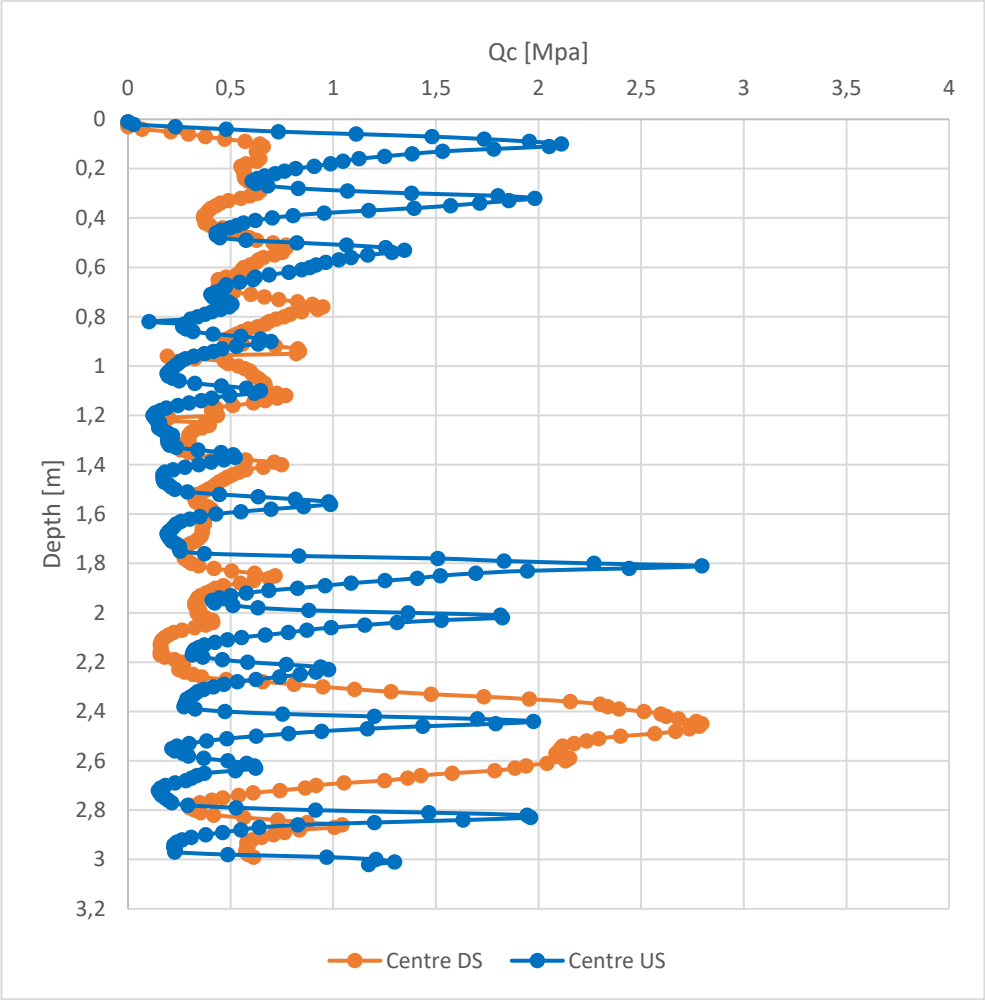


Figure 13. Measured cone tip resistance, Q_c, versus depth in the core soil at the centre of the dam.

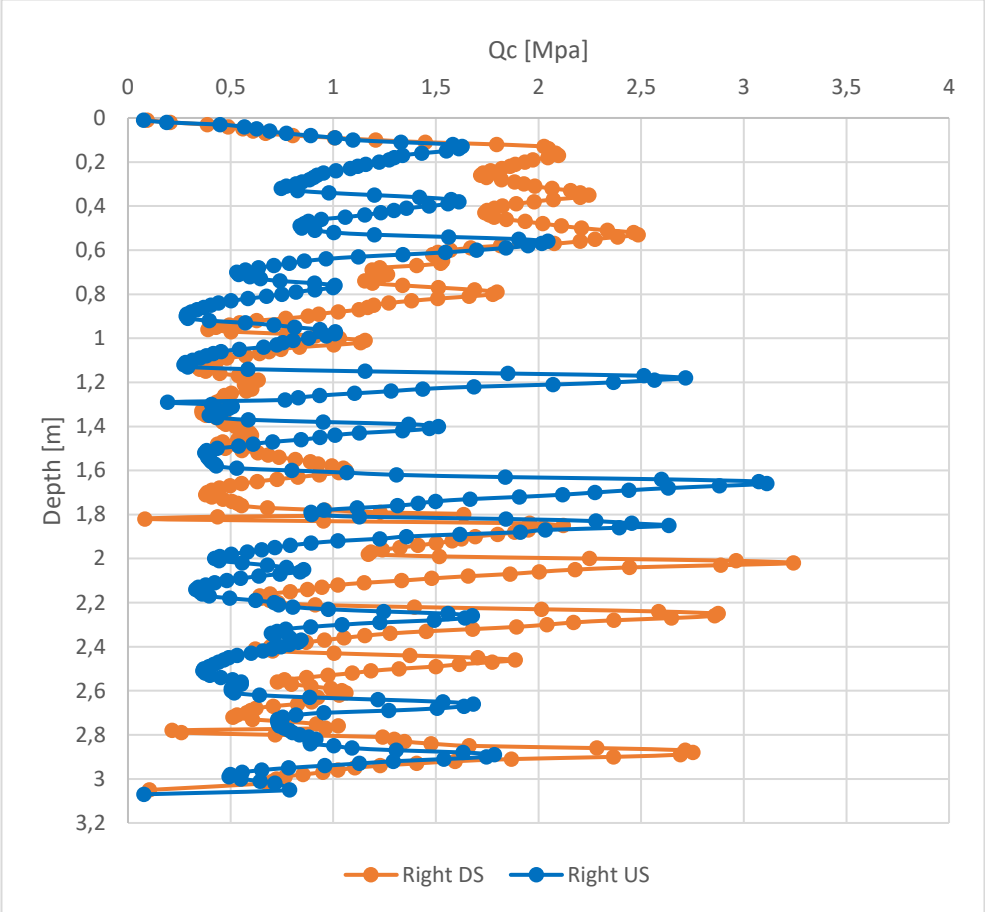


Figure 14. Measured cone tip resistance, Qc, versus depth in the core soil at the right abutment.

Higher Q_c mean higher stiffness of the soil. The core soil in the centre (Figure 13) was generally less stiff compared to the soil at the abutments (Figure 12 and Figure 14). At the abutments, the soil in the downstream side of the core was stiffer compared to the soil in the upstream side of the core. In the centre, the soil in the upstream side of the core was stiffer compared to the soil in the downstream side of the core.

From the CPT figures, the layered structure of the core soil is clearly seen. Each layer in the core soil was roughly 20 cm, which corresponds to the distance between each peak in Q_c.

4.2 WATER LEVELS

Water levels could be measured in the CPT holes the day after the sounding at full reservoir level. Results hereof are presented in Figure 15.

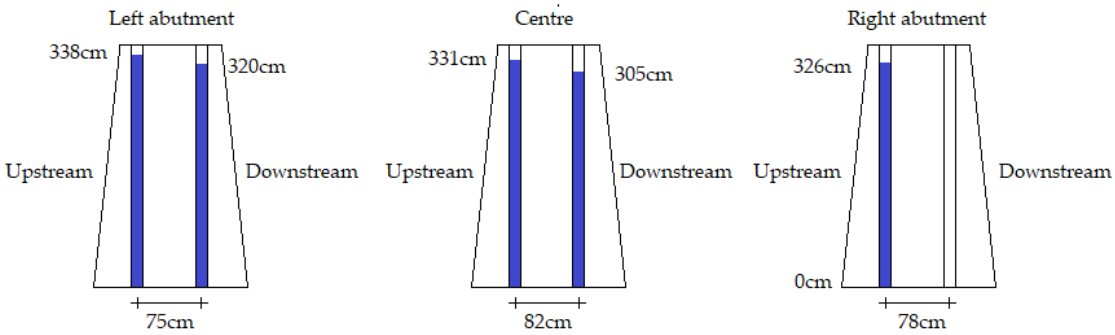


Figure 15. Water levels in the CPT holes.

Core crest level at the left abutment, centre and right abutment were 345 cm, 343 cm and 338 cm respectively. Water level in reservoir was ca 325 cm. Water level inside the core soil was thus higher than the water reservoir level. At the time water levels were measured, foam had built up in the CPT holes during the night. This indicates air being present inside the core soil and released into the holes, see Figure 16.

Figure 16. Air release from the core soil as seen as a foam on the top of the CPT sounding holes on the 15th of August 2024.

5 The crest

Shoulder fill and fine filter material was removed from the crest down so the top of the core soil was laid bare, see Figure 17. The core soil crest was measured with an optical balancing instrument, see Figure 18.

Figure 17. Core soil crest after removal of shoulder fill and fine filter material on the 17th of September 2024.

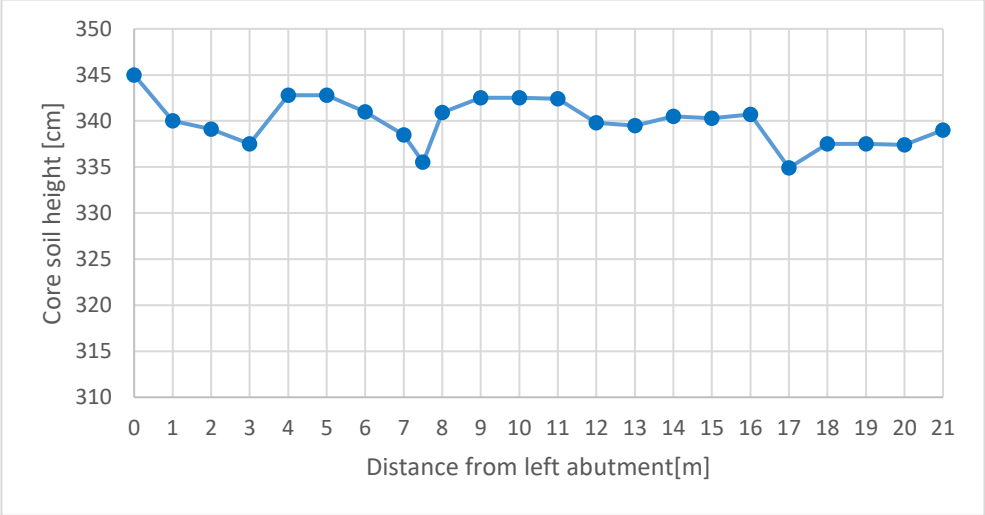


Figure 18. Core soil level at the crest.

The difference in the core crest level, between its highest and lowest point, was 100 mm. At the time of construction in November 2019, the core crest level difference was no more than 5 mm. Core soil crest level at time of construction was 347 cm.

It was also found that the core soil crest had been suspended against the abutments. This was particularly evident at the left abutment, see Figure 19. The sore soil crest surface had a slope of ca 10° into the centre of the dam. The slope at the right abutment was ca 6°. The suspension against the abutments can also be seen in Figure 18.

Figure 19. Photo from left abutment. Core soil is suspended against the abutment. Ruler in the photo is laid out horizontally and at its right side it is in contact with both the core soil crest and the abutment.

An edge was found at the core soil crest at its downstream side, see Figure 20. The edge ran across the whole crest. The core soil at the crest downstream the edge was slightly higher than the core soil upstream the edge. The height of the core soil crest was measured at eight locations with an optical balancing instrument. At each location, the core soil crest level was measured both up- and downstream the edge. The height increase downstream the edge could thus be calculated, see Figure 21.

Figure 20. The edge on top of the core soil crest marked with red arrows, 17th of September 2024.

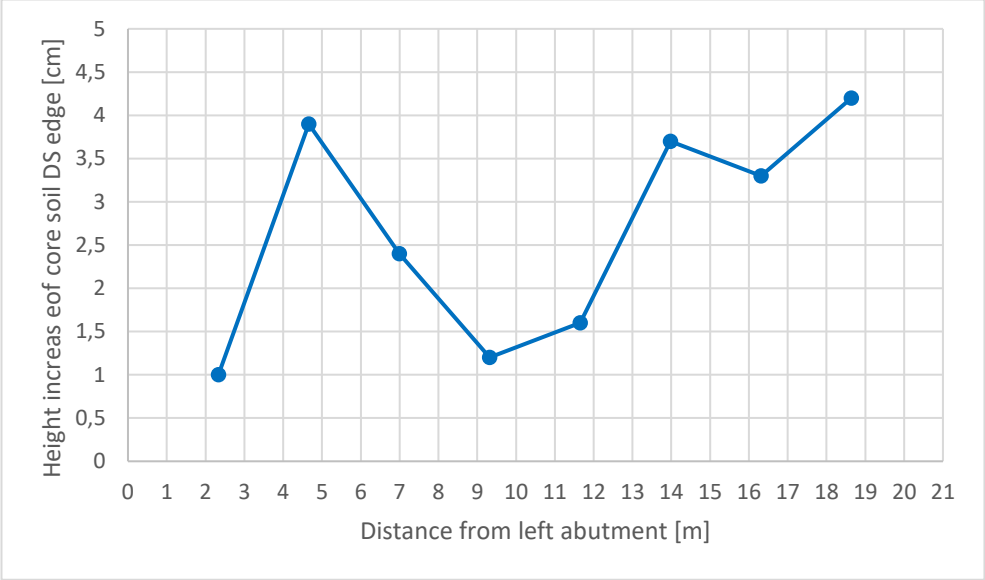


Figure 21. Height increase downstream the edge on the core soil crest.

The height increase was between 1 – 4 cm. A close-up photo of the edge is shown in Figure 22.

Figure 22. Close-up of the core soil crest edge. Downstream of the dam is at the top of the photo.

6 Built-in defects

There was a total of five built-in defects in the dam. Their locations are shown in Figure 23 and Figure 24.

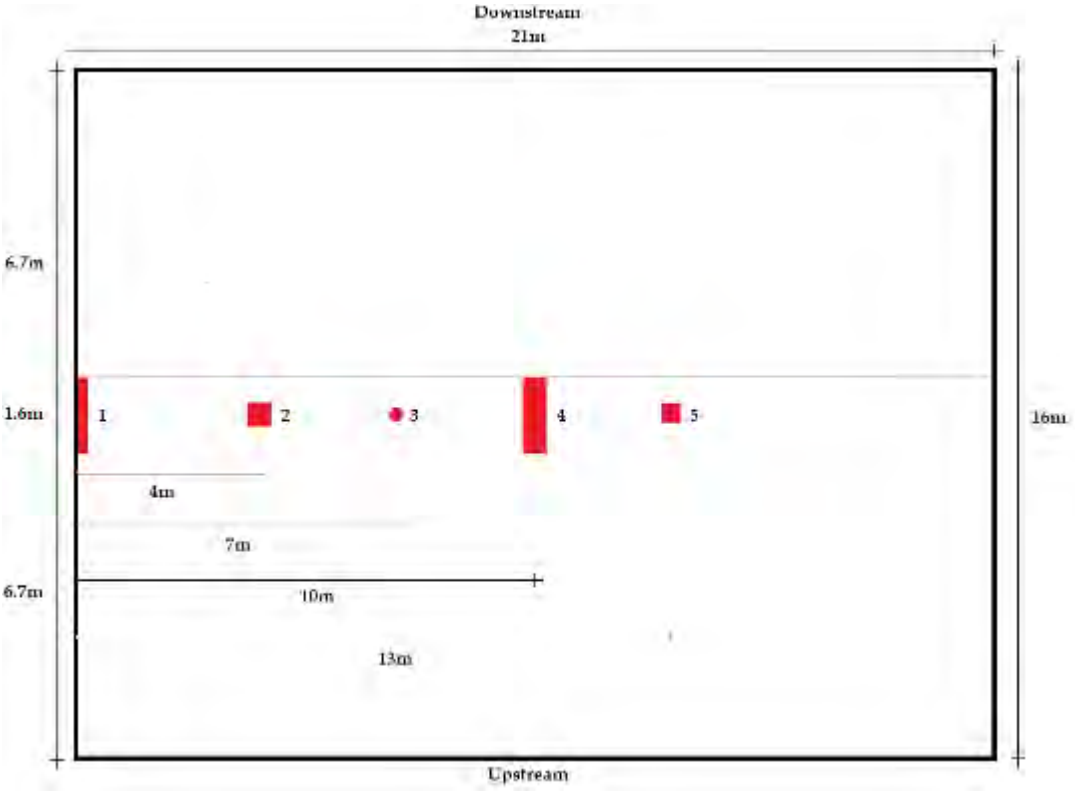


Figure 23. Placement of built in defects viewed from above.

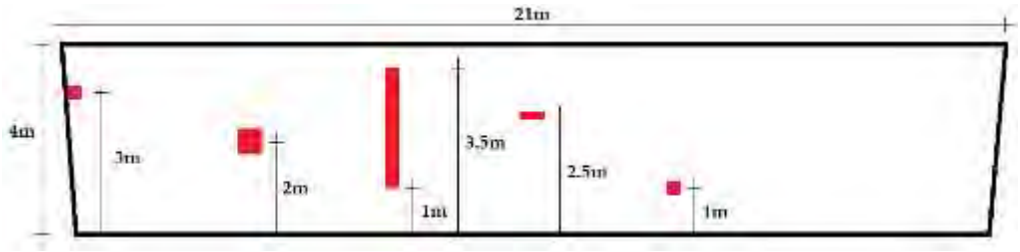


Figure 24. Placement of built in defects viewed from upstream side toward downstream side.

6.1 HORIZONTAL PERMEABLE ZONE

There were two built-in defects labelled horizontal permeable zone, defect 1 and 4 according to Figure 23.

6.1.1 Horizontal permeable zone at left abutment

This zone, labelled defect 1 according to Figure 23, was placed at the left abutment at ca level 300 cm. It traversed the core soil completely, was made of 4/8 mm gravel surrounded by fine filter material on all sides, see Figure 25. It was square shaped with each side measuring ca 10 cm.

Figure 25. Photo of defect 1 at time of installation on the 11th of November 2019.

Defect 1 at time of demolition is shown in Figure 26.

Figure 26. Photo of defect 1 taken 18th of September 2024. Downstream side is at the top of the photo. Red circles mark the locations where samples for sieving were extracted. The "hole" at the centre of the defect is from the injection grouting.

The two particle size distributions from the defect, US damage and DS damage, can be seen in Figure 27 and compared to the original particle size distribution of the defect material as built on the 11th of November 2019.

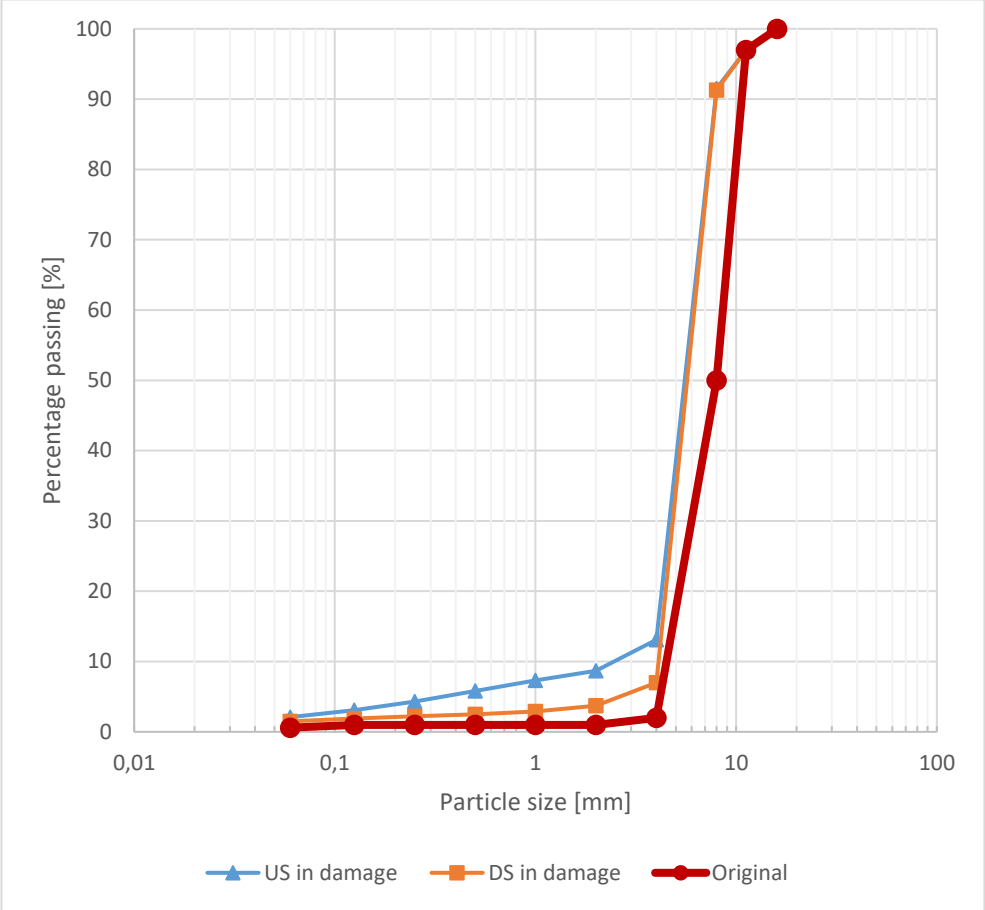


Figure 27. Particle size distributions from defect 1.

The upstream side of defect 1 contain more fine material than the downstream side. The original defect 1 material at time of construction was constituted by less than 1 weight-% of material <2 mm. Corresponding weight-% of material <2 mm from the upstream- and downstream at time of dismantling was 9 weight-% and 4 weight-% respectively.

The fine filter directly downstream defect 1 is shown in Figure 28.

Figure 28. Photo of the downstream fine filter at the exit point of defect 1 taken 19th of September 2024. Red circle mark the location where sample for sieving was extracted. Fine filter has been washed-out of fines. The grey-coloured soil indicates no seepage had passed through it. Brown-coloured soil had been passed by seepage.

Particle size distribution from fine filter downstream defect 1 can be seen in Figure 29.

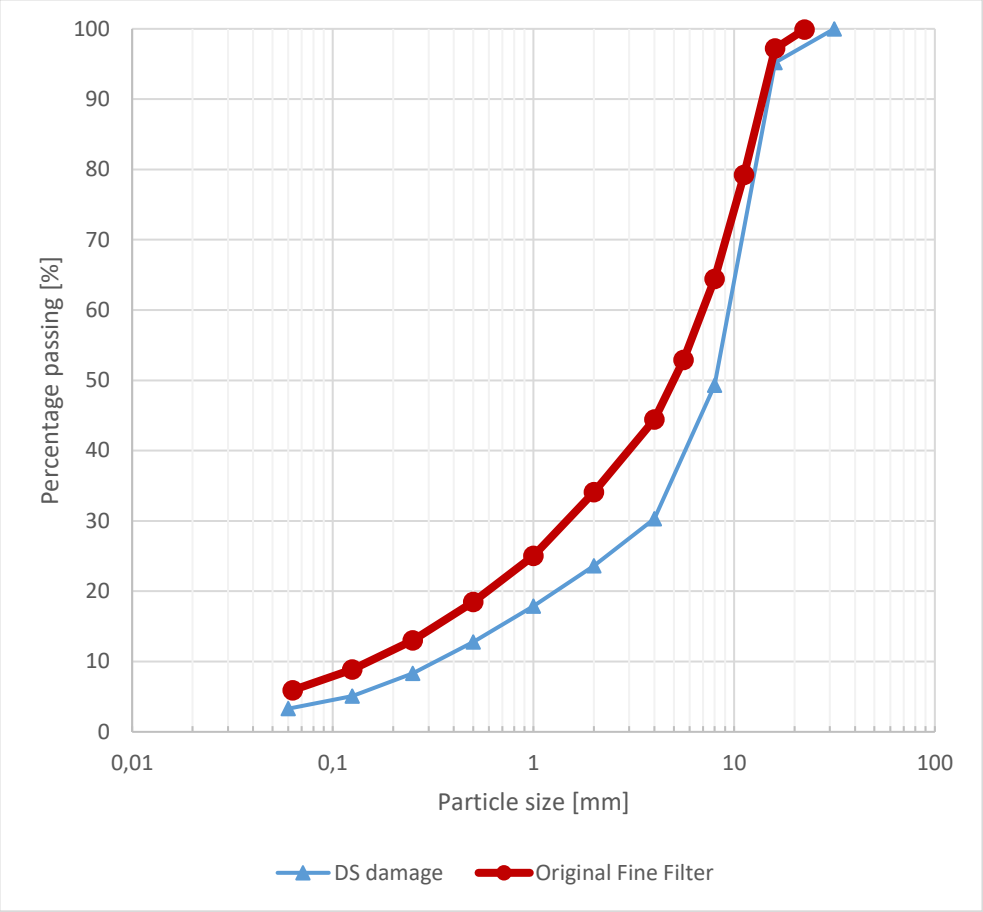


Figure 29. Particle size distribution from the fine filter downstream defect 1.

Fine material content (<0.063 mm) in the fine filter material at time of construction was ca 6 weight-%. Corresponding fine filter content at time of dismantling was ca 3 weight-%, a reduction of 50 %.

6.1.2 Horizontal permeable zone at centre

This zone, labelled defect 4 according to Figure 23, was placed at the centre of the dam, 10.5 m from the left abutment at ca level 250 cm. It traversed the core soil completely, was made of 4/8 mm gravel (same as defect 1) and surrounded by fine filter material on all sides, see Figure 30. It was rectangularly shaped with sides measuring ca 10x30 cm.

Figure 30. Photo of defect 4 at time of installation on the 7th of November 2019.

Defect 4 at time of demolition is shown in Figure 31.

Figure 31. Photo of defect 4 taken 20th of September 2024. Downstream side is at the right side of the photo. Red circles mark the locations where samples for sieving were extracted.

The two particle size distributions from the defect, US damage and DS damage, can be seen in Figure 32 and compared to the original particle size distribution of the defect material as built on the 7th of November 2019.

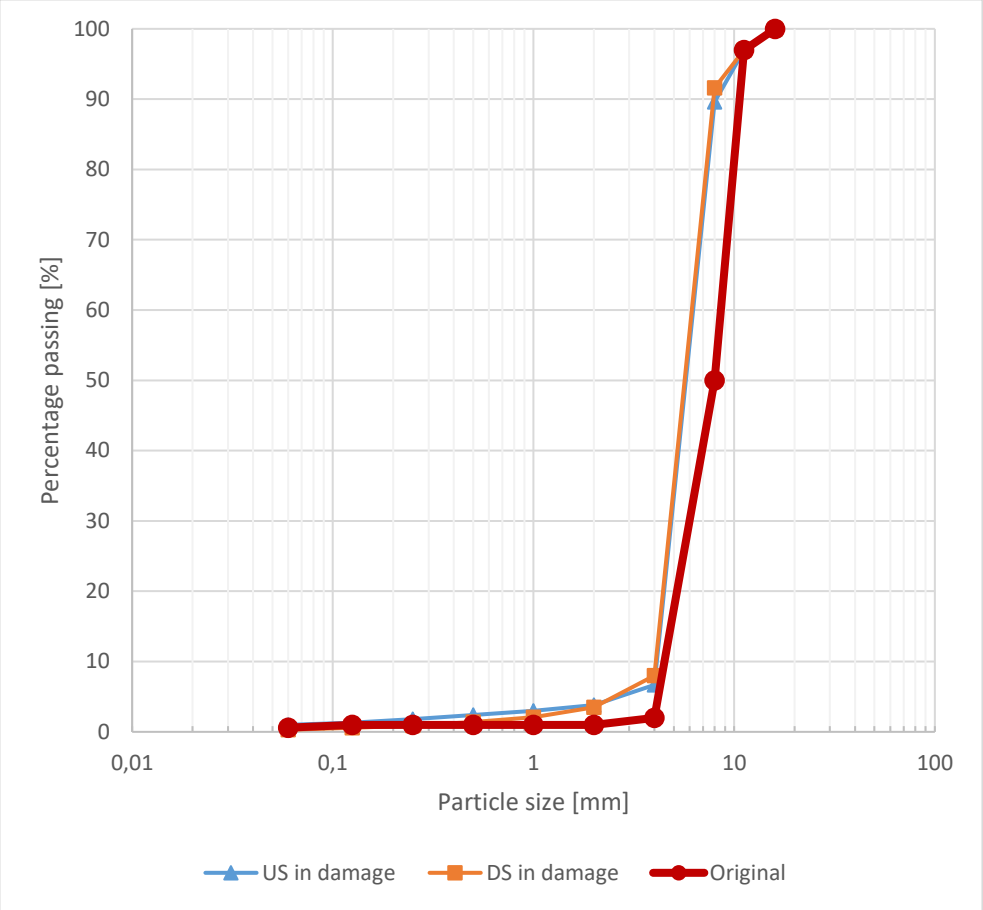


Figure 32. Particle size distribution from the upstream side of defect 4.

The defect material was similar on both up- and downstream side. There were slightly more fines in the upstream side, as seen in the horizontal defect at the left abutment.

The fine filter directly downstream defect 4 is shown in Figure 33.

Figure 33. Photo of the downstream fine filter at the exit point of defect 4 taken 20th of September 2024. Red circle mark the location where sample for sieving was extracted.

Particle size distribution from fine filter downstream defect 4 can be seen in Figure 34.

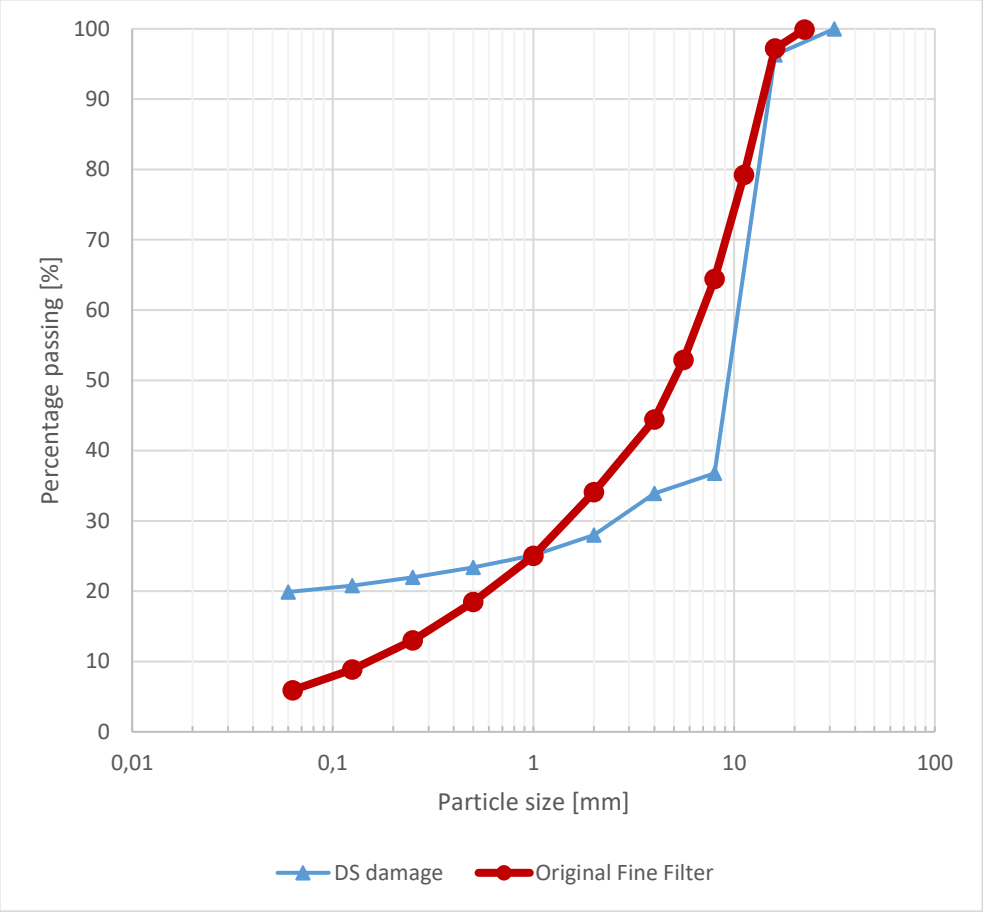


Figure 34. Particle size distribution from the fine filter downstream defect 4.

The fine filter downstream defect 4 had been enriched with fines (<0.063 mm). Fine material content in the fine filter material at time of construction was ca 6 weight-%. Corresponding fine filter content at time of dismantling was ca 20 weight-%, an increase of ca 330 %.

6.2 CONCRETE CUBE

The concrete cube, labelled defect 2 in Figure 23, was placed 4 m left abutment at ca level 200 cm. It was cube shaped with sides of 50 cm. It had a horizontal hole with a diameter of 50 mm through it to facilitate its installation during construction. The hole was orientated downstream-upstream. Photos from installation can be seen in Figure 35 and Figure 36.

Figure 35. Photo of defect 2 at time of installation on the 4th of November 2019.

Figure 36. Photo of defect 2 at time of installation on the 6th of November 2019. Concrete cube almost covered by the core soil.

No visual changes could be found around defect 2 at time of demolition, see Figure 37 to Figure 39.

Figure 37. Photo of defect 2 at time of demolition on the 20th of September 2024. Downstream side on the right side of the photo. Left abutment visible at the top.

Figure 38. Photo of defect 2 at time of demolition on the 24th of September 2024. Photo taken from upstream side of the core soil. Note that the hole through the cube has been partially filled with core soil.

Figure 39. Photo of defect 2 at time of demolition on the 24th of September 2024. Photo taken from downstream side of the core soil. Note that the hole through the cube has been partially filled with core soil.

Core soil from the hole through the concrete cube was sampled from both the up- and downstream side, US cube and DS cube, and sieved. Results are shown in Figure 40.

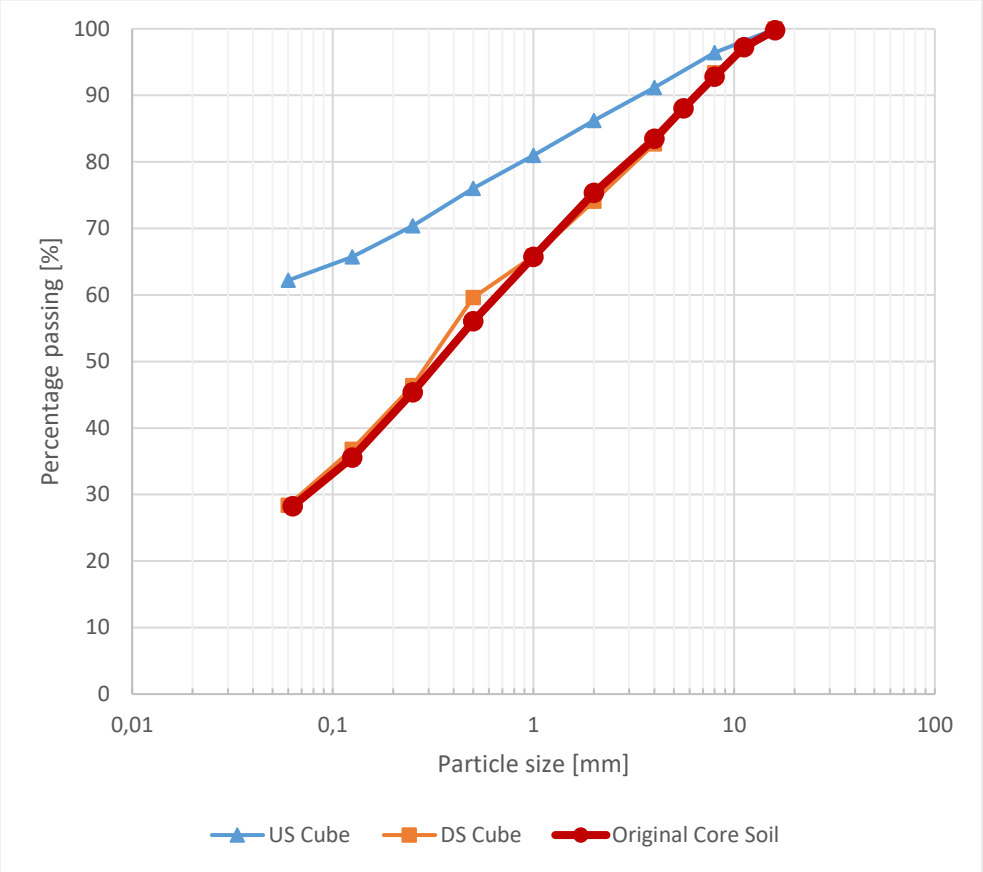


Figure 40. Particle size distribution of the core soil material sampled from the hole traversing the concrete cube compared to the original particle size distribution of the core soil.

The particle size distribution of the core soil found inside the hole on the downstream side of the concrete cube was identical to the original core soil. The core soil found inside the hole on the upstream side of the concrete cube however had doubled its fine content to 62 weight-%.

6.3 VERTICAL PERMEABLE ZONE

The vertical permeable zone, labelled defect 3 in Figure 13, was placed 7 m left abutment between level 100 – 350 cm. It was circular shaped with a diameter of ca

25 cm. Material of the defect was same as the coarse filter of the dam, i.e. 4/64 mm. Photos from installation can be seen in Figure 41 and Figure 42.

Figure 41. First layer of defect 3 on the 29th of October 2019 at level 100 cm.

Figure 42. Final layer of defect 3 on the 12th of November 2019 at level 350 cm.

Internal erosion was found on the top of defect 3 at the core crest, see Figure 43 - Figure 45. The internal erosion was caused by an overtopping of the core soil during the first filling of the dam. The overtopping lasted ca 2 weeks. The core soil had been eroded down to ca 20 cm upstream defect 3 and infilled by the overlaying fine filter material, Figure 43. Downstream the defect, a piping damage through the upper layer of the core soil was found at the border of core soil and downstream fine filter, Figure 44 and Figure 45.

The core soil around defect 3 was less stiff than the core soil generally. Material from the core soil was found inside the defect 3 material. During dismantling, defect 3 was sieved every 40 cm, see Figure 46.

Figure 43. Erosion at core crest at the end location of defect 3 on the 17th of September 2024. Original area for the circular defect 3 marked with a red circle.

Figure 44. Erosion at core crest at the end location of defect 3 on the 18th of September 2024. Original area for the circular defect marked with a red circle. Material removed from the defect to be sieved. Fine filter material removed from the eroded core soil. Red arrow mark the location of a piping damage at the downstream side of the core soil crest.

Figure 45. Downstream view of the piping through the core soil at the border zone core soil and fine filter on the 18th of September 2024. Red arrow mark the same area as in Figure 44 and red circle mark the top of the vertical defect.

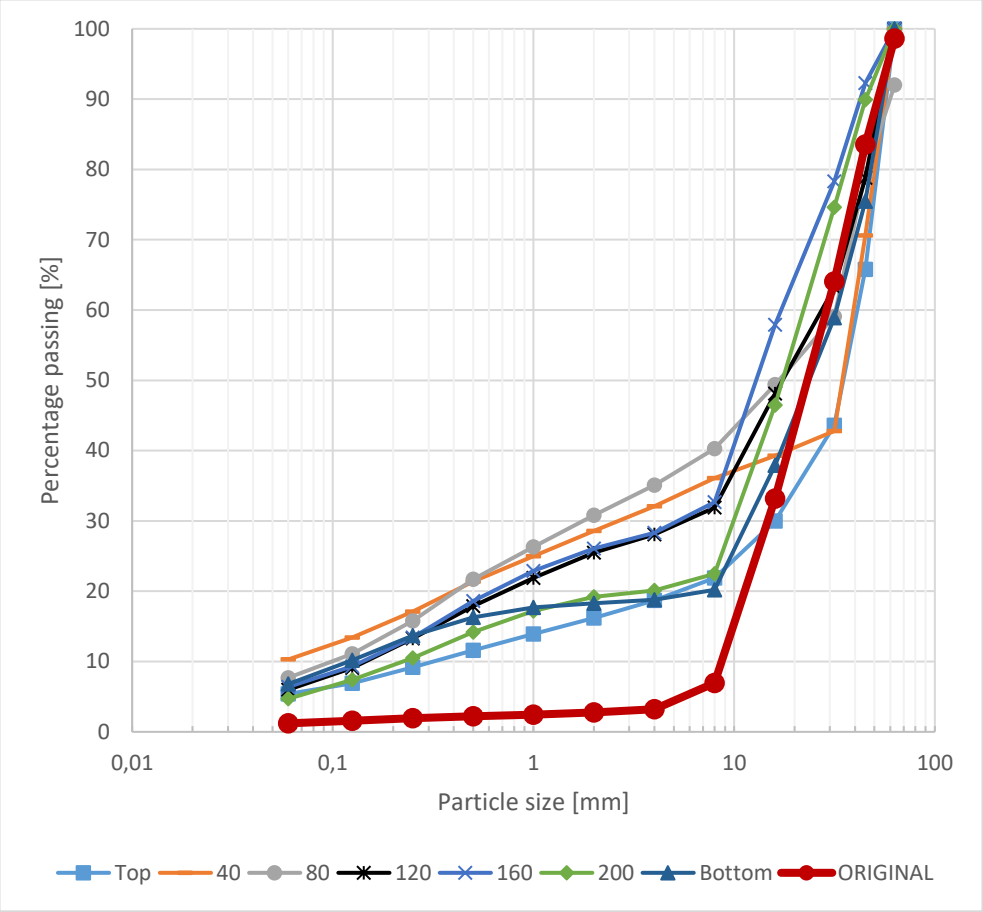


Figure 46. Particle size distribution of defect 3 from top (level 350 cm) to its bottom (level 100 cm) in increments of 40 cm.

For all levels sieved of defect 3, there was an increase in fines, indicating transport of fines from the core soil into the defect material. Note that filter criterion was not fulfilled between the core soil and defect material.

6.4 WOODEN CUBE

The wooden, labelled defect 5 in Figure 13, was placed 13 m left abutment at ca level 100 cm. It was cube shaped with a side measurement of 40 cm. Neither the wooden cube, nor the core soil around it had been affected at all during the experiment, see Figure 47 - Figure 50.

Figure 47. Photo of defect 5 during installation (level 100 cm) on the 29th of September 2019.

Figure 48. Photo of defect 5 during installation (level 140 cm) on the 29th of September 2019.

Figure 49. Photo of defect 5 during dismantling on the 29th of September 2024.

Figure 50. Imprint in the core soil of defect 5 after its removal on the 30th of September.

7 Internal erosion

In this chapter, observations of "unexpected" defects caused by internal erosion that were found during the dismantling are presented. These defects were never intended to develop in the dam, hence they were "unexpected".

7.1 "LARGE SINKHOLE"

The first unexpected defect was labelled as the "large sinkhole". It was not a sinkhole per say, but a sinkhole under development. The material in the sinkhole was eroded core soil material. Its orientation in the dam can be seen in Figure 52.

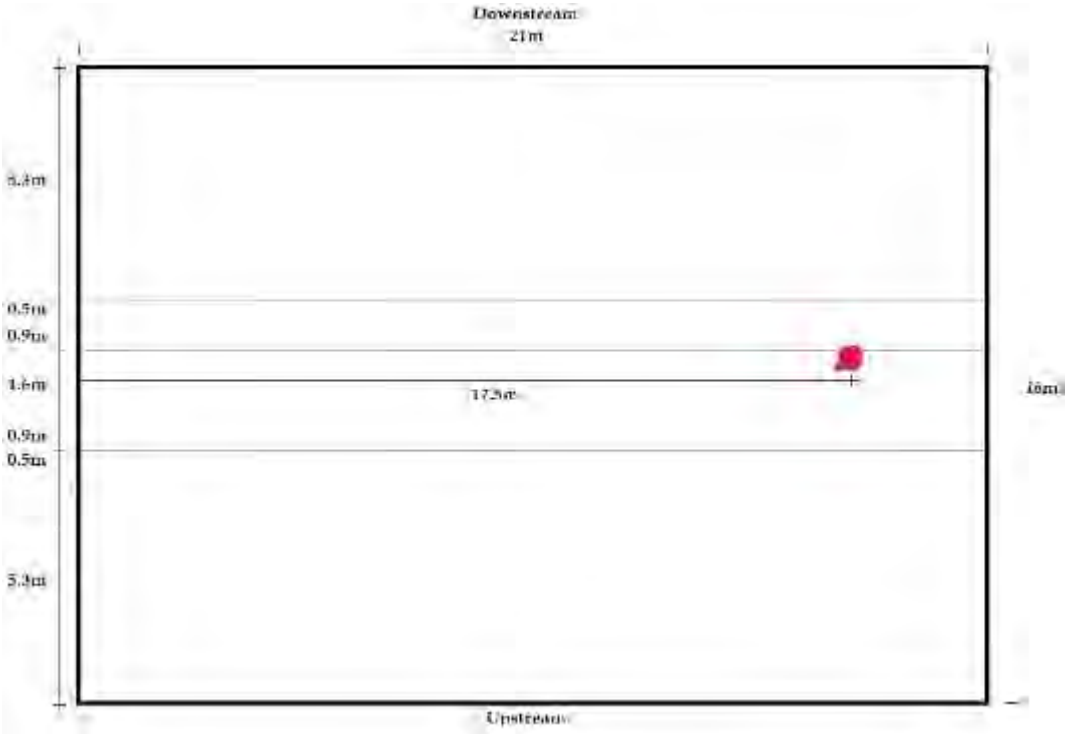


Figure 51. Orientation of the large sinkhole viewed from above.

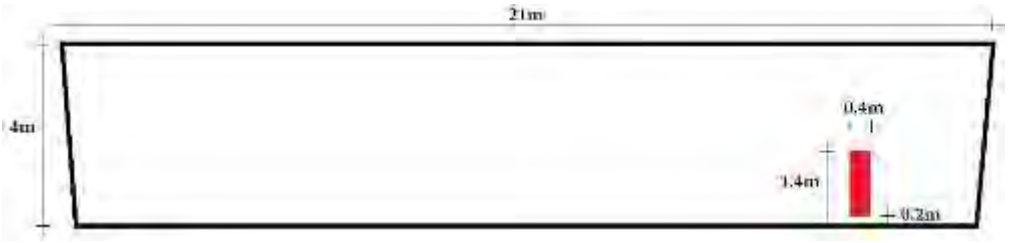


Figure 52. Orientation of the large sinkhole viewed from upstream side toward downstream side.

The first sign of the sinkhole appeared at a level 140 cm, 17.5 m from the left abutment. The sinkhole first appeared as a sandy patch surrounded by core soil, see Figure 53.

Figure 53. Level 140 cm on the 26th of September 2024. Top of the sinkhole (sandy patch just above the ruler). White circular zone is the grout material from injection grout hole 5 (see section 8.5)

As the exploration of the sinkhole continued, soil material was removed from it leaving a hole with intact, uneroded core soil supporting the walls around it. The eroded core soil material from different depths was sieved. Depth intervals for the sieve analysis were chosen randomly since no information regarding the size of the sinkhole existed. Sieve analysis from the material in the sinkhole is presented in Figure 61.

Soil material from the top of the sinkhole had a very low amount of soil material > 1 mm. The soil could be formed as a ball in the hand and did not fall apart, see Figure 54.

Figure 54. Sinkhole material from the top of the sinkhole on the 26th of September 2024.

Original core soil had a maximum particle size of 20 mm and ca 66 weight-% of the soil was finer than 1 mm. At the top of the sinkhole ca 97 weight-% was finer than 1 mm. Particle size curve for the top soil material in the sinkhole is labelled 140 cm in Figure 61.

Excavation of the soil from the sinkhole was carefully done with a spoon as not to damage the side walls of uneroded core soil, Figure 55.

Figure 55. Level 120 cm, just beneath the top of the sinkhole on the 26th of September 2024. Excavated material from the sinkhole can be seen above the sinkhole.

At level 120 cm (20 cm depth of sinkhole) the material during time of excavation was considered as "plain sand". At the moment of excavation, it was very surprising no gravelly soil material could be found. Particle size curve for the soil material shown in this photo is labelled 120 cm in Figure 61. 89 weight-% of the soil material was finer than 1 mm.

The transition zone from intact core soil to the excavated sinkhole is shown in Figure 56.

Figure 56. Transition zone between intact core soil and sinkhole viewed from above at level 90 cm on the 27th of September 2024. Intact core soil below the dashed red line of the photo.

Further photos from the excavation of the sinkhole are shown in Figure 57 - Figure 60.

Figure 57. Level 70 cm on the lower part and 120 cm on the upper part on the 27th of September 2024.

Figure 58. Level 30 cm on the bottom of the sinkhole and 120 cm on the upper part on the 30th of September 2024. Yellow cable in the lower right of the photo is the fiber optical cable installed in the downstream fine filter.

Figure 59. Bottom of the sinkhole at level 20 cm on the 30th of September 2024. Notice the more coarse-grained soil in the bottom.

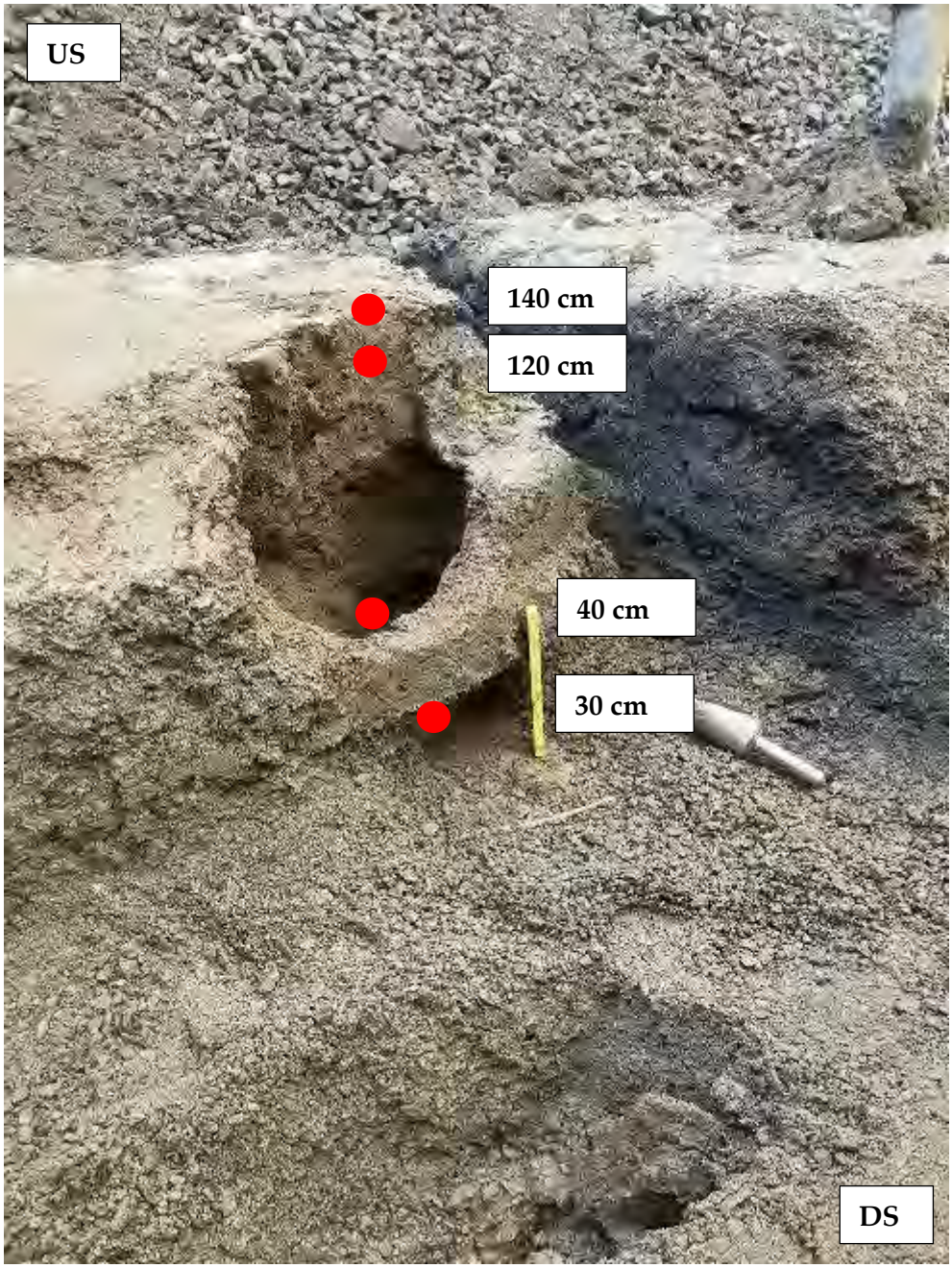


Figure 60. All levels where sinkhole soil material was sampled and sieved. Results from sieve analysis in Figure 61.

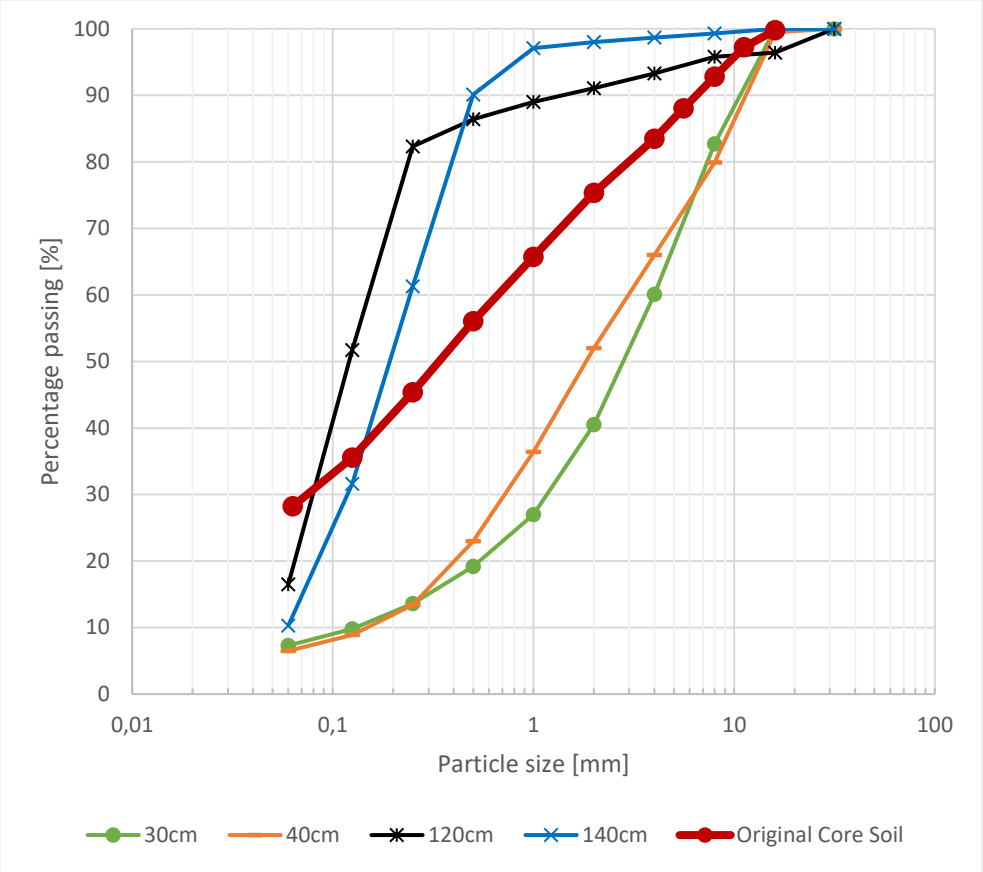


Figure 61. Particle size distribution curves of the eroded core soil found inside the sinkhole.

Key observations from the sinkhole were:

- The eroded core soil material from the upper part of the sinkhole was pure sand. No coarse soil particles were found in the upper part. The coarser particles were found in the bottom of the sinkhole.
- Fine material content was lower in all parts of the sinkhole compared to the original core soil.
- The downstream side of the sinkhole was merged with the downstream fine filter.
- Possible outlet of the fine material was through the washed out downstream fine filter (see Figure 63)at ca level 80 cm (see Figure 62 and Figure 64).
- Possible outlet from the sinkhole at its bottom. However, no clear leakage path was found but the area underneath the sinkhole was heavily eroded (see section 7.2).

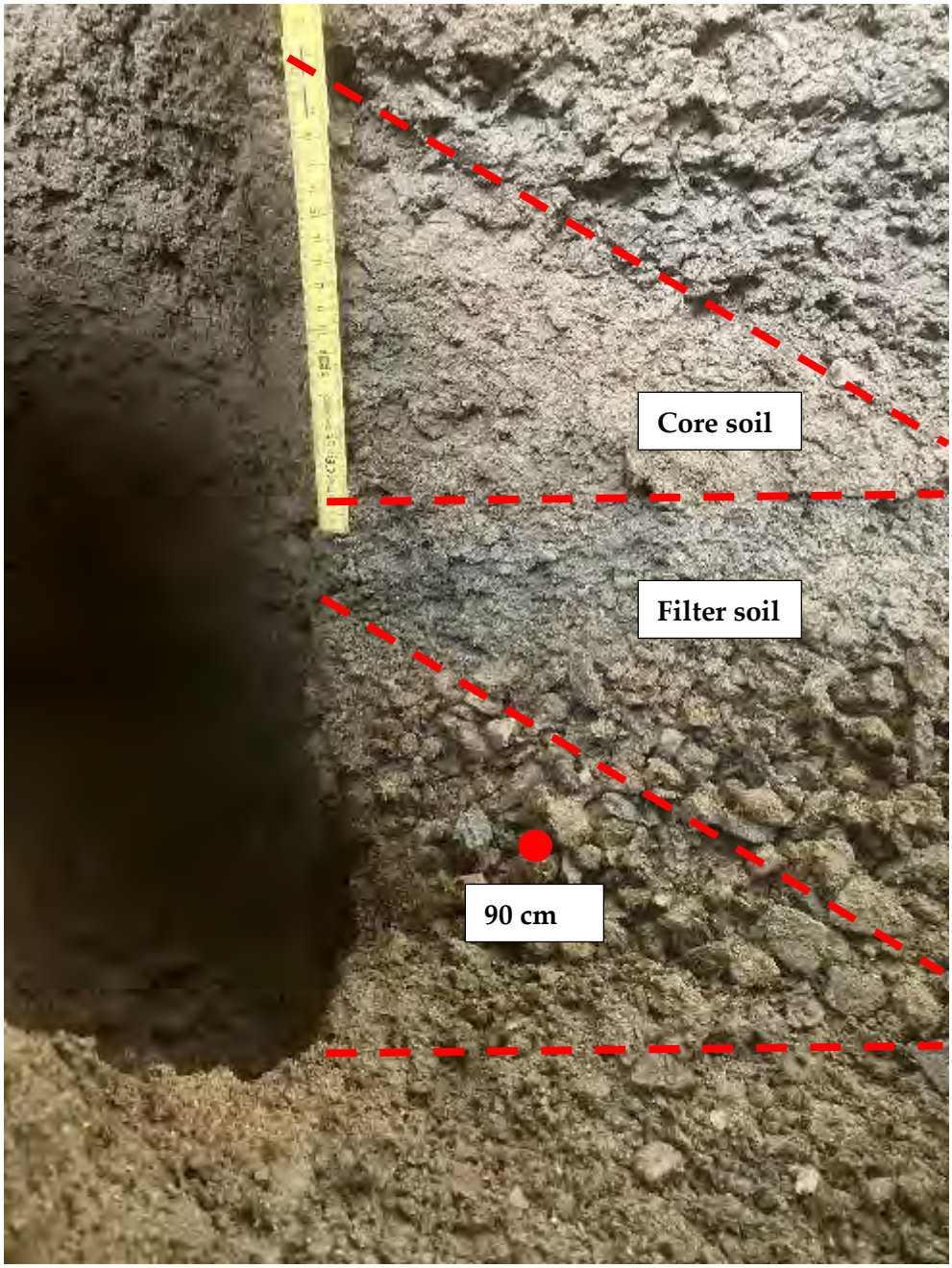


Figure 62. Washed out fine filter and core soil downstream the sinkhole. Notice how the core soil and filter soil has "merged" in eroded part.

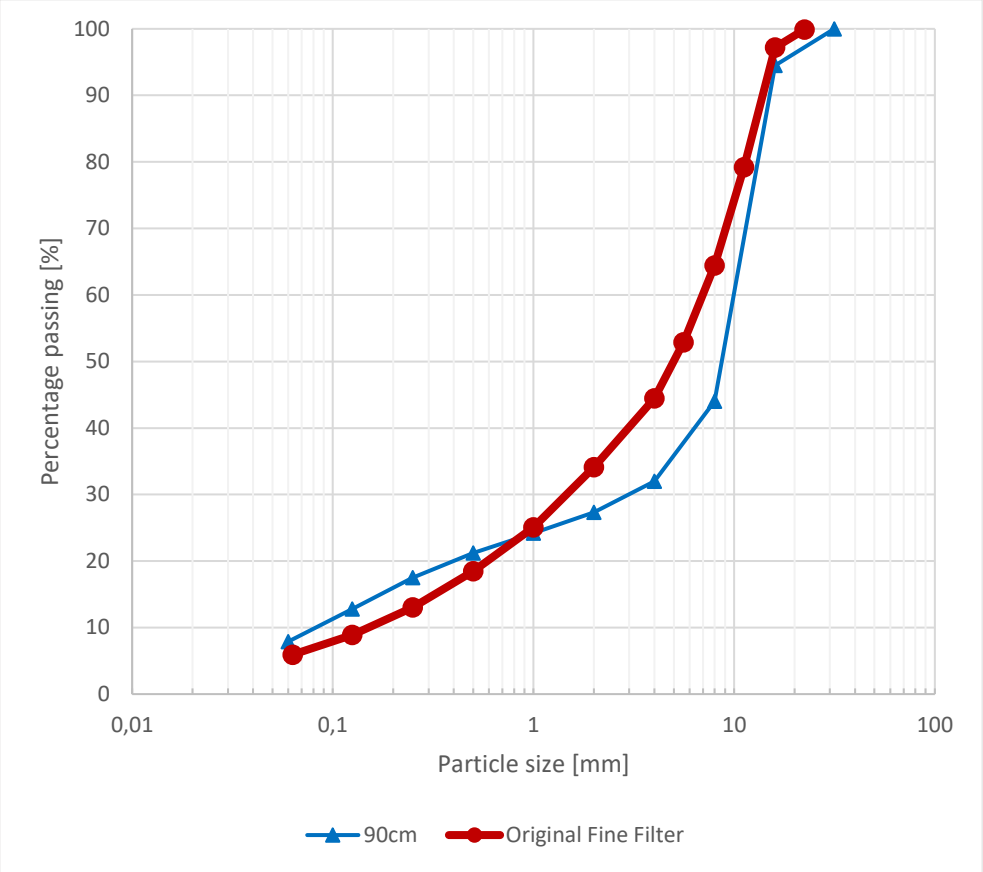


Figure 63. Particle size distribution curve of the eroded downstream fine filter material from the sinkhole at 90 cm depth.

The particle size distribution of the washed out fine filter material as shown in Figure 63 gave the impression during the dismantling of being more coarse grained than the result showed, see Figure 62.

Figure 64. Eroded material removed from the downstream side of the sinkhole at ca 80 cm level.

7.2 UNDER THE LARGE SINKHOLE.

Under neath the large sinkhole (section 7.1), a 1 m wide zone was found at level 20 cm with considerably more wet core soil, see Figure 65 - Figure 66.

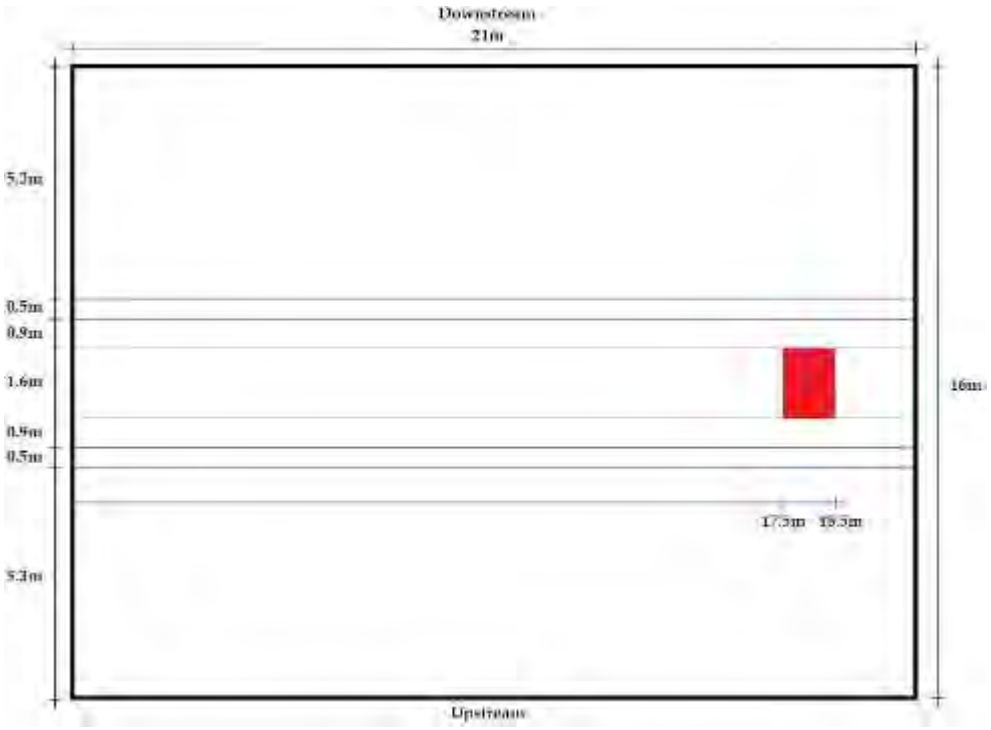


Figure 65. Orientation of the damage under the large sinkhole viewed from above.

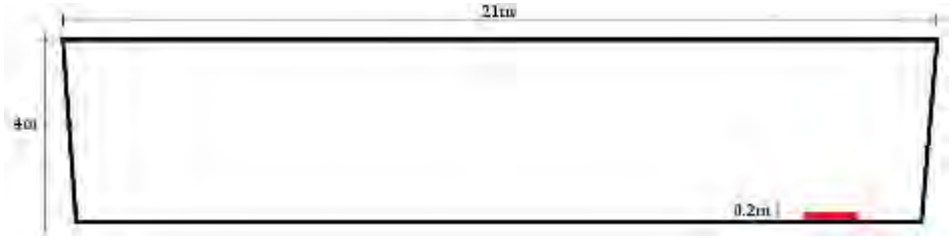


Figure 66. Orientation of damage under the large sinkhole viewed from upstream side toward downstream side.

In this area in the core soil, a pre-tensed strain cable traversed the core soil. The strain cable was installed as a loop in an upstream to downstream orientation at four locations through the core soil. The strain cable traversed the core soil at level 15 cm, 2, 3, 4 and 5 m out from the right abutment, see Figure 67.

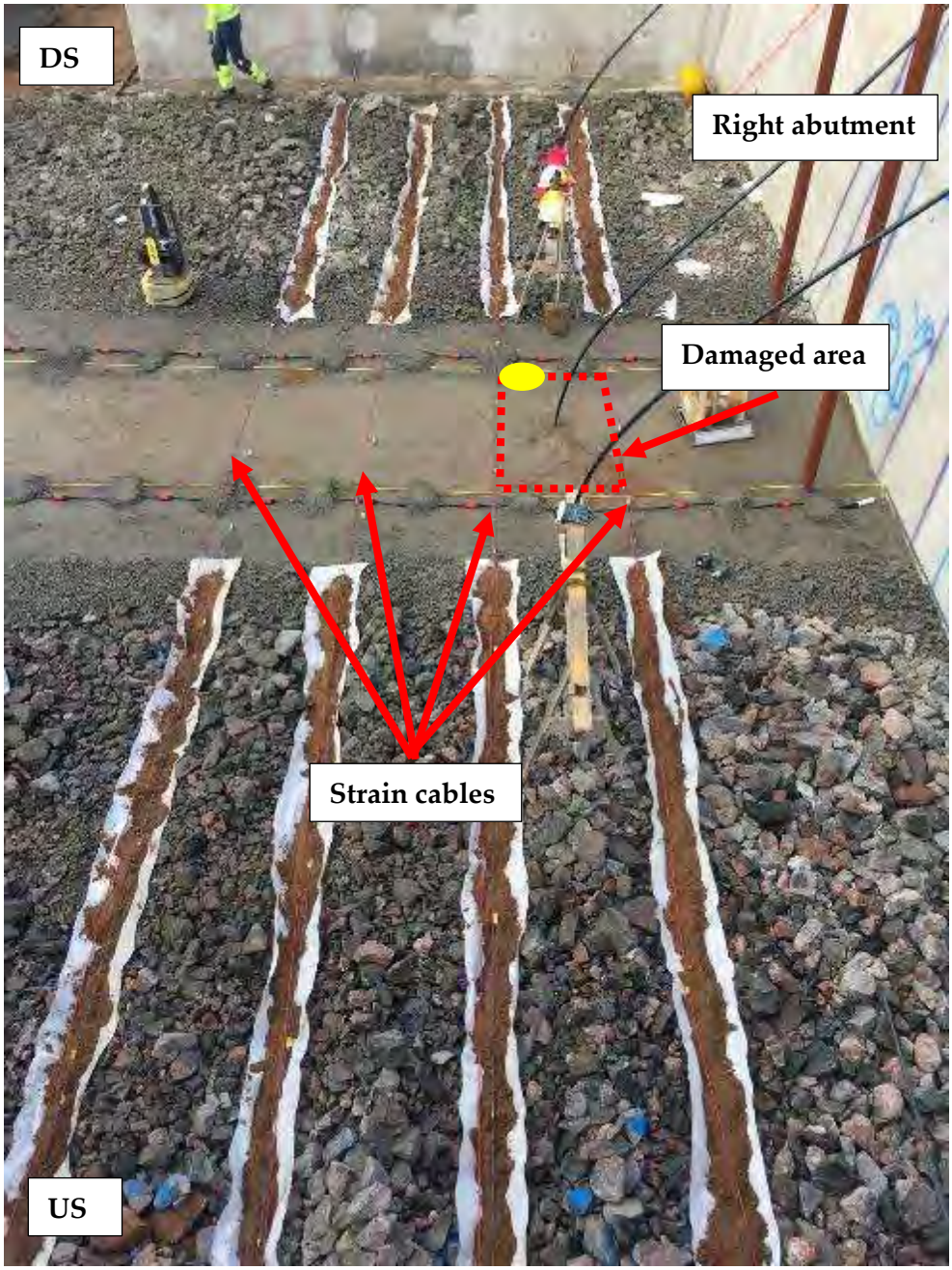


Figure 67. Photo of the strain cable during its installation on the 24th of October 2019. Damaged area inside the red dashed square. Bottom of large sinkhole marked with a yellow circle.

During installation, there were worries that this cable would cause concentrated leaks along it. Therefore, the cable was sealed with a bentonite powder layer before it was covered with the next layer of core soil and compacted, see Figure 68.

Figure 68. Close up of the strain cable (blue) and temperature cable (red) traversing the core soil. White powder is bentonite powder for extra sealing. Visible core soil is not yet compacted.

At 2, 4 and 5 m out from the right abutment, the core soil/strain cable boundary seemed to have worked well but around the strain cable 3 m out from the right abutment the soil was damages. There were no direct signs of fine particles being washed out. The core soil looked more perforated, see Figure 69.

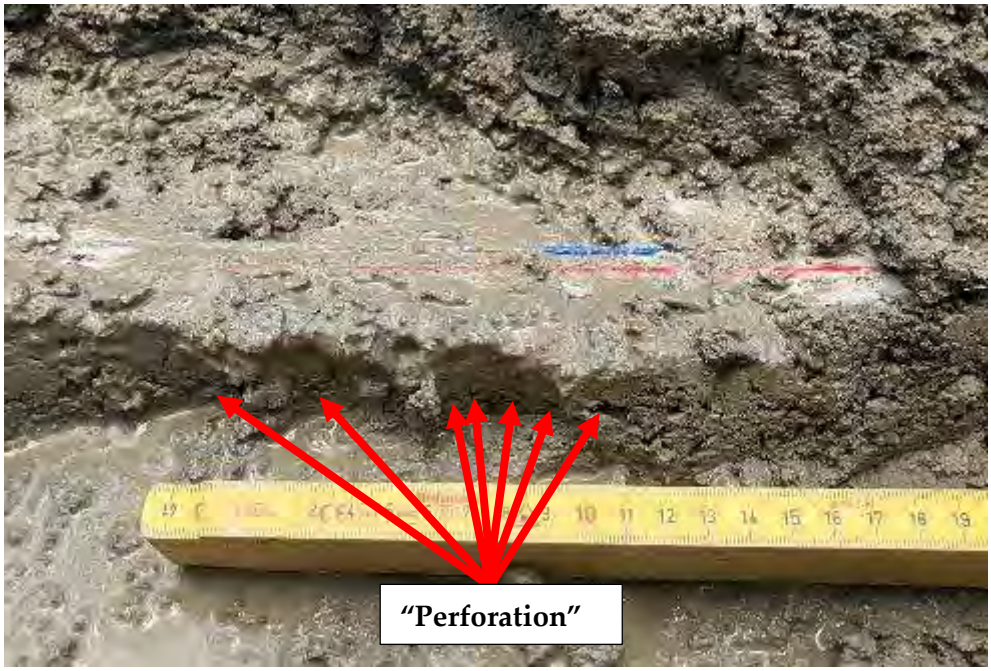


Figure 69. Strain cable 3 m out from right abutment on the 3rd of October 2024. The perforated holes led into the strain cable. Notice how wet the core soil is at the bottom of the photo.

Bentonite powder was still present around the strain cable at all investigated points. The bentonite had the same texture as a toothpaste, Figure 70.

Figure 70. Wetted bentonite powder removed from the strain cable placed on the tip of a finger on the 2nd of October 2024.

More photos from the damage is shown in Figure 71 – Figure 73.

Figure 71. Eroded core soil found at the upper part of the damage on the 2nd of October 2024.

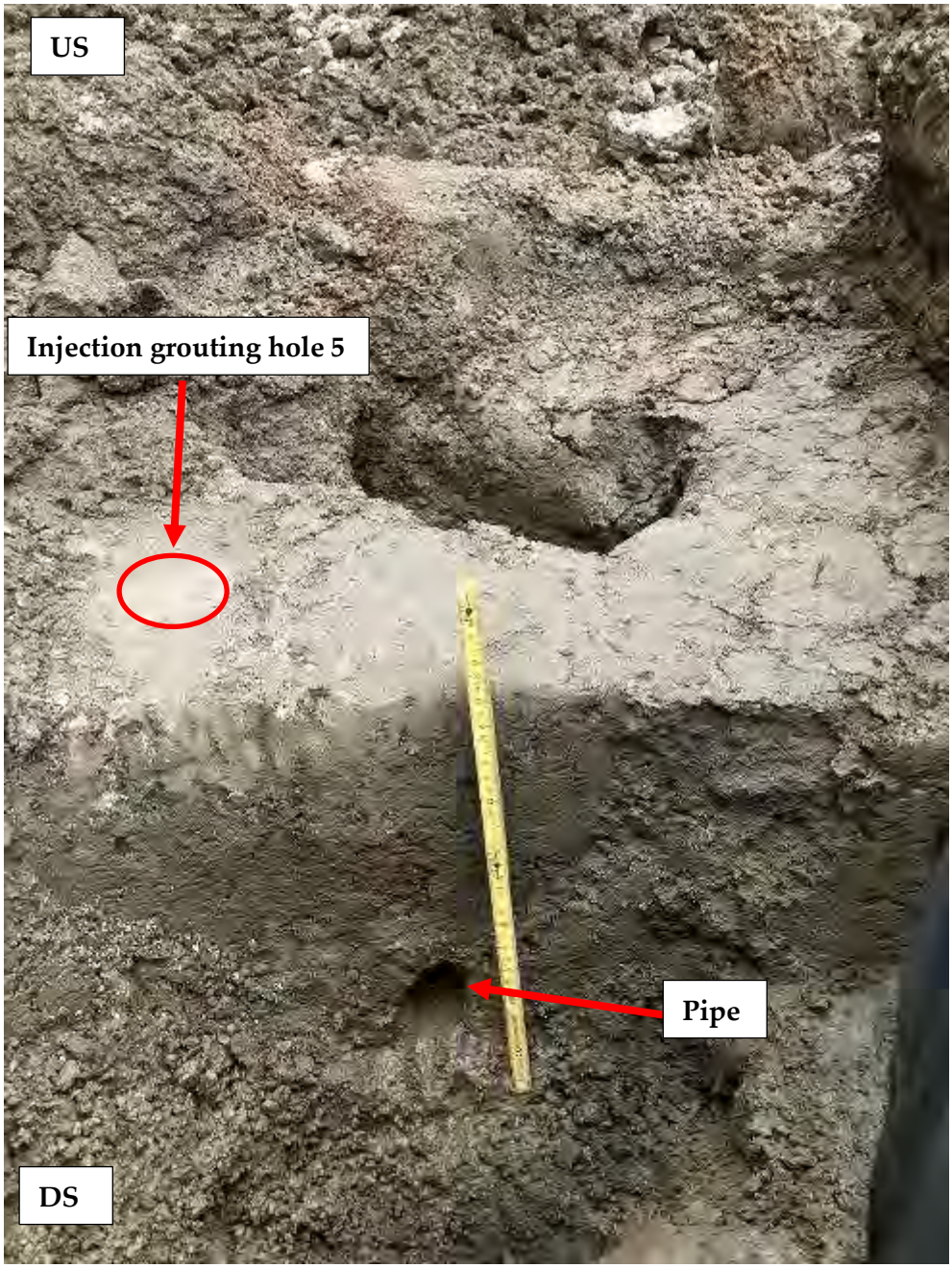


Figure 72. A pipe had formed on the upstream side of the large sinkhole. Direction of pipe was towards upstream with an inclination of ca 10°. The hole in the core soil above the top of the ruler is the hole shown in Figure 71. Pipe was full of same type of eroded core soil found at all other damages (coarse sand – fine gravel). Photo taken on the 2nd of October 2024.

The pipe shown in Figure 72 was discovered after the removal of the large sinkhole. A verified connection between the pipe and sinkhole could therefore not be established. However, the pipe was fond only centimeters from the upstream side wall of the bottom of the large sinkhole. The connection is therefore highly likely.

In Figure 73, the bottom of the damaged can be seen.

Figure 73. Bottom of the damaged area as seen on the 3rd of October 2024. "2m" and "3m" refer to the distance from the right abutment. Bottom of large sinkhole marked with a yellow circle. Notice how wet the area is.

Even though the core soil was in "better shape" at the other strain cables there where still damages found around them, in particular around the strain cable 5 m out from the right abutment, see Figure 74.

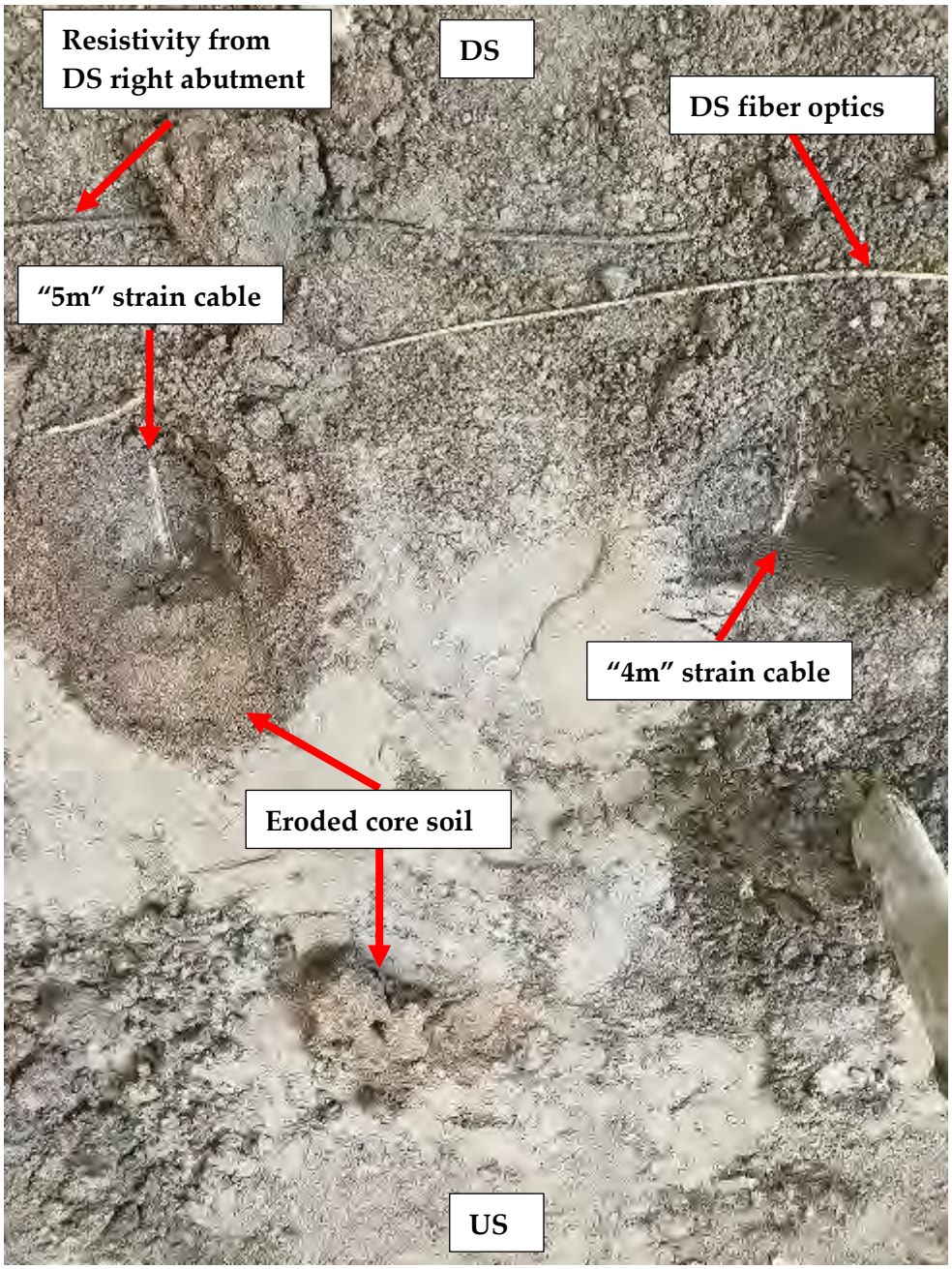


Figure 74. Close up on the two strain cables at 4 and 5 m out from the right on the 2nd of October 2024.

There was heavy ongoing erosion around the downstream side of the core soil surrounding the "5m" strain cable but none around the "4m" astrain cable. On the bottom right in Figure 74, the lost casing from injection hole 1 can be seen. Furthermore, the piece of eroded core soil seen at the bottom of Figure 74 is a piece removed from the "5m" strain cable. Erosion of core soil on the bottom part of a layer of core soil.

7.3 "HORIZONTAL PIPING"

The horizontal pipes were fond underneath the vertical defect, see Figure 75 to Figure 76. The damaging was extensive. One full pipe through the core soil and two

initiated pipes were found. Similar to the sinkhole, the pipes were not empty but filled with “sand” (eroded core soil material). All three pipes had developed in the boundary zone between the layers of core soil.

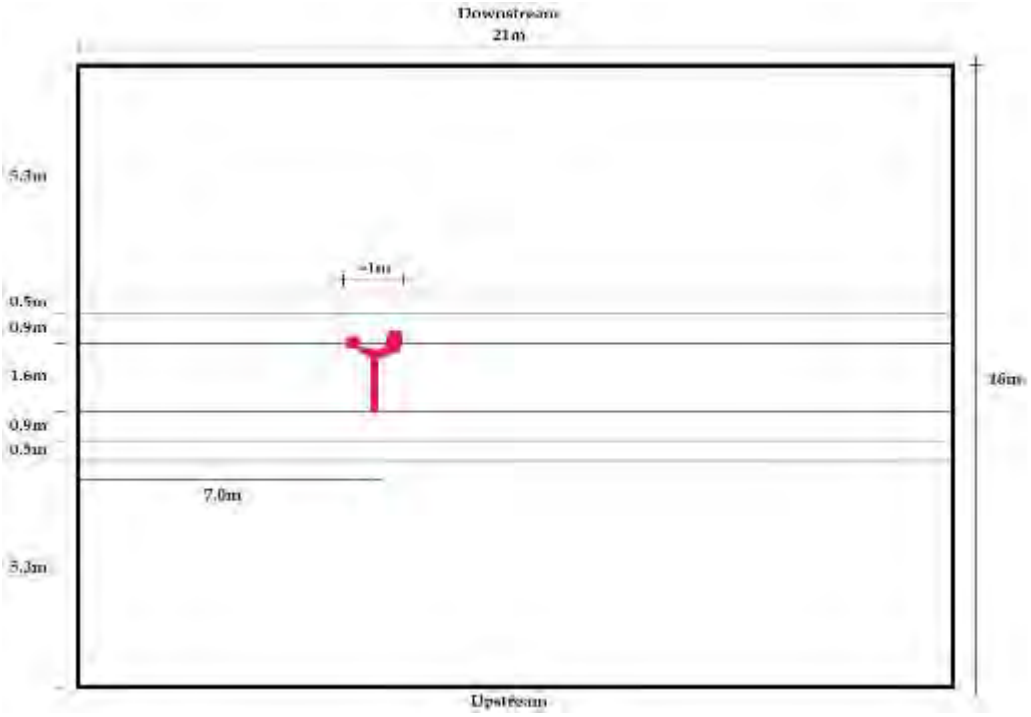


Figure 75. Orientation of the horizontal pipes viewed from above.

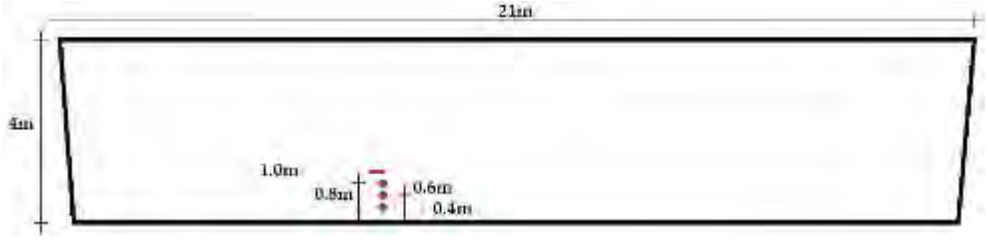


Figure 76. Orientation of the horizontal pipes viewed from upstream side toward downstream side.

At the bottom 20 cm of the vertical defect internal erosion was found. Erosion of the core soil had begun and traversed the core soil both up- and downstream from the bottom of the vertical defect, see Figure 77.

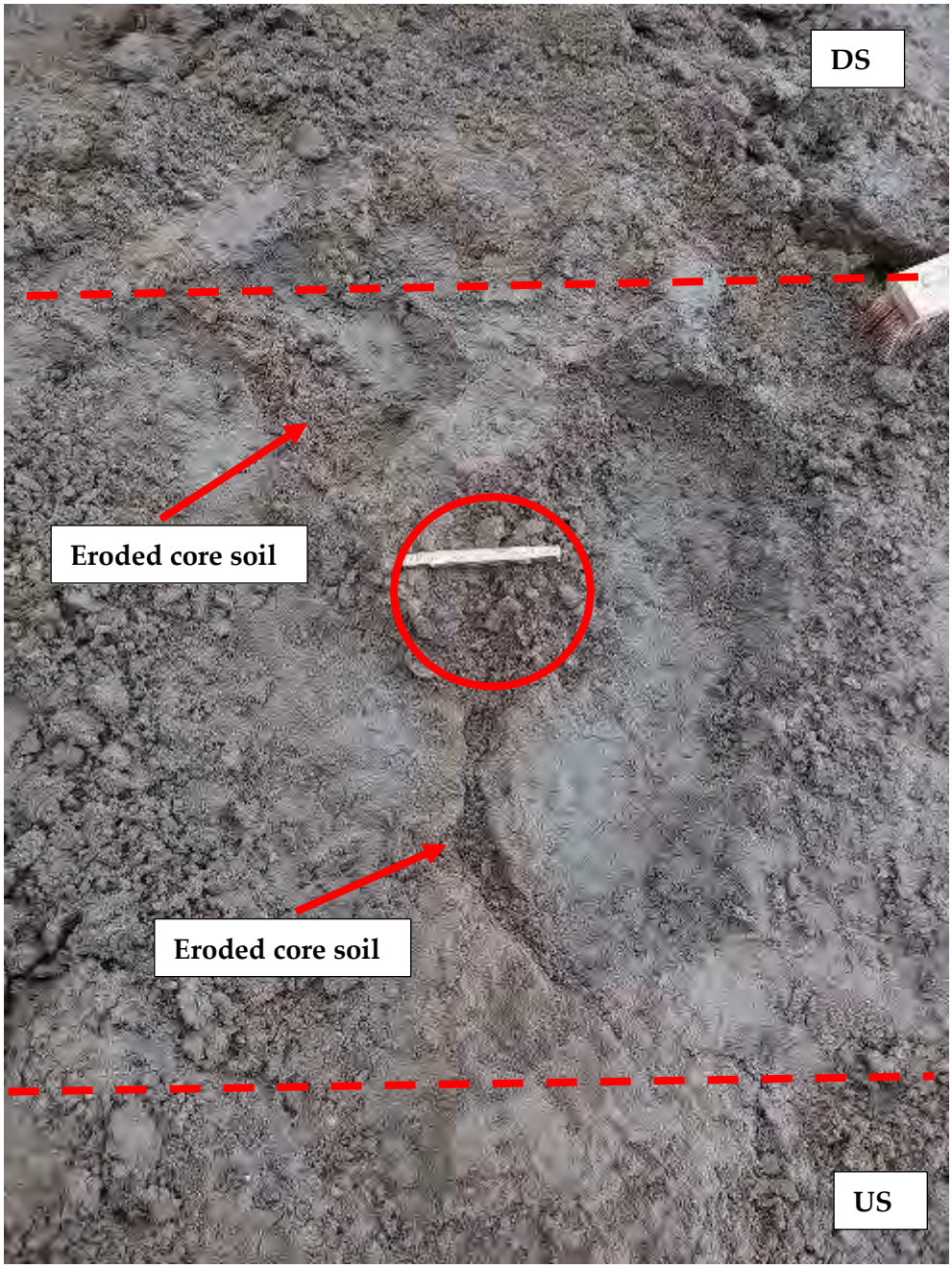


Figure 77. Bottom of the vertical defect on level 100 cm on the 27th of September 2024. Upstream is down in the photo. Note the streaks of eroded core soil. Boundaries of the core soil marked with red, dashed line. Bottom of vertical defect marked with red circle.

The core soil material that had been eroded was coarse sand – fine gravel. Removal of the eroded soil revealed two distinct, narrow, "canyon-shaped" areas, see Figure 78. The eroded core soil was easily removed with a spoon or brush.

Figure 78. Material from the bottom of the vertical defect removed. Eroded core soil partly removed, exposing the extent of the internal erosion. Close up of the erosion between the bottom of the vertical defect and downstream filter marked with red oval can be seen in Figure 79. Close up of the erosion between the bottom of the vertical defect and upstream filter marked with yellow oval can be seen in Figure 82.

Figure 79. Close up of erosion as marked with red oval in Figure 78 (eroded soil has been removed) between bottom of vertical defect and downstream filter.

The intact core soil around the bottom 20 cm of the vertical defect was completely removed. The upstream erosion area (yellow oval in Figure 78) continued while the downstream erosion area (red oval in Figure 78 and close up in Figure 79) disappeared.

Another extensive area of internal erosion was found in the boundary zone between core soil and fine filter downstream the vertical defect. After the eroded soil (coarse sand – fine gravel) had been removed, the appearance of the damages can be seen in Figure 80.

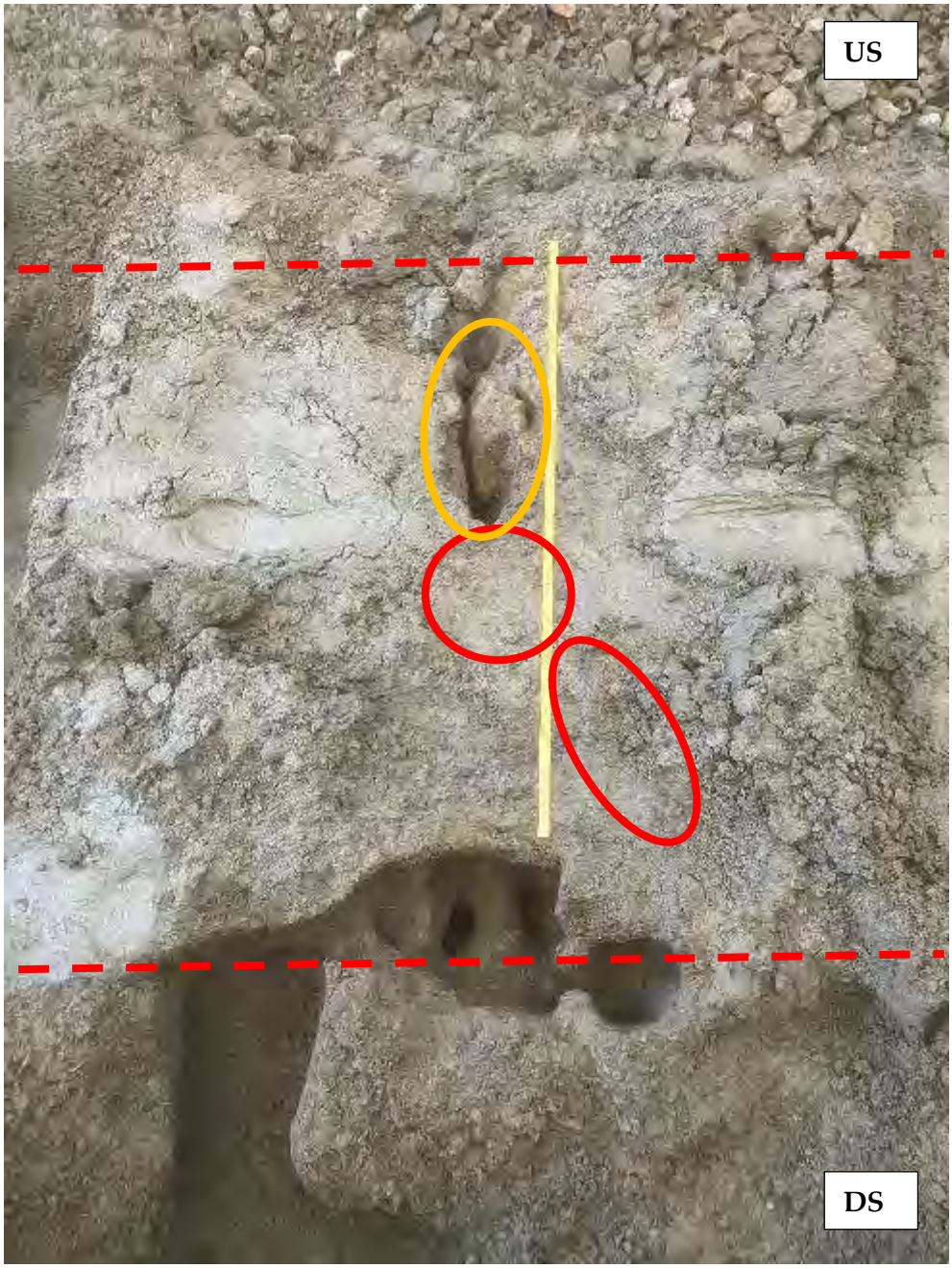


Figure 80. Red circle mark the bottom of the vertical defect. Red and yellow oval mark the same areas as in Figure 78. Dashed red lines mark the boundary zones between filter and core soil. Damaged area within red oval has disappeared. New erosion found in the boundary area between downstream fine filter and core soil.

After further excavation on both up- and downstream side the erosion continued under the vertical defect, see Figure 81.

Figure 81. Further excavation of the internal erosion discovered underneath the vertical defect. Red circle marks the bottom of the vertical defect.

The upstream damage area (golden oval in Figure 80) started off as a standing slot, see Figure 82, but as the excavation progressed downstream in this area, the appearance of three distinct pipes was revealed, Figure 83. The levels of the three pipes had developed at the layer boundaries of the core soil. Spacing was 20 cm apart.

Figure 82. Upstream area of the internal erosion (golden oval in Figure 80). Red dashed line mark the point of excavation presented in Figure 83.

Eroded, washed out core soil material removed from the damage can be seen in the bottom of Figure 82.

Figure 83. Erosion at three different levels under the vertical defect (red circle). Red dashed line at same location here as in Figure 82.

Removal of eroded core soil material led to the discovery of three pipes. Only the middle pipe traversed the core soil while the bottom and top pipe was under development, see Figure 84.

Figure 84. Eroded core soil material removed. The visible light on the other side of the core soil mean that the pipe traversed the core soil entirely. Photo is taken from the upstream side.

The roof of the pipe was removed leading to an hourglass shaped damage with the waist located underneath the vertical defect, see Figure 85.

Figure 85. The core soil "roof" of the middle pipe removed. The damage, when the eroded soil has been removed had the shape of an hourglass with the waste located ca 20 cm below the bottom of the vertical defect.

The left side wall of the pipe was removed so the damage could be viewed from the side, Figure 86.

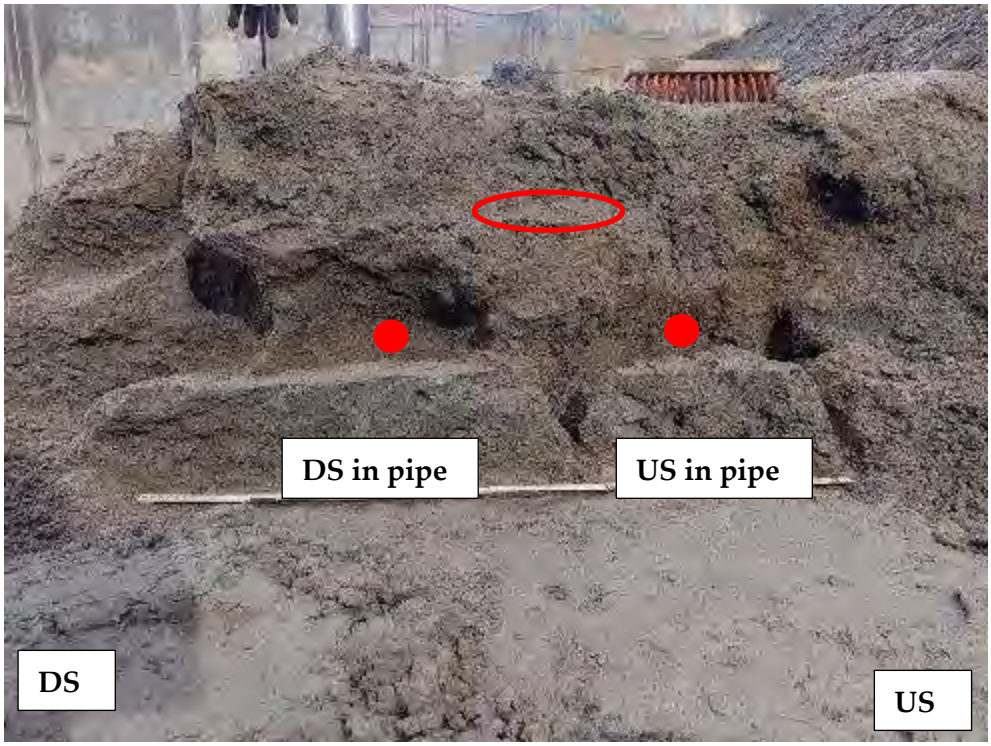


Figure 86. Side view of the pipe when its left wall has been removed. Red circle on top mark the bottom of the vertical defect. Red points mark locations where eroded core soil material was removed for sieving.

Eroded core soil material was removed from the pipe and sieved. Its particle size distribution up- and downstream in the pipe can be seen in Figure 87.

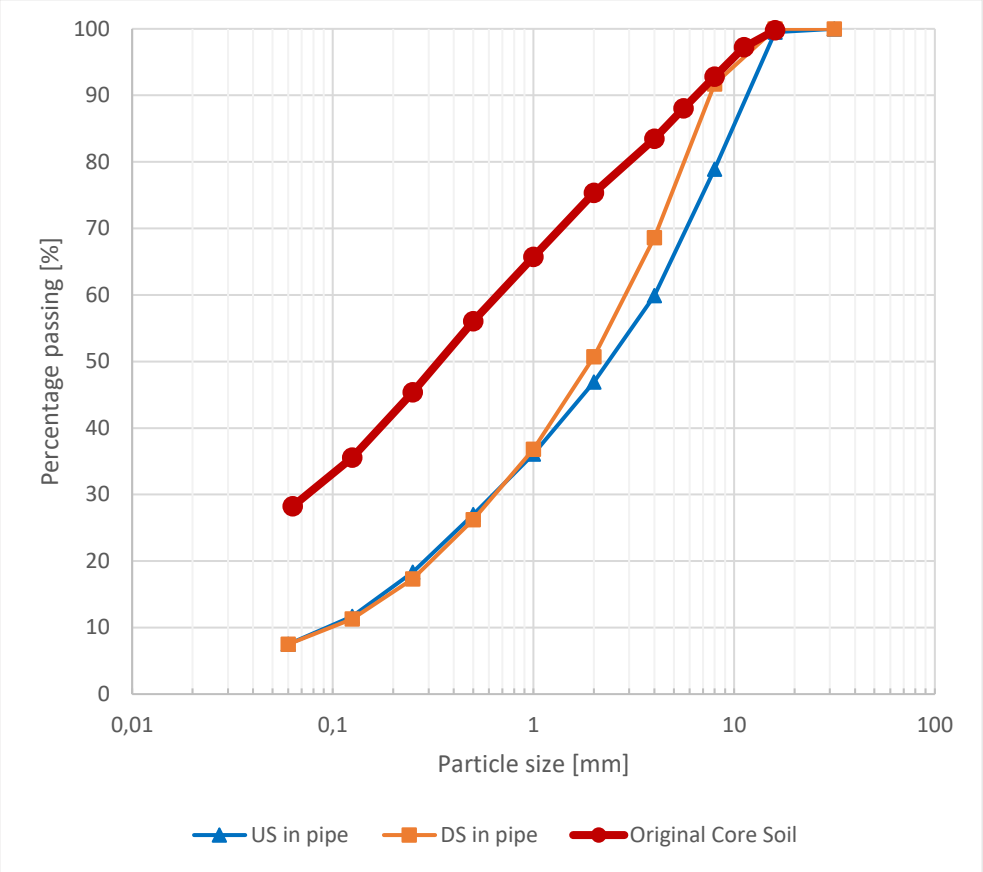


Figure 87. Particle size distribution of the eroded core soil extracted from the pipe under the vertical defect. Particle size distribution of the original plotted in red as reference.

The eroded core soil material extracted from the pipe had lost ca 70 % of its fine material content (<0.063 mm). The eroded core soil downstream the pipe had a slightly higher gravel content compared with the downstream eroded core soil material.

7.4 “SANDY ZONE”

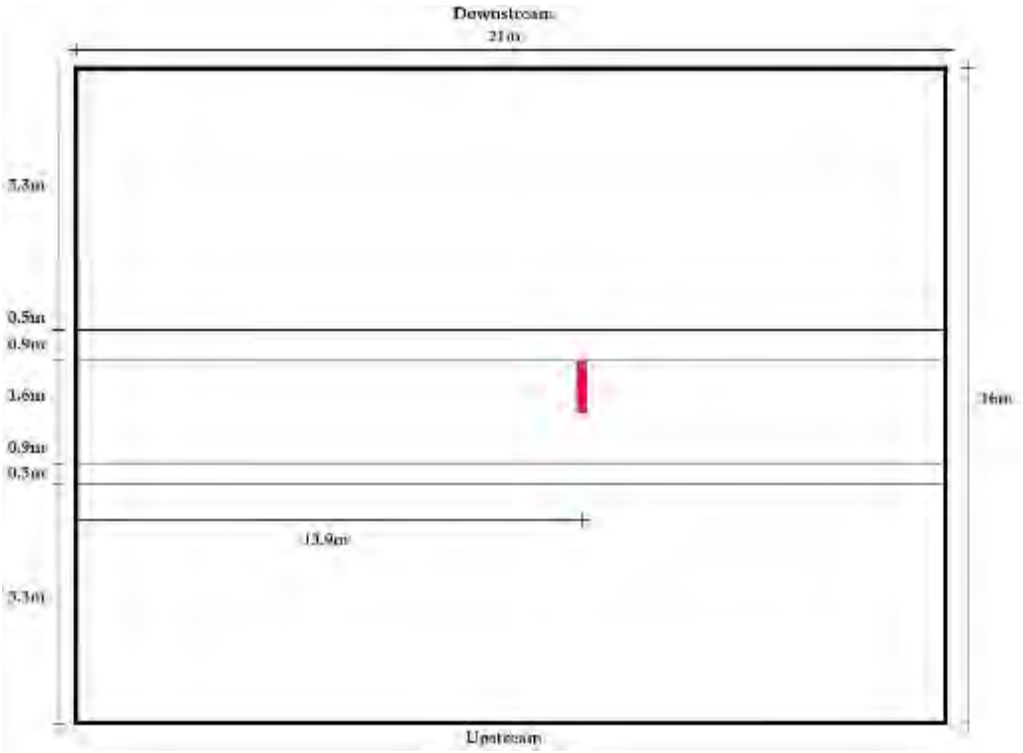


Figure 88. Orientation of the sandy zone viewed from above.

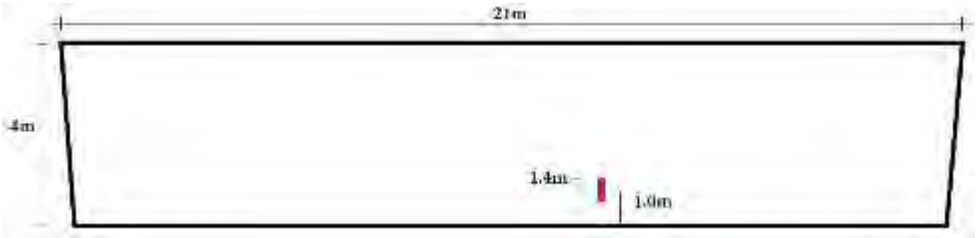


Figure 89. Orientation of the sandy zone viewed from upstream side toward downstream side.

Close to the wooden cube (defect 5). A sandy patch was found on the excavated core crest at level 140 cm, see Figure 90. The sandy patch was excavated by hand and seemed to end at a depth of ca 15 cm under the current core soil crest level (level 125 cm), see Figure 91.

Figure 90. Sandy patch marked by red circle ca 70 cm to the right of the wooden cube (defect 5) found on the 27th of September 2024.

Figure 91. Sandy patch ca 70 cm to the right of the wooden cube (defect 5) found on the 27th of September 2024. Sandy material removed. Red dashed square mark the location where the wooden cube was moved (see Figure 92 - Figure 94.

Since the sandy patch seemed to end after ca 15 cm of manual excavation. Another 40 cm of core soil removed and the wooden cube (defect 5) was removed and placed just downstream the excavated sandy patch. When yet another 20 cm of core soil was to be removed a large sandy zone was revealed at the boundary zone between downstream fine filter and core soil, see Figure 92

Figure 92. More sand discovered at the boundary zone between downstream fine filter and core soil as the excavation continued (inside red oval).

Yet another 20 cm of core soil was removed and a large sandy zone was discovered, seemingly connecting the sandy patch (Figure 90) with the sandy zone as shown in Figure 92. This new sandy zone is shown in Figure 93.

Figure 93. Area under the sandy patch on the 2nd of October 2024. 40 cm of core soil has been removed. Boundary for the sandy zone within the two black, dashed lines. Wooden cubed has been moved. Red dashed line mark the top location of the sandy patch as shown in in Figure 90 and Figure 91.

At two points in the sandy zone, eroded core soil material was removed and sieved, see Figure 94and Figure 95. The sandy zone did not traverse the core soil completely since it still was ca 10 cm from the upstream fine filter. On its downstream side however, the sandy zone was connected to the downstream fine filter.

Figure 94. Points in the sandy zone where eroded core soil material was extracted and tested with sieve analysis. Eroded core soil removed from the damage in the bottom of the photo.

The sandy zone had a slight inclination downwards toward the downstream side. It was ca 1 m long and between 15 – 40 cm heigh. Its width was between 2 – 10 cm. Results from sieve analysis in Figure 95.

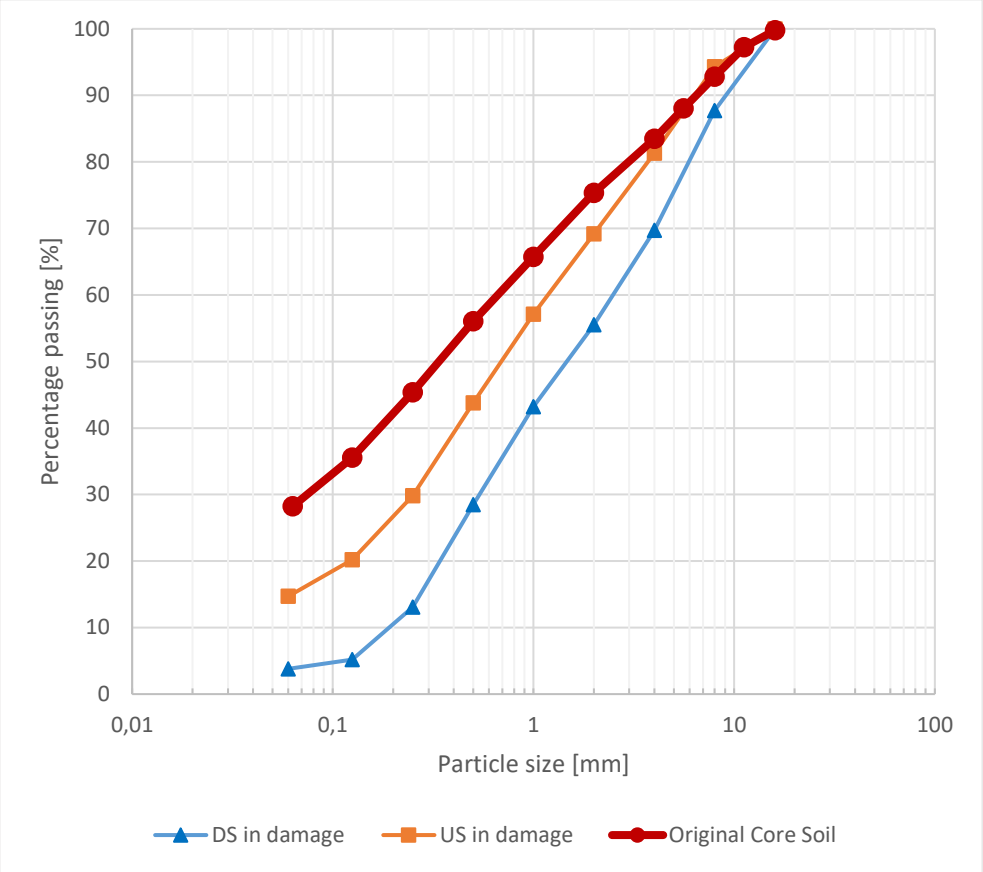


Figure 95. Particle size distribution of eroded core soil from the sandy zone. Original particle size distribution plotted as a reference.

Similarly to the "sinkhole", the eroded core soil was more coarse grained closer to the fine filter outlet than at its upstream side.

Just behind the sandy zone (towards the left abutment), early stage internal erosion was found being developed in the layer boundaries in the core soil, see Figure 96. More of this type of initiated internal erosion was seen in more places at this depth in the dam (≤level 100 cm), see Figure 97 and Figure 98. Internal erosion of this sort was always found close to the downstream fine filter.

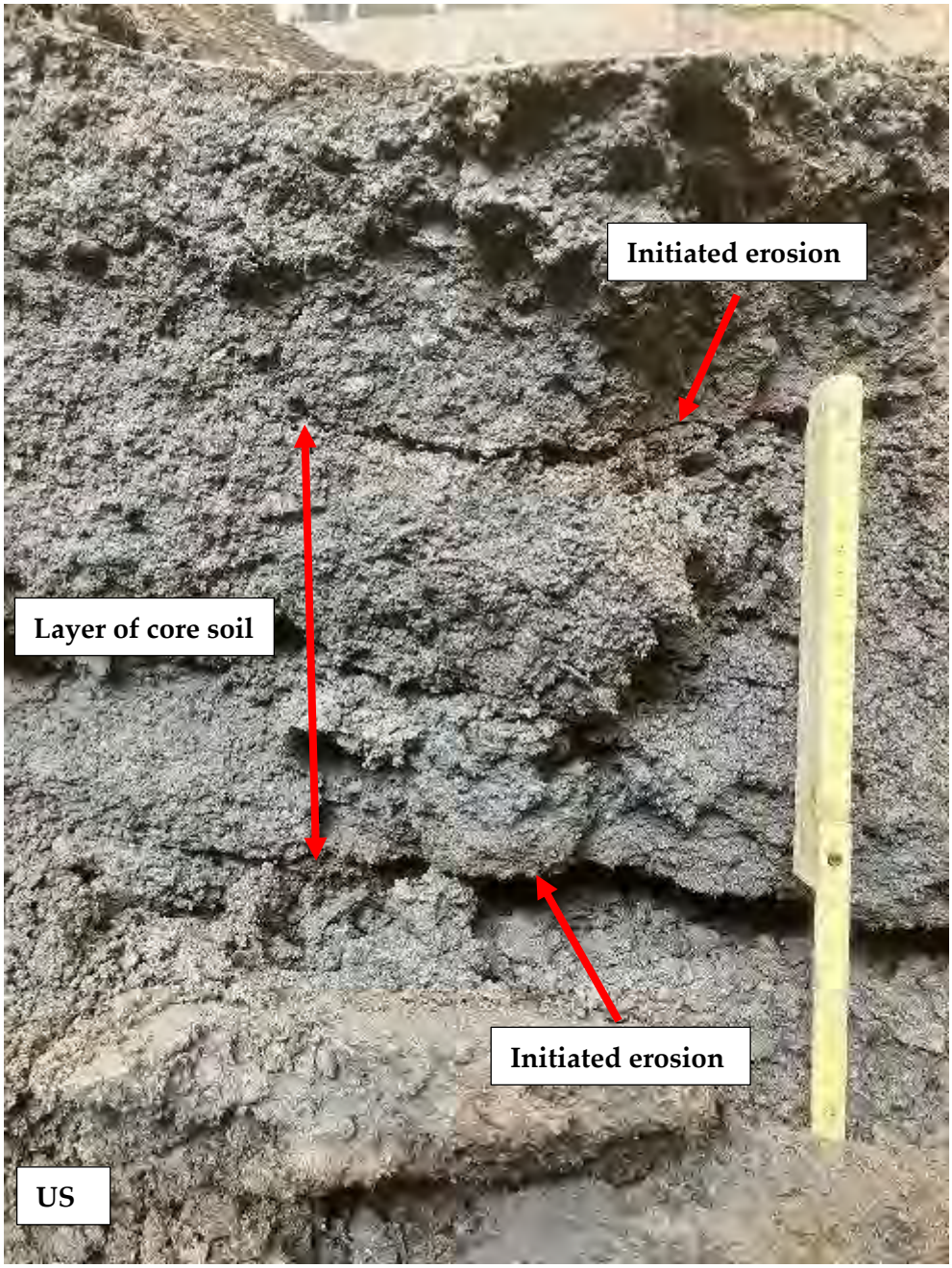


Figure 96. Internal erosion, at a very early stage, was found in the layer boundaries between the core soil just "behind" the sandy zone (towards the left abutment). Photo taken on the 2nd of October 2024.

Figure 97. Internal erosion was found in the layer boundaries in the core soil close to injection grouting hole 1, 16.5 m from the left abutment at level 60 – 80 cm. Photo taken on the 2nd of October 2024.

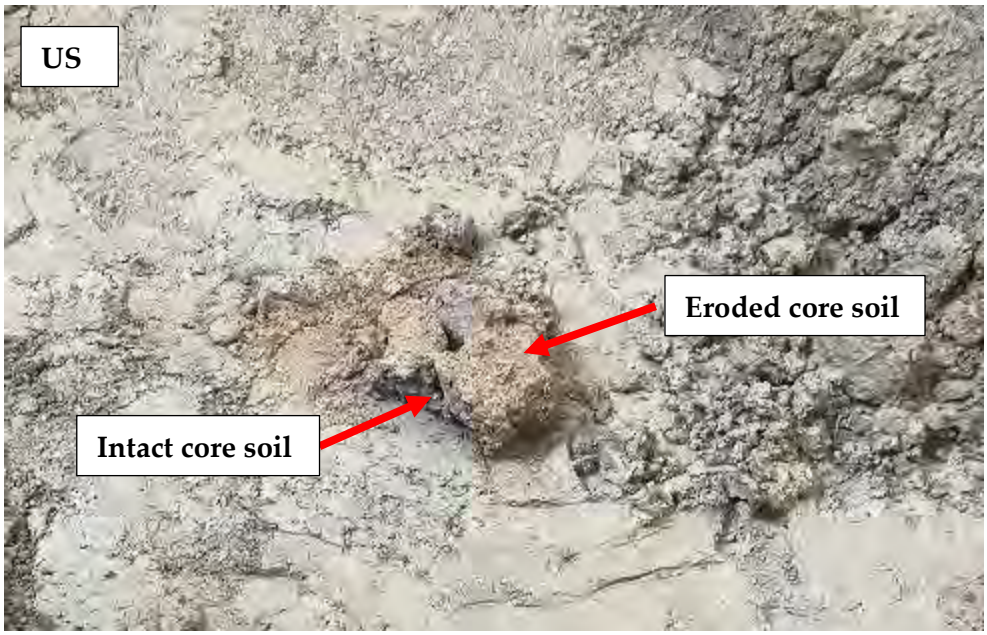


Figure 98. Bottom part of a layer of core soil flipped upside down during excavation. Notice the sand on the top and intact core soil under it. It is unknown where this part of core soil originates but it was found at level 40 cm ca 5 – 6 m out from the right abutment

7.5 "RIGHT ABUTMENT"

The left abutment had no damages (except the defect installed at level 300 cm) but the right one had. Internal erosion was found at level 40 cm in the "downstream half" of the core soil, See Figure 99 and Figure 100.

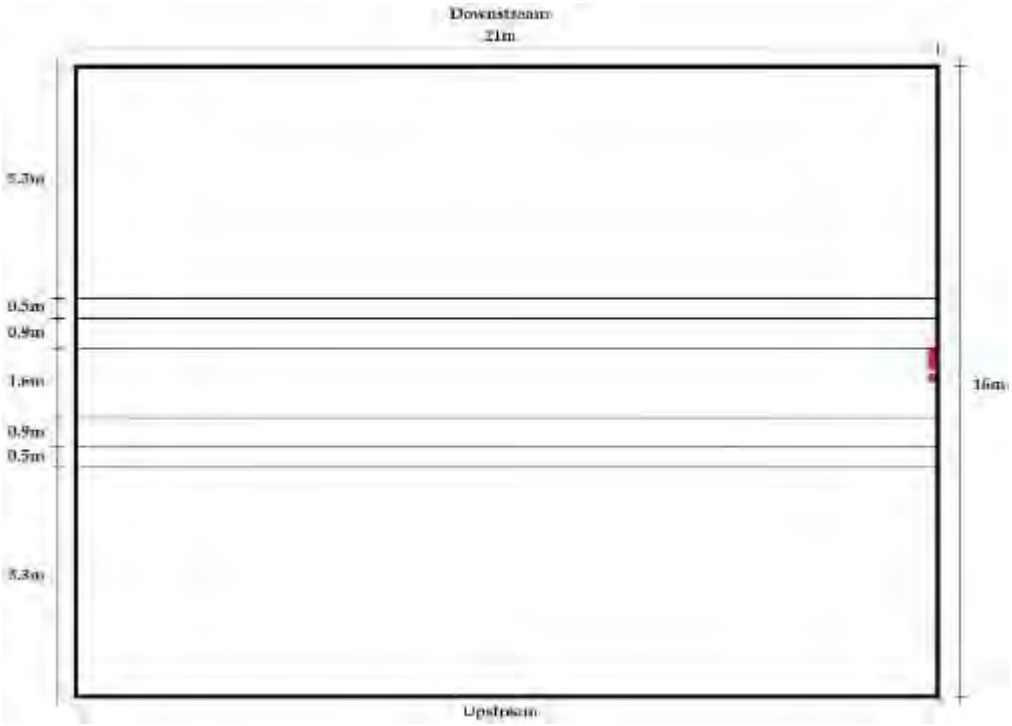


Figure 99. Orientation of the damage at the right abutment viewed from above.

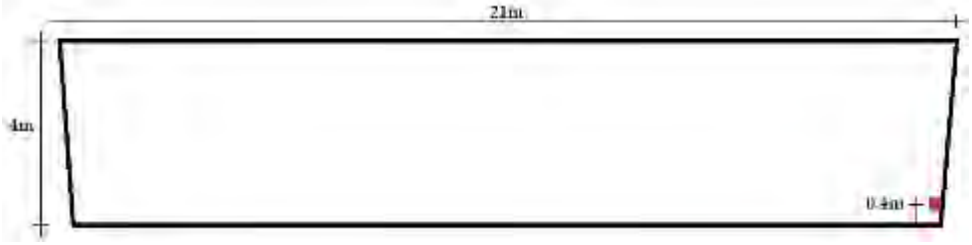


Figure 100. Orientation of the damage at the right abutment viewed from upstream side toward downstream side.

Initially a couple of small damages with similar shape as a sinkhole were found at a level of ca 60 cm, see Figure 101. Eroded core soil material was removed and looked similar to the other eroded core soil material found in the erosion damages of the dam (coarse sand – fine gravel).

Figure 101. Internal erosion found at right abutment at level 60 cm on the 1st of October 2024.

After yet another 20 cm of excavation, the damage changed form into a more uniform zone of eroded core soil (still coarse sand – fine gravel) in direct contact with the right abutment on the downstream side of the core soil, see Figure 102.

Figure 102. Internal erosion (inside red oval) at the right abutment at level 40 cm on the 3rd of October 2024. Red, dashed line mark the boundary between the core soil and downstream fine filter. White circular zone is injected grout material (hole 4).

A ca 10 cm thick layer of the core soil material at the abutment as shown in Figure 102, was removed with the excavator so the core soil material in direct contact with the right abutment could be studied, see Figure 103.

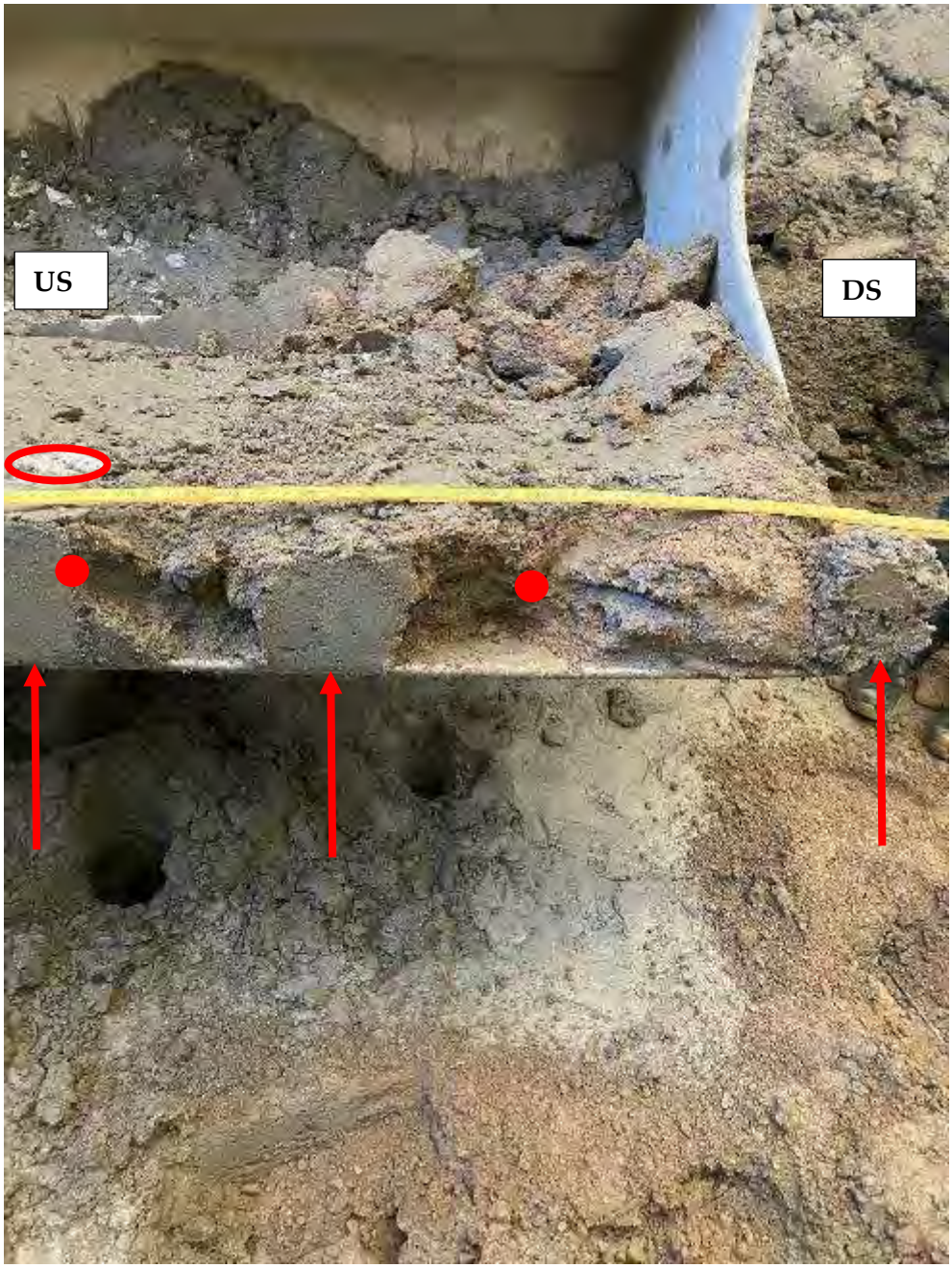


Figure 103. Core soil material from right abutment from level 40 cm removed on the 3rd of October 2024. Red arrows mark intact core soil. Red point mark where material was taken for sieve analysis. Red circle mark the point of the injected grout material (hole 4).

Eroded core soil material from the damage revealed a loss of fines on the downstream side, see Figure 104.

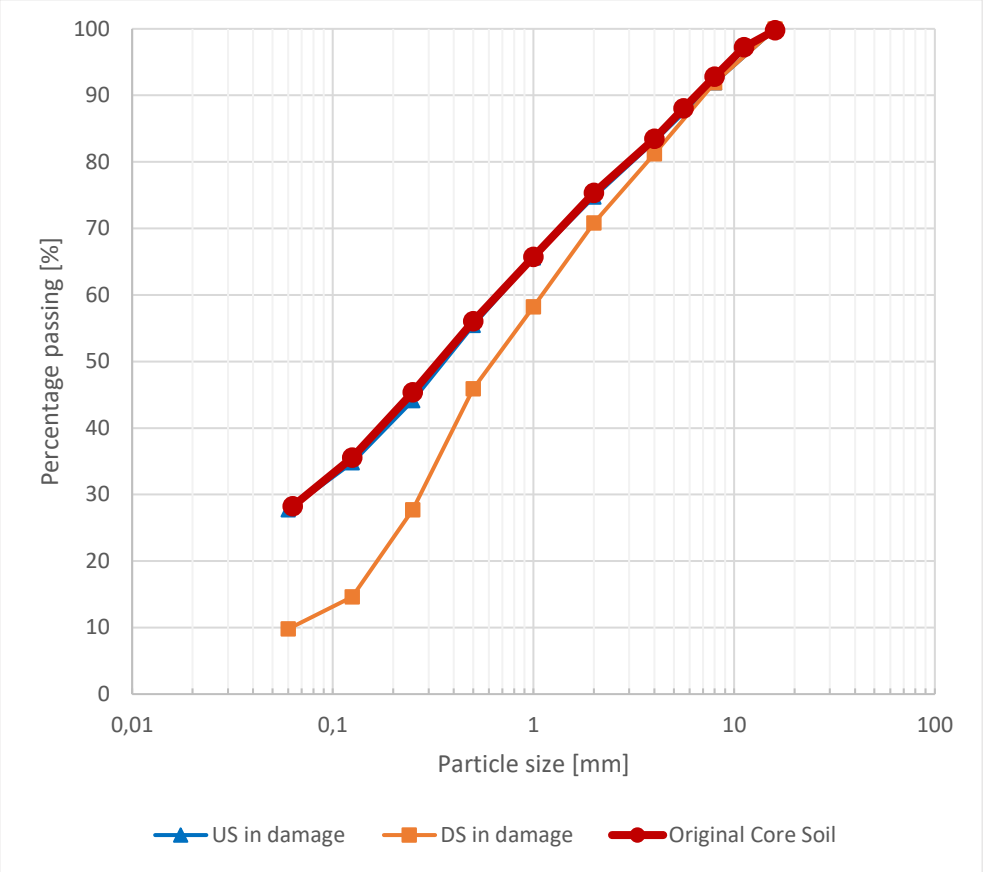


Figure 104. Particle size distribution of eroded core soil from the sandy zone. Original particle size distribution plotted as a reference.

8 Injection grouting

Drilling and injection grouting of the dam was performed between 14th – 17th of November 2024. The locations of the six injection grouting holes is shown in Figure 105. Injection in all holes were performed from the bottom and up. An injection pipe was inserted into the drilled casing all the way to the bottom and both casing and injection pipe was withdrawn simultaneously upwards while pre-calculated amount of grout material was injected at a pre-calculated injection pressure. A detailed description of the procedure of drilling and grouting is presented in Lagerlund et al. (2023). In all photos of the holes, except when noted, they have been photographed standing on the upstream side of the hole looking downstream.

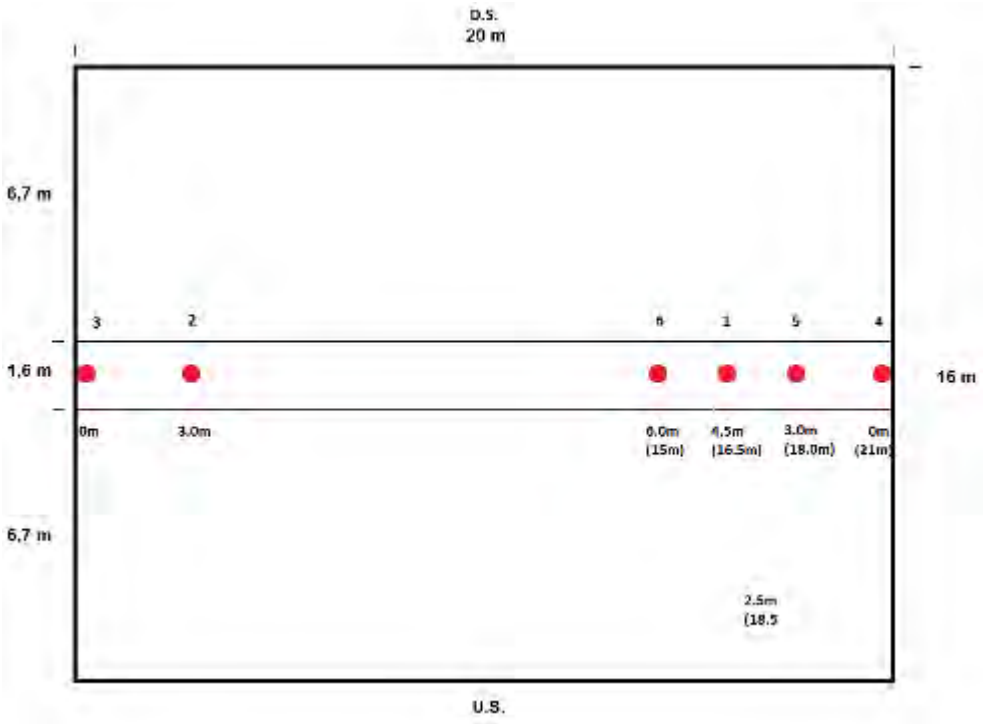


Figure 105. Injection grouting holes drilled and injected between November 14th – 17th 2022.

8.1 INJECTION GROUTING HOLE 1

Hole number 1 was drilled to a depth of 3.55 m under the crest (level 45 cm), 16.5 m from the left abutment, see Figure 105. Drilling took place on the 14th of November and injection grouting on the 15th of November 2022. One of the grout material constituents was limestone filler, see Lagerlund (2024). Therefore, the grout material was white. Diameter of drilled hole (prior to injection grouting) was 100 mm. Injection pressure was 45 kPa, intended not to damage the core soil during injection.

Photos from the gradual excavation of hole 1 is shown in Figure 106 – Figure 114.

Figure 106. Level 300 cm on the 18th September 2024.

A pre-calculated grout material amount of ca 30 liters was used so if fracturing or excessive enlargement of the injected hole occurred, there would not be enough grout material to inject the full height of the drilled hole. As seen in Figure 106, only a fraction of the grout material was found at the top of the injected hole. Therefore, fracturing or excessive enlargement was suspected to have had happened deeper in the hole.

Figure 107. Level 260 cm on the 20th September 2024.

Figure 108. Level 220 cm on the 23rd September 2024.

As seen in Figure 108, Somewhere between level 260 cm (Figure 107) and level 220 cm the grout material completely filled the hole. Diameter of the drilled hole was 100 mm but after injection of the grout material the diameter was ca 130 mm. The grout material and surrounding core soil had very similar mechanical stiffness. Higher up in the injected hole, where the grout material did not completely fill the hole, both grout material and surrounding core soil was softer. Strength properties were not measured.

Figure 109. Level 170 cm on the 24th September 2024.

In Figure 109, the shape of the grout material changed at level 170 cm The grout material had fractured the core soil in a boundary zone between two core soil layers. The grout material had fracture the very bottom part of the overlaying core soil layer.

Figure 110. Level 140 cm on the 25th September 2024.

As seen in Figure 110, the grout hole had a diameter of almost 190 mm. This happened just above a lost casing from the drilling. It was known from the grouting at the 15th of November 2022 that the bottom third of the casing had been lost in the dam. After this accident, all casing parts were welded together during the drilling. No more casings were lost after that.

Figure 111. Level 140 cm on the 26th September 2024.

Compared to Figure 110, a couple of cm of core soil was removed and the top of the casing could now be seen (Figure 111). Grout material had "spilled over the brim" of the casing during the injection process. From this level and down, all remaining grout material was expected to be inside the casing.

Figure 112. Core soil level at 100 cm on the 26th September 2024.

Figure 113. Casing standing freely in the core soil on the 2nd of October. Core soil at the very left at level 40 cm. Casing section 1.2 m long.

Figure 114. Bottom of the casing on the 3rd of October 2024..

Core soil had clogged the bottom of the casing so no grout material at the used grout pressure could penetrate it. This was the end of grouting hole 1.

8.2 INJECTION GROUTING HOLE 2

Hole number 2 was drilled to a depth of 3.70 m under the crest (level 30 cm), 3.0 m from the left abutment, see Figure 105. Drilling took place on the 15th of November and injection grouting on the 15th of November 2022. One of the grout material constituents was magnetite powder, see Lagerlund (2024). Therefore, the grout material was black. Diameter of drilled hole (prior to injection grouting) was

100 mm. Injection pressure was 50 kPa, intended not to damage the core soil during injection.

Photos from the gradual excavation of hole 2 is shown in Figure 115 – Figure 121.

Figure 115. Level 260 cm. 20th September 2024.

The first sign of grout material was at a level 260 cm. At this level, the hole was not full and both the core soil surrounding the hole and grout material was quite soft.

Figure 116. Level 220 cm. 23rd September 2024.

Similar to grouting hole 1 at level 220 cm (Figure 108), the grout material filled the hole, see Figure 116. Diameter of the hole was however slightly lower at ca 100 mm compared to hole 1. Grout material felt a bit "airy" but core soil material around it was stiff.

Figure 117. Level 170 cm. 24th September 2024.

At level 170 cm level diameter of the hole was ca 120 mm, see Figure 117. This was 25 mm larger than the drilled hole. Both grout material and surrounding core soil was stiff. From this level down to the bottom the grouting hole remained the same. Diameter of the injected hole slightly larger than the drilled. This meant that the injection had worked as intended, filling the hole and providing a slight compaction of the surrounding core soil. However, at level 90 cm, a fracture was found, see Figure 120.

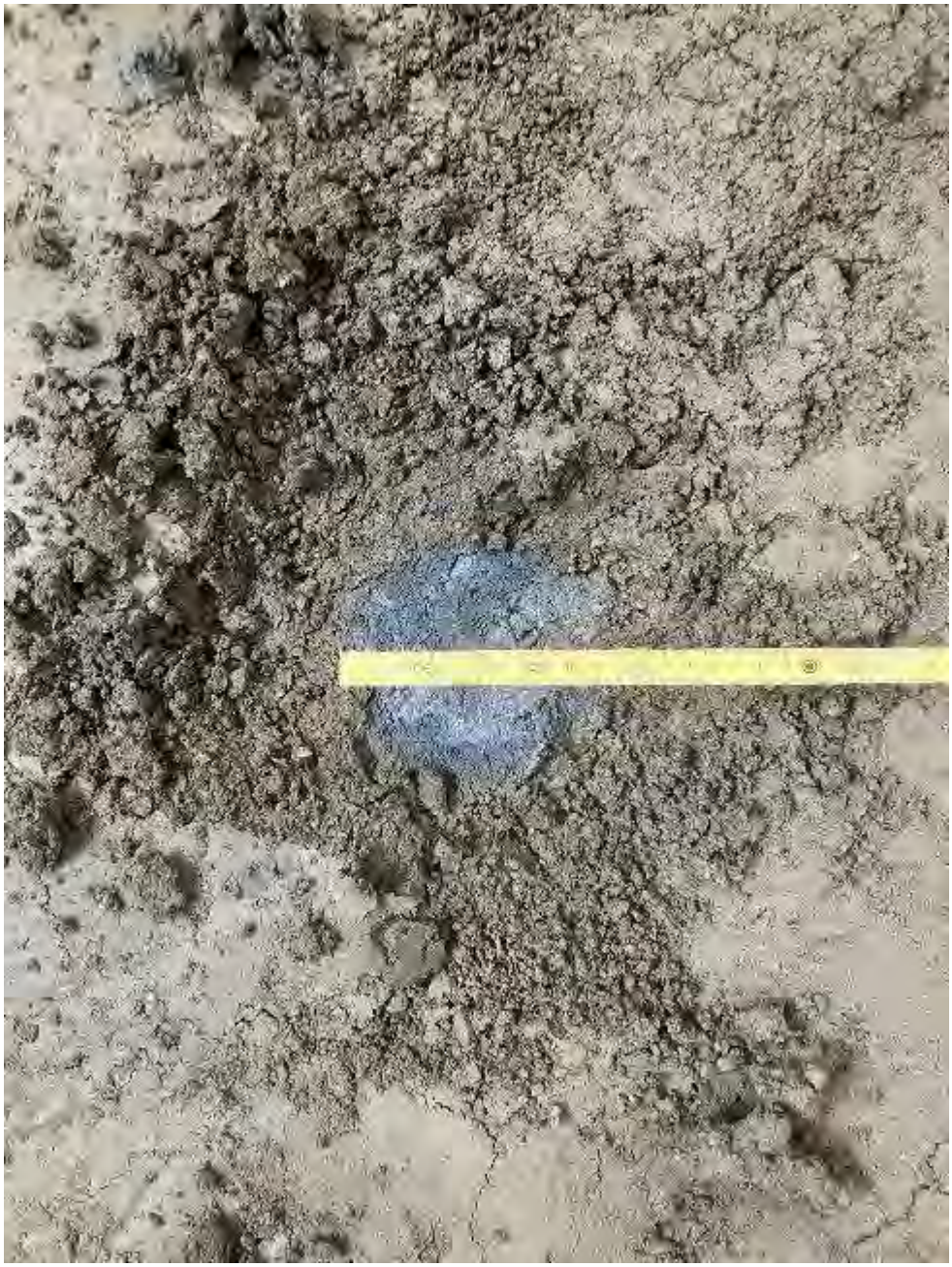


Figure 118. Level 140 cm. 25th September 2024.

Figure 119. Level 130 cm. 26th September 2024.

Figure 120. Level 90 cm. 30th September 2024. Original hole marked by red circle.

As seen in Figure 120, the grout material at level 90 cm had fractured the core soil. Like hole 1, the fracture occurred in the boundary zone between two core soil layers. The fracture occurred in the bottom part of the overlaying layer.

Figure 121. Level 70 cm from bottom. 30th September 2024.

This was the end of grouting hole 2. No more grouting material was found beneath the point as seen in Figure 121. Note that just because no more grout material was found underneath this level didn't mean it was not there. The method of excavation at this location should have been more careful. Too much core soil material was most likely removed at the same time, preventing further findings.

8.3 INJECTION GROUTING HOLE 3

Hole number 3 was drilled to a depth of 3.52 m under the crest (level 48 cm), close to the left abutment, see Figure 105. Drilling took place on the 15th of November and

injection grouting on the 16th of November 2022. One of the grout material constituents was magnetite powder, see Lagerlund (2024). Therefore, the grout material was black. Diameter of drilled hole (prior to injection grouting) was 100 mm. Injection pressure was 50 kPa, intended not to damage the core soil during injection.

Photos from the gradual excavation of hole 3 is shown in Figure 122 – Figure 131.

Injection grouting hole 4 was located so it traversed defect 1 at the left abutment at level 300 cm. At this level, grout material was initially thought to have been found, see Figure 122.

Figure 122. Level 300 cm. 18th September 2024. Note that the material found was not grout material but fines from the core soil traversing the defect 1 at the left abutment.

However, the material found traversing defect 1 was not grout material but fine material from the core soil mixed with material from the defect and material from the crest, see Figure 123.

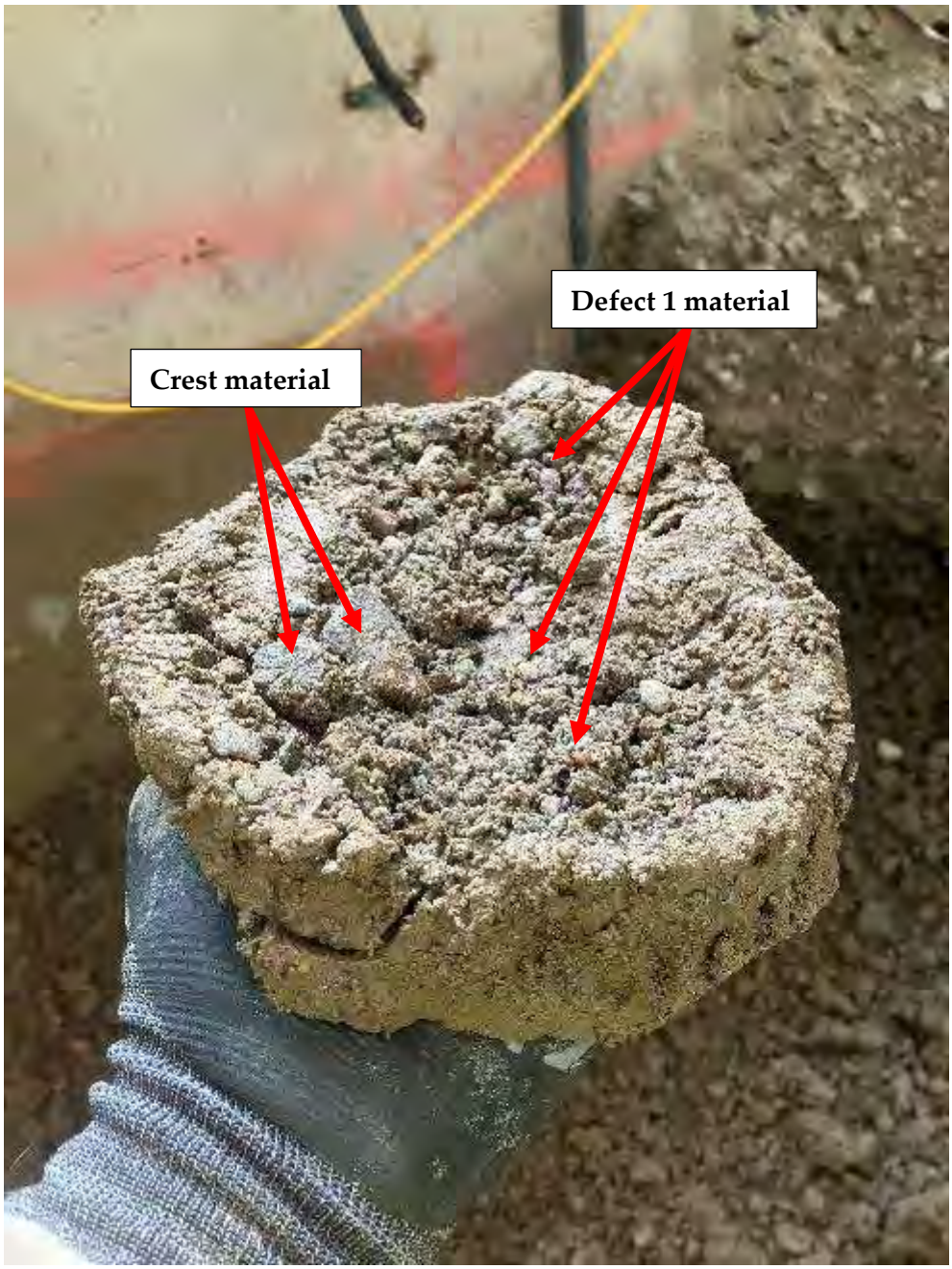


Figure 123. Material from grout hole 3 removed from defect 1 and held in the palm of a hand.

The material removed was best described as a filter cake. This filter cake was created during the drilling phase during the drilling procedure on the 15th of November 2022. A 40 % lowering of seepage rate was recorded at the moment of drilling and after injection, seepage was only further marginally lowered, Lagerlund (2023). Unfortunately the filter cake was lost during the dismantling work and was therefore not examined further. After its removal, a hole was left in defect 1 but

directly underneath it, no grout material was found, only crest material, see Figure 124.

Figure 124. Defect 1 after the material from grout hole 1 had been removed on the 18th of September 2024.

Figure 125. Level 260 cm. 20th September 2024. Defect 1 material (4/8 mm gravel) found in the drilled hole.

At level 260 cm, only 4/8 mm gravel material from defect 1 was found in the hole, see Figure 125. The core soil close to the hole was soft.

Figure 126. Level 220 cm. 23rd September 2024.

At 220 cm level, the hole was completely filled with grout material, see Figure 126. Diameter of the hole was 100 mm, on par with the drilled hole. No expansion of the grout material had thus occurred.

Figure 127. Level 170 cm. 24th September 2024.

At level 170 and 140 cm the grout material diameter was ca 110 mm. Indicating an injection grouting process where not only the hole was filled but also compacted the core soil surrounding the hole.

Figure 128. Level 140 cm. 25th September 2024.

At level 120 – 135 cm the grout material had deformed the core soil surrounding the hole, see Figure 129. Level 120 -135 cm. 26th September 2024.

Figure 129. Level 120 -135 cm. 26th September 2024.

The deformation of the core soil had an orientation towards the left abutment. At its closest, the grout material was 3 cm from the abutment, ca 7 cm closer than the original grout material column.

Figure 130. Grout material column, 15 cm high removed and photographed. Dashed lines mark the original drilled hole. Grout material outside the dashed lines mean the core soil has been deformed at this location (level 120 – 135 cm).

Figure 131. Level 70 cm. 30th September 2024.

No more grout material was found under level 70 cm. Note that just because no more grout material was found underneath this level didn't mean it was not there. The method of excavation at this location should have been more careful. Too much core soil material was most likely removed at the same time, preventing further findings.

8.4 INJECTION GROUTING HOLE 4

Hole number 4 was drilled to a depth of 3.50 m under the crest (level 50 cm), close to the right abutment, see Figure 105. Drilling took place on the 16th of November and injection grouting on the 16th of November 2022. One of the grout material

constituents was limestone filler, see Lagerlund (2024). Therefore, the grout material was white. Diameter of drilled hole (prior to injection grouting) was 100 mm. Injection pressure was 250 kPa, intended to fracture the core soil during injection. This was five times higher than grouting pressures used in grouting hole 1 – 3.

Photos from the gradual excavation of hole 4 is shown in Figure 132 – Figure 139.

Figure 132. Level 220 cm. 23rd September 2024.

The upper part of the hole was filled with crest and fine filter material and no grout material was to be found. This left a noticeable wet spot in the core soil. The first time grout material was found in the hole was at level 170 cm, almost half way down

the hole, Figure 133. This meant that the applied injection pressure on the grout material had caused fracturing of the core soil as intended.

Figure 133. Level 170 cm. 24th September 2024.

At level 140 cm, the grout material completely filled the hole, Figure 134. All 30 liters of grout material was therefore expected to be located between level 140 – 50 cm.

Figure 134. Level 140 cm. 26th September 2024.

Grout material diameter between level 140 – 70 cm was between 110 – 120 mm, indicating a slight expansion of the grouting hole due to the injection process, see Figure 134 – Figure 136.

Figure 135. Level 110 cm. 26th September 2024.

Figure 136. Level 70 cm. 30th September 2024.

At level 60 cm the fracture was found. Due to the excavation process, anything between level 70 – 60 cm could not be seen. At level 60 cm an area of almost 50 cm in length and 23 cm wide had been fractured. The fracture was had an orientation toward the upstream side, see , Figure 137.

Figure 137. Level 60 cm. 2nd October 2024. Original hole in the red circle. Movement of the fracturing grout material marked with red arrows.

Another 10 cm down (level 50 cm), the fracture had diminished significantly, meaning the majority of the fracturing had occurred between level 50 – 70 cm. Area of fracture including the hole at level 50 cm was approximately 25x13 cm, see Figure 138.

Figure 138. Level 50 cm. 3rd October 2024. Original hole in the red circle. Movement of the fracturing grout material marked with red arrows.

At level 40 cm the hole was "back to normal", see Figure 139. The fracturing had thus not started directly but happened at a higher level during the grouting

Figure 139. Level 40 cm. 3rd October 2024.

Under level 40 cm the hole ended. The last part was excavated by hand and the presence of grout material, as seen in Figure 139, stopped after a few more centimeters down.

8.5 INJECTION GROUTING HOLE 5

Hole number 5 was drilled to a depth of 3.55 m under the crest (level 45 cm), 18 m from the left abutment, see Figure 105. Drilling took place on the 16th of November and injection grouting on the 16th of November 2022. One of the grout material constituents was limestone filler, see Lagerlund (2024). Therefore, the grout material

was white. Diameter of drilled hole (prior to injection grouting) was 100 mm. Injection pressure was 150 kPa, intended to fracture the core soil during injection. This was three times higher than grouting pressures used in grouting hole 1 – 3.

Photos from the gradual excavation of hole 5 is shown in Figure 140 – Figure 153.

Figure 140. Level 260 cm. 20th September 2024.

At levels 260 – 220 cm, only crest material was found inside the hole. The core soil around the un-grouted hole was very loose and the material in is wetter than its surrounding.

Figure 141. Level 220 cm. 23rd September 2024.

Figure 142. Level 170 cm. 24th September 2024.

At level 170 cm, finer material from the core soil was found in the hole, Figure 142. This material was very similar to the soil material found on the downstream side of the defect 2 (concrete cube), see Figure 39 to Figure 40. Core soil around the hole was soft

Figure 143. Level 140 cm. 25th September 2024.

At level 140 cm, grout material mixed with crest material was found in the hole. The amount of grout material was very low, Figure 143. Core soil around the hole was soft.

Figure 144. Level 130 cm. 26th September 2024.

At level 130 cm, the grout material completely filled the hole, Figure 144. This was similar to hole 4, where the grout material completely filled the hole at level 140 cm. Diameter of the whole was ca 100 mm, no expansion at this level of the drilled hole due to the injection pressure. The core soil around the hole was stiff.

Figure 145. Level 100 cm. 30th September 2024.

At level 100 cm the diameter of the hole was ca 110 mm, indicating a slight expansion of the drilled hole due to injection pressure, Figure 145. The core soil around the hole was stiff.

Figure 146. Level 80 cm. 30th September 2024.

At level 80 cm the first sign of fracturing was found, Figure 146. Grout material was not only found at the drilled hole but became visible ca 40 cm upstream the hole. At this point, the initial suspicion was that the grout material had made a turn down and up (like an arch) in the core soil. After another 10 cm of core soil removed, the situation on the site is shown in Figure 147.

Figure 147. Level 70 cm. 1st October 2024. Bottom piping damage bottom right (compare with Figure 71). Movement of the fracturing grout material marked with red arrows. Original grout hole marked with red circle.

At level 70 cm it became clear that the grout material had fractured the core soil. At this point, the suspicion was that a "lump" of grout material had formed. The length of the grout material "lump", upstream from the original hole, was almost 60 cm and its width was at the widest part ca 20 cm. The point of the grout material "lump" farthest upstream was only a couple of centimeters from going into the upstream fine filter.

Figure 148. Level 70 cm. Surrounding core soil has been removed down to level 30 cm. 1st October 2024. Movement of the fracturing grout material marked with red arrows. Original grout hole marked with red circle and red lines.

After further excavation at level 70 cm, it became evident that neither an arch nor a "lump" of grout material had formed due to the excessive injection pressures used. Instead, it was discovered that a fracture between two different layers of core soil had been formed. The fracture occurred in the bottom of the overlaying layer. The original hole was also found to have been expanded 10 – 20 mm downstream, see Figure 148.

Figure 149. Level 70 cm. 1st October 2024. Original grout hole marked with red circle.

The thickness of the fracture was at most 20-30 mm, see Figure 149.

Figure 150. Level 60 cm. 1st October 2024.

From level 60 cm down to the bottom of the hole at level 30 cm, the grout material took on a more "lump" appearance. Viewed from above it had an oval form, which gradually diminished in size in an almost linear manner, see Figure 151 – Figure 153.

Figure 151. Level 50 cm. 1st October 2024.

Figure 152. Level 40 cm. 1st October 2024.

Figure 153. Level 30cm. 1st October 2024.

At level 30 cm no more grout material was found. Furthermore, the diameter of the hole was 90 mm, 10 mm smaller than the original diameter of the hole.

8.6 INJECTION GROUTING HOLE 6

Hole number 5 was drilled to a depth of 3.40 m under the crest (level 60 cm), 15 m from the left abutment, see Figure 105. Drilling took place on the 16th of November and injection grouting on the 17th of November 2022. One of the grout material constituents was limestone filler, see Lagerlund (2024). Therefore, the grout material was white. Diameter of drilled hole (prior to injection grouting) was 100 mm.

Injection pressure was initially 0 (freefall of the grout material into the drilled hole and thereafter 150 kPa was added, intended to fracture the core soil during injection. This was three times higher than grouting pressures used in grouting hole 1 – 3.

Photos from the gradual excavation of hole 6 is shown in Figure 154 – Figure 157.

Figure 154. Level 220 cm. . 23rd September 2024. Material from the hole removed and placed below the hole

During the injection of grout material on the 17th of November 2022 it was known that the grout material fractured the core soil after the pressure of 150 kPa was applied. It was therefore certain that grout material was supposed to be in the dam at a similar level as in hole 4 and 5 (where intentional fracturing of the core soil was sought. However, no grout material was ever found in this hole. The grout material

is suspected to have fractured the core soil between level 60 and 100 cm. Given the method of excavation with an 18 ton excavator, the grout material was most likely removed without being detected. The material found in the hole was similar to the material found on the downstream side of defect 2 (concrete cube). The core soil around the hole was very loose on all investigated levels.

Figure 155. Level 170 cm. 24th September 2024. Material from the hole removed and placed below to the right of the hole.

Figure 156. Level 140 cm. 25th September 2024. Material from the hole removed and placed below to the left of the hole.

Figure 157. Level 100 cm. 26th September 2024. Material from the hole removed and placed above to the right of the hole.

The hole was still filled with loose core soil material at level 70 cm (no photo taken by mistake). At 40 cm, the grout hole and grout material had "disappeared".

8.7 WATER CONTENT AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF GROUT MATERIALS.

Water content of both types of grout materials was tested during the dismantling and found to be very uniform compared to the water content of the core soil (see section 11.3.2). Water content was between 8 – 9 %. Example form sampling is shown in Figure 158Results from water content measurements are shown in Table 1.

Table 1.

Figure 158. Sampling from hole 2 at level 220 cm on the 23rd of September.

Table 1. Water content of grout material in hole 1 – 5. No measurements from hole 6 since no grout material was found in it.

Hole	Level [m]	Water content [%]	Water content 2022 [%]
1	220	8.0	12.1
1	140	8.4	12.1
2	220	8.2	11.9
2	90	9.0	11.9
3	220	8.6	11.9
3	120	8.7	11.9
4	140	8.4	12.1
4	50	8.2	12.1
5	130	8.1	12.1
5	60	8.8	12.1

Particle size distribution of both grout materials injected in 2022 and excavated is shown in Figure 159.

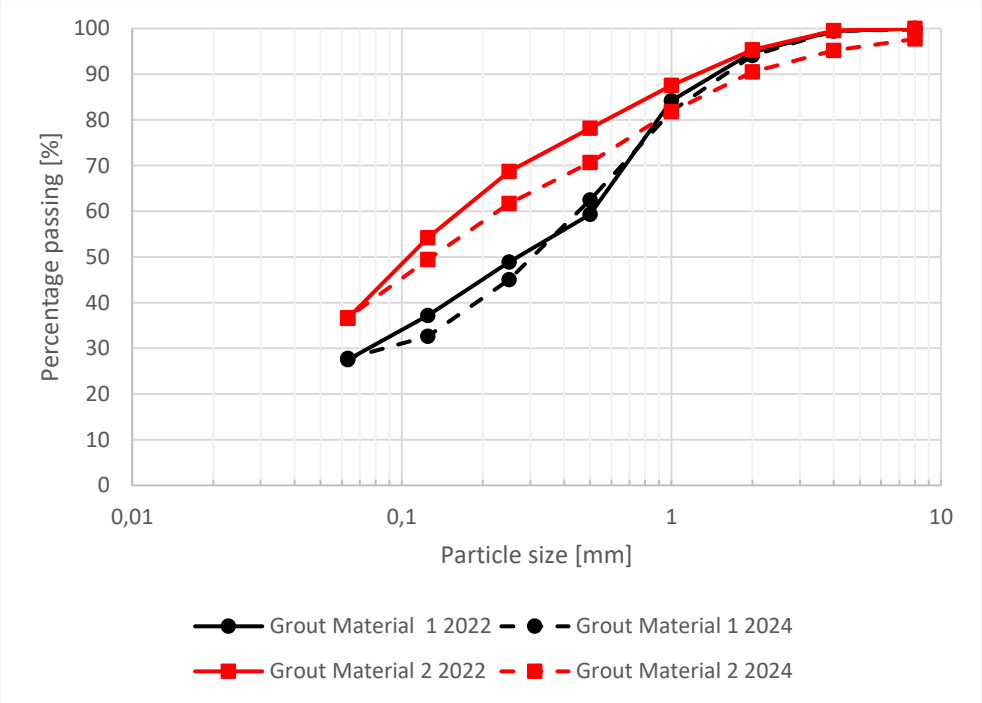


Figure 159. Particle size distribution of the two types of grout materials used. Grout material 1 contained no magnetite powder while grout material 2 did. Results from time of injection (2022) and time of excavation (2024) compared.

The results show that the particle size distribution of neither grout materials has changed significantly over two years. Fine content is the same 2024 compared to 2022.

9 Pore pressure gauges

The pore pressure gauges placements are shown in Figure 160 and Figure 161.

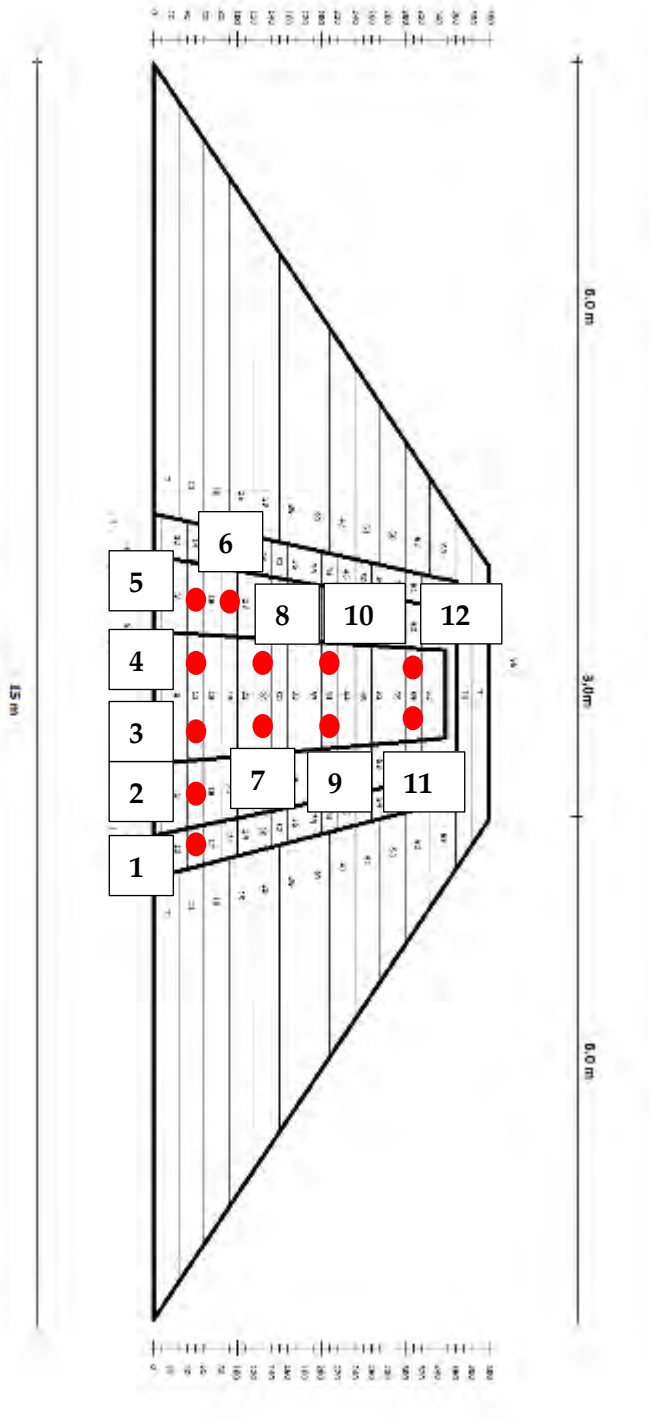


Figure 160. Placement of pore pressure gauges 1 – 12.

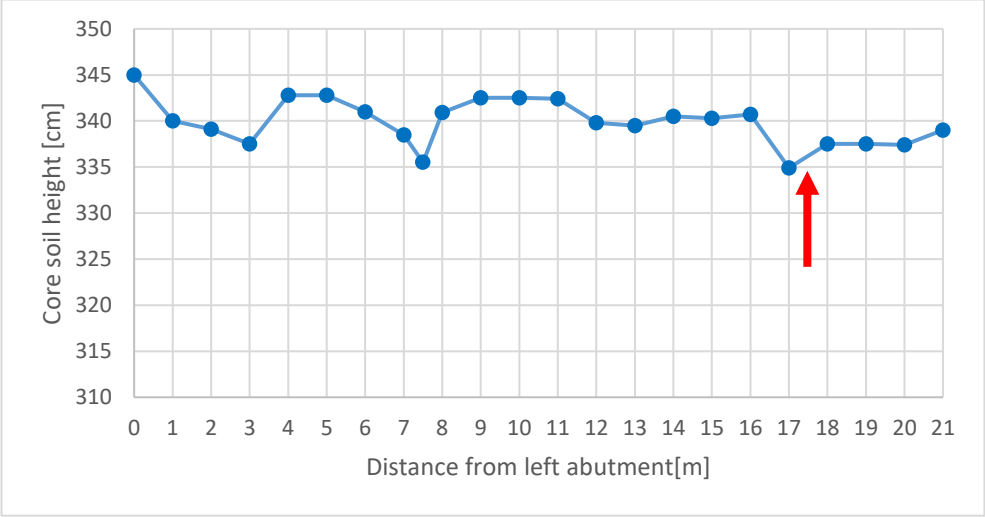


Figure 161. Location of the pore pressure gauges vis a vis settlement measurements of the crest marked with red arrow. This figure is a repetition of Figure 18.

All these pore pressure gauges were measured during installation in October – November in 2019 and during dismantling. Measuring them again after 4.5 years of operation gave an opportunity to study settlements of the core soil at various levels. All pore pressure gauges were installed 3 m from the right abutment. Results, before and after, is shown in Table 2.

Table 2. Measurement of the pore pressure gauges at installation in 2019 and after the experiment in 2024. For locations of the pore pressure gauges see Figure 160.

Location	Gauge	2019 depth [m]	2024 depth [m]	Diff. [cm]	Level [m]	Settlement [%]
DS coarse	1	3.850	3.875	-2.5	0.260	-9.5
DS fine	2	3.863	3.894	-3.1	0.247	-12.4
DS core	3	3.863	3.886	-2.3	0.247	-9.4
US core	4	3.864	3.903	-3.9	0.246	-15.9
US fine	5	3.836	3.868	-3.2	0.274	-11.8
US fine	6	3.404	lost			
DS core	7	2.971	3.043	-7.2	1.139	-6.4
US core	8	2.975	3.052	-7.7	1.135	-6.8
DS core	9	2.105	2.211	-10.6	2.005	-5.3
US core	10	2.125	2.236	-11.1	1.985	-5.6
DS core	11	1.069	1.165	-9.6	3.041	-3.2
US core	12	1.074	1.179	-10.5	3.036	-3.5

The absolute settlements, expressed at settlement over available height, according to Table 2 was higher in the bottom than in the top. The pore pressure gauges in the

bottom were placed within the area described in section 7.2, "Under the large sinkhole". Pore pressure gauge 5 was never photographed during excavation but measured. Pore pressure gauge 6 was destroyed during the dismantling.

Photos of all the pore pressure gauges, before and after dismantling, are shown in Figure 162 – Figure 176.

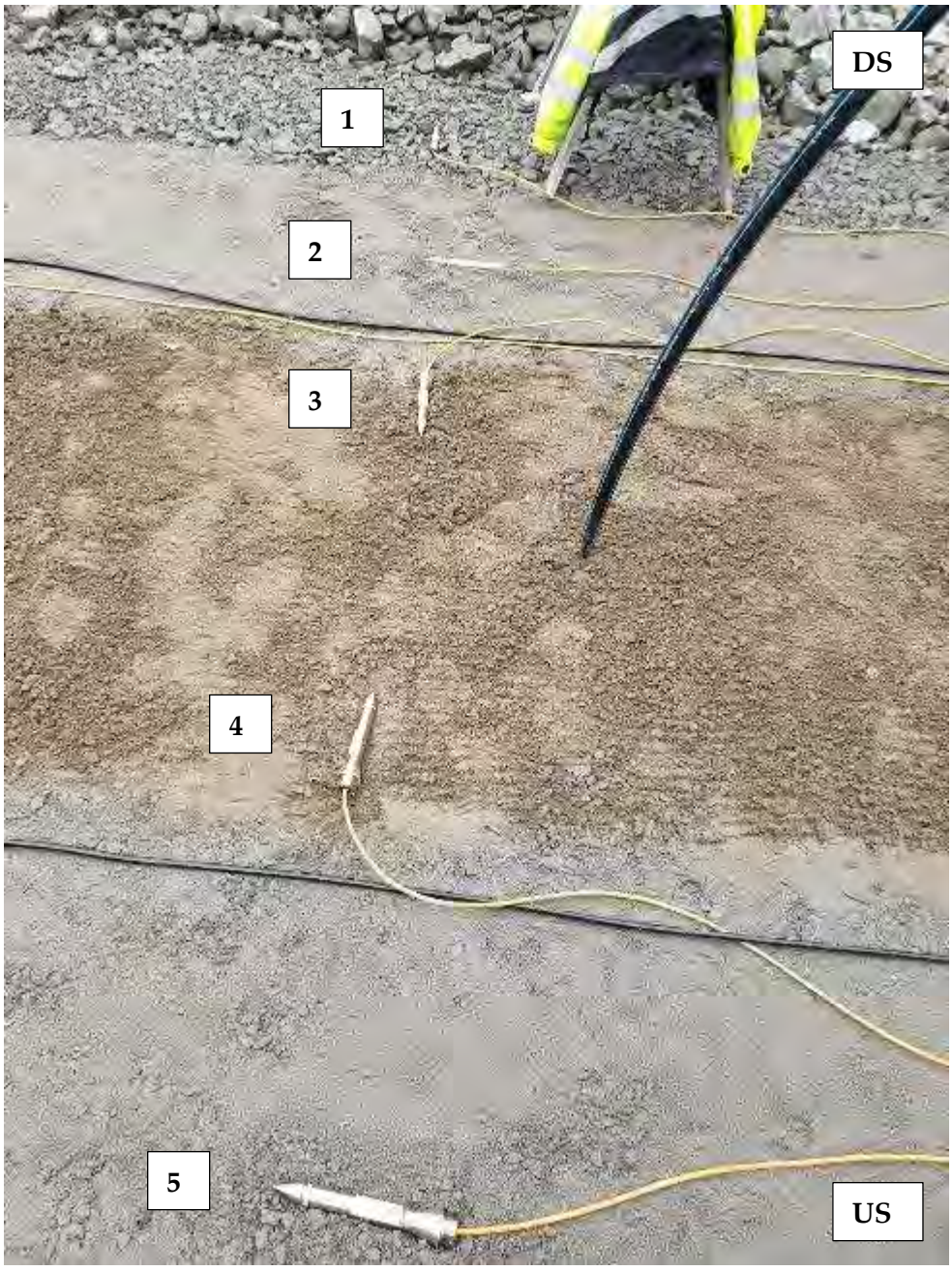


Figure 162. Pore pressure gauges 1 – 5 at time of construction at level 28.5, 27.8, 27.0, 28.5 and 30.6 cm respectively on the 25th of October 2019.

Bottom row of five pore pressure gauges laid out on the core soil, fine filter and downstream coarse filter before being overlayed with next layer of materials, Figure 162.

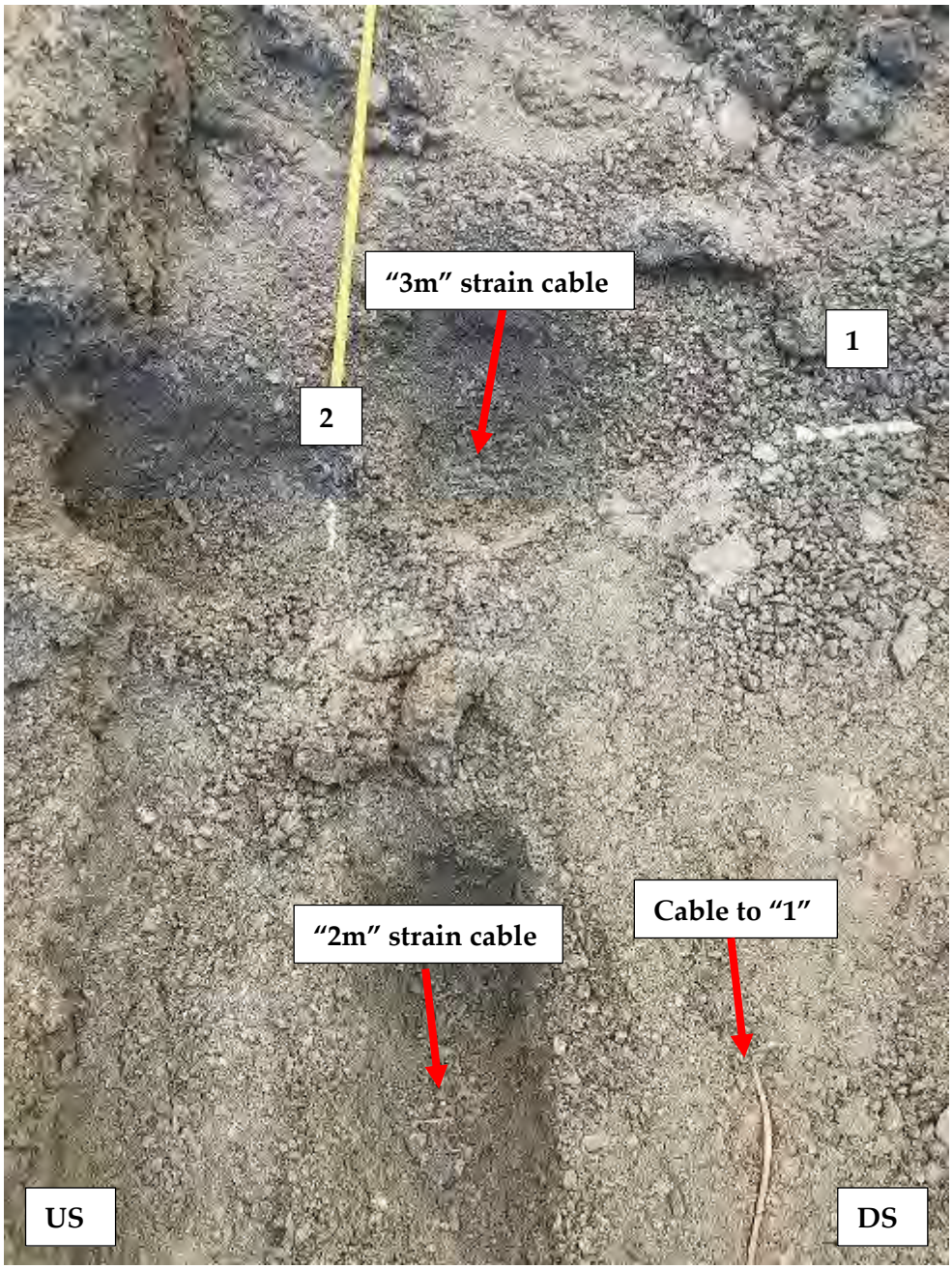


Figure 163. Pore pressure gauges 1 and 2 at level 26.0 and 24.7 cm respectively on the 1st of October 2024.

Pore pressure gauges 1 and 2 was uncovered on the 1st of October 2024. Here they are photographed together with strain cables installed 2 and 3 m from the right abutment, Figure 163.

Figure 164. Pore pressure gauges 3 and 4 at level 24.7 and 24.6 cm respectively on the 2nd of October 2024. Pore pressure gauge 3 has been removed but it imprint is left intact in the core soil. Wall of large sinkhole facing pore pressure gauge 3 marked with red dashed line.

Pore pressure gauges 3 and 4 was just above the damage area under the sinkhole, see section 7.2. Pore pressure gauge 3 was very close to the large sinkhole, Figure 165 – Figure 166. Furthermore, the back part of pore pressure gauge 3 could have ended up in the DS fine filter material but it could not be determined with 100 % accuracy since the core soil and fine filter not always have a very clear boundary, see Figure 167.

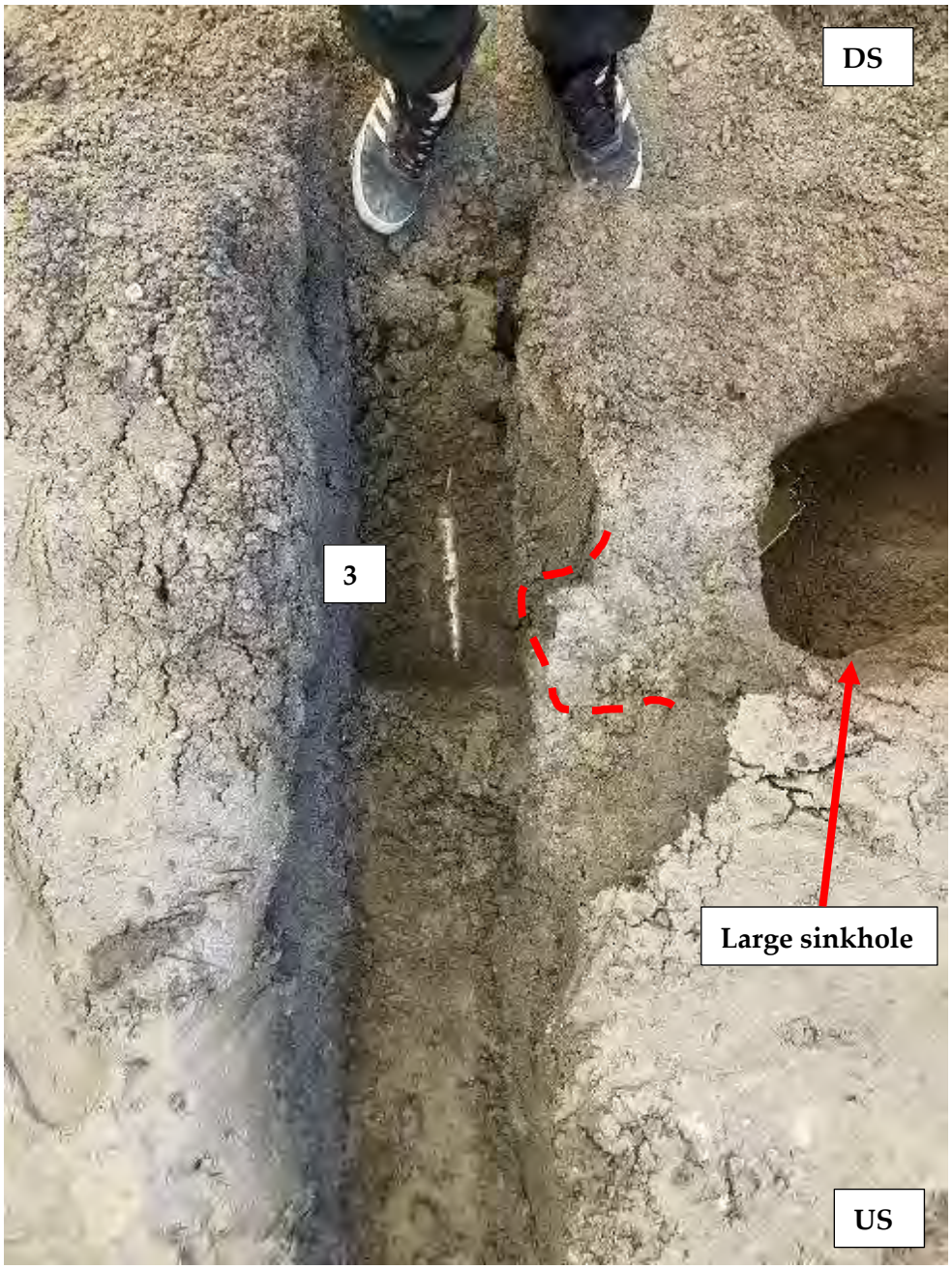


Figure 165. Close up of pore pressure gauge 3 on the 1st of October 2024. Wall of large sinkhole facing pore pressure gauge 3 marked with red dashed line.

Figure 166. Close up of pore pressure gauge 3 on the 1st of October 2024. Note the coarse soil on the right side within the red oval. Behind it the large sinkhole was situated.

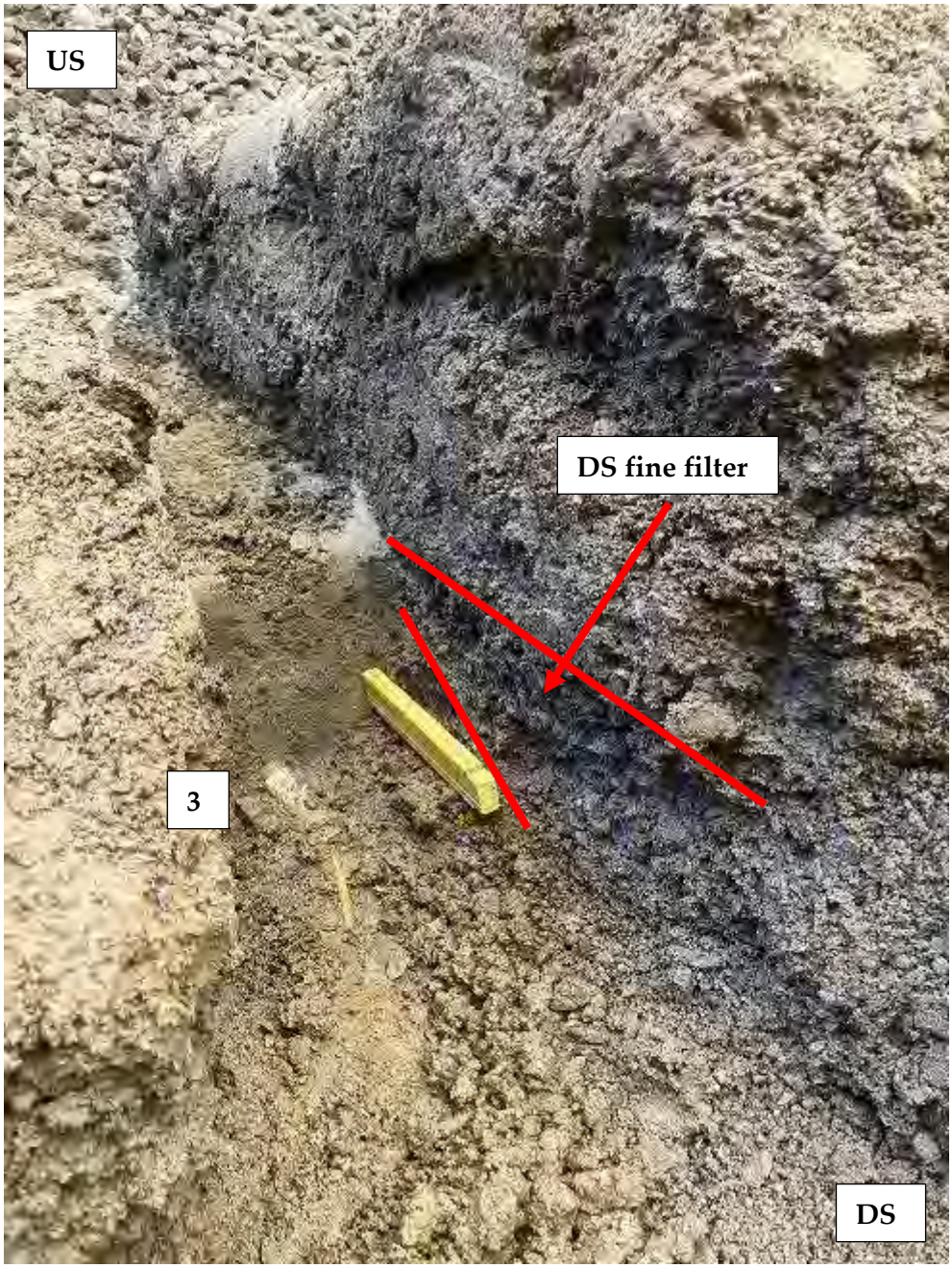


Figure 167. DS fine filter very close to pore pressure gauge 3.

Figure 168. Top view of pore pressure gauge 4 on the2nd of October 2024. Orientation of ruler is perpendicular to the dam length (strict US to DS). Note the heavy eroded core soil around the pore pressure gauge.

The settlements had in particular cased settlements of almost 16 % of pore pressure gauge 4. The tip of the gauge moved down and to the right with an downward angle of 8° and angle to the right of 9°, see Figure 168 and Figure 169.

Figure 169. Side view (left abutment in the background) of pore pressure gauge 4 on the 2nd of October 2024. Orientation of ruler is vertical and perpendicular to the dam length (strict US to DS).

After removal of pore pressure gauges 3 and 4, there was a thin layer of a rusty moist fine soil material covering the downstream pore pressure gauge 3. No rust was found on pore pressure gauge 4 on the upstream side.

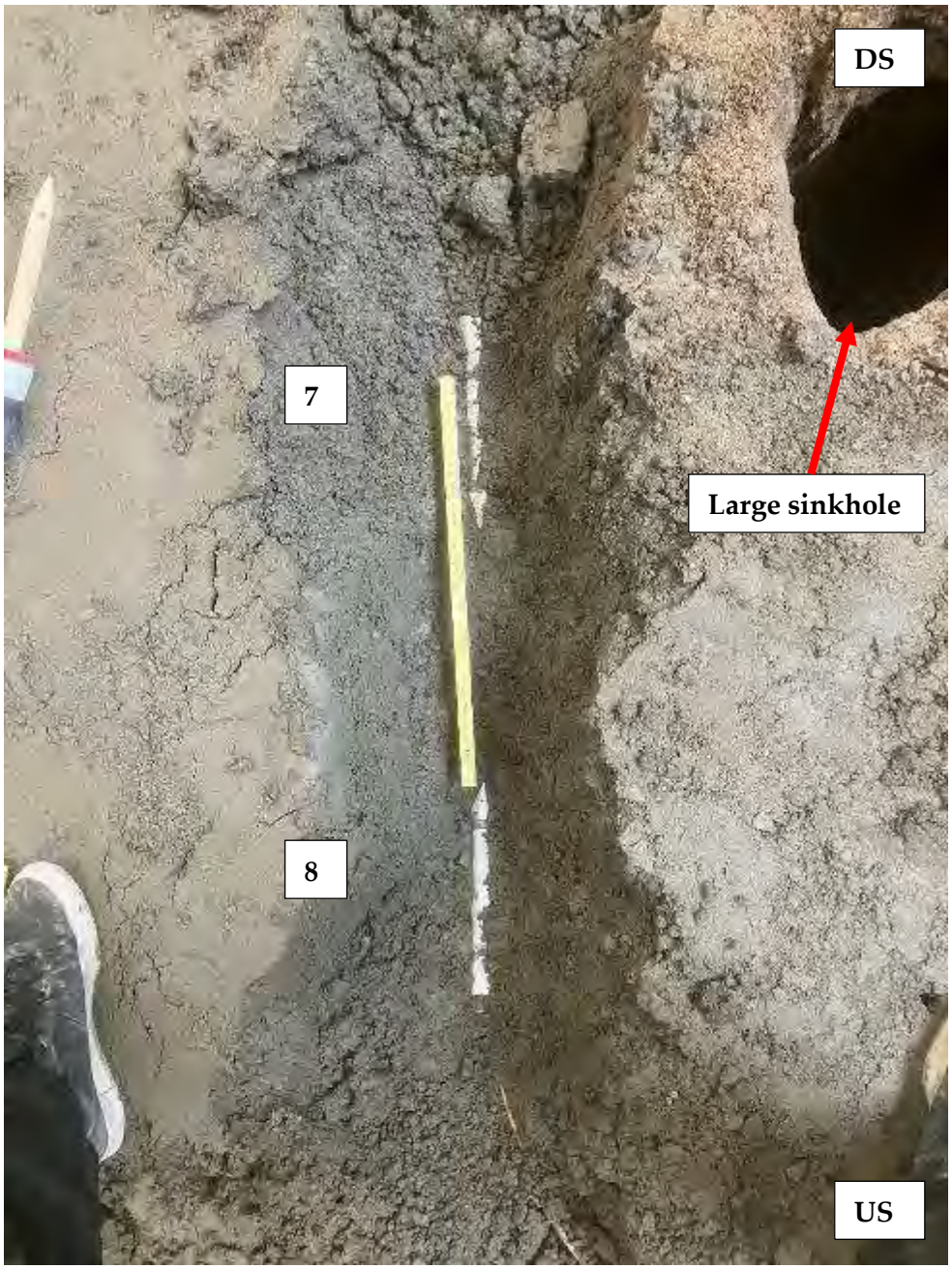


Figure 170. Pore pressure gauges 7 and 8 at level 113.9 and 113.5 cm respectively on the 27th of September 2024.

Pore pressure gauges 7 and 8 were perfectly embedded inside the core soil, Figure 170. The cables from the gauges also looked very well. Similar to the previous level of pore pressure gauges, the downstream pore pressure gauge was covered in a rusty moist fine soil material

Figure 171. Pore pressure gauges 7 and 8 at level 121.1 and 121.2 cm respectively on the 29th of October 2024.

Figure 172. Pore pressure gauges 9 and 10 at level 200.5 and 198.5 cm respectively on the 24th of September 2024.

Pore pressure gauges 9 and 10 and their connecting cables were very well embedded in the core soil. Both downstream and upstream pore pressure gauges were covered with a rusty, moist fine soil material. A close up of the rusty core soil is shown in Figure 173.

Figure 173. Close up of rusty core soil around the removed pore pressure gauge 10.

Figure 174. Pore pressure gauges 9 and 10 at level 211.1 and 209,6 cm respectively on the 5th of November 2019.

Figure 175. Pore pressure gauges 11 and 12 at level 304.1 and 303,6 cm respectively on the 18th of September 2024.

The uppermost pore pressure gauges, i.e., 11 and 12 and their respective cables were also perfectly embedded in the core soil. No rusty, moist soil material was found around these two pore pressure gauges.

Figure 176. Pore pressure gauges 11 and 12 at level 313.7 and 314.1 cm respectively on the 11th of November 2019.

10 Other observations

In this section follows a description of other findings inside the dam during dismantling work.

10.1 INHOMOGENUS CORE SOIL

The most distinct feature of the dam was the varying properties of the core soil due to its layered structure. During construction, al layer of moraine was laid out with a thickness of ca 30 cm. The core soil was thereafter compacted to a thickness of 20 cm. Then, another layer is added on top of the previous compacted layer of the core soil and compacted in a repeating process until the desired height is reached. This will create layers in the core soil. Before adding the next layer, the upper part of the previously compacted core soil is raked to enhance the connection between the two layers, see Figure 177 – Figure 179.

Figure 177. Raking the underlaying layer of core soil.

Figure 178. Adding the next layer of core soil, ca 30 cm thick.

Figure 179. Compaction of the overlaying layer from 30 cm thickness to 20 cm.

Compaction of the core soil could not be performed according to the recommendations since the core soil was too wet at time of construction. Optimum water content for the core soil was around 6 %. At time of construction, water content of the core soil was between 8 – 10 %, see Figure 217. Therefore, the compaction had to be aborted after half of the desired time since the core soil became softer the more compaction was done. The theory behind this was that water in the wet core soil began to rise while particles moved down, making the upper part of the soil very wet and soft. This procedure was quickly adapted during the construction so all layers in the dam were compacted with only about half the

amount of compaction energy used. The first two layers of core soil had to be removed and remade, see Figure 180.

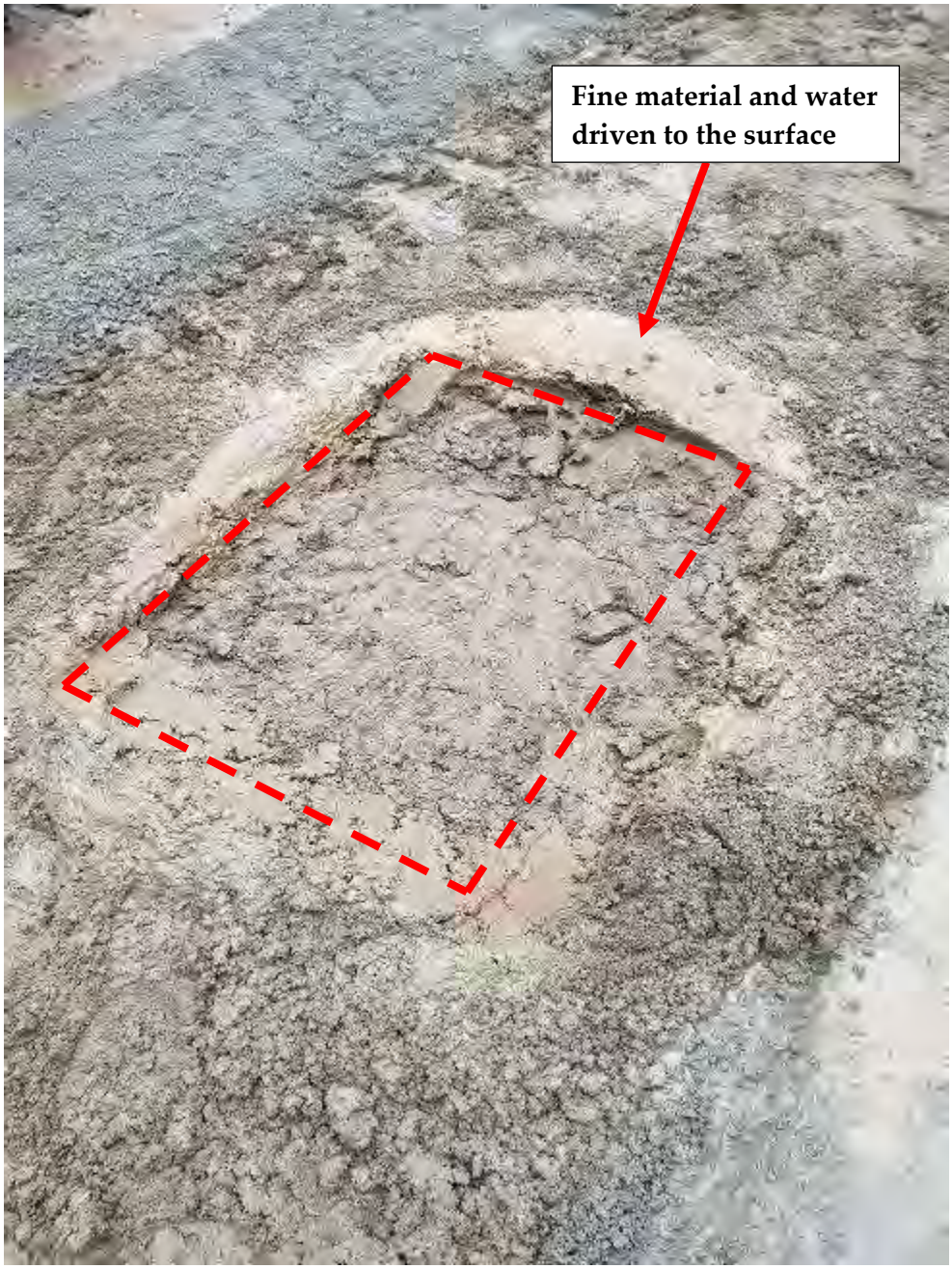


Figure 180. Imprint of compacter (inside the dashed red lines) after too much compaction energy had been applied. Photo taken on the 16th of October 2019.

After nearly 4.5 years of operation the layering structure of the core soil was very noticeable. Not only the boundary zone between each layer, but also each layer of core soil having different properties at the top of the layer compared to the bottom of the same layer, see Figure 181.

Figure 181. Core sampling of a full layer of core soil. The top of the layer was hard and brittle while the lower part of the same sample was soft and plastic.

Water content in the layer was normally 1 – 2 % units lower in the top of the layer compared to the bottom, e.g., 9 % in the top and 11 % in the bottom. Sieve analysis of the core layer samples showed no differences in particle size distribution in the top compared to the bottom.

During dismantling, this feature was shown in two ways. Firstly, when a new level was excavated during the dismantling, the properties of the core soil were very varying, see Figure 182 and Figure 183.

Figure 182. Imprint of density measurement equipment on level 140 cm. Core soil is very hard.

Figure 183. Imprint of density measurement equipment on level 140 cm. Core soil is very soft.

Figure 182 and Figure 183 is taken at the same level but the differences are very clear. The theory is that when the excavation is done, the new level after excavation is not perfectly horizontal. Instead, the new level may vary as visualized in Figure 184.

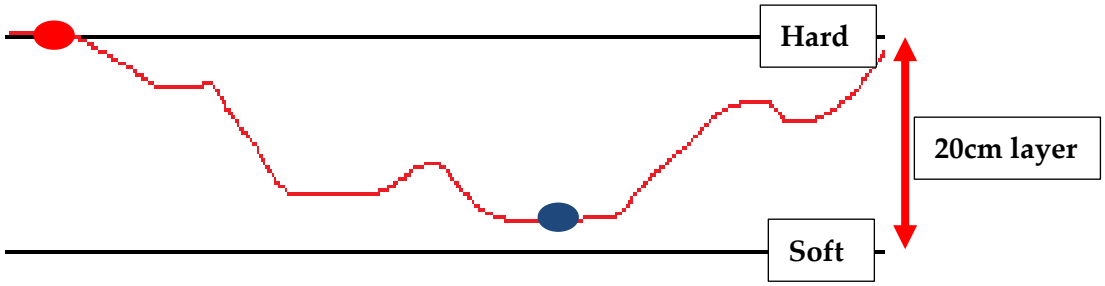


Figure 184. Excavation of a layer. Black lines are the top and bottom of a core soil layer. Red line is the level excavated with the 18 ton excavator.

If the core soil is observed at the red point in Figure 184 it will be very hard as seen in Figure 182. If the soil however is observed at the blue point in Figure 184 it will be very soft as seen in Figure 183. Hence, same level but varying properties of the core soil. The green dashed line in Figure 187 shows how this could look at the dam during excavation.

Secondly, when excavating the core soil, it was easy to remove the bottom layer of the overlaying soft core soil by hand. This would reveal the upper part of the underlaying hard core soil with its rake marks still intact, see Figure 185 – Figure 186.

Figure 185. Soft core soil from the bottom of an overlaying layer (bottom of photo). Ruler is placed on the harder soil from the upper part of the underlaying core soil layer. Raking marks still intact after 4.5 years.

Figure 186. Soft core soil from the bottom of an overlaying layer (top of photo). Harder soil from the upper part of the underlaying core soil layer (bottom of photo). Raking marks still intact after 4.5 years. Grouting hole 3 visible.

Core soil layers could also be observed when preparing for core sampling (described in section 3.2, Figure 9). Layers shown from downstream side of the core soil

Figure 187. Boundary zones between the core soil layers visible at level 180 – 220 on the 23rd of September. Boundary zones just above red dashed lines. Green line represent the location of the core crest after excavation with an 18 ton excavator.

10.2 BOUNDARY ZONE CORE SOIL AND FINE FILTER

The boundary zone between the core soil was investigated since it is regarded as a weak zone in an embankment dam.

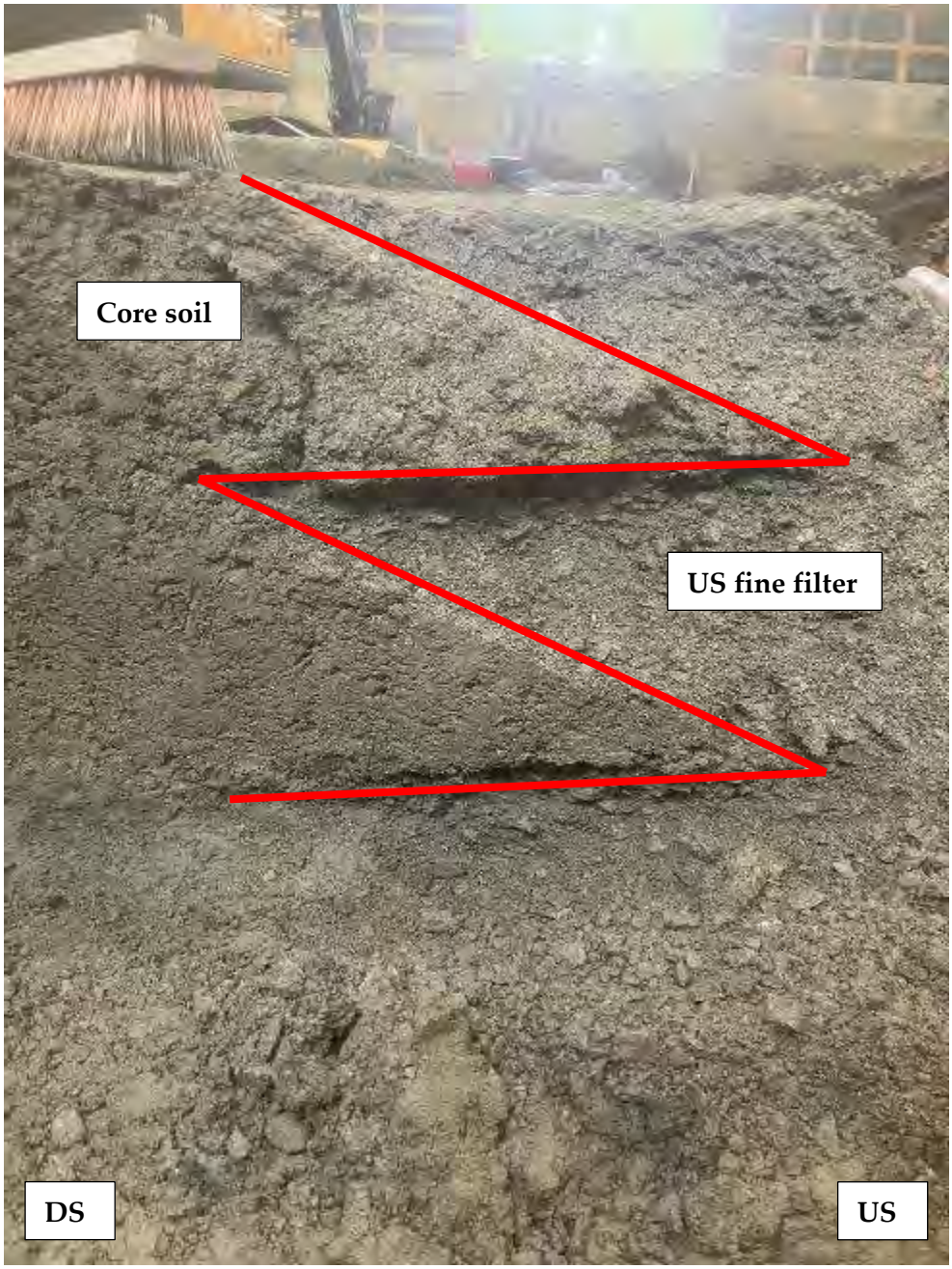


Figure 188. Distinct "Christmas tree pattern" between upstream fine filter and core soil at level 180 – 220 cm.

Figure 189. Core soil laid bare at the crest close to the right abutment. Downstream fine filer removed.

Figure 190. A gap (marked with red arrows) found between core soil and upstream fine filter at level 140, 3 m out from right abutment.

10.3 SANDY PATCHES

From level 140 cm and down, several sandy or gravelly "patches" were found inside the core soil. These patches seemed to have formed independently in the core soil, i.e., no clear connections with downstream fine filter were found. No sandy patches were found in the upper half of the dam. Examples of patches are shown in Figure 191 – Figure 194.

Figure 191. Sandy patch found at level 140 cm, 12.4 m from left abutment on the 25th of September 2024.

Figure 192. Close up of sandy patch shown in Figure 191.

Figure 193. Sandy patch found at level 110, 2.5 m from left abutment on the 27th of September 2024.

Figure 194. Sandy patch (or streak) found at level 70, 16 m from left abutment on the 2nd of October 2024.

10.4 ANOMALY OF CORE SOIL AT RIGHT ABUTMENT

On the 19th of September 2024 at level 260 – 280 cm an anomaly was fond in the downstream fine filter at the right abutment. Core soil had either replaced the fine filter or fines from the core soil hade been washed into the fine filter in such quantities the fine filter had transformed into a "core soil". The situation is shown in Figure 195 – Figure 197. This finding was extremely surprising.

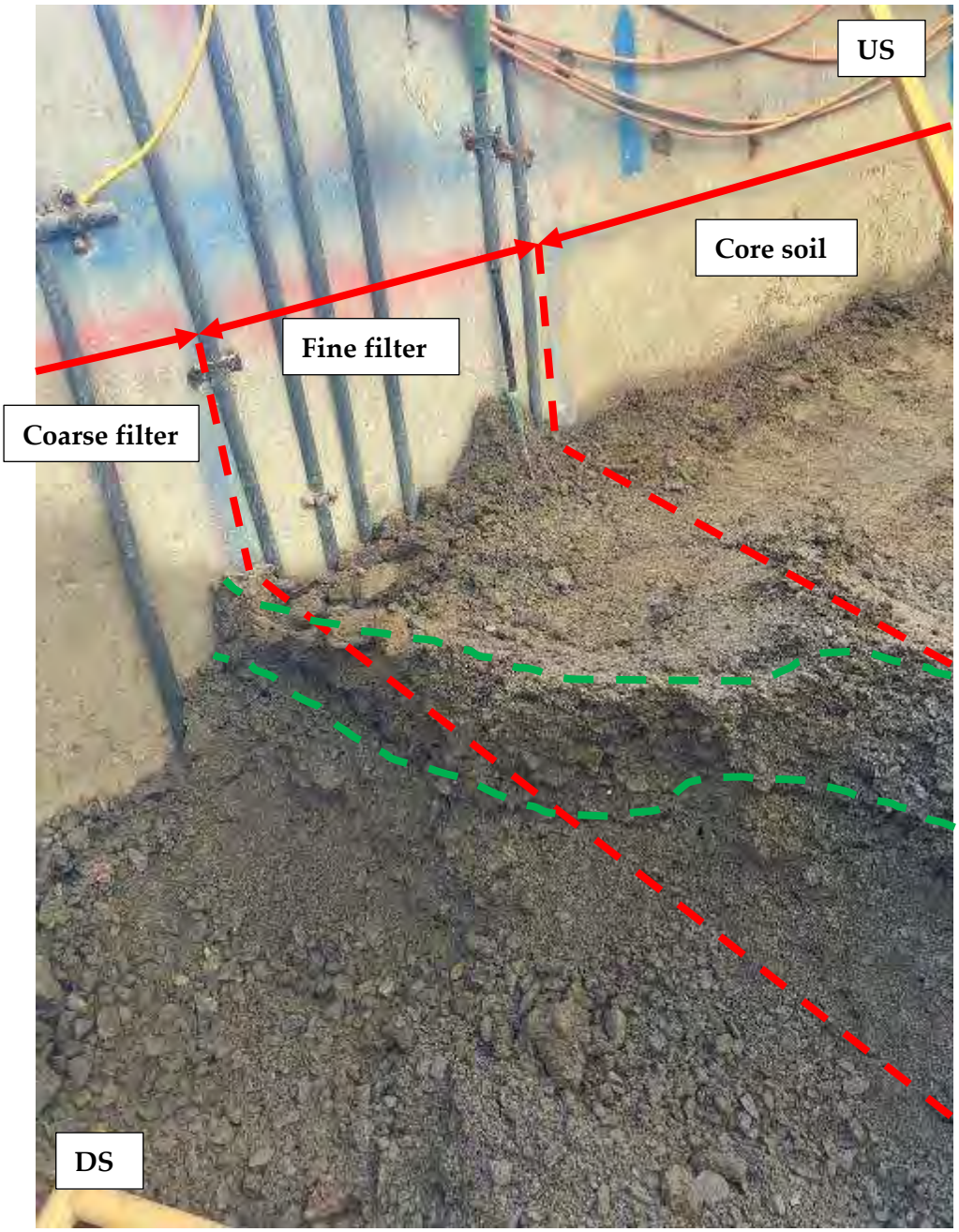


Figure 195. Level 260 – 280 cm on the 19th of September 2024. Original zones for core soil, fine- and coarse filter marked with red dashed lines. "New" core soil marked with green dashed line.

Figure 196. Close up of area shown in Figure 195. Core soil in the area where only fine filter should be present.

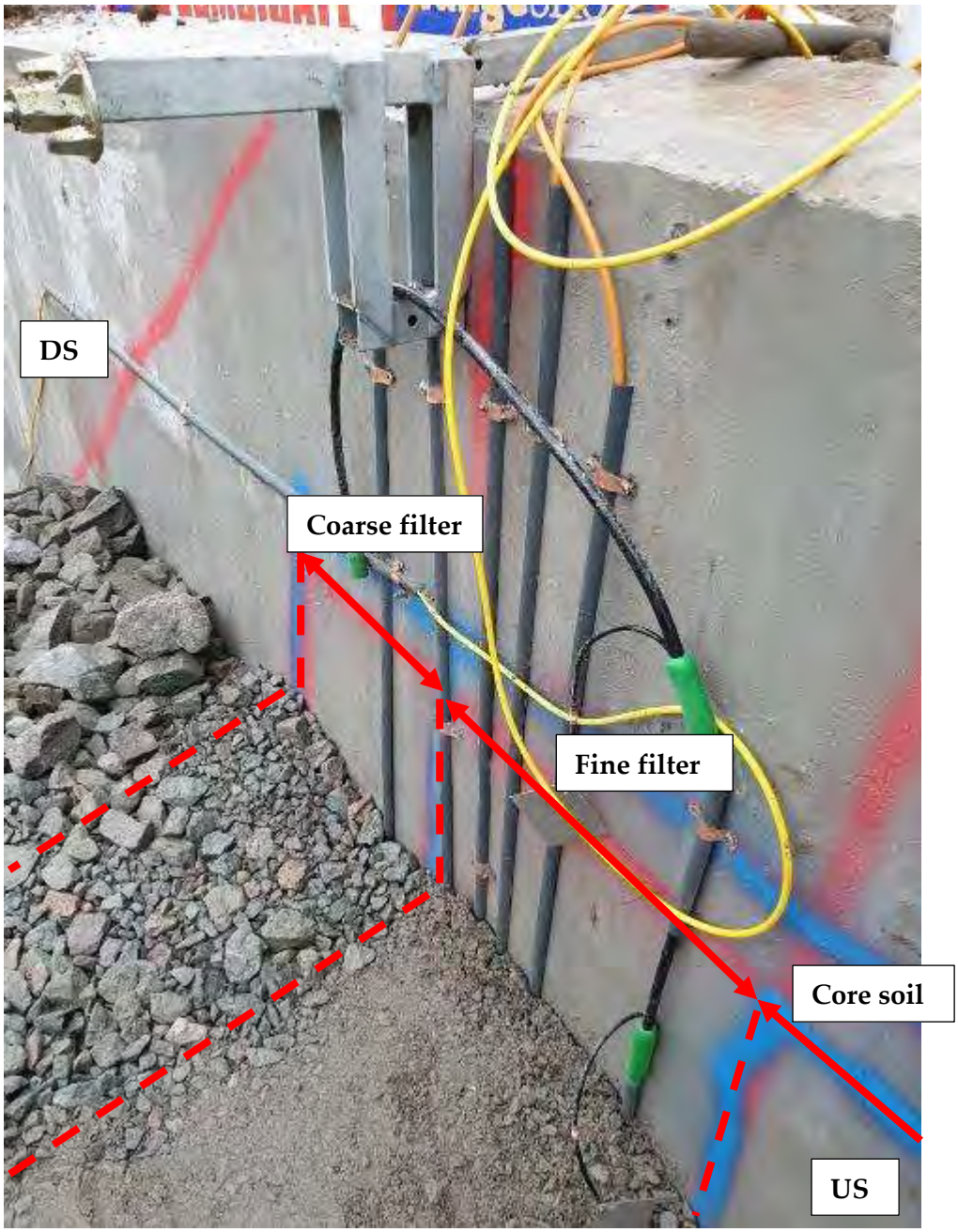


Figure 197. Photo from time of construction of the same area as shown in Figure 195 and Figure 196. Photo taken on the 11th of November 2019.

10.5 THE ABUTMENTS

The left abutment was after 4.5 years in excellent condition apart from the installed defect 1 at level 3 m. The right abutment was also in excellent condition apart from the internal erosion found at level 40 cm. Some photos from the excavation of the abutments is shown in Figure 198 – Figure 201.

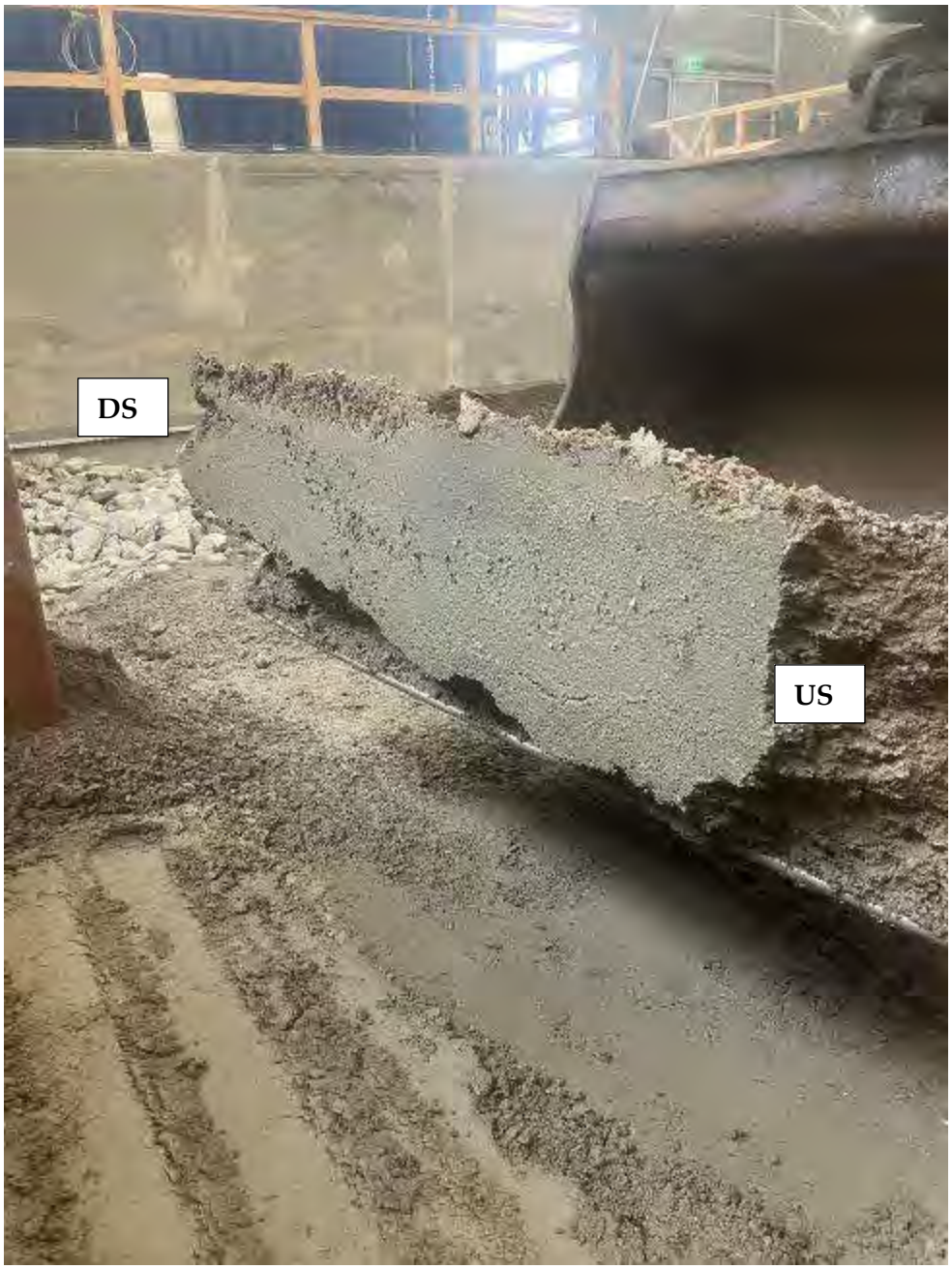


Figure 198. Core soil removed from left abutment at level 220 cm on the 23rd of September. The imprint of the concrete abutment can be seen in the soil.

Figure 199. Left abutment at level 20 cm on the 3rd of October 2024.

Figure 200. Core soil removed from right abutment at level 220 cm on the 23rd of September. The imprint of the concrete abutment can be seen in the soil.

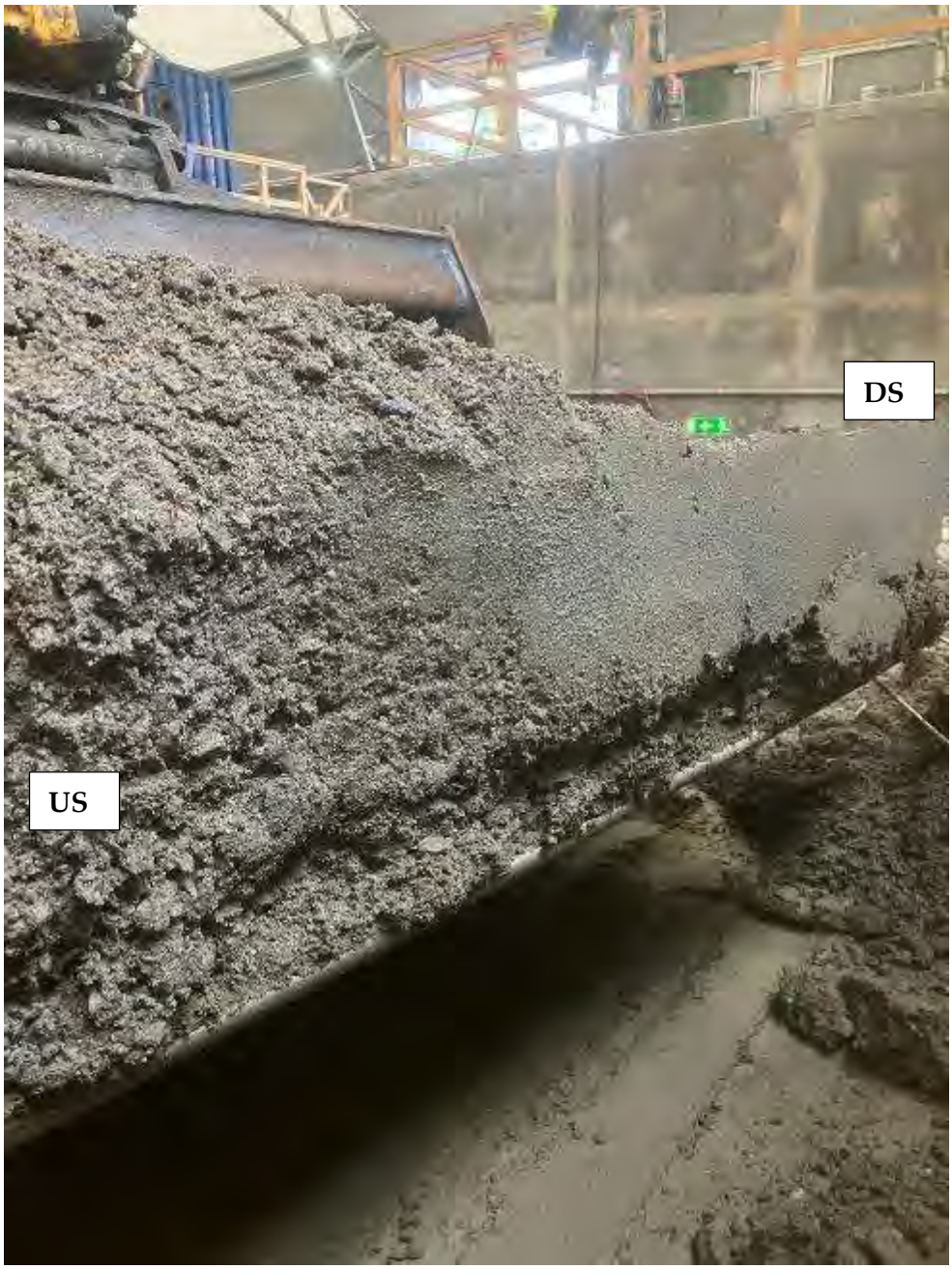


Figure 201. Core soil removed from right abutment at level 140 cm on the 25th of September. The imprint of the concrete abutment can be seen in the soil on the downstream side. On the upstream side imprint from fine filter material can be seen in the core soil.

During the removal of the dam materials from the abutments, it was possible to spot the phreatic surface through the dam during the steady state conditions of the reservoir. The phreatic surface hade been "imprinted" in the concrete, see Figure 202 and Figure 203. It was much easier to distinguish the phreatic surface on the left abutment than on the right abutment.

Figure 202. Phreatic surface through the dam at the left abutment. Red lines mark the zones of the dam and blue line is the phreatic surface.

Figure 203. Phreatic surface through the dam at the right abutment. Verified phreatic line marked with blue line, assumed phreatic surface marked with green dashed line. Red arrow mark the location of the anomaly described in section 10.4. Photo taken on the 18th of September 2025.

During CPT-measurements, approximately 10 cm out from the left and right abutment, water levels in the core soil could be measured, see Figure 15. For the left abutment, measurements on the up- and downstream side of the core soil corresponded very well with the imprints of phreatic surface. On the left abutment however, the water level on the downstream side of the core soil was zero. This is probably the reason behind the difficulties in reading the phreatic surface at the right abutment. The suspected phreatic surface exemplified with a green, dashed line in Figure 203 suggest a non saturated seepage flow.

10.6 TOP SHAPE OF A LAYER OF CORE SOIL

At three locations, the top of the core soil layer was laid bare and its shape was measured in an up- to downstream direction every 10 cm to survey its shape. The three locations are shown in Figure 204 – Figure 206.

Figure 204. Top of core soil layer 1.8 m from left abutment at level 40 cm prepared for measurement on the 1st of October 2024.

Figure 205. Top of core soil layer 8.1 m from left abutment at level 60 cm prepared for measurement on the 1st of October 2024.

Figure 206. Top of core soil layer 17.0 m from left abutment at level 60 cm prepared for measurement on the 1st of October 2024.

Results from the measurements are shown in Figure 207.

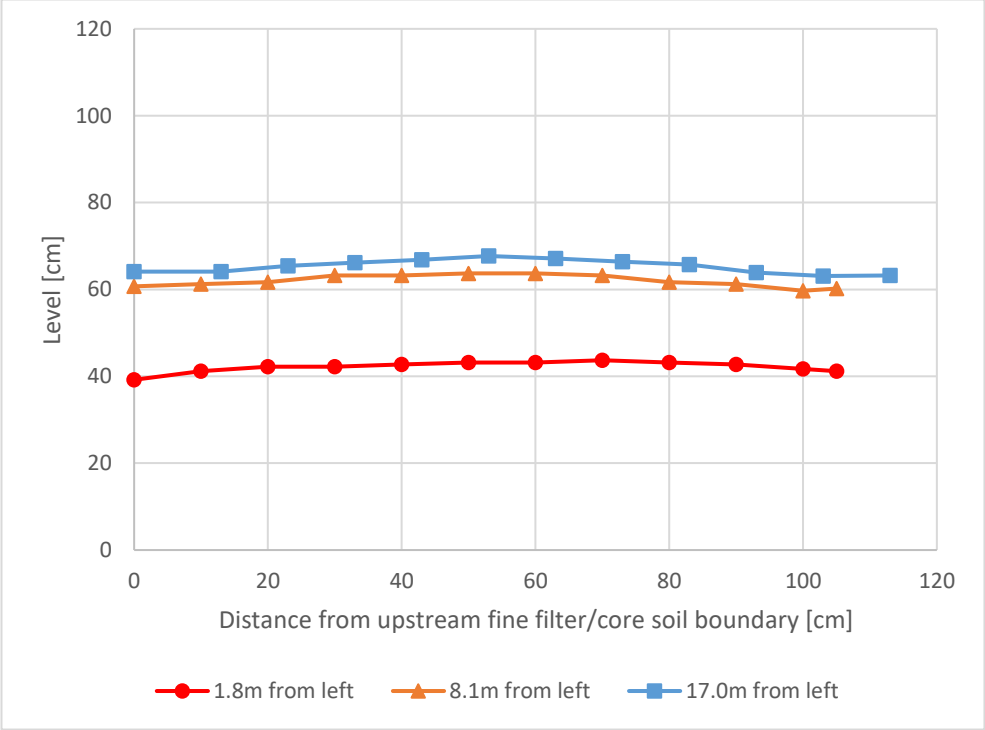


Figure 207. Measurements of the top surface of core soil layers on level 60 and 40 cm.

The measurements of the top of two layers show that the top of a core soil layer have a convex shape, i.e., highest level in the center and slightly lower at the boundary zone with the up- and downstream filters. This may be caused by the difficulties in compacting the outermost point of the core soil during construction. The slope of the core soil ("Christmas tree pattern" as seen in Figure 188.) is compacted indirectly when the fine filters are compacted. This may cause lower compaction of the core soil in the slopes, leading to greater settlements with time compared to the center of the core soil.

10.7 BOTTOM OF DOWNSTREAM COARSE FILTER

Fine material was found in the bottom of the downstream coarse filter. No such material was found neither on the bottom of downstream fine filter nor the filters on the upstream side. Photos of fine material found in the bottom of the downstream coarse filter is shown in Figure 208 and Figure 209.

Figure 208. Fine particles on level 0 cm in the downstream coarse filter at the center of the dam on the 2nd of October 2024.

Figure 209. Fine particles on level 0 cm in the downstream coarse filter at the left abutment of the dam on the 2nd of October 2024.

Coarse filter material from the two locations in Figure 208 and Figure 209 were extracted and sieved. Results from these sieve analysis and a comparison with the original particle size distribution of the coarse filter is shown in Figure 210.

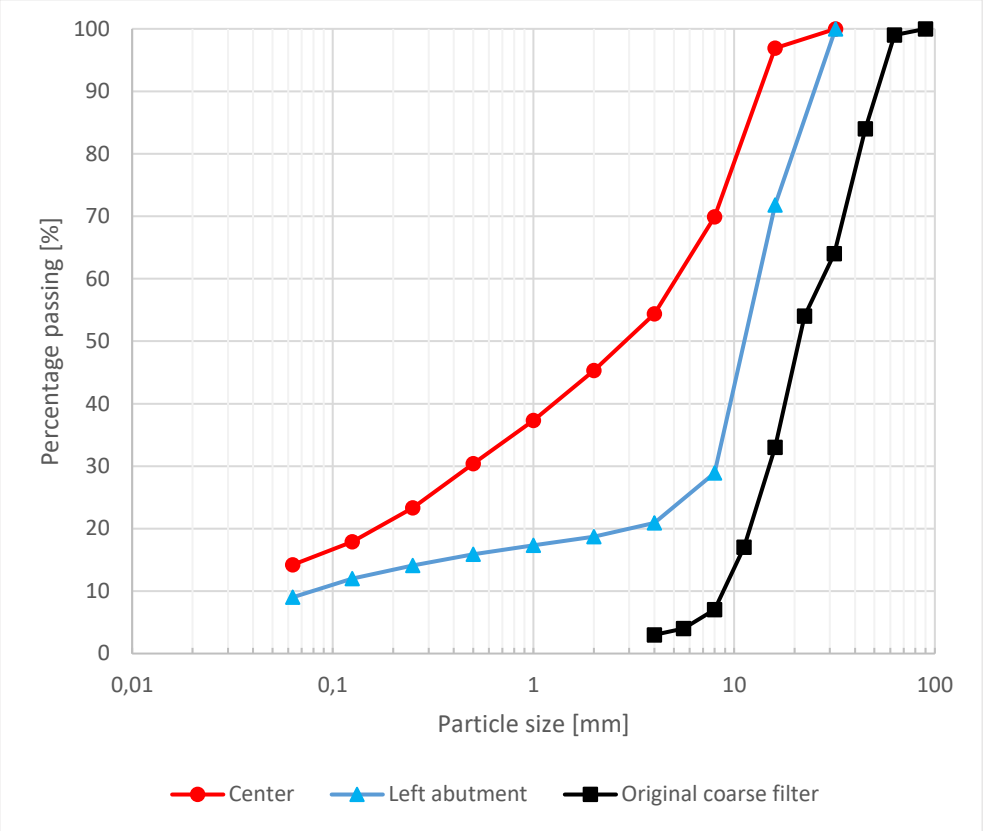


Figure 210. Particle size distribution of coarse filter from level 0 cm compared with the original coarse filter.

The brown color of the fines made it easy to distinguish that the fine material originated from the core soil. Fines from the filter had a grey color. The brown colored fines were only found in the downstream coarse filter, never under the downstream structural fill.

11 Sampling

11.1 GENERAL SIEVING

Sieving of downstream fine filter was performed on sampled extracted from both abutments and centrally in the dam at 8 different depths, i.e., 1.2, 1.6, 1.9, 2.3, 2.6, 3.0, 3.4 and 3.8 m. The amount of fine material (<0.063 mm) is shown in Table 3.

Table 3. Weight-% of fines from downstream fine filter at different depths, at both abutments and centrally in the dam. Results from the sieving compared with obtained results from moment of construction (23rd of October – 12th of November 2019).

	Weight-% of fines				% change over 4.5 years		
Depth [m]	Left	Centre	Right	As built	Left	Centre	Right
1.2	6.2	7.9	6.4	6.1	2	30	5
1.6	6.4	7.6	6.7	4.4	5	25	10
1.9	4.4	8.4	13.4	6.9	-28	38	120
2.3	7.4	7.4	7.3	7.4	21	21	20
2.6	6.9	8.6	5.7	5.7	13	41	-7
3.0	4.5	8.8	9.5	5.5	-26	44	56
3.4	6.6	7.4	7.9	6.5	8	21	30
3.8	8.1	8.3	9.6	7.2	33	36	57

Over 4.5 years of operation there has been an increase in fine content of the downstream fine filter in all but three measured points.

11.2 HYDRAULIC CONDUCTIVITY

Hydraulic conductivity was measured on undisturbed samples extracted from the core soil at four depths, i.e. 1.2, 2.1, 3.2 and 3.8 m. Samples were extracted both horizontally and vertically.

11.2.1 Vertical hydraulic conductivity

Table 4. Vertical hydraulic conductivity of core soil from different depths

Depth [m]	Hyd.Cond. [10^{-8}m/s]	Left abutment	Centre
1.2	3.3		X
1.2	0.8		X
1.2	1.9		X
1.2	4.6		X
1.2	3	X	
1.2	3.4	X	
1.2	5	X	
1.2	5.5	X	
2.1	0.1		X
2.1	0.1		X
2.1	1.2	X	
2.1	1.8	X	
3.2	0.8	X	
3.2	1.4	X	
3.2	1.7	X	
3.2	0.7	X	
3.8	0.5	X	
3.8	0.6	X	
3.8	0.9	X	
3.8	0.9	X	

11.2.2 Horizontal hydraulic conductivity

Table 5. Horizontal hydraulic conductivity of core soil from different depths.

Depth [m]	Hyd.Cond. [10^{-8}m/s]	Left abutment	Centre	Layer boundary	Centre of layer
1.2	113	X		X	
1.2	33	X		X	
1.2	14	X			X
1.2	12	X			X
1.2	26		X	X	
1.2	18		X	X	
1.2	8		X		X
1.2	0.7		X		X
2.1	1.6		X	X	
2.1	1.5		X	X	
2.1	0.2		X		X
2.1	1.8		X		X
3.2	3.4		X	X	
3.2	4		X	X	
3.2	1		X		X
3.2	0.5		X		X
3.8	0.5		X	X	
3.8	0.8		X	X	
3.8	0.3		X		X
3.8	1.4		X		X
3.8	0.5	X			X
3.8	5	X		X	

Note that in Table 5, "Layer boundary" refers to the interface where two different core soil layers meet, while "center of layer" refers to the middle of a core soil layer, approximately 10 cm from both the top and bottom boundaries..

11.2.3 Comparison vertical horizontal hydraulic conductivity

Hydraulic conductivity was not affected by whether samples were extracted from the abutment or the central part of the dam. Therefore, mean values for the hydraulic

conductivity of the core soil from the four different depths can be presented., see Table 6-

Table 6. Men values och hydraulic conductivity of the core soil from four different depths in the dam.

	Horizontal		Vertical
Depth [m]	Layer boundary [10^{-8}m/s]	Centre of layer [10^{-8}m/s]	[10^{-8}m/s]
1.2	47.5	8.7	3.4
2.1	1.6	1.0	0.8
3.2	3.7	0.8	1.2
3.8	2.1	0.7	0.7

Note that in Table 6, "Layer boundary" refers to the interface where two different core soil layers meet, while "center of layer" refers to the middle of a core soil layer, approximately 10 cm from both the top and bottom boundaries..

The hydraulic conductivity of the core soil is consistently higher at layer boundaries (horizontal direction) compared to both the vertical hydraulic conductivity and the horizontal conductivity through the center of the layer. These differences are more pronounced in the upper part of the core. In the lower half of the dam, vertical and horizontal hydraulic conductivities through the center of the core soil layer are similar. The differences in horizontal versus vertical hydraulic conductivity are presented below in Table 7.

Table 7. Results from horizontal hydraulic conductivity divided by vertical horizontal conductivity.

	Horizontal/vertical hydraulic conductivity	
Depth [m]	Layer boundary	Centre of layer
1.2	14.0	2.6
2.1	2.0	1.3
3.2	3.1	0.7
3.8	3.0	1.0

Note that in Table 7, "Layer boundary" refers to the interface where two different core soil layers meet, while "center of layer" refers to the middle of a core soil layer, approximately 10 cm from both the top and bottom boundaries..

11.3 DRY DENSITY AND WATER CONTENT

Density and water content were continuously measured throughout the dismantling. The continuous measurement of density and water content were undertaken at both abutments and in the centre of the dam at depths 1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0, 3.4 and 3.8 m from the crest. Only core soil was measured and for each measurement, both upstream- and downstream side of the core soil was measured separately.

11.3.1 Dry density

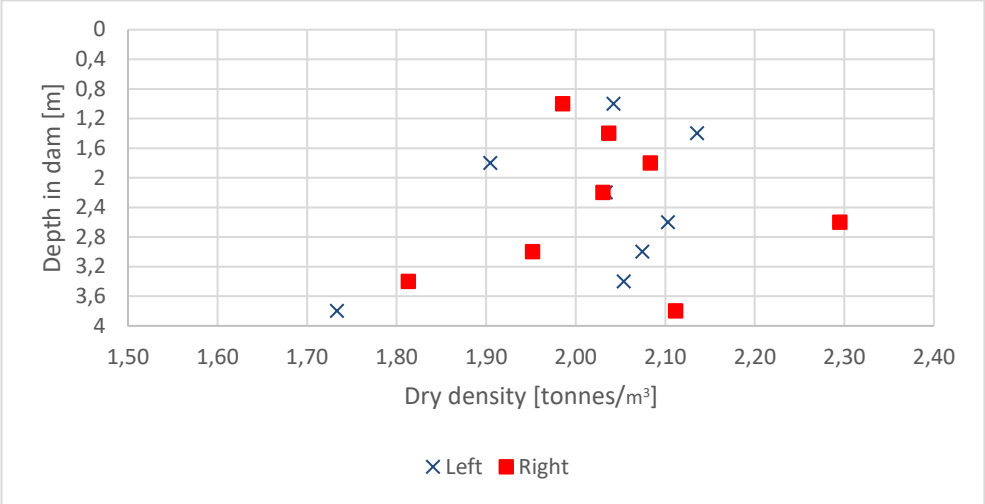


Figure 211. Dry density of the core soil on the UPSTREAM side of both abutments.

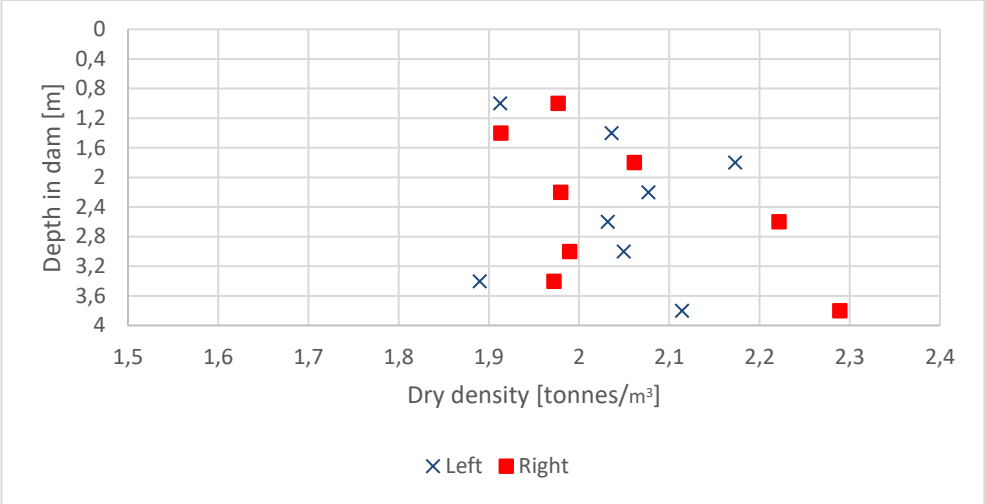


Figure 212. Dry density of the core soil on the DOWNSTREAM side of both abutments

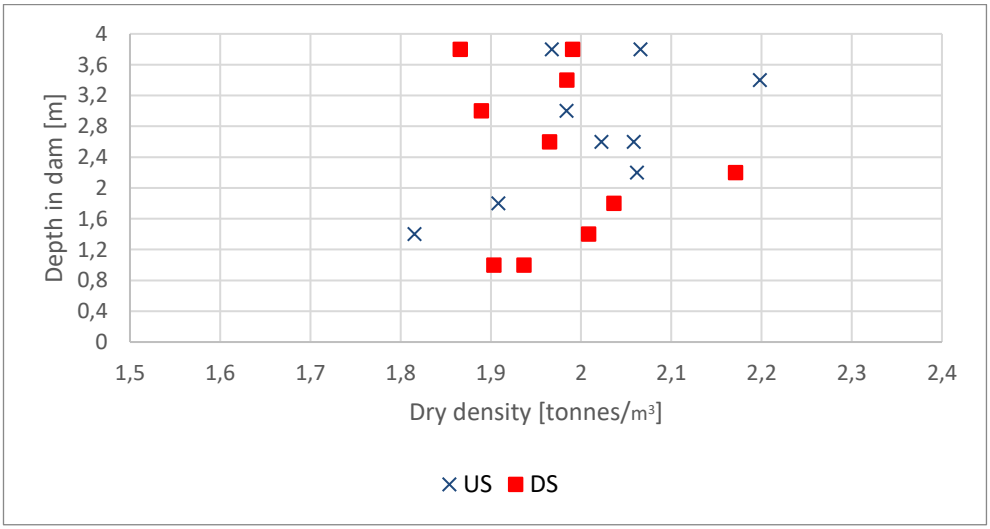


Figure 213. Dry density of the core soil in the CENTRE of the dam.

Results are very wide spread, indicating inhomogeneity of the core soil and issues with the preciseness of the excavation method as discussed in section 10.1.

11.3.2 Water content

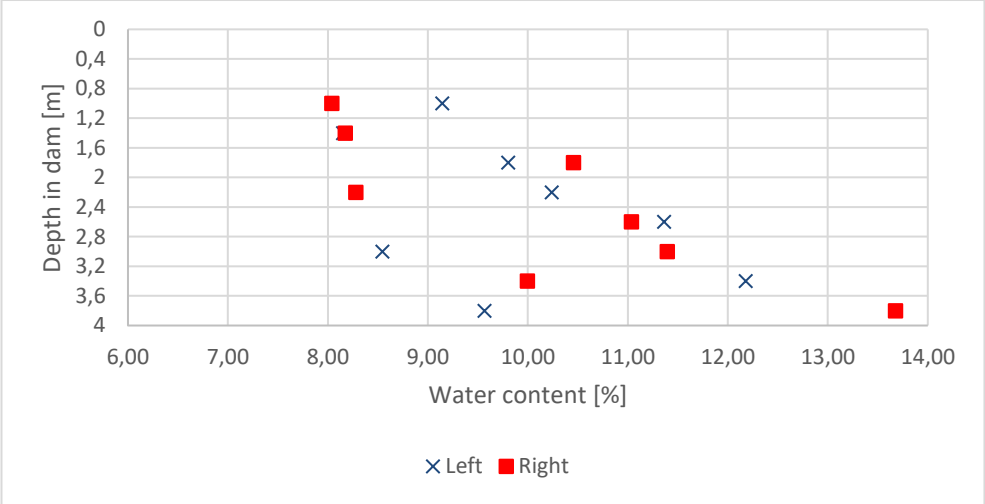


Figure 214. Water content of the core soil on the UPSTREAM side of both abutments.

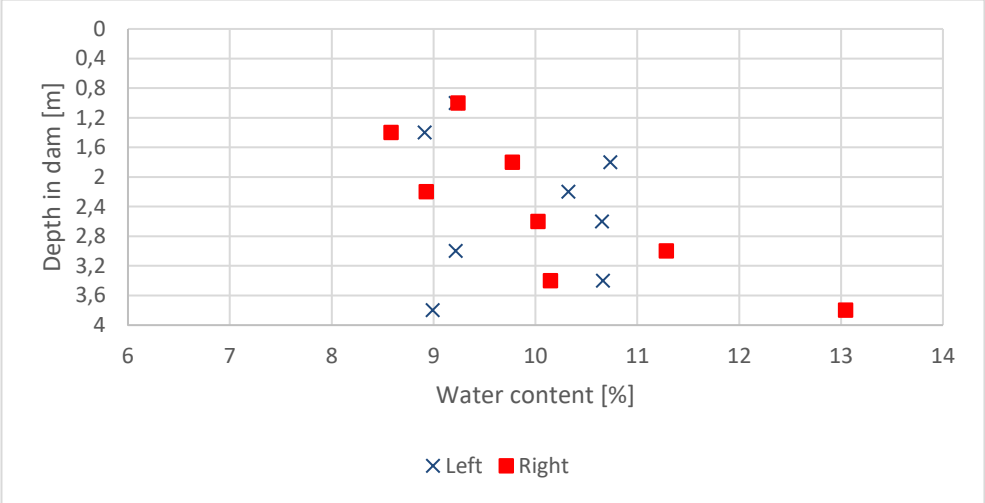


Figure 215. Water content of the core soil on the DOWNSTREAM side of both abutments.

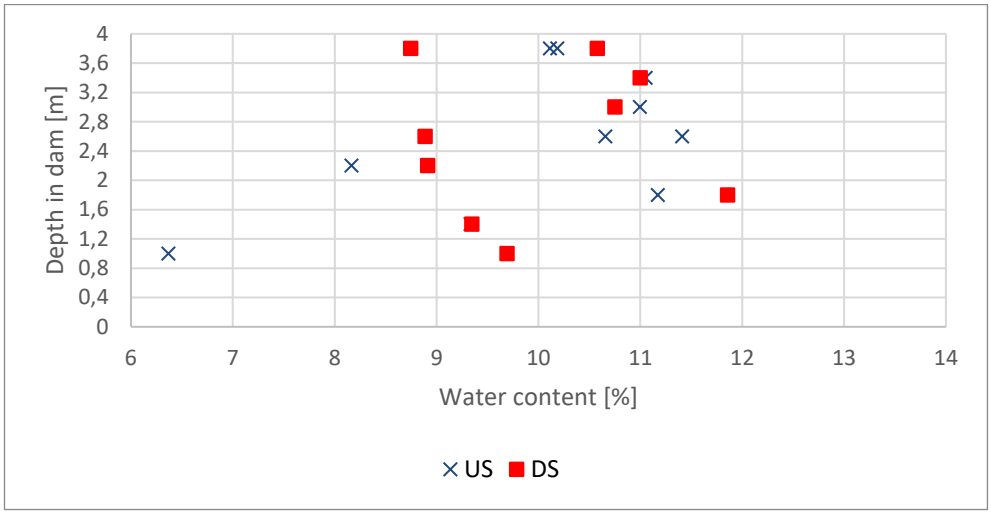


Figure 216. Water content of the core soil in the CENTRE of the dam.

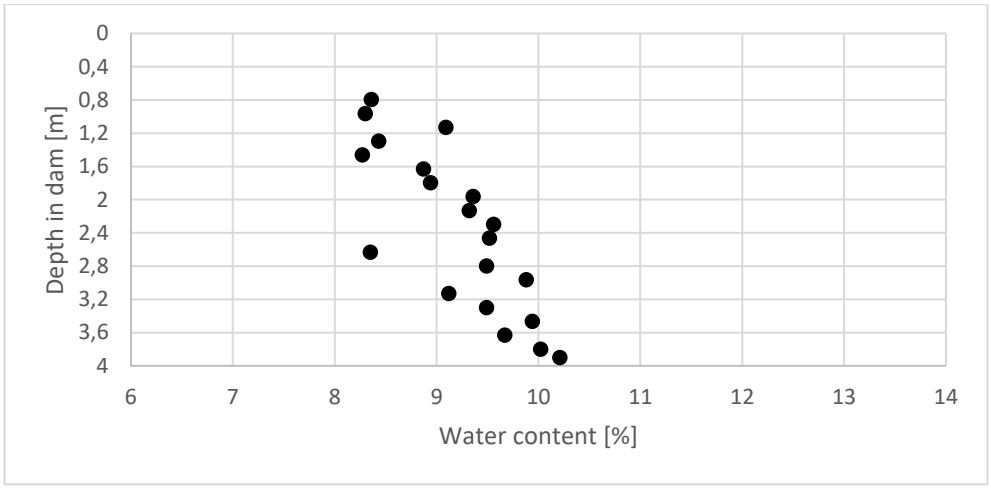


Figure 217. Water content of each layer of the core soil at the time of construction (23rd of October – 12th of November 2019).

Results are very wide spread, indicating inhomogeneity of the core soil and issues with the preciseness of the excavation method as discussed in section 10.1.

12 Conclusive remarks for future dismantling projects

The dismantling of an older embankment dam can be considered the ultimate method for evaluating its long-term performance. However, it does not provide information on when anomalies formed, only that they exist and where they are located. The causes of anomaly formation are often subject to debate, as they rarely result from a single factor but rather from a sequence of contributing events. In the case of the Älvkarleby dam, no formal analysis has yet been conducted to determine the reasons behind the observed anomalies. To support such an investigation, a fault tree analysis is recommended. This method enables a more holistic approach and avoids prematurely excluding potential causes.

Dismantling an embankment dam generally requires more time than demolishing it, and is therefore more expensive. However, the dismantling methodology used in this report, removing the dam in 40 cm increments across its full length, is not expected to significantly increase the total dismantling time if thicker increments are used. The most time-consuming aspect is manual excavation at locations where anomalies are discovered. For larger dams, dismantling can likely continue in other areas while such anomalies are being investigated. Additionally, having access to the dam's operational history can be valuable. Has the dam experienced specific issues during its lifetime? Were higher seepage rates observed at certain locations? Were there problems encountered during construction? This type of information can help identify areas, pre-determined for extra attention during dismantling.

Dismantling requires continuous monitoring of the excavated soil material. This responsibility should not fall to the excavator operator but instead to a designated individual with the expertise to identify potential anomalies. Experience from the Älvkarleby dam shows that this task is highly demanding. Maintaining constant focus is essential to avoid missing any signs of anomalies. This was particularly exhausting in the lower half of the dam, where anomalies, both large and small, appeared in many locations without any obvious cause. The approach taken at the Älvkarleby dam was that "no anomaly is to be missed." However, this level of scrutiny is unlikely to be feasible for larger dams. A more pragmatic approach is therefore recommended. While it is inevitable that some anomalies will go undetected, each identified anomaly presents an opportunity to learn and improve understanding. The goal should be to maximize learning rather than to achieve complete detection.

It should be noted that the results from the dismantling of the Älvkarleby embankment dam are not directly transferable to other embankment dams. Each embankment dam is unique in terms of design, soil materials used, construction methods, operational history, and other site-specific factors.

13 Conclusions

- Prior to dismantling, CPT and water level measurements in the core soil were conducted while the reservoir was full. The results revealed a highly inhomogeneous core soil with respect to soil stiffness and a higher water level in the core soil than in the reservoir. Following these measurements, the reservoir was drained. The dam was then left for three weeks before excavation commenced.
- The installed defects that permitted increased seepage through the core soil exhibited minor changes in particle size distribution, and the fine filter downstream of these defects had been washed out. The isolated defects showed no changes. Significant internal erosion was observed at the bottom of the vertical defect. Three pipes had formed there, one of which traversed the core soil entirely. These pipes, developed at the boundary between two layers of core soi. They were not empty, but filled with sandy, gravelly eroded moraine.
- A large "sinkhole" was discovered, with an estimated volume of approximately 300 liters. It was not empty, but filled with sandy, gravelly material similar to that found beneath the vertical defect. Beneath the "sinkhole", a very wet and soft zone was identified. The likely cause of this formation was the installation of four pre-tensioned strain cables passing through the core soil in an upstream–downstream direction. Several other sandy, gravelly zones were observed in the lower third of the dam. Some of these zones were connected to the downstream filter, while others appeared to have formed independently. In several places, signs of initiated internal erosion were found between the core soil layers, indicating structural weakness in this part of the core soil.
- The grout material injected in November 2022 performed effectively in the holes where low grouting pressures were applied. In contrast, in the holes where excessive grouting pressures were used, intended to fracture the core soil, the core soil was indeed fractured. The orientation of these fractures was consistently upstream, extending into the boundaries between core soil layers. The mechanical properties of the core soil and the grout material were very similar. The grouted holes with low pressures functioned almost exactly as intended, and the core soil surrounding the original hole was firm. However, around the holes where fractures occurred, the upper sections remained un-grouted, resulting in softened core soil in those areas.
- The installed pore pressure gauges in one section of the dam enabled settlement measurements at various depths. Overall, the core soil exhibited settlements of up to 3.5 %, while in the bottom 25 cm, relative settlements reached up to 15 %.
- Undisturbed core soil samples from various levels of the dam, extracted both vertically and horizontally, were tested for hydraulic conductivity. Horizontal samples were taken from the center of a core soil layer as well as

into the boundary zone where two layers meet. In the upper section of the dam, horizontal hydraulic conductivity in the boundary zone was nearly 14 times higher than the vertical hydraulic conductivity. At the bottom section of the dam, the horizontal hydraulic conductivity was 2 to 4 times higher then the vertical. Horizontal hydraulic conductivity through the center of the core soil layer was approximately 3 times higher in the top section of the dam, but similar to vertical hydraulic conductivity in the lower half of the dam.

- Sieving of the downstream fine filter revealed a significant enrichment of fines, with some locations showing more than a twofold increase. Water content and density measurements of the core soil produced highly variable results due to the inhomogeneity of the core soil. Each independent core soil layer was found to be hard and brittle at the top, but soft and wet at the bottom.
- Overall, the dam exhibited significantly more damage than expected for an embankment dam built only five years ago and operated for 4.5 years under maximum gradients of 3. Four primary factors are suspected to be the main drivers behind the anomalies observed in the dam:

    1. Inadequate compaction during construction.
    2. Inherent weaknesses in the core soil, particularly at layer boundaries.
    3. Use of fine filter material that did not conform to the design specifications.
    4. Coarse filter separated during construction.

14 Referenser

Johansson, S., & Nilsson, Å., 2005. *Internal Erosion Detection at the Røsvatn Test Site – Experiences from blind test using Resistivity, Self-Potential, Temperature, and Visual inspection*. Part A – Assessment report. Elforsk rapport 05:42, Stockholm.

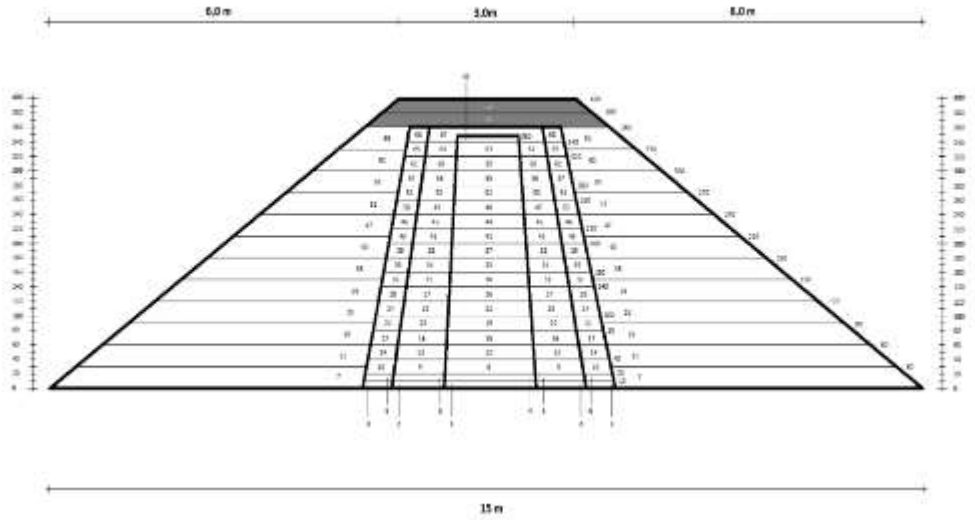
Lagerlund, J., Viklander, P., Laue, J. and Toromanovic, J. (2023). *Methodology for remediation grouting in embankment dams – grouting with a new type of non hardening grout*. 91st ICOLD annual meeting 2023, Gothenburg, 1788 – 1797

Lagerlund, J. (2024). *Grout Development and Methods for Remedial Grouting of Embankment Dams*. Doctoral thesis. Luleå University of Technology. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering.

Appendix A: Dismantlig diary

This appendix contains the daily notations made during the dismantling of the Älvkarleby embankment dam between September 16 and October 2. All conclusions in the diary entries should be interpreted with caution, as they were made on-site during the dismantling process. The language of the diary is Swedish, and this section of the report has not been edited since it was originally written.

14.1 16TH OF SEPTEMBER 2024



Figur 1. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

På morgonen observerades att vattennivån på US sida ökat med ca en meter medan den var ”torr” på NS sida. Detta tros bero på att vatten som var kvar i tätjord efter tömning av reservoaren för ca 3 v sedan dränerats. Då US sida av tätjord hållit majoriteten av vattnet har troligtvis vattnet dränerats ut på just US sida.

Under förmiddagen gjordes allmänna förberedelser inför rivning som att ha säkerhetsgenomgång med entreprenörer, rensa yta utanför tältet för upplag av massor, förbereda all provtagning och öppna infart mot dammtån, se Figur 2.

Figur 2. Öppning av infart mot NS dammtå.

Grävmaskinen kördes ut på krön efter lunch efter det att håligheteter efter borrning fyllts igen. Grävmaskinen körde ut på höger sida och jobbade sig därefter ner i de övre 50 cm av dammen från vänster till höger, se Figur 3. Material läggs på NS slänt så att vi, så fort det går, kan placera grävare på NS stödfyllning så att den inte behöver gränsla tätjord.

Figur 3. Maskin ute på krön. På den högra bilden syns seismikkablar i finfiltermaterialet som omger tätjordens överkant.

Ingen provtagning hanns med under denna första dag men de tre seismikkablar som placerats på krönet kunde återvinnas, se Figur 4. Värt att notera är att den seismikkabel som installerats centralt på tätjord låg lägre än de kablar som legat på US och NS finfiltermaterial, se ursprunglig placering av kablar i Figur 5. Detta indikerar sättning av tätjord, vilket även observerades vid friläggning av anslutningar vid borrningen i augusti.

Figur 4. Upptagna seismikkablar. Kan återanvändas.

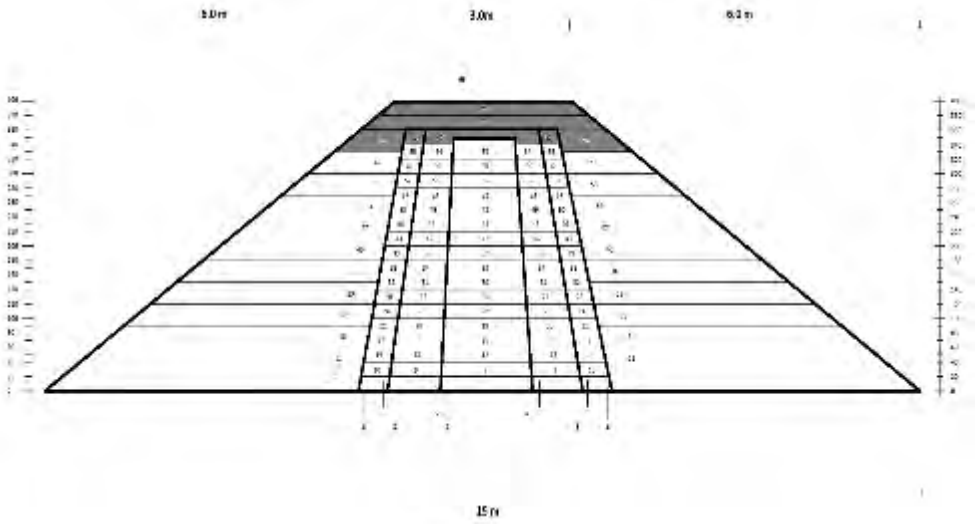
Figur 5. Ursprunglig placering av seismikkablar(röda), resistivitetskablar (gröna) och temperaturkabel (gul). I bakgrunden syns mäktigheten på det finfiltermaterial som lades ovanpå kablarna.

Vid dagens slut hade vi kommit till ca 10 cm ovanför tätjordens förväntade överkant, se Figur 6. Den gula temperaturkabeln kommer under morgondagen att visa oss hur djupt vi kan gräva innan vi når tätjorden då den ligger på tätjordens överyta och har en god kontrast som grävmaskinisten ”enkelt” kan följa.

Dammen ser fortfarande ut som kriget och vi är alltjämt över högsta vattenyta. När vi väl når tätjorden kommer de olika zonerna, tätjord, finfilter, grovfilter och stödfyllning förhoppningsvis att utkristalliseras.

Figur 6. Slut för dagen. Djup ca 60 – 70 cm under betonglådans överkant.

14.2 17TH OF SEPTEMBER 2024

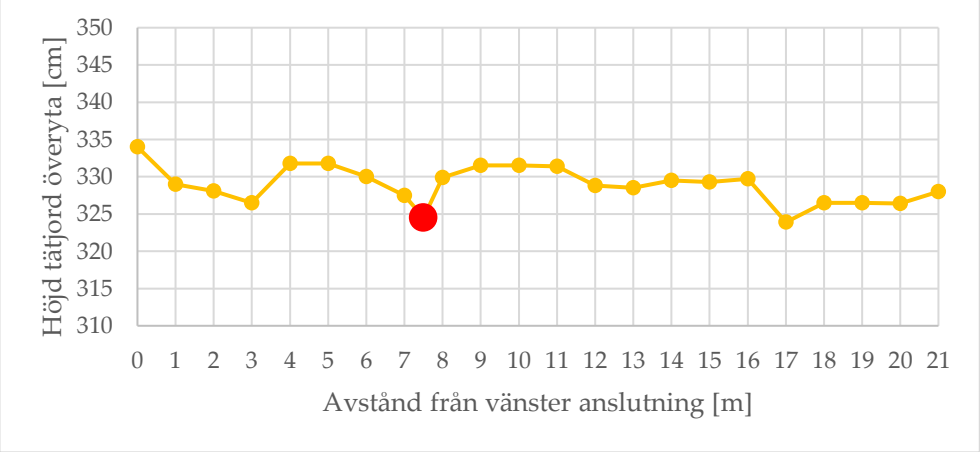


Figur 7. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Idag frilades hela tätjorden. Grävning skedde med maskin ner till ca 5 – 10 cm över tätjorden. Resten av finfiltermaterialet som låg ovanpå tätjorden skrapades därefter bort manuellt med skyfflar och piassavakvast. Då tätjorden byggdes och avvägdes i toppen i november 2019 så låg precisionen i höjd inom mm längs hela dammlängden (21 m). Nu har, milt sagt, en hel del hänt.

Jag kommer i följande resultatpresentation inte att ge mig in på att teoretisera varför det ser ut som det gör av den enkla anledningen att jag behöver fundera och diskutera resultaten vidare. Era förslag tas tacksamt emot.

Överytan av den frilagda tätjorden skannas med två LIDAR i taket men vi gjorde även en enklare avvägning av den med avvägningsutrustning. Resultat från LIDAR kommer i slutrapport men resultat från avvägning ser ni i Figur 8.



Figur 8. Avvägning av damm. Vänster anslutning = 0 m och höger anslutning = 21 m. Röd punkt är nivån vid den vertikala skadan där erosion skett (diskuteras lite senare i detta dokument).

Tätjordens överyta som ursprungligen, innan dammen togs i drift, låg inom mm har nu satt sig så att variationerna ligger inom 10 cm. Översiktsbild före och efter 5 års drift i Figur 2.

Figur 9. T.v. Tätjordens överyta vid bygget. T.h. Tätjordens överyta vid rivning. Bild tagen från höger anslutning mot vänster.

Då dammen byggdes installerades sammanlagt sex stycken skador i dammen. En av dessa var en vertikal zon som placerades ca 7 m in från vänster anslutning, diameter ca 25 cm, höjd från 1 m hela vägen upp till toppen av tätjord. Vid överytan på denna skada upptäcktes tydliga tecken på inre erosion, se Figur 10.

Figur 10. Erosion kring vertikal skada. Skadan efter 5 år markerad med röd cirkel till vänster. Närbild på skada innan damm togs i drift till höger. Fötter på bilden till höger står på US sida om tätjorden. Fyrkanter på bild är metallplattorna från resistivitetsmätningarna.

När tätjordens överyta vägdes av 2019 så lades ett sista lager (ca 5 cm mäktighet) med tätjord på för att jämna av överytan. Det fanns tydliga indikationer på att detta översta lager inte hade ”gått ihop” med underliggande lager tätjord utan lagren uppträdde som två isolerade skikt, se Figur 11. Värt att notera att ingen upprivning av underliggande skikt utfördes i detta sista avjämningssteg.

Figur 11. T.v. avjämning av tätjordens överyta. T.h. skikten hade ej gått ihop (skiktning synlig till höger om den blåa pennan.

En oförklarlig hävning av NS sida av tätjorden (eller sättning av US sida) observerades och gick rakt igenom hela dammens längd. Den var tydlig men inte så stor, se Figur 12. Vidare upptäcktes en insjunkning ca en meter in från höger anslutning på NS sida av tätjorden, se Figur 13.

Packningsgrad mättes vid båda anslutningar samt mitt i dammen på tätjordens överyta. Preliminära resultat indikeras en bulkdensitet på ca 2,25 t/m^3, vilket är i paritet med uppmätt densitet kring byggtiden för fem år sedan. Vattenkvoten mäts i detta nu så i morgon har vi en torrdensitet. Värt att notera är att vi fortfarande rör oss i den lilla delen av tätjorden som aldrig varit under vattenytan då DG låg på ca 320 cm. Enligt Figur 8 befinner vi oss för närvarande mellan 325 – 335 cm.

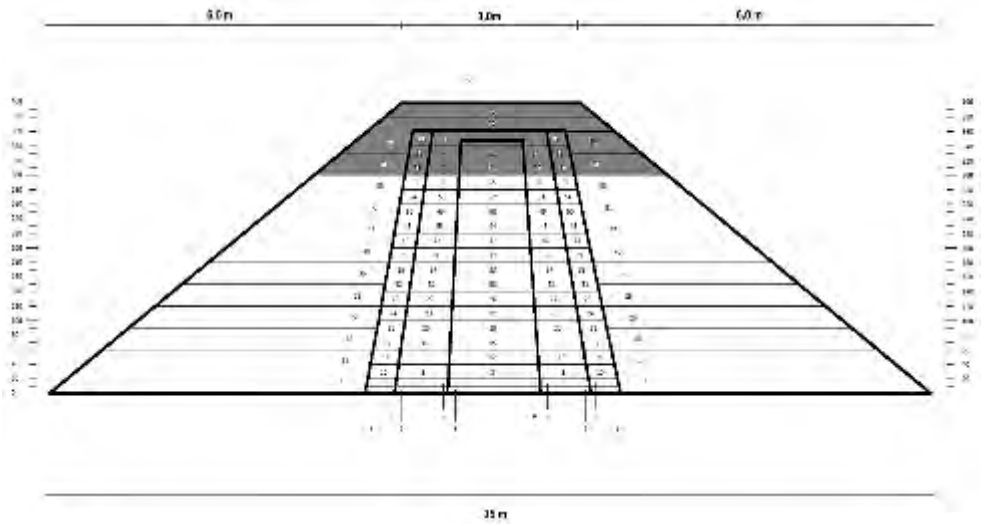
Figur 12. Hävning av NS sida av tätjorden (eller sättning av US sida). Hålen som syns i tätjordens överyta är injekteringshål. Bild tagen från höger anslutning mot vänster.

Figur 13, Insjunkning på NS sida av tätjorden. Överst i bilden finns den högra anslutningen, täckt i sand från åsen. Detta för att fylla igen det hål som grävts ur vid anslutning inför sondering av anslutningen. Sanden har alltså inte varit i dammen mer än ett dygn.

I morgon kommer vi att stöta på en genomgående skada som installerades vid vänster anslutning på ca 300 cm höjd, vi fortsätter följa erosionen kring den vertikala skadan och även kika de två överst placerade portrycksgivarna. Även de på 300 cm höjd. Med lite tur hinner vi ner även till nivå 260 cm för uttag av provkroppar till triax och hydraulisk konduktivitet. Provkroppar kommer att tas både vertikalt och horisontellt (helst igenom ”skiktningen” av tätjord, där två pallar möts). Packningsgrad mäter vi vid varje ny nivå.

Väl mött då.

14.3 18TH OF SEPTEMBER 2024



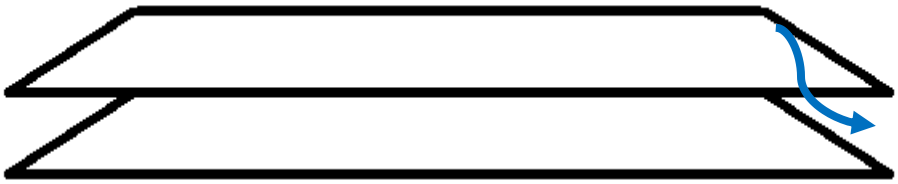
Figur 14. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Innan vi satte i gång med grävmaskinen så undersöktes toppen av erosionsskadan, orsakad av den vertikala inbyggda skadan. Vi hittade både det ena och det andra, se Figur 15.

Figur 15. Skada som utvecklats kring den vertikala skadan. Notera att den vertikala skadan är utplockad på sitt 4/64mm material ner till ca 20 cm. Bilden är tagen så att NS sida av tätjord är nedåt i bilderna och US sida uppåt.

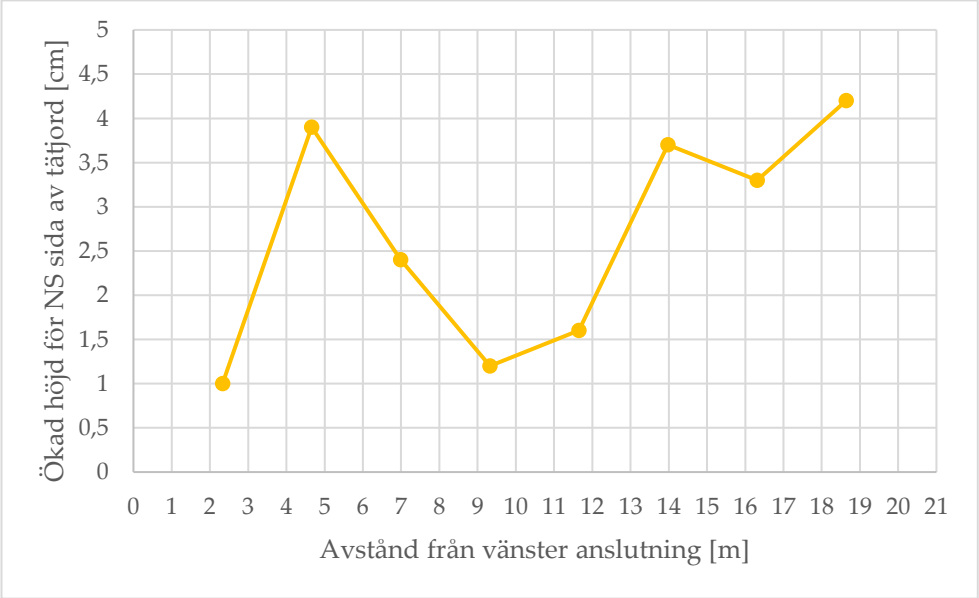
Skadan har troligen uppstått i början av dammens livstid då överströmning skedde under någon veckas tid. Nedströms skadan hade inre erosion skett där vattnet brutit

igenom tätjorden och tagit sig ned genom underliggande finfilter vid tån av ”julgranen”, se Figur 16.



Figur 16. Pipingens väg genom tätjorden markerad med blå pil. Två pallar av tätjord visas.

Den förhöjning vi upptäckte igår på NS sida av tätjordens överyta mättes idag. Resultat visas i Figur 17.



Figur 17. Skillnad i höjd på tätjordens överyta mellan centrallinjen och uppe på förhöjningen på NS sida.

Skillnaden längs hela dammlinjen låg mellan 1-4 cm. Fortfarande, om NS sida av tätjorden tryckts uppåt eller övriga tätjorden satt sig mer än förhöjningen kan inte klargöras men NS sida ÄR högre på samtliga punkter vilket är ett, för mig, oväntat resultat.

Stödfyllning, grovfilter on finfilter schaktades därefter ned med ca 30 cm så att ny nivå blev ca 300 cm höjd. Tätjordens höjd behölls så att tätjordspallarna kunde inspekteras. Dessa syntes mycket tydligt när finfiltermaterial försiktigt togs bort på ömse sidor om tätjorden, se Figur 18.

Figur 18. De två översta pallarna av tätjorden på NS sida av höger anslutning. ”Julgransmönstret” syntes tydligt. Blått streck markerar hur nära anslutningen grävmaskinisten får gräva.

Julgransmönstret i tätjorden kunde också studeras, se Figur 19. Inga skador noterades på de ställen den undersöktes.

Figur 19. Tätjord innanför den röda triangeln, finfilter utanför.

Tätjorden schaktades nu ned med ca 30 cm, så även den hamnade på ca 300 cm i likhet med utanförliggande materialzoner. Halvmetern närmast båda anslutningar schaktades för hand. En liten 18V bilningsmaskin fick användas då tätjorden inte var så lätt att schakta för hand.

Schaktning av tätjord utfördes i 3–4 drag med skopan och det var noterbart att då ovanpåliggande pall gärna ville glida mot underliggande när det togs bort, se Figur 20. Den upprivning av överyta vi utförde under bygget av dammen var otillräcklig.

Figur 20. Figur visar (1) underliggande pall med tätjord. (2) ovanpåliggande pall med tätjord. Pilar visar ursprunglig upprivning av underliggande pall.

Anslutningarna såg fina ut och tätjorden låg an bra mot betongen. Tätjorden släppte dock enkelt anslutningen i stora stycken när man började att schakta just där, dvs. störde den, se Figur 21 och Figur 22.

Figur 21. T.v. tätjord mot anslutning innan störning. T.h. tätjord mot anslutning vid störning.

Figur 22. Del av tätjord som legat direkt mot anslutning.

De två överta portrycksgivarna grävdes fram och inspekterades. De låg fint inbäddade i tätjord. Inga skador kunde observeras kring dessa, se Figur 23. US givares spets mättes in på höjd 282,1 cm och NS givares spets på 283,5 cm över betongplattans botten.

Figur 23. Översta paret med portrycksgivare. US nedåt i bild.

Skadan vid vänster anslutning på höjd 300cm grävdes också fram, se Figur 24 och Figur 25. I morgon tas prover ut från denna för att titta på kornfördelningen och om materialet har förändrats med tiden. Skadan byggdes in, omgiven av ”korrekta” filter.

Figur 24. Genomgående skada vid vänster anslutning då det finfiltermaterial som omgivit skadan frilagts. Tätjord under röda strecket och finfilter material ovanför.

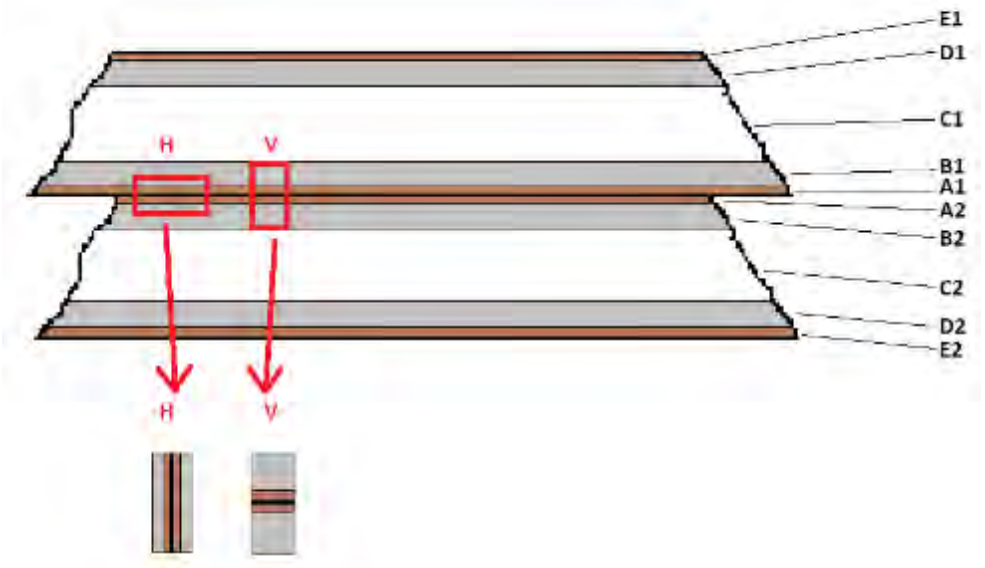
Figur 25. Genomgående skada vid vänster anslutning då ovanpåliggande finfiltermaterial avlägsnats. Skadan gjordes med ett 4/8 mm grus. Detta material ska siktas för att se om det kommit in finmaterial i det. Hål i mitten är från injekteringshål.

Vertikal skada, som på ytan gett upphov till inre erosion, var ”mindre intressant” 30 cm längre ner. Grovfiltermaterialet som utgör den vertikala skadan var mättat med tätjordsmaterial och kommer att siktas.

Figur 26. Vertikal skada på ca 300 cm höjd före och efter urplockning av grovfiltermaterialet. Tätjordsmaterial hade trängt in.

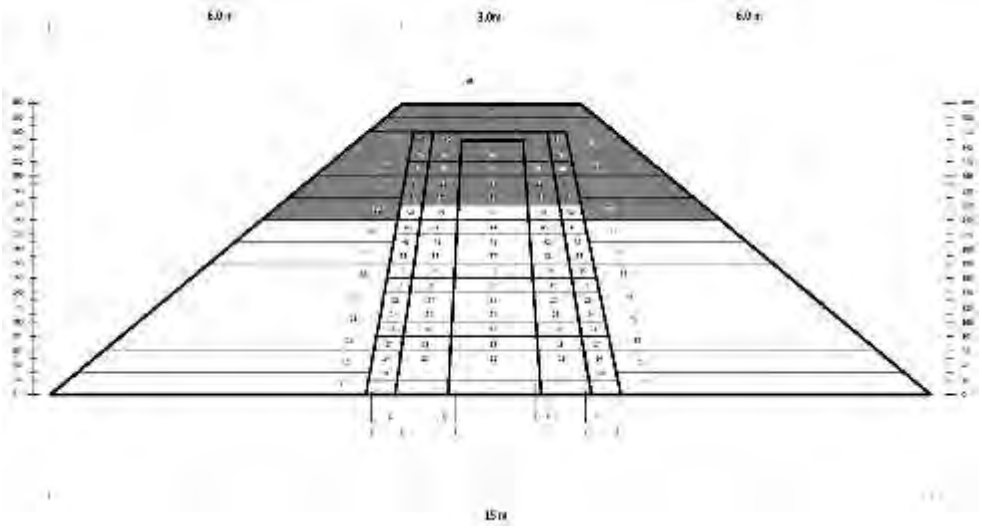
På nivå 300 cm mäts nu packningsgrad på sex ställen US och NS sida av tätjorden vid båda anslutningar samt centralt. Kan nämnas att vi nu är en bit under dämningsgränsen till skillnad från igår. Skrymdensitet verkar ligga något lägre än under gårdagen men avvaktar torrdensitet innan vi kan uttala oss.

Imorgon är planen att ta oss ner 40 cm till och plocka ut cylindrar med tätjordsmaterial för triax och hydraulisk konduktivitet. Prover ska tas ut vertikalt vid anslutning och centralt på både US och NS sida. Prover tas även horisontellt där vi ska försöka ”pricka in” området där två pallar möts. Triax och hydraulisk konduktivitet testas även här.



Figur 27. Uttag av provkroppar vertikalt och horisontellt.

14.4 19TH OF SEPTEMBER 2024



Figur 28. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

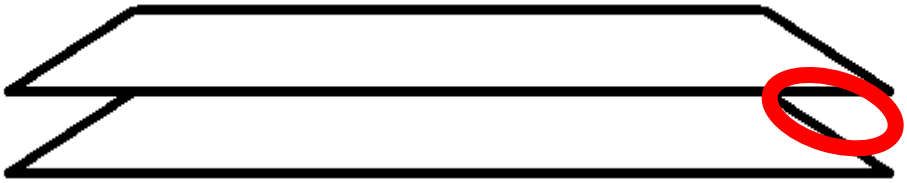
Rivningen fortsätter och vi tar oss ner 40 cm om dagen. Vi är nu på en höjd om ca 250–260 cm. Idag var den första rejäla provtagningsdagen. Sammanlagt plockades 36st kolvar ut med tätjord och 9 hinkar för tvättsiktsanalys. Prover lagras tillslutna i klimatrum tills provning. Packningsgraden testades även den med vattenvolymetern på sex ställen; båda anslutningarna och centralt. US och NS på tätjorden sett till centrallinjen. När jag har den första sammanställningen kring resultat om packningsgrad så ska jag redovisa den. Dock är vi till 100% på dammen för närvarande.

Lite observationer från dagen. Vid vänster anslutning installerades som bekant en skada vid bygget. Uttag av material av denna skada för tvättsiktsanalys togs både på dess US respektive NS sida, se Figur 29. Dock upptäcktes att finmaterial från finfiltret NS skadan spolats ur, se Figur 30. Det urspolade materialet togs ut för tvättsiktsanalys. Det urspolade materialet hade en annorlunda färg, betydligt brunare, nästan rostigt. Precis vid denna urspolade zon, inpackat i finfiltermaterialet låg även en resistivitetsplatta (5x5 cm) installerad. Anslutningsskruv mellan platta och kabel hade nästan rostat sönder så kanske detta var upphovet till missfärgningen men även materialet inne i skadan (US plattan) hade en rostigare färg än omgivande jord. Ytterligare en resistivitetsplatta, där skruv rostat, installerades US skadan så rosten härifrån kan ha varit en möjlig källa till skadans missfärgning. Inget urspolat material upptäcktes dock US skadan vid resistivitetsplattan. Det kan inte uteslutas att NS resistivitetsplatta varit delaktig i att initiera den inre erosionen NS skadan.

Figur 29. Vänster anslutning, genomgående skada. Områden för uttag av material för tvättsiktsanalys. Hål i mitten är injekteringshål.

Figur 30. Urspolat finfiltermaterial NS genomgående skada vid vänster anslutning på nivå ~290 – 300cm. Urspolat område innanför röd ellips.

Uttag av finfiltermaterial gjordes NS tätjorden på 5 ställen, jämnt utspridda över dammens längd. Uttag skedde så nära tätjord som möjligt men utan att själva tätjorden ”följde med” i hinken. Prov togs i finfiltret inne i själva julgransmönstret, se Figur 31 och Figur 32



Figur 31. Område (markerat med röd ellips) på NS sida av tätjorden där finfiltermaterial för tvättsiktsanalys tagits.

Figur 32. Uttag av finfiltermaterial på NS sida av tätjord

Därefter lades stor möda på att få upp provkroppar från tätjorden. 20 provkroppar kunde plockas ut vertikalt centralt i dammen och vid anslutningen. Vid dessa två platser togs fem provkolvar ut på US och NS sida, se Figur 33

Figur 33. Uttag av provkroppar centralt i dammen på US sida (vänster) och NS sida (höger). De två stora hålen är efter mätning av packningsgrad med vattenvolymetern.

Provkroppshylsorna är gjorda i metall med fasade kanter så att den ska kunna knackas in i tätjorden med hammare. Klurig och svår process som nog kan göras bättre men ”good enough” i denna tätjord. Efter att hylsan knackats in vrids den försiktigt och dras ut, Figur 34.

Figur 34. Inknackad provkroppshylsa innan utdrag.

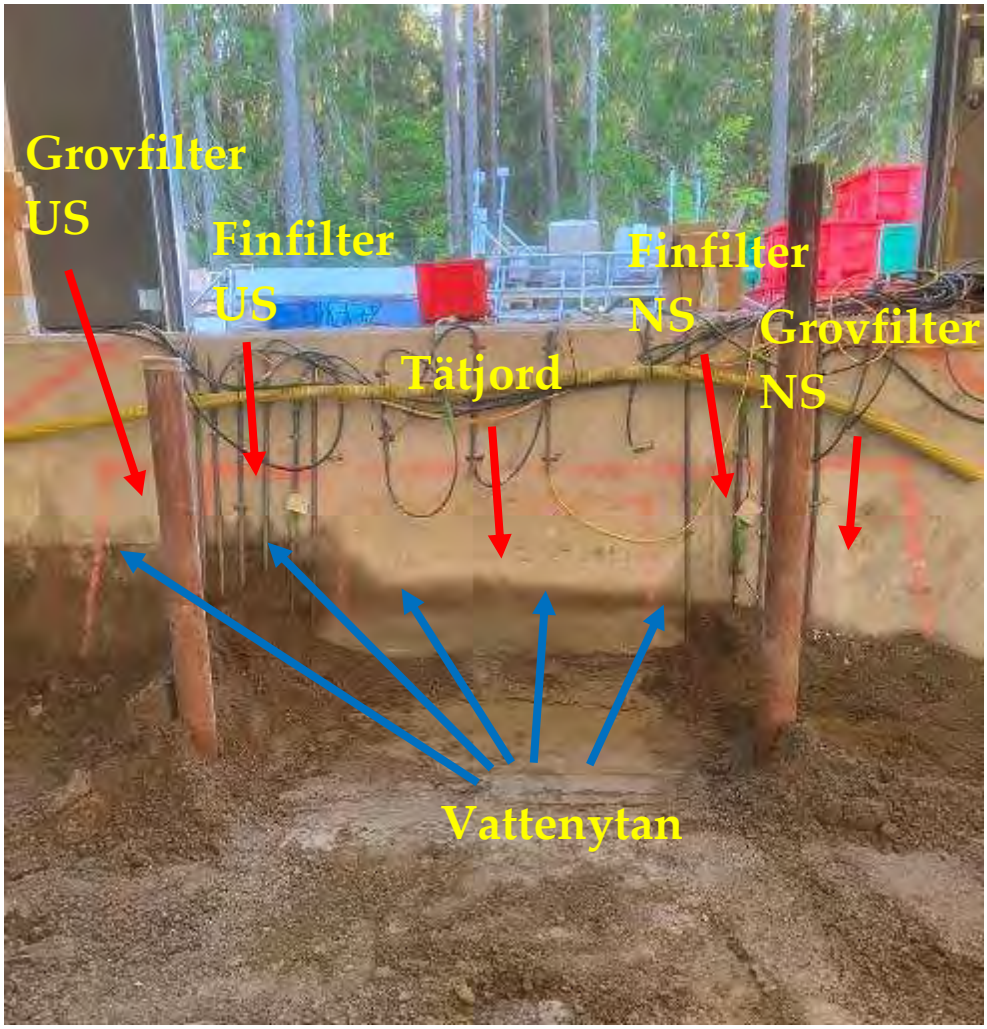
Provkroppar togs även horisontellt på NS sida centralt och vid vänster anslutning, se Figur 35 och Figur 36. Pallgränsen kan hittas på två sätt; följ julgranen, dvs finfiltermaterialets spets eller leta efter den lätt grånade materialzonen som skär igenom tätjorden där två pallar möts.

Figur 35. Uttag av horisontella provkroppar centralt. Gräns för pallskifte är markerat med röda streck. Övre pallgräns på nivå 282 cm, undre på nivå 260 cm

Figur 36. Uttag av horisontella provkroppar vid vänster anslutning NS. Gräns för pallskifte är markerat med rött streck. Pallgräns på nivå 280 cm.

Samtliga uttagna prover är ganska spröda och jag förväntar mig svårigheter att testa triax. Hydraulisk konduktivitet tror jag blir enklare. Hoppas på det bästa. Jag har i många år funderat på hur pallskiftena i en damm påverkar anisotropin i tätjorden, dvs skillnaden i vertikala och horisontella egenskaper. Snart vet vi!

En annan intressant observation idag var vattennivån genom dammprofilen. Vi har ju i några år legat med en konstant vattennivå och när vi tog bort anslutningarna kan man verkligen se hur vattnet har legat, se Figur 37.



Figur 37. Vänster anslutning. Vattenlinjen syns mot dammens olika zoner inritade i betongen för att underlätta under bygget.

Vad man kan göra med denna information vet jag inte riktigt då det är utanför mitt område, men vill ni ha exakta mått på ytan får ni gärna säga till så mäter jag in. Informationen liksom finns där.

En märklig upptäckt gjordes vid höger anslutning NS på ca 290 cm höjd. Det var som att tätjord ”tryckts fram” flera decimeter NS till, se Figur 38.

Figur 38. Tätjord har tryckts fram flera decimeter i ett tunt skikt vid höger anslutning på NS sida.

Jag har ingen aning om varför det ser ut så. Tittar vi på bilder från bygget på denna nivå ser allt ut enligt designen, se Figur 39.

Figur 39. Samma område (NS höger anslutning nivå ca 290 cm) då dammen byggdes. Allt ser ut som det bör här

Måste medge att jag inte blir klok på varför det ser ut så här. Alla idéer kring varför tas tacksamt emot.

Till sist kan jag nämna att grävaren idag korsade tätjorden och jobbar nu från NS stödfyllning, se Figur 40. Dags att stänga av accessen vid anslutningarna då det börjar bli högt.

I morgon inspekterar vi injekteringar, vertikal skada, testar packningsgrad på tätjord, frilägger överytan på den inbyggda betongkuben (skada) samt den genomgående stora skadan (samma utformning som vid anslutning men den är betydligt större) och skalar bort ytterligare 40 cm av stödfyllning, grovfilter och finfilter. Tätjorden skalar vi av först på måndag.

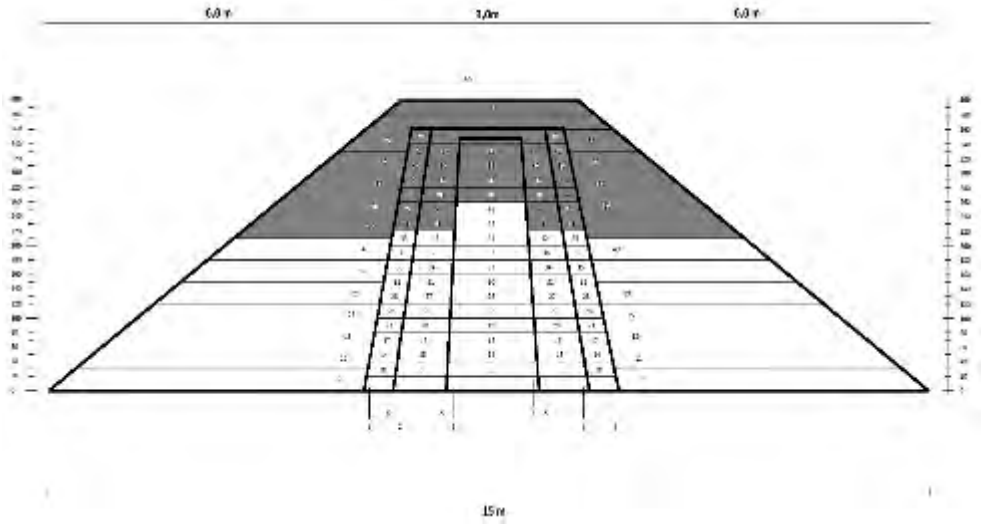
Figur 40. Kaoset för det otränade ögat. Djup från betongkant ner till dammen är just nu ca 140 - 150 cm.

Kan nämna att nästa vecka får jag besök från några exjobbare, Jasmina Toromanovic och Hans Mattsson, samtliga från LTU. Vill ni besöka så är det bara att höra av sig. Jag bedömer att vi behöver ca 6 – 7 arbetsdagar till innan vi är klara. I mitten på vecka 40 alltså.

Bonusbild på mitt kära julgransmönster på nästa sida, se Figur 41.

Figur 41. Julgranen. Tjocklek på pall i bild ca 18 cm.

14.5 20TH OF SEPTEMBER 2024



Figur 42. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Halvdag på dammen idag så det finns inte överdrivet mycket att rapportera. Vi hann dock schakta ner stödfyllningen, fin- och grovfiltret ytterligare så vi nu befinner oss på nivå ca 210 cm. Tätjorden är dock kvar på ca 240 cm. Fanns en hel del att kika på den idag.

Densitetsmätningar gjordes som vanligt på tätjorden på sex ställen (US och NS på tätjorden vid båda anslutningar samt centralt i dammen). Uttag av material för tvättsiktsanalys togs även ut på NS finfilter så nära tätjorden det är möjligt.

Idag var även dagen då vi skulle nå fram till två olika skador, genomgående skada i mitten samt betongkub. Betongkuben bjöd inte på några överraskningar förutom att det var markant mycket mer fukt i tätjorden runt dess kanter. Prover för vattenkvotsbestämningar togs från varje sida av kuben. Möjligtvis är det så att betongkuben, som legat vattendränkt i 5 år, dräneras långsammare än tätjord. Detta kan då få till följd att tätjorden vid dess sidor blir ”blötare” jämfört med övrig tätjord. Betongkubens överkant mättes in till 226,5 cm höjd (Figur 43) vilket kommer att kontrolleras mot den höjd den installerades på för 5 år sedan (se Figur 44).

Figur 43. Betongkub, 4 m ut från vänster anslutning.

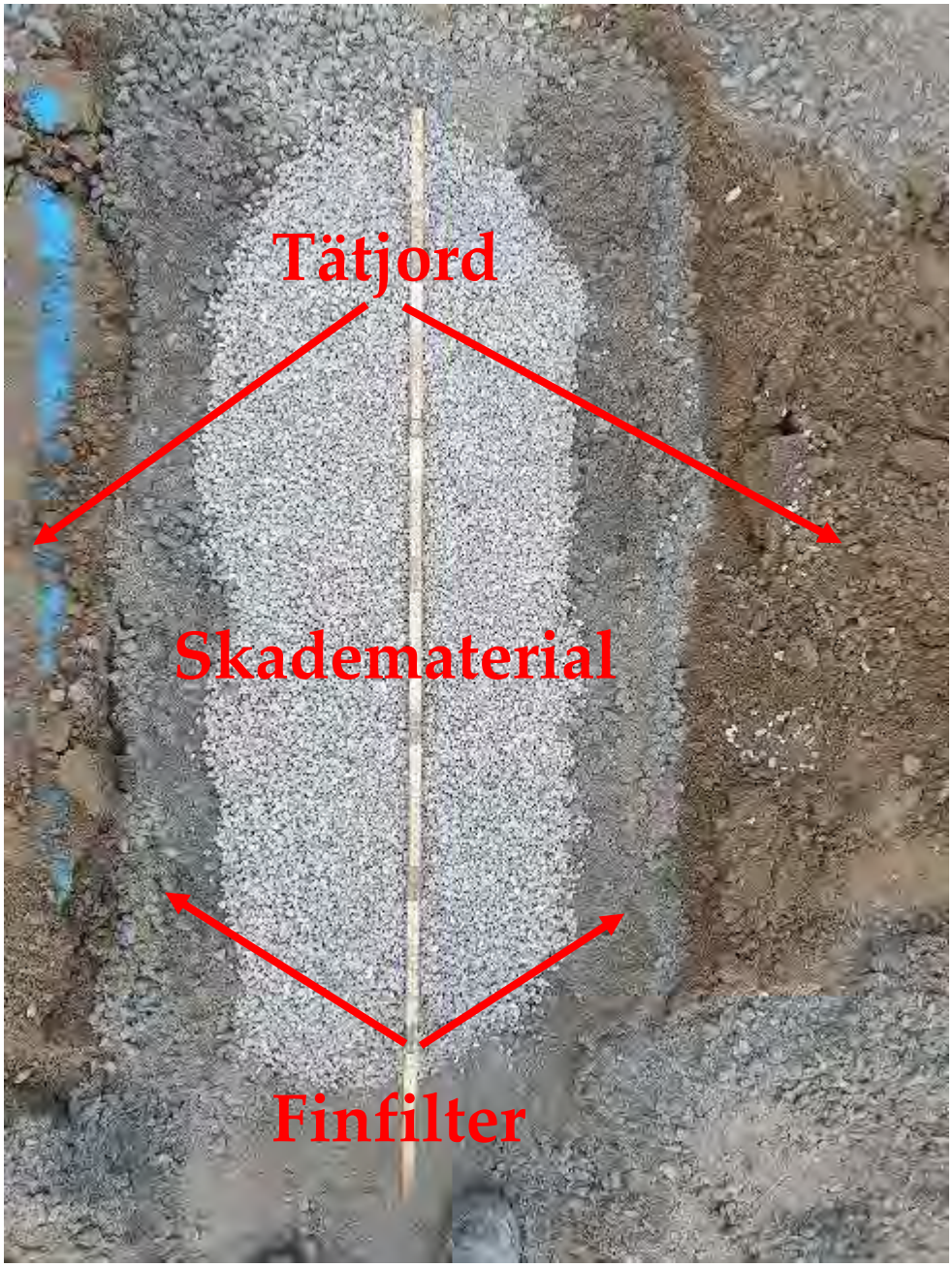
Figur 44. Betongkub, 4 m ut från vänster anslutning då dammen byggdes (6e november 2019).

Den genomgående skadan skrapades fram med grävaren på i stort sett identisk nivå (233,7 cm) som betongkubens överkant (226,5 cm). Vid framskrapningen, dvs mindre drag med grävmaskinens skopa så kunde man se hur tätjordens övre pall gled längs med den undre, se Figur 45

Figur 45. Glidning av tätjord vid pallgränsen då tätjord skrapades bort i tunnare skikt (ca 5 cm i taget).

När väl skadan frilades (Figur 46) såg den ut som när den installerades (Figur 47). Prover av skadan för tvättsiktsanalys togs både på dess US sida som NS sida. Finfiltret NS skadan var uppenbart urspolat (i likhet med den horisontella skadan vid anslutningen). Prov togs från det urspolade finfiltret för tvättsiktsanalys, se Figur 7.

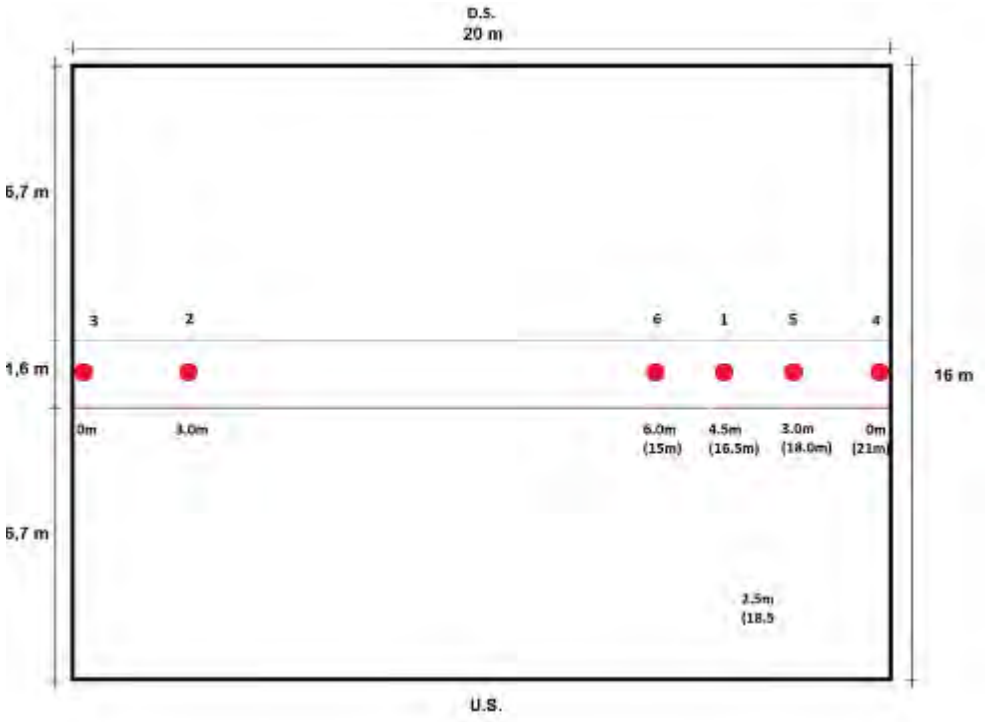
Figur 46. Horisontell skada genom tätjord sedd mot vänster anslutning.



Figur 47. Horisontell skada genom tätjord då dammen byggdes (7e november 2019). Fötterna står på US sida. Skadan omgärdades av finfiltermaterial.

Figur 48. Urspolat finfiltermaterial NS den horisontella skadan.

Injekteringshålen kunde också inspekteras och i två av sex injekterade hål kunde injekteringsbruk hittas. Injektering utfördes på platser som visas i Figur 49



Figur 49. Injekteringshålens placering.

Injekteringsbruk upptäcktes i hål 1 och 2 enligt Figur 49. Injekteringstryck i dessa två hål var självtryck +45 kPa respektive självtryck +50 kPa. ”klena tryck” i en miljö där omgivningen är endast moränen. Injekteringsbruken i dessa två hål bestod av grus, sand och kalkfiller (vitt bruk) eller grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver (svart bruk). Bruken samarbetade bra med omgivande tätjord och var mycket följsamma (ej styva), se Figur 50 och Figur 51.

Injekteringshål 3, invid anslutningen förväntade jag mig att finna injekteringsbruk men där låg inget än så länge. Dock hittade vi material från den horisontella skadan här vilket får betecknas som lite mystiskt, se Figur 52. Injekteringstrycken var vid vänster anslutning identiska med trycken i hål 2. Injekteringsbruket vid anslutningen verkar alltså ”smitit” iväg någonstans längre ner i jorden mellan tätjorden och betongen. Vi behöver ta oss längre ner här innan vi kan ta reda på varför det inte finns injekteringsbruk i injekteringshålet.

Får hål 4, 5 och 6 kommer vi troligtvis inte att hitta injekteringsbruk på ett tag då dessa injekterades med mycket högre tryck (självtryck +250 kPa, självtryck +150 kPa och självtryck först i två minuter och därefter 150 kPa extra). Anledningen härvid var att jag ville testa gränserna för injekteringstrycken och se vart injekteringsbruket tar vägen 7då man har för höga tryck. Alltså, i hål 4, 5 och 6 hittade vi bara grövre material från dammens krön som rasat ned i det tomma hålet efter uppdrag av injekteringsrör, se Figur 53 och Figur 54.

Bör tilläggas att jag under mina injekteringar hade en begränsad mängd bruk (30 liter). Jag kunde alltså inte injektera tills det var fullt utan fick injektera tills bruket var slut och har det då stuckit i väg längre ner som kommer jag få tomma hål i toppen.

Figur 50. Injekteringsbruk (grus, sand och kalkfiller) från hål 1 enligt Figur 49.

Figur 51. Injekteringsbruk (grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver) från hål 2 enligt Figur 49.

Figur 52. Injekteringshål invid vänster anslutning (hål 3 enligt Figur 49).

Figur 53. Injekteringshål invid höger anslutning (hål 4 enligt Figur 49). Här fanns det fortfarande vatten!

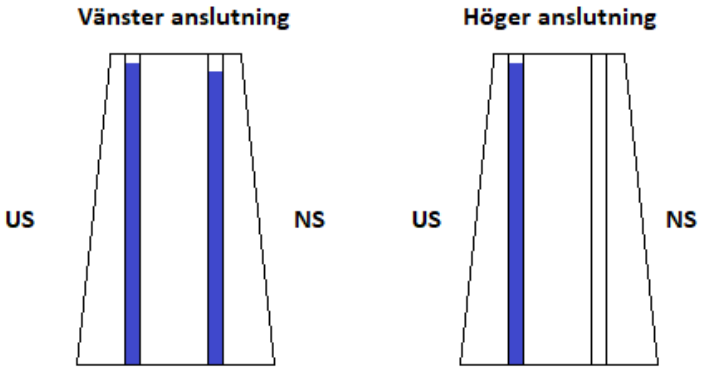
Figur 54. Injekteringshål 5 enligt Figur 49. Hål 6 var i det närmaste identiskt.

Prov för tvättsiktsanalys togs även av den vertikala skadan. Det tas prover från denna varje 40 cm vi tar oss ner.

Till sist kan jag nämna att vi gör en noggrann mätning av den vattenlinje som uppstått mot vänster anslutning. Av någon anledning är den inte alls lika tydlig mot höger anslutning och jag vet inte varför, se Figur 55. Kanske kommer vattenytan fram mot anslutningen då vi gräver längre ner.

Figur 55. Överst vänster anslutning, Nederst höger anslutning.

Kan nämna att då dammen var full med vatten och vi borrade, så var det borrade hålet på NS sida i tätjorden om vid höger anslutning torrt medan det vid vänster anslutning var fullt, se Figur 56.

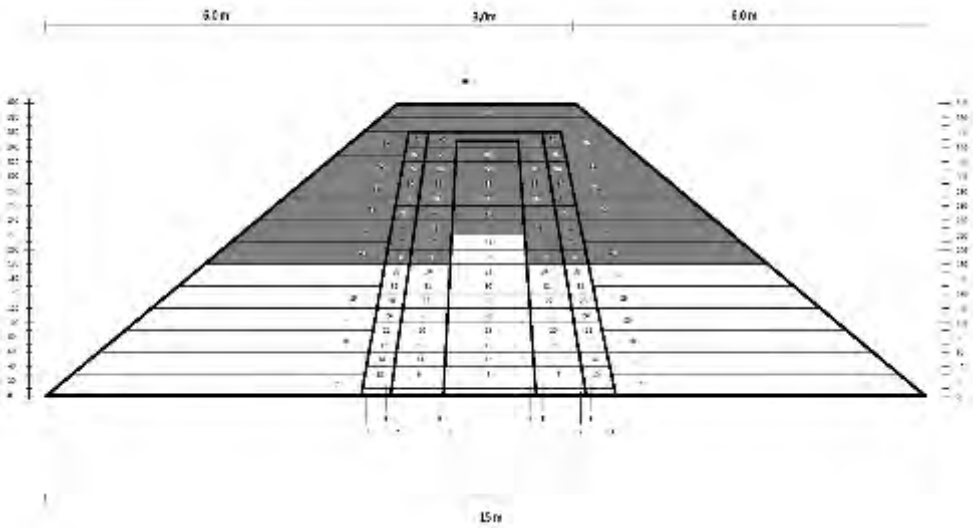


Figur 56. Skillnad på vattenstånd vid de två olika anslutningarna under borrning då dammen var fylld.

Exakta siffror på vattenståndsskillnad har jag på kontoret (sitter hemma nu) men dessa kommer i slutrapport. Ovan beskrivna observationer kan sammantaget

indikera att det någonstans vid höger anslutning sker ett dränage. Åter igen, vi gräver oss nedåt och kanske vi får se något som stödjer denna tes.

14.6 23RD OF SEPTEMBER 2024



Figur 57. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Vi börjar lära oss hur vi rent logistiskt river bäst. Varje dag börjar med att grävmaskinen tar ner tätjorden 40 cm och därefter direkt grovfilter + stödfyllning samt majoriteten av finfiltret ner 40 cm. När denna grävprocess är färdig ligger materialen i de olika zonerna som visas i Figur 57. På så sätt optimerar vi användandet av anläggningsmaskinerna samtidigt som vi kan undersöka tätjorden i lugn och ro hela eftermiddagen. Som en bonus för föraren behöver han bara jobba på förmiddagen och inte behöva komma åter vid 14–15 tiden på eftermiddagen. Mycket stress släpper om man kan optimera denna process. Vi hade säkert kunnat skala ner tätjorden i tunnare skikt än 40 cm men grävaren går hårt åt tätjorden. Inte på grund av oförsiktighet utan mer för att den är så blöt och lätt slits sönder om vi tar för små skikt, se Figur 58 och Figur 59. För närvarande är det en utmaning att jobba med tätjorden.

Figur 58. Tätjorden är mycket sprickbenägen.

Figur 59. Tätjorden är mycket mjuk. Skorna sjunker in flera cm när vi går på den.

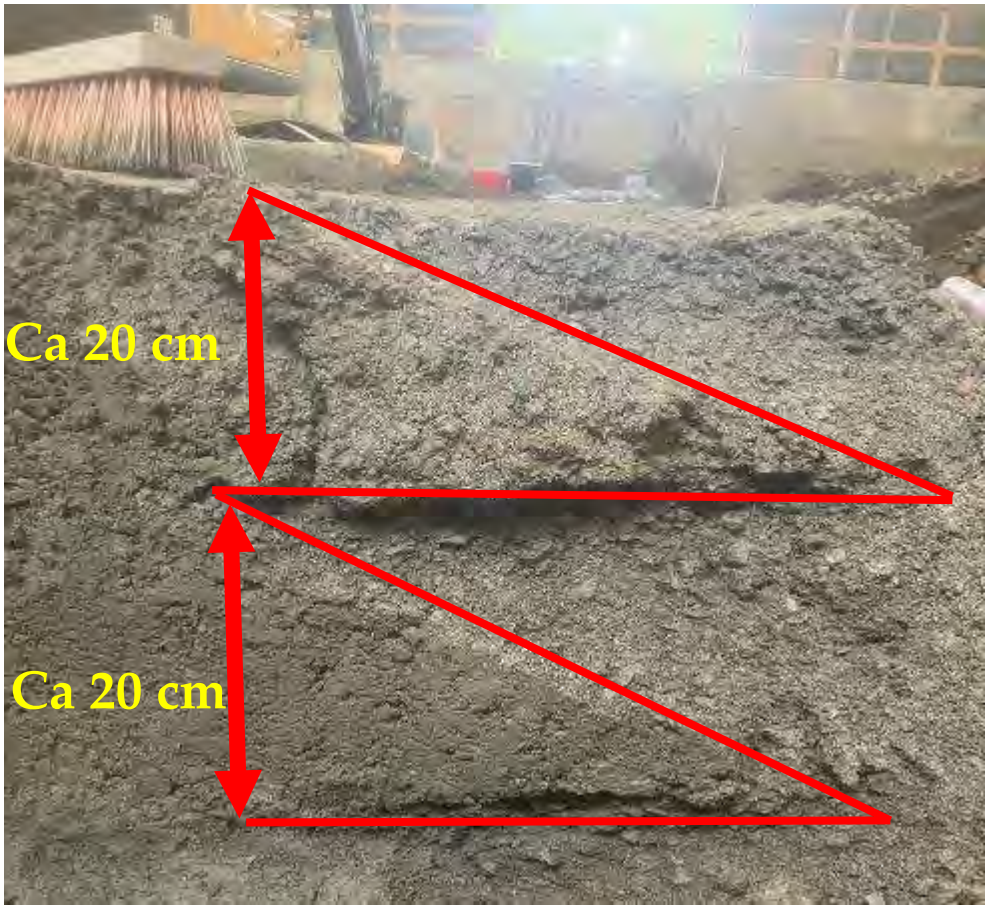
Idag upptäckte vi inre erosion, se Figur 60. Den inre erosionen hittades ca 10 – 20 cm under den centralt placerade horisontella skadan centralt i dammen. Alltså precis under finfiltret som låg under den genomgående skadan. Material i skadan var finfiltermaterial. Det var som att tätjorden spolats ur och ersatts ovanifrån av det ovanpåliggande finfiltermaterialet. Vi kunde inte se något fel i NS finfilter. Gränser mellan NS finfilter och tätjord är en stor utmaning då de lätt flyter ihop.

Figur 60. Inre erosion precis under den centralt placerade genomgående skadan. Fötterna står på US sida.

Provkolvar tog ut idag ur tätjord, 20 st vertikala (5 centralt US, 5 centralt NS, 5 vänster anslutning US och 5 vänster anslutning höger NS). 20st horisontella (5 centralt US i pallskiftet, 5 centralt US mitt i pallen, 5 vänster anslutning US i pallskiftet och 5 vänster anslutning US mitt i pallen. Uttagen idag var mycket kämpiga. Blött material som inte ville samarbeta alls men det gick. Det var i synnerhet svårt centralt i dammen. Vid anslutningen gick det enklare. Mindre ”geggigt” där.

Figur 61. Uttag av horisontella provkroppar. Övre raden mitt i pallskiftet (nivå ca 200 cm höjd) och undre raden mitt i en pall (nivå ca 170 cm höjd).

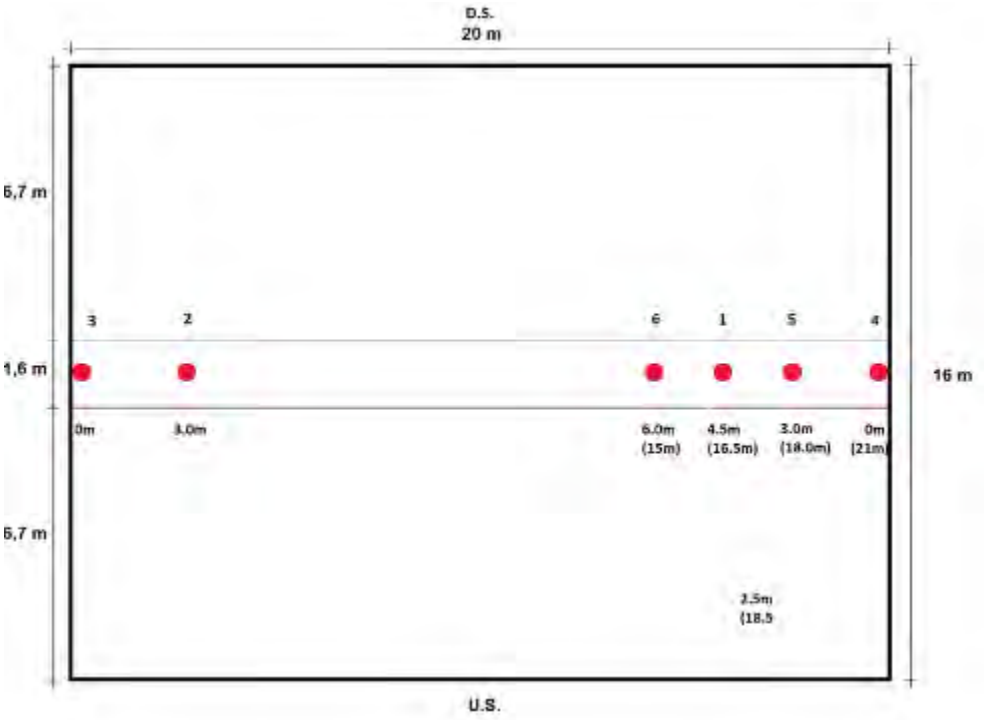
Bonusbild på julgranen i Figur 62



Figur 62. Julgranen på nivå 180 – 220 cm höjd.

Jag har även fastnat för den ”fläckvisa svampigheten” i tätjorden. Det är ett mysterium hur tätjorden kan kan vara så ömsom hård, ömsom mjuk utan någon direkt logiskt mönster. PÅ vissa ställen är den mjuk och när man grävt ner en cm eller två blir den hårdare igen. För att kunna sätta siffror på svampigheten har vi börjat testa packningsgrad på jorden där den är mjuk och hård. Vet inte hur densitetsskillnad kommer att bli eller om det kommer att bli någon. Vi ger det ett försök. Både densitet och vattenkvot mäts vid dessa försök. Sedan tidigare mäter vi standardmässigt packningsgrad vid anslutningar samt centralt (6 olika platser) för varje 40 cm men nu utökar vi det för att undersöka ”svampigheten också).

Injekteringshålen undersöktes härnäst för dagens nivå och injekteringshålens placering visas i Figur 49.



Figur 63. Injekteringshålens placering.

Injekteringsbruk upptäcktes i hål 1 och 2 enligt Figur 49. Injekteringstryck i dessa två hål var självtryck +45 kPa respektive självtryck +50 kPa. ”klena tryck” i en miljö där omgivningen är endast moränen. Injekteringsbruken i dessa två hål bestod av grus, sand och kalkfiller (vitt bruk) eller grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver (svart bruk). Bruken samarbetade bra med omgivande tätjord och var mycket följsamma (ej styva), se Figur 50 och Figur 51.

Figur 64. Injekteringsbruk (grus, sand och kalkfiller) från hål 1 enligt Figur 49.

Figur 65. Injekteringsbruk (grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver) från hål 2 enligt Figur 49.

Injekteringshål 3, invid vänster anslutning, syntes nu fint för första gången på nivå ca 220 cm över botten. Injekteringsbruket samarbetade mycket bra med omgivande tätjord, se Figur 52. Injekteringstrycken var vid vänster anslutning identiska med trycken i hål 2.

Figur 66. Injekteringshål invid vänster anslutning (hål 3 enligt Figur 49).

Injekteringshål 4, 5 och 6 var fortfarande tomma på injekteringsbruk (vi troligtvis inte att hitta injekteringsbruk på ett tag då dessa injekterades med mycket högre tryck, dvs. självtryck +250 kPa, självtryck +150 kPa och självtryck först i två minuter och därefter 150 kPa extra). I hål 4 och 5, enligt Figur 49, hittade vi bara grövre material från dammens krön som rasat ned i det tomma hålet efter uppdrag av injekteringsrör, se Figur 53 och Figur 54. I injekteringshål 6, enligt Figur 49, hittade

vi mycket löst tätjordsmaterial, se Figur 69. I brist på bättre ord, det var som elefantbajs.

Figur 67. Injekteringshål invid höger anslutning (hål 4 enligt Figur 49). Här fanns det fortfarande vatten!

Figur 68. Injekteringshål 5 enligt Figur 49.

Figur 69. Injekteringshål 6 enligt Figur 49. Mycket löst tätjordsmaterial uppgrävt ur hål och placerat nedanför i bild.

Vi tog upp injekteringsbruk för att inspektera det. Det är svårt att provta injekteringsbruket för andra tester än kanske en kornstorleksfördelning. Provkolvar är svårt eftersom det är materialet både är löst och vid uppdrag av kolven skapas ett undertryck som gör att provet i kolven inte vill följa med upp (är så tätt runt omkring). Injekteringsbruken samt tätjorden syns i Figur 70 och Figur 71. I dessa två figurer har en mindre mängd injekteringsbruksmaterial grävts ut ur sitt borrhål och formats till små bollar. Magnetitbruket är mer snarlikt tätjorden när man ”känner” på det. Kalkfillerbruket upplevs som lite för sandigt. Jag funderar på om kalkfillermaterialet lakats ur och därmed tappat finmaterial. Material för tvättsiktsanalys på kalkfillerbruket har tagits.

Figur 70. Injekteringsbruksmaterialet och tätjord format till små bollar. Från vänster till höger magnetitbruk, tätjord, kalkfillerbruk.

Figur 71. Injekteringsbruksmaterialet och tätjord format till små bollar och belastade. Från vänster till höger magnetitbruk, tätjord, kalkfillerbruk.

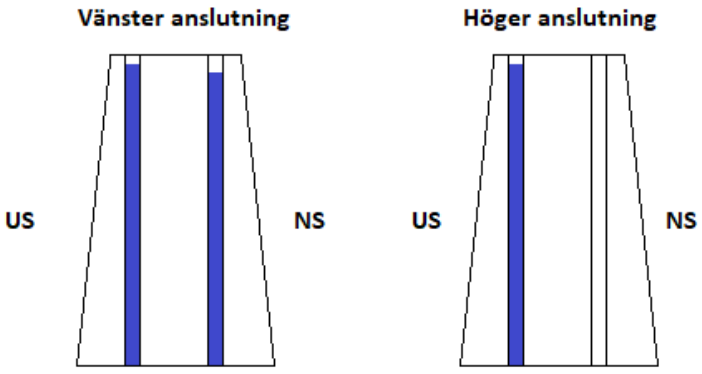
Prov för tvättsiktsanalys togs även av den vertikala skadan. Det tas prover från denna varje 40 cm vi tar oss ner. Idag var den vertikala skadan (ursprungligen grovfiltermaterial) fylld med sandmaterial! Innan har skadans porsystem varit fylld med tätjordsmaterial men just idag, på nivå ca 200 cm höjd, var det dominerande sand, se

Figur 72. Vertikal skada, för dagen fylld med sand (sand inbäddat i 4/64 mm materialet)

Till sist kan jag uppgradera er på mätning av den vattenlinje som uppstått mot vänster anslutning som av någon anledning är den inte alls lika tydlig mot höger anslutning, se Figur 55. Jag teoretiserade om att anledningen är att det har skett en form av dränering vid den högra anslutningen. Då vi borrade, när reservoar var full uppstod vattennivåer i borrhål på NS och US sida vid båda anslutningarna enligt visualisering i Figur 56. Vid höger anslutning var GVY 7cm under tätjordens krön US men helt tom på NS sida. För vänster anslutning låg GVY 13 cm under tätjordens krön US men på 41 cm under tätjordens krön på NS sida. Alltså har dränering skett vid höger anslutning. Som vanligt kanske vi får reda på anledningen längre ner men jag misstänker att mitt ”misslyckade” (jag misslyckades med flit) injekteringshål vid höger anslutning fungerat som en vertikaldrän medan injekteringen vid vänster

anslutning fungerat bättre. Till slutrapport kopplar jag läckagemätningar vid anslutningar till mina observationer.

Figur 73. Överst vänster anslutning, Nederst höger anslutning.



Figur 74. Skillnad på vattenstånd vid de två olika anslutningarna under borrning då dammen var fylld.

Vid höger anslutning upptäcktes även en grånad nyans i tätjorden. Den typen av grå nyans den kan få när den kommer upp i dagen. Detta kan kanske vara ytterligare en indikation på att dränering sker? se Figur 75. Det gråa skiktet var ca 2 – 3 cm brett.

Figur 75. Grå nyans på tätjord allra närmast höger anslutning. Detta kunde inte ses vid vänster anslutning

Figur 76. Inga grå nyanser på tätjorden invid vänster anslutning.

När anslutningen grävs fram är den som en avgjutning av anslutningen. Vänster anslutning var betydligt blötare än vänster på dagens nivå, se

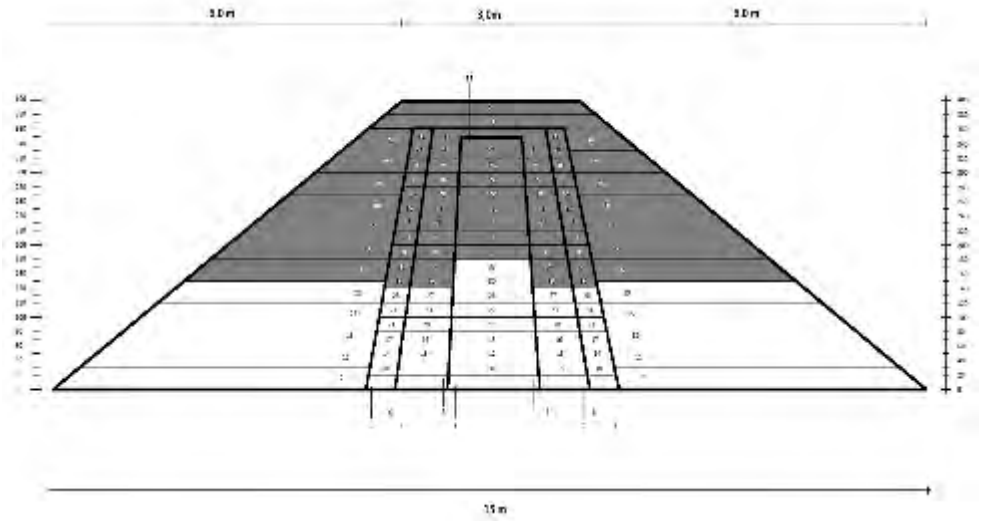
Figur 77. Bit från höger anslutning. US sida till vänster och NS till höger. Yta helt jämn.

Figur 78. Bit från vänster anslutning. US sida till höger och NS sida till vänster. Yta helt jämn och markant blötare än höger anslutning.

Till sist, bild på dammen sedd mot vänster anslutning innan hemgång. Vi är halvvägs nere nu, se Figur 23.

Figur 79. Dammen sedd från höger anslutning mot vänster. Tätjord ÖK är på nivå 220 cm. Stödfyllning, grov- och finfilter på nivå 180 cm.

14.7 24TH OF SEPTEMBER 2024



Figur 80. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

På grund av ett felskär i början av dagens nedtagning av tätjord hamnade vi ca 10 cm djupare än tänkt. Ingen fara i sig men i morgon får vi gräva 10 cm grundare (30 cm i stället för 40 cm). Innan dagens nergrävning tog vi fram portrycksgivare. US givare låg på nivå 176,4 cm och NS givare på 178,9 cm, se Figur 81. Givarna låg perfekt inbäddade i tätjord utan tecken på erosion. Givarna har dock korroderat en del, se Figur 82

Figur 81. Portrycksgivare framgrävda innan nedtagning av tätjord. US till höger.

Figur 82. Rostmärken i tätjorden efter borttag av US portrycksgivare på nivå 176,4 cm.

Efter nedtag av tätjord togs stöd, fin- och grovfilter bort ner till nivå 140 cm. Därefter mättes densitet med vattenvolymeter på US och NS sida av tätjordens centrumlinje vid båda anslutningarna samt centralt. Utöver det gjordes densitetsmätningar på både mjuka och hårdare zoner på tätjordsytan (”svampigheten”). Ett intressant mönster har dock börjat utkristallisera sig. Varje gång vi mäter de mjuka områdena får vi mycket höga skrymdensiteter (upp mot 2,6 t/m^3). Detta är orimligt. Då vi mäter volymen grävs en grop och dess volym mäts genom att ställa en ca 10 kg tung vattenfylld cylinder ovanpåmed en ballong i botten. Med ett handtag pressar man ner vatten i ballongen som fyller ut hålet. Skillnaden mellan en referensmätning (utan hål) och med hålet ger en volym. Eftersom vi får höga skrymdensiteter så överskattar vi antingen vikten på det urgrävda materialet eller underskattar

volymen. Vikten är vad den är så allt landar i volymen. Jag misstänker att när vattenvolymetern trycks ner så sätter sig den mjuka jorden kring vattenvolymetern. På så sätt komprimeras det grävda hålet och volymen underskattas. Vet i dagsläget inte hur vi ska komma runt detta. Jorden är så mjuk på sina ställen. Vatten kan även pressas upp genom botten på hålet vid de mjuka ställena, se Figur 83

Figur 83. Hål grävt för densitetsmätning. Tätjorden kring toppen är mycket sättningsbenägen vid överkant. Vatten ansamlas också i dess botten efter en stund.

Apropå svampigheten i tätjorden så tror jag att jag kommit på anledningen. Tätjorden är uppbyggd i pallar om ca 20 cm. Som det verkar är pallen som hårdast i toppen för att gradvis bli mjukare mot botten av pallen, se Figur 84. Då vi gräver så är precisionen i grävmaskinen inte riktigt på topp. Då vi gräver ner oss i skikt kan därför överytan av det bortgrävda hamna både högt upp, eller långt ner i pallen när vi gjort klart en ny nivå. Givetvis blir då hårdheten på tätjordsytan mycket ojämn. Gårdagens nivå (220 cm) var tex mjuk medan dagens nivå (170 cm) var hårdare. Jag ska försöka få ut provkroppar som spänner över en hel pall för att studera skillnaden i en pallhöjd.

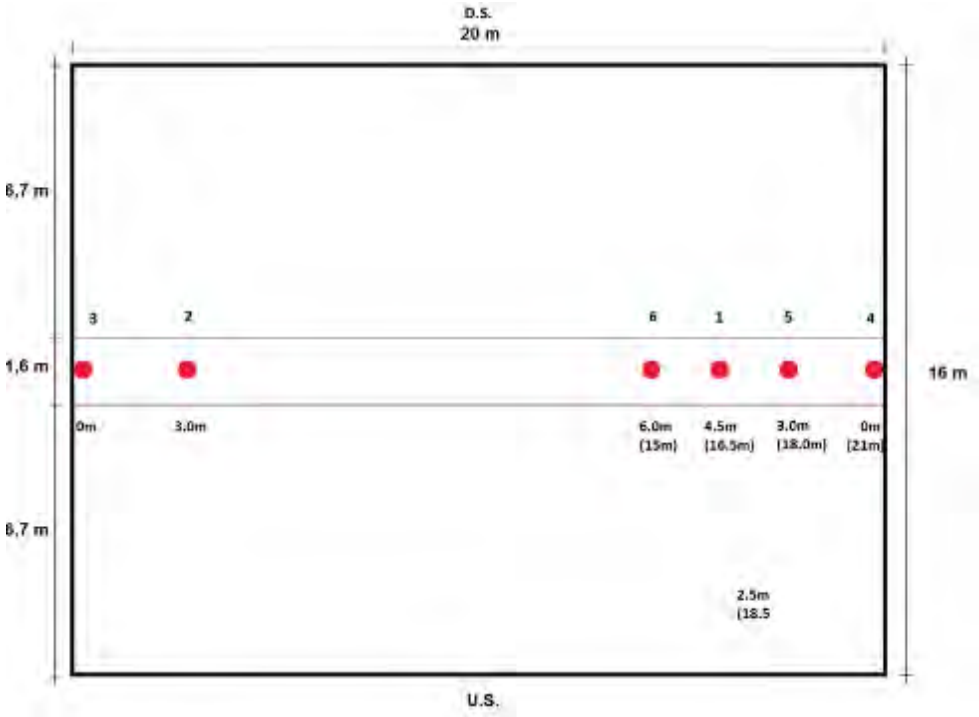
Figur 84. Skillnad i pallens hårdhet beroende på om man är i dess topp eller botten.

Erosion upptäcktes även vid den vertikala skadan på nivå ca 170 cm, se Figur 85.

Figur 85. Vertikal skada. Originalformen markerad med röd cirkel. Fötter på US sida. NS skadan har erosion skett.

Material för kornstorleksbestämning plockades ut ur skadan. Märkligt nog verkar skadematerialet (4/64mm) fyllt ut med sand. Vi ser inget annat. Vi kommer köra sedimentationsanalyser nu tills vi kommer ner helt. Förväntar mig mer finmaterial längre ner. Har svårt att förstå att det som fyllt ut porerna i den vertikala skadan ser så sandigt ut. Sanden syns tydligt i Figur 85. Prover för tvättsiktsanalys togs som vanligt ut på sex ställen på NS finfilter. Ska tilläggas att tätjorden runt om den vertikala skadan är ytterst mjuk.

Till dagens injekteringshål då. Deras placering visas i Figur 49.



Figur 86. Injekteringshålens placering.

Injekteringsbruk upptäcktes i hål 1 och 2 enligt Figur 49. Injekteringstryck i dessa två hål var självtryck +45 kPa respektive självtryck +50 kPa. ”klena tryck” i en miljö där omgivningen är endast moränen. Injekteringsbruken i dessa två hål bestod av grus, sand och kalkfiller (vitt bruk) eller grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver (svart bruk). Bruken samarbetade bra med omgivande tätjord och var mycket följsamma (ej styva), se Figur 50 och Figur 51. Kalkfillerbruket togs ut för bestämning av kornstorleksfördelning. Jag vill kunna avgöra om det lösts upp eller ej. Minns att jag under gårdagen upplevde bruket som sandig, som att finmaterial försvunnit ur det.

Figur 87. Injekteringsbruk (grus, sand och kalkfiller) från hål 1 enligt Figur 49.

Figur 88. Injekteringsbruk (grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver) från hål 2 enligt Figur 49.

Injekteringshål 3, invid vänster anslutning, syntes för första gången på förra nivå ca 220 cm över botten, och även nu. Injekteringsbruket samarbetade mycket bra med omgivande tätjord, se Figur 52. Injekteringstrycken var vid vänster anslutning identiska med trycken i hål 2.

Figur 89. Injekteringshål invid vänster anslutning (hål 3 enligt Figur 49).

Injekteringshål 4, vid höger anslutning uppvisade injekteringsbruksmaterial för första gången, se Figur 90. Det fanns fortfarande en hel del grövre material i hålet från ytan. Vid nästa nivå (140 cm) kanske det är mer ”rent” injekteringsbruk.

Figur 90. Injekteringshål 4 vid höger anslutning.

Hål 5 och 6 var fortfarande tomma på injekteringsbruk (vi troligtvis inte att hitta injekteringsbruk på ett tag då dessa injekterades med mycket högre tryck, dvs. självtryck +250 kPa, självtryck +150 kPa och självtryck först i två minuter och därefter 150 kPa extra). I hål 5, enligt Figur 49, hittade vi bara grövre material från dammens krön som rasat ned i det tomma hålet efter uppdrag av injekteringsrör, se Figur 54. I injekteringshål 6, enligt Figur 49, hittade vi mycket löst tätjordsmaterial, se Figur 69. I brist på bättre ord, det var som elefantbajs.

Figur 91. Injekteringshål 5 enligt Figur 49.

Figur 92. Injekteringshål 6 enligt Figur 49. Mycket löst tätjordsmaterial uppgrävt ur hål och placerat nedanför i bild.

Vid höger anslutning upptäcktes under grånad nyans i tätjorden. Den typen av grå nyans den kan få när den kommer upp i dagen. Idag, fanns inte den nyansen alls. Som ett sammanträffande fanns injekteringsbruk i hålet idag. Säger inte att en eventuell dränering stoppats på denna nivå men det är en teori jag har, jämför Figur 75 med Figur 94.

Figur 93. Grå nyans på tätjord allra närmast höger anslutning på .nivå 220 cm

Figur 94. Inga grå nyanser på tätjorden invid höger anslutning på nivå 170 cm.

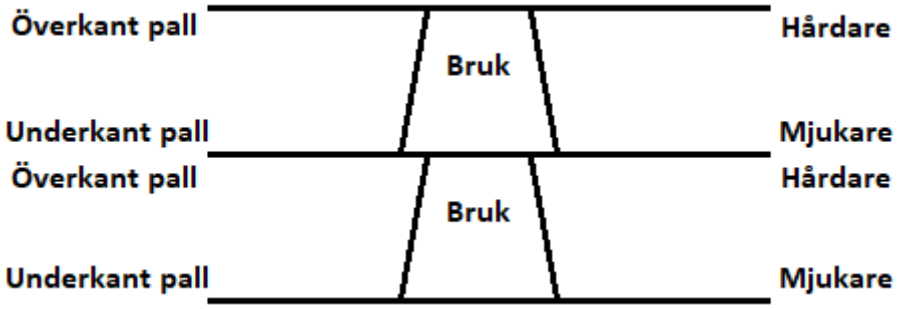
När tätjordsanslutningen grävs fram är den som en avgjutning av betonganslutningen. Anslutningarna var idag lika blöta. I går var höger betydligt torrare än den vänstra. US sida är blötare än NS vid båda anslutningar.

Figur 95. Bit från höger anslutning. US sida till vänster och NS till höger. Yta helt jämn.

Figur 96. Bit från vänster anslutning. US sida till höger och NS sida till vänster. Yta helt jämn.

Innan vi rundar av dagen vill jag återkoppla till det faktum att varje pall verkar styvare i toppen och lösare i botten. När jag grävde lite i injekteringshål 1 så upptäcktes något intressant. Injekteringsbruket hade tryckt sig utåt flera cm när det drogs upp igenom ett pallskifte. Detta indikerar också att pall är mjukare i botten, se Figur 97 och Figur 98.

Figur 97. Injekteringsbruk på nivå 170 cm. I hålet bredvid injekteringen har underliggande palls överyta frilagts som referensnivå.



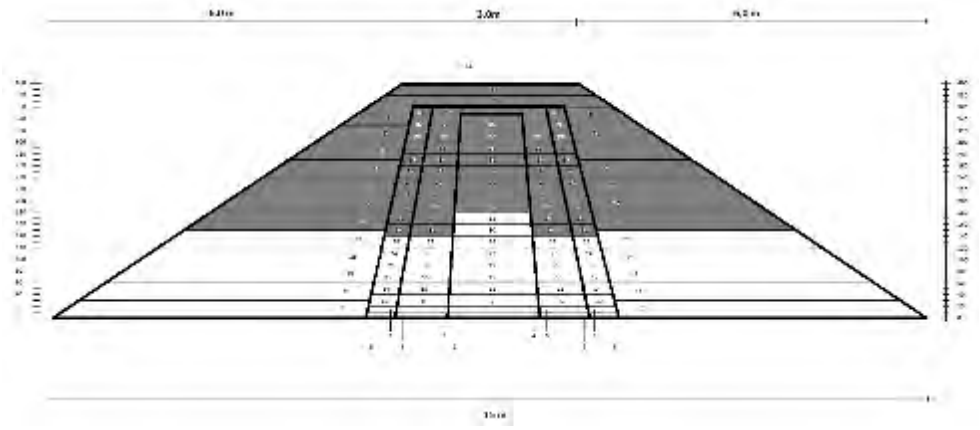
Figur 98. Idealiserad bild över injekteringsbrukets spridning i en jordprofil uppbyggd av pallar med skiftande hållfasthet i höjdled.

Injekteringsbruken i hålen verkar vidare ha en diameter på 13 – 14 cm. Foderrören var drygt 10 cm i diameter. När jag beräknade bruksåtgång räknade jag med att injekteringshålen skulle bli ca 11 cm i diameter. Då hålen blivit större kan det förklara att bruket i de hålen med låga tryck inte tagit sig hela vägen upp i tätjorden (till tätjord överkant). Det skapades helt enkelt mer volym att fylla ut än vad jag hade injekteringsbruk till.

Till sist, bild på dammen sedd mot vänster anslutning innan hemgång, se Figur 99.

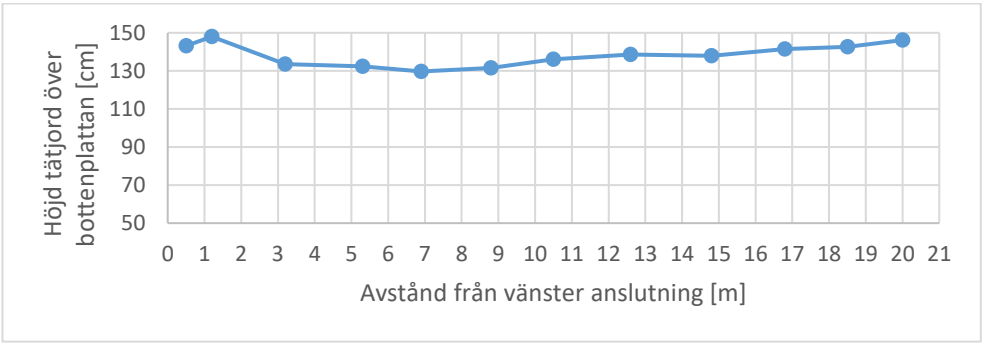
Figur 99. Dammen sedd från höger anslutning mot vänster. Tätjord ÖK är på nivå 170 cm. Stödfyllning, grov- och finfilter på nivå 140 cm.

14.8 25TH OF SEPTEMBER 2024



Figur 100. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Idag tog vi ner tätjord ca 20 – 30 cm och stödfyllning, grov- och finfilter 40 cm. Tätjorden avvägdes med målet att befinna sig på nivå 140 cm, se Figur 101. Noterat att nivåer är på grund av grävning och inte så att vi följ en viss pall. Formen blir lite en sadelform, vilket är i stort sett ofrånkomligt när man inte avväger varje decimeter. Grävmaskinisten är duktig och gör så gott han kan. Dock är detta inte så viktigt, att yta blir perfekt jämn. När vi bygger är det en annan femma såklart.



Figur 101. Avvägning av tätjord. Genomsnittlig nivå 138 cm.

När man schaktar bort tätjord kan man tydligt se, i synnerhet på US sida, att tätjorden ofta har släppt från underliggande finfilter så att hålrum uppstår, se Figur 102. Detta har enbart observerats på US sida och inte NS. Vet inte om detta innebär någon fara men vi har ju sett kring de ofyllda injekteringshålen och den vertikala skadan att så fort det uppstår tomrum så blir omkringliggande tätjord mycket, mycket mjuk (jag skriver ”mycket” två gånger och egentligen hade jag velat skriva upp det fem gånger). Man gräver sig ned men en enklare liten spade helt utan motstånd, se Figur 103.

Figur 102. Tätjord har släppt från US finfilter.

Figur 103. Vertikal skada efter uttag av material för tvättsiktanalys. Fötterna står på US sida. Material runt skada mycket löst och sprucket. NS skadan har det grävts ur ett mindre hål med mycket löst material. Som att skära i smör.

Materialen i dessa mjuka zoner, som visas överst i Figur 103, har konsistensen av färsk betong (i likhet med det jag hittat hela tiden i injekteringshål 6 enligt Figur 49 och Figur 69. Skulle vilja säga att det är exakt samma material. Prover uttagna för tvättsiktsanalys och vattenkvot.

Anslutningarna undersöktes också som vanligt. På höger sida hade finfiltermaterial trängt in mellan anslutning och morän. Förstår inte riktigt varför och det ser inte ut som inre erosion, se Figur 104. Finfiltermaterialet låg bara ytligt och skrapades lätt av. Dock efterlämnades märken i moränen, se Figur 105. För vänster anslutning upptäckes inget speciellt. Allt var som tidigare,

Figur 104. Bit från höger anslutning. US sida till vänster och NS till höger. Finfilter har ”trängt” in på US sida.

Figur 105. Bit från höger anslutning. US sida till vänster och NS till höger. Finfilter på US sida borttaget. Yta skrovlig.

Figur 106. Bit från vänster anslutning. US sida till höger och NS sida till vänster. Yta helt jämn.

Nu ska vi avhandla det som tagit oss mest tid idag, att klura ut hur vi mäter densitet i tätjord utan att överskatta den. Skillnad mellan att mäta i hård och mjuk jord med vattenvolymetern syns i Figur 107.

Figur 107. Urgrävd provgrop efter provning med vattenvolymeter. Till vänster är tätjorden hård. Till höger mjuk.

Skillnad är uppenbar. Då jord är hård lämnar vattenvolymeter minimala deformationer efter sig och mätt volym ger mycket rimliga skrymdensitetsvärden (torrdensiteter kommer efter vi arbetat klart på dammen och börjar att analysera). Då jord är mjuk deformeras hålet plus att vatten trycks upp ur dess botten men underskattning av provgropens volym som följd. Efter diskussioner kom vi fram till att gräva en provgrop enligt Figur 107. Tätjorden utanför hålet planades av men i stället för att ställa en vattenvolymeter ovanpå den lade vi i stället ut gladpack i provgropen. Därefter hälldes vatten försiktigt ner på gladpacken så att hela provgropen fylldes med vatten. Gladpacken gjorde att vattnet stannade i provgropen och vatten hälldes tills det precis nådde överkanten på provgropen. Genom att veta vikten på vattnet innan det hälldes ner och efter att det hällt ned kunde vi med mycket hög noggrannhet bestämma volymen på hålet. Vidare ser jag det som en fördel att väga vattnet och inte mäta dess volym (som man gör med vattenvolymetern). Plötsligt fick vi mycket bättre skrymdensitetsvärden på tätjorden även där den var mjuk. ”Vår” metod orsakade inga synbara deformationer på den mjuka jorden under utvärderingen. Vi kommer nu att fortsätta mäta med vattenvolymeter projektet ut men dubblera med ”vår” metod för att få lite bättre statistiska underlag att vi gör rätt. Tidigare har vi fått skrymdensiteter upp till 3,3 t/m^3 med vattenvolymeter i mjuk tätjord men nu är vi på 2,0 – 2,3 t/m^3.

Inre erosion har upptäckts under dagen. Erosionen ser vanligtvis ut som tunna stråk av sand mitt i moränen utan synbar koppling till NS finfilter. Idag upptäcktes ett område 12,4m från vänster anslutning på nivå 138 cm, se Figur 108 till Figur 113. Materialet funnet i detta område är identiskt med det vi hittar inne i den vertikala skadan, dvs av sandkaraktär. Vi kunde inte finna en direktkontakt med NS filter

men det betyder bara att jag inte hittade en, inte att det inte finns. Vissa sprickor var otroligt svårupptäckta men de fanns och innehöll alltid sandmaterial.

Figur 108. Sandstråk upptäcktes på ytan, 12,4m från vänster anslutning på nivå 138 cm.

Figur 109. Erosionen har tagit sig ner några cm i tätjord.

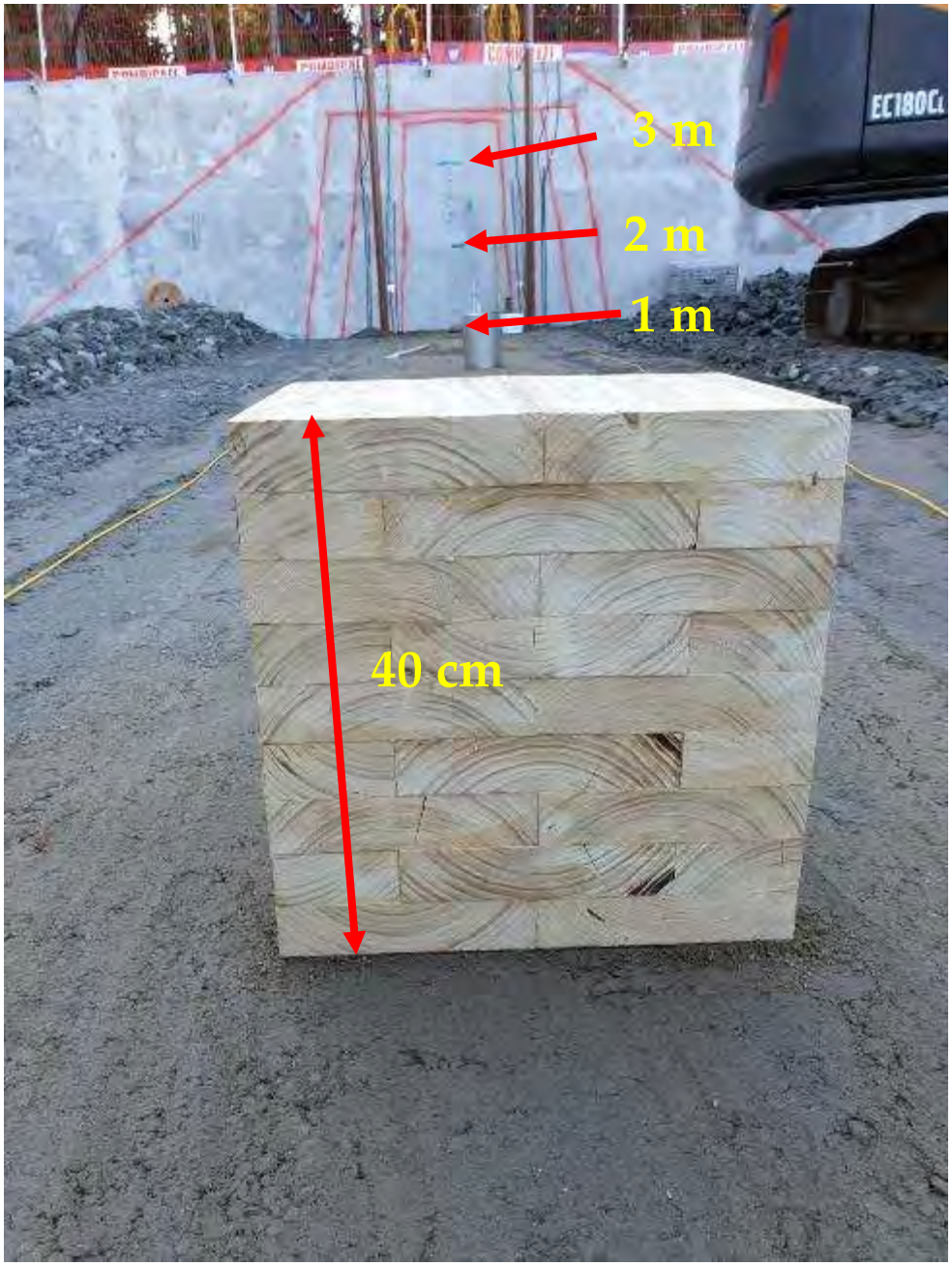
Figur 110. Små stråk av sand gick ner i moränen.

Figur 111. Tätjord togs upp NS erosionen. Sprickor fyllda med sand upptäcktes.

Figur 112. Ett område med filtermaterial inringat som gick in mot US finfilter (bild tagen mot US sida).

Figur 113. Sandzonen ”dök” ner mot NS finfilter utan synbar direktkontakt med just NS finfilter.

Strax till höger om ovan nämnda skada grävdes träkuben fram. Träkuben installerades på ca 1 m höjd och är 40 cm hög, Figur 114. Exakt inmätning vid installation 2019 inkluderas i slutrapport men träkubens överyta, se Figur 115, mättes idag in till nivå 109,5 cm vilket indikerar en sättning på ca 30 cm (orimligt). Mätning behöver kompletteras med den riktiga nivån på bottenplatta under tätjordens centrallinje (idag antagen till 400 cm) samt inmätning av träkub vid installation (kommer i slutrapport). Nog har den satt sig men aldrig så mycket som 30 cm. Tätjorden runt träkubens överyta var svart i färgen och mycket torr. Vattenkvot mäts.



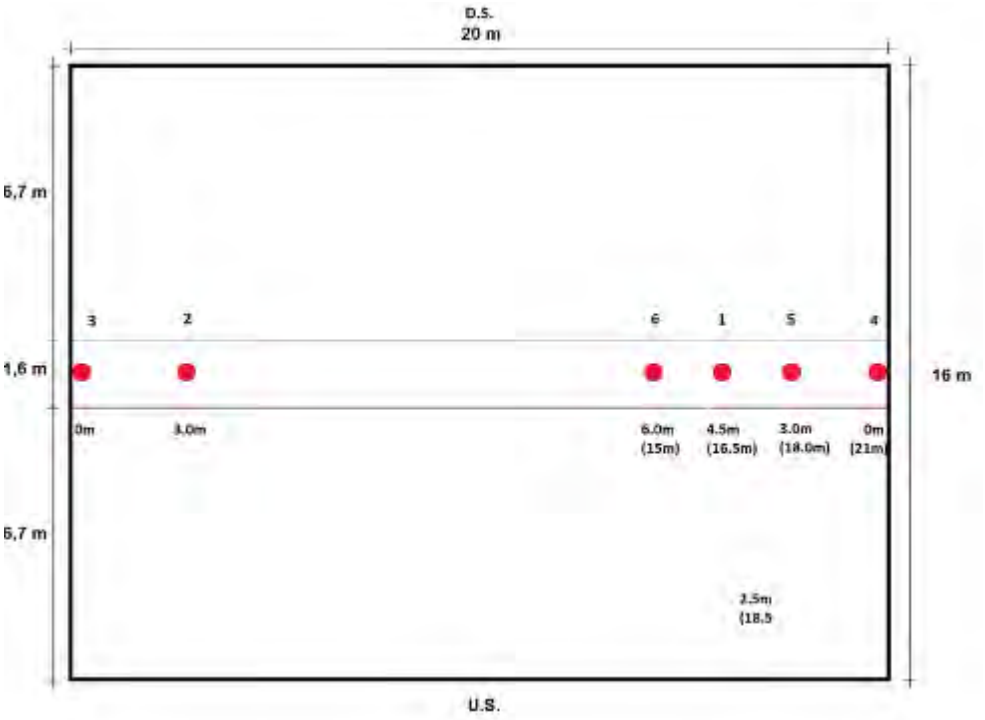
Figur 114. Träkub placerad på pall med överyta på nivå ca 100 cm. Höjd 40 cm.

Figur 115. Träkubens överyta. Bild tagen från NS mot US.

Betongkuben lyftes också bort under dagen och ställdes åt sidan, se Figur 116.

Figur 116. Borttagen betongkub. Hålet i mitten var för att kunna lyfta den. Hålet är genomgående US till NS och var fyllt med löst material.

Till dagens injekteringshål då. Deras placering visas i Figur 49.

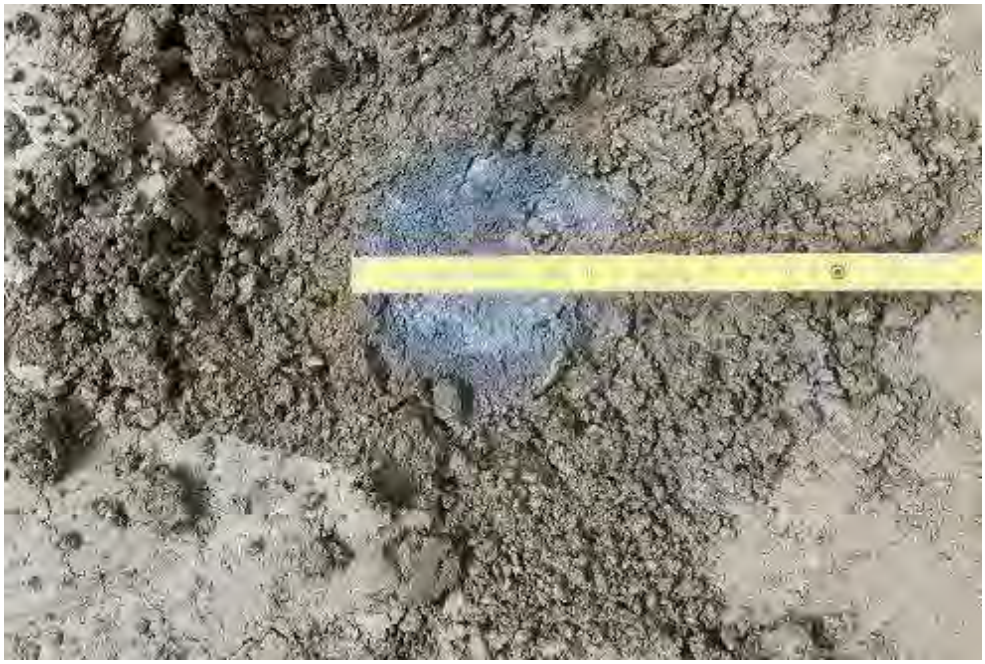


Figur 117. Injekteringshålens placering.

Injekteringshål 1 hade på dagens nivå (140 cm) expanderat till 21 cm (injekteringsröret var ca 11 cm). Detta är nästan en fördubbling sedan gårdagens nivå 30 cm högre upp. Bruket håller fortfarande ihop fint och samarbetar väl med omgivande tätjord. Tätjord runt hål är styvt, se Figur 50.

Figur 118. Injekteringsbruk (grus, sand och kalkfiller) från hål 1 enligt Figur 49.

Injekteringsbruk i hål 2 ser ut som det gjort de senaste nivåerna. Ingen förändring, se Figur 51.



Figur 119. Injekteringsbruk (grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver) från hål 2 enligt Figur 49.

Injekteringsbruk från hål 3 identiskt med gårdagens nivå, se Figur 52

Figur 120. Injekteringshål invid vänster anslutning (hål 3 enligt Figur 49).

Injekteringshål 4, vid höger anslutning, har jag faktiskt bommat att ta bild på idag. Tar denna i morgon. Även den ser ut som igår. Material från dammens krön

uppblandat med lite bruk. Hålet är blött. Injekteringshål 5 visar för första gången upp ett innehåll av injekteringsbruket, se Figur 54. Det mesta av innehållet är dock fortfarande grovkornigt material från dammkrönet.

Figur 121. Injekteringshål 5 enligt Figur 49.

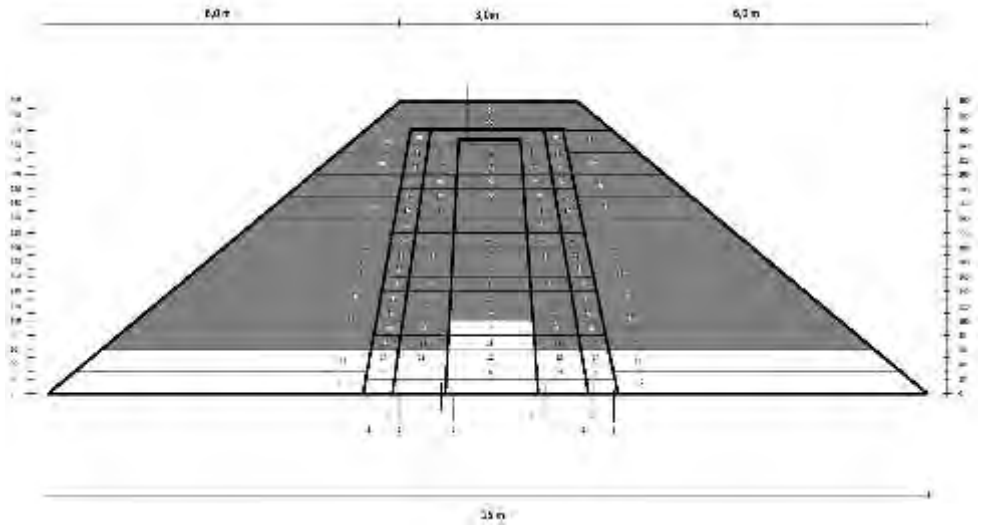
Injekteringshål 6 är nu det enda helt utan tecken på bruk. Detta hål är alltjämt fyllt med löst material från tätjord och inget grovt från dammens krön, se Figur 69.

Figur 122. Injekteringshål 6 enligt Figur 49. Mycket löst tätjordsmaterial uppgrävt ur hål och placerat nedanför i bild.

Till sist, bild på dammen sedd mot vänster anslutning innan hemgång, se Figur 99.

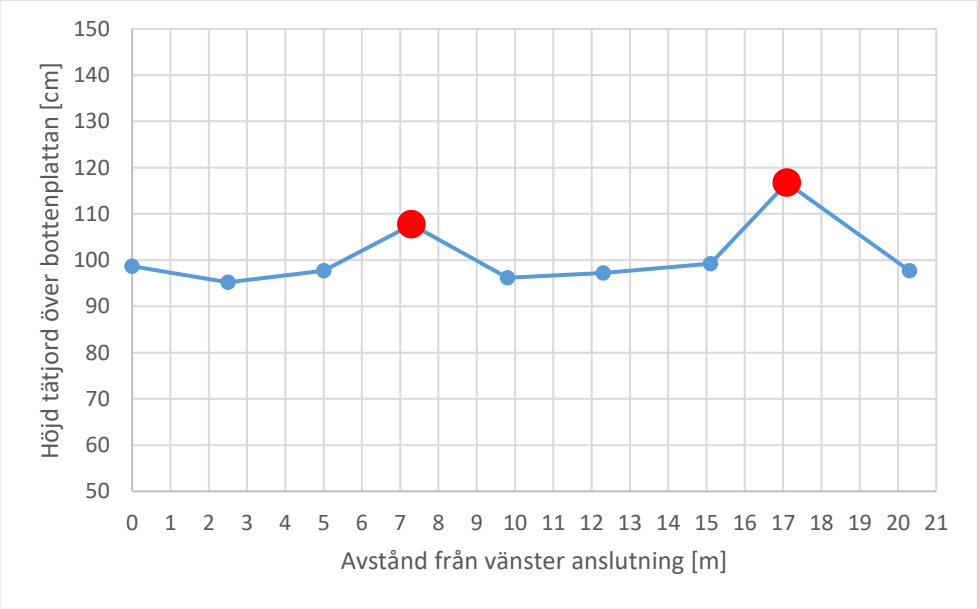
Figur 123. Dammen sedd från höger anslutning mot vänster. Tätjord ÖK är på nivå 140 cm. Stödfyllning, grov- och finfilter på nivå 100 cm.

14.9 26TH OF SEPTEMBER 2024



Figur 124. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Nu när vi kommer allt närmare botten gäller det att vara mer försiktig. Därför fattade vi beslutet att börja ta ner tätjorden 10 cm i taget (4x10 cm = 40 cm) så vi kunde stoppa grävaren om vi upptäckte något av intresse. Injekteringspelarna togs också ner 10 cm i taget. Dagens avvägningsprofil visas i Figur 101.



Figur 125. Avvägning av tätjord. Genomsnittlig nivå 97 cm. Röda punkter indikerar plats där nedtagningen avbröts på grund av att intressanta upptäckter gjordes.

Vid den röda punkten i Figur 101, 17 m från vänster anslutning (strax NS om tätjordens centrumlinje) upptäcktes en liten fläck med finkornig sand, se Figur 126. Jag har noterat dessa fläckar förr men de har aldrig lett till något. Denna gång slog jag stopp i maskin på nivå 120 cm för att återkomma till denna när vi grävt ner övrig tätjord till nivå 100 cm.

Figur 126. Fläck med finkornig sand ca 30cm NS om injekteringshål 5, 17 m från vänster anslutning.

Först tänkte jag bara ta ut finsanden för tvättsiktsanalys som jag gjort på ett flertal ställen tidigare men ju mer jag grävde desto mer lossnade, Figur 127. Skeden övergavs fort och inom kort låg jag på alla fyra och skopade ut sanden med handen.

Figur 127. Hålet grävs ut. Material från hålet ligger i bildens överkant. NS finfilter syns allra högst upp i bilden.

Inom en stund fick jag lägga mig platt på tätjorden för att nå hela vägen ner. Jag kom ner till 60 cm innan jag var tvungen att åka hem för dagen, se Figur 103.

Figur 128. Hålet är nu 60 cm djupt.

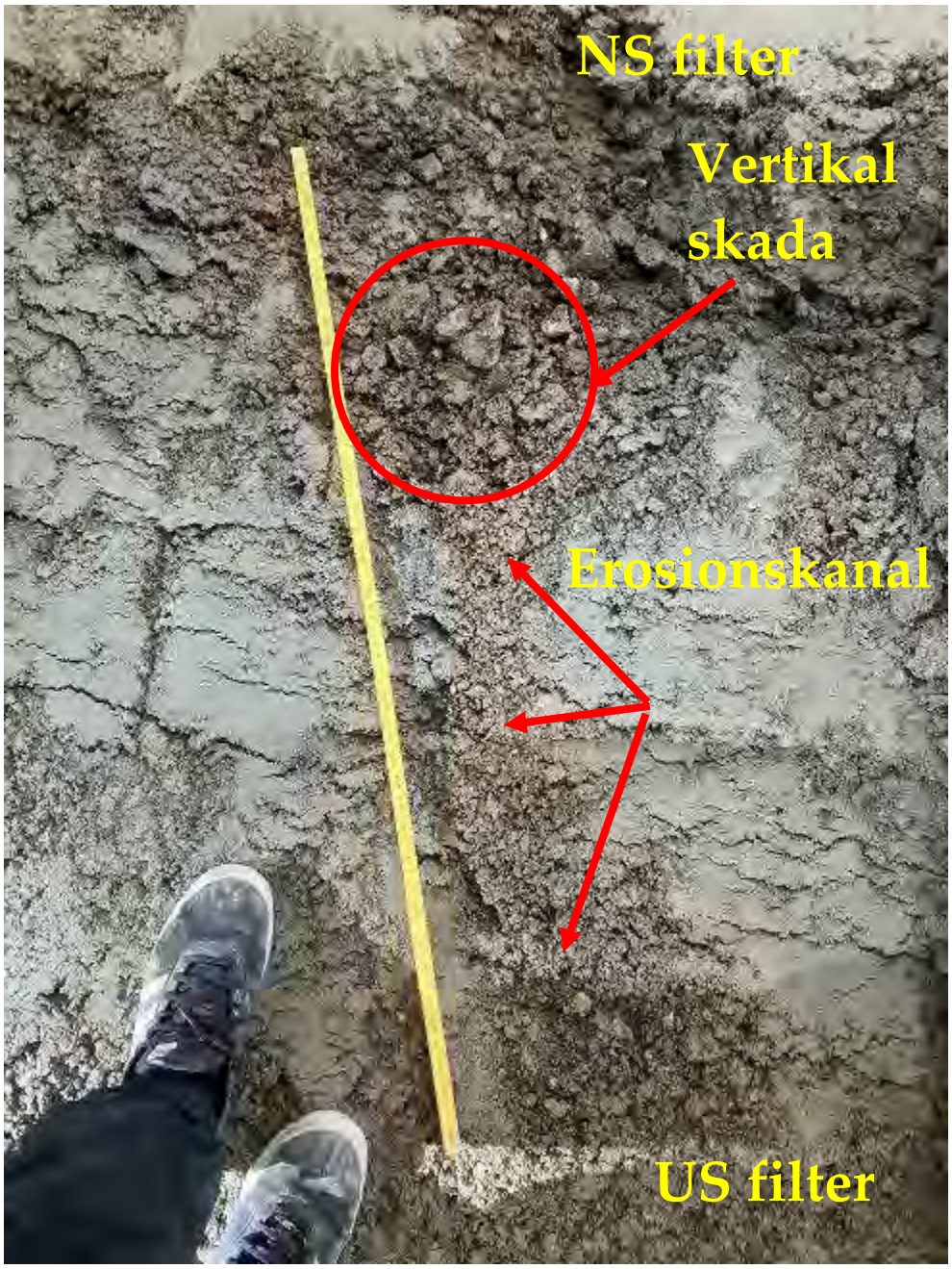
Kan nämna redan nu att jag kommer att fortsätta att gräva under morgondagen tills jag når utloppet på skadan. Detta skulle med största sannolikhet bli ett sjunkhål och jag misstänker att utloppet för skadan ligger vid någon av de fyra töjningskablar som är installerade rakt igenom dammen (US till NS) på 20 cm djup. Vi har även i denna zon haft högre läckage än i övriga icke anslutningsdelar av dammen. Vår misstanke har hela tiden varit att dessa kablar orsakat inre erosion. Vad vi har här är resultatet av fem knappt fem års genomströmning. Kabeln ligger ganska rakt under skadan knappt en meter ner. Skadan dyker med ca 80 grader med en lätt dragning åt höger anslutning. Inne i skadan finns inget annat än sand, se Figur 129. Hålet volym just nu uppskattar jag till ca 10 liter.

Figur 129. Bild inifrån hålet. Bara sand.

Jag håller även på att jobba mig rakt in mot höger anslutning ca 10 cm ner i skadan. I det ”tak” som formas där när jag gräver ut är det siltig sand, se Figur 130. Prover tagna för tvättsiktsanalys.

Figur 130. Siltig sand. Sanden håller ihop och man kan forma den.

I morgon gräver jag ut resten. 7,5 m från vänster anslutning, se Figur 101, fick jag göra nästa stopp. Även här upptäcktes inre erosion som gick mellan den vertikala skadan och US finfilter, se .



Figur 131. Bakåtskridande erosion som utgått från vertikal skada på nivå 110 cm, 10 cm från skadans botten.

Tyvärr får jag hålla er på halster kring denna skada tills i morgon eftersom jag inte hann med den idag. To be continued.

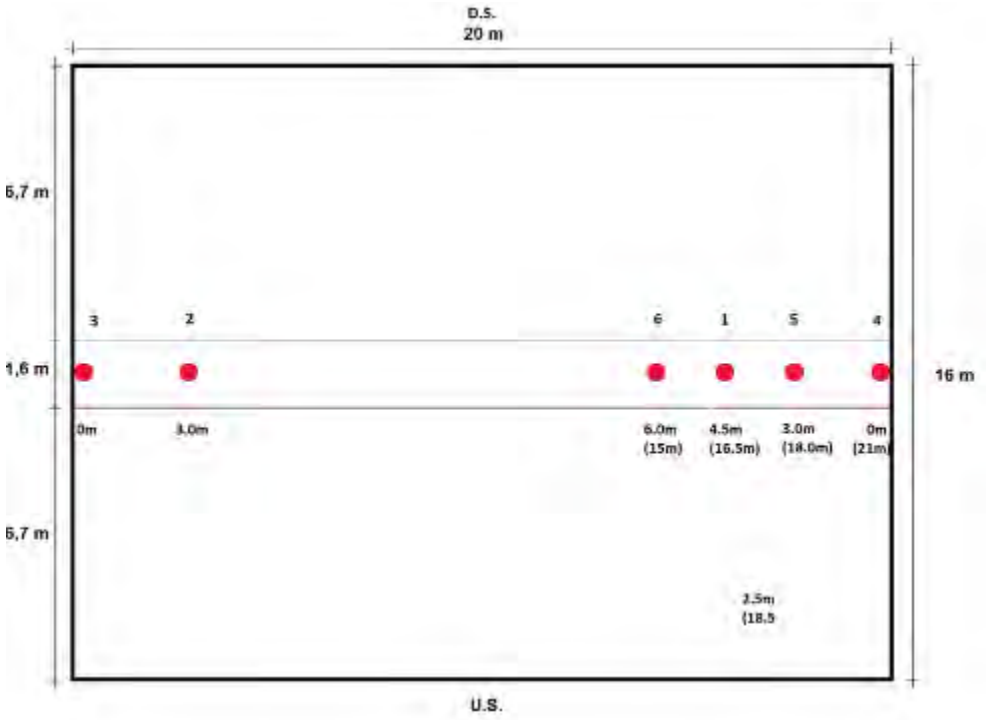
Igår tog vi ut stora provkroppar som ska användas för triaxförsök. Tanken är att kika på skalfaktorn på våra provkroppar där d_{max} är 22 mm men provkropparna är endast 50 mm i diameter. Vi fattade beslutet att ta ut dem idag för att ta vattenkvot i sektioner. Provkropparnas topp är toppen på en pall och undersidan är botten

Figur 132. Uttagen provkropp av en pall med tätjord. Diameter = 100 mm.

Mitt intresse i detta är att sätta siffror på hur egenskaperna i pallen ändras beroende på djupet i den. Jag kan just nu inte komma på en mekanisk testningsmetod för att påvisa eventuella djupberoende skillnader men vi har tagit ner den i fem sektioner för vattenkvotsbestämning samt tvättsiktsanalys för att verifiera att materialet är detsamma i toppen som i botten. Rent visuellt så ser man att moränen i pallen är hårdare, sprödare, torrare i toppen jämfört med dess botten som är mer plastisk, mjuk, se Figur 132. Vi testar detta på två provkroppar. Det här med pallarnas skiftande egenskaper beskriver troligtvis väl varför seismiken var så svår att få till i testdammen vid de geofysiska testerna. Tätjorden är allt annat än homogen.

När vi idag tog ner stödfyllning till nivå 60 cm fick vi en ganska otrevlig överraskning. Tätjorden fortsätter att släppa ifrån sig vatten. Dammen har varit tömd den 19 augusti men när vi började gräva ut dammen den 17 september låg det 90 cm vatten på US sida vilket pumpades ur ner till 15 cm. NS sida var helt torr. Idag, 26 september var det återigen vatten på US sida, se Figur 133. Nivån låg på 67 cm så pumpen fick sättas igång igen för vi kan inte riktigt jobba på US sida om tätjorden när det står vatten där. Ska knacka ut horisontella prover och det får inte bli för ”geggigt”, eftersom det då blir så svårt att få ut prover.

Figur 133. Vatten på US sida, nivå 67 cm.



Figur 134. Injekteringshålens placering.

Samtliga injekteringshål skalas nu ner 10cm i taget vid grävning med maskin. Den kraftiga expansionen av diametern på injekteringsbruk vid injekteringshål 1 fick idag sin förklaring. Strax under gårdagens nivå kom det tappade foderröret upp i ytan. Foderröret skruvades av i samband med att moränen skruvades ut vid injekteringen. Då moränen skruvades ut ur foderrören (3st ihopskarvade ca 120 cm styck) kördes skuven ned till botten (standardförfarande). Här fastnade den sega tätjorden mellan skruven och insidan på foderröret så när vi skruvade oss tillbaka så skruvades hela det nedre foderröret sonika av. När jag sedan injekterade fanns här en liten glipa som bruket plötsligt kunde röra sig ut igenom horisontellt. Gårdagens brukspelardiameter på nivå 140 cm gick direkt från 21 cm diameter till 88 mm som är innermåttet på foderröret, se Figur 12.

Figur 135. Foderrör i dagen

Foderrörer står nu ca 30 cm över nivå 100 cm, se Figur 136, och jag kan inte bärga mig tills jag kommer till dess botten för att se vart bruket tagit vägen där i alls mina olika sex injekteringshål.

Figur 136. Översta 30 cm av foderrör. Bruket är fortfarande i röret.

Injekteringsbruk i hål 2 ser ut som det gjort de senaste nivåerna. Ingen förändring vid någon av de 10 cm höga nedtagningarna, se Figur 51.

Figur 137. Injekteringsbruk (grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver) från hål 2 enligt Figur 49. Nivå 100 cm.

Injekteringsbruk från hål 3 identiskt med gårdagens nivå, se Figur 52.

Figur 138. Injekteringshål invid vänster anslutning (hål 3 enligt Figur 49). Nivå 100 cm

Injekteringshål 4, vid höger anslutning, var även det identiskt med igår.

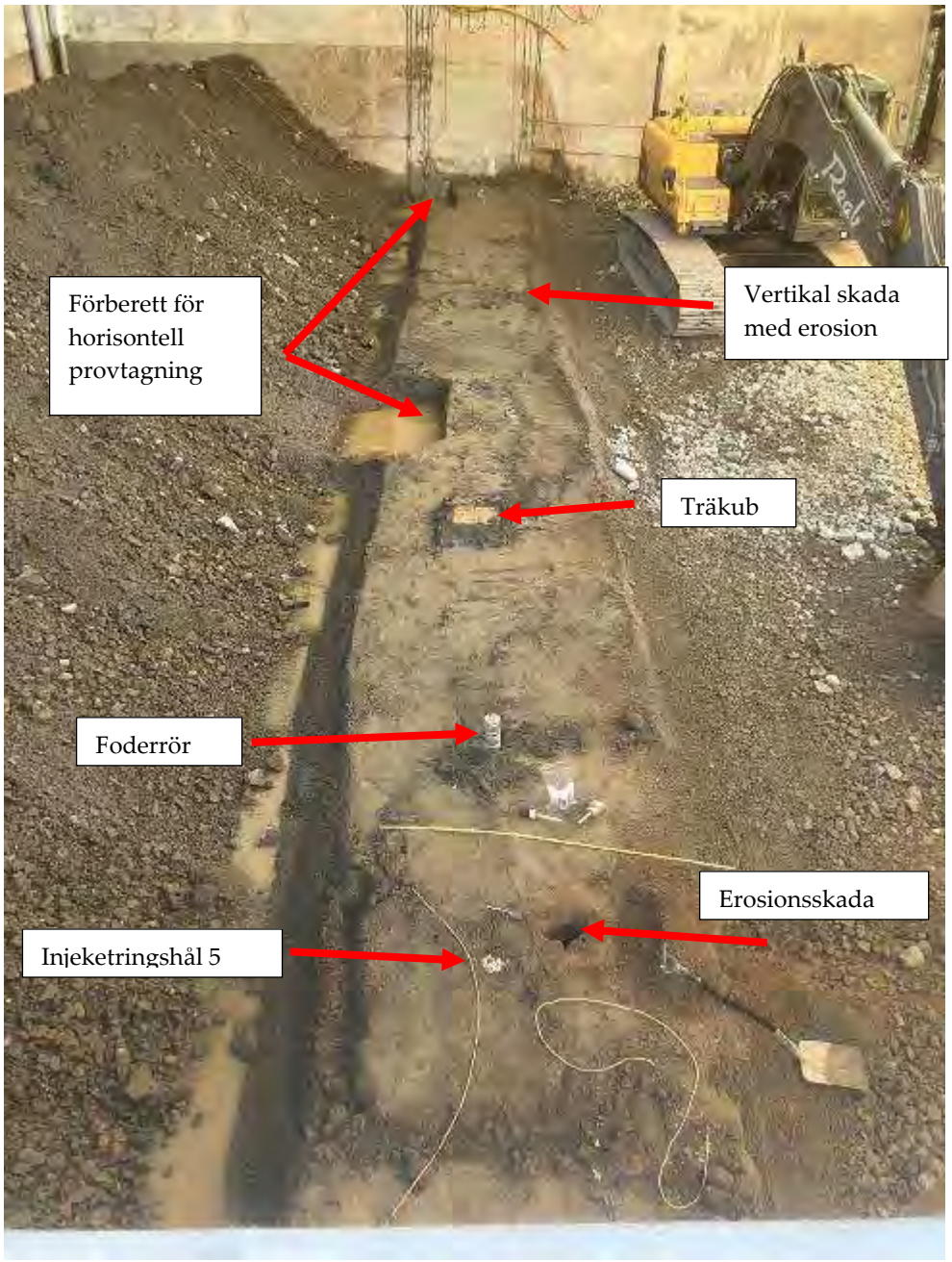
Figur 139. Injekteringshål invid höger anslutning (hål 4 enligt Figur 49). Nivå 100 cm

Injekteringshål 5, som igår visade spår av injekteringsbruk var välfyllt efter den första borttagningen av 10 cm, se Figur 54. Efter ytterligare 10 cm slog jag stopp på nedgrävning på grund av sandfläcken som upptäckes och avhandlades först i denna rapport. e visar för första gången upp ett innehåll av injekteringsbruket, se Figur 54. Det mesta av innehållet är dock fortfarande grovkornigt material från dammkrönet.

Figur 140. Injekteringshål 5 enligt Figur 49. Nivå 130 cm.

Injekteringshål 6 är fortfarande tomt på bruk, endast fyllt med löst material från tätjord och inget grovt från dammens krön.

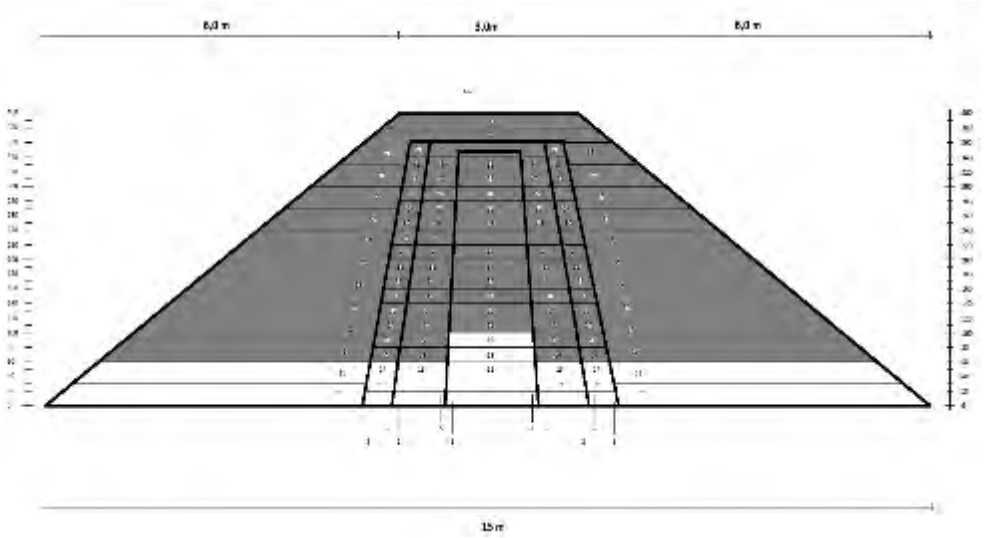
Till sist, bild på dammen sedd mot vänster anslutning innan hemgång, se Figur 99.



Figur 141. Dammen sedd från höger anslutning mot vänster. Tätjord ÖK är på nivå 100 cm. Stödfyllning, grov- och finfilter på nivå 60 cm.

Vi fortsätter med nuvarande nivå under morgondagen. Ingen nerdrivning förrän på måndag. 40 st små provkroppar (50 mm) ska tas ut och 10 stora (100 mm). Erosionsskadorna ska grävas ut.

14.10 27TH OF SEPTEMBER 2024



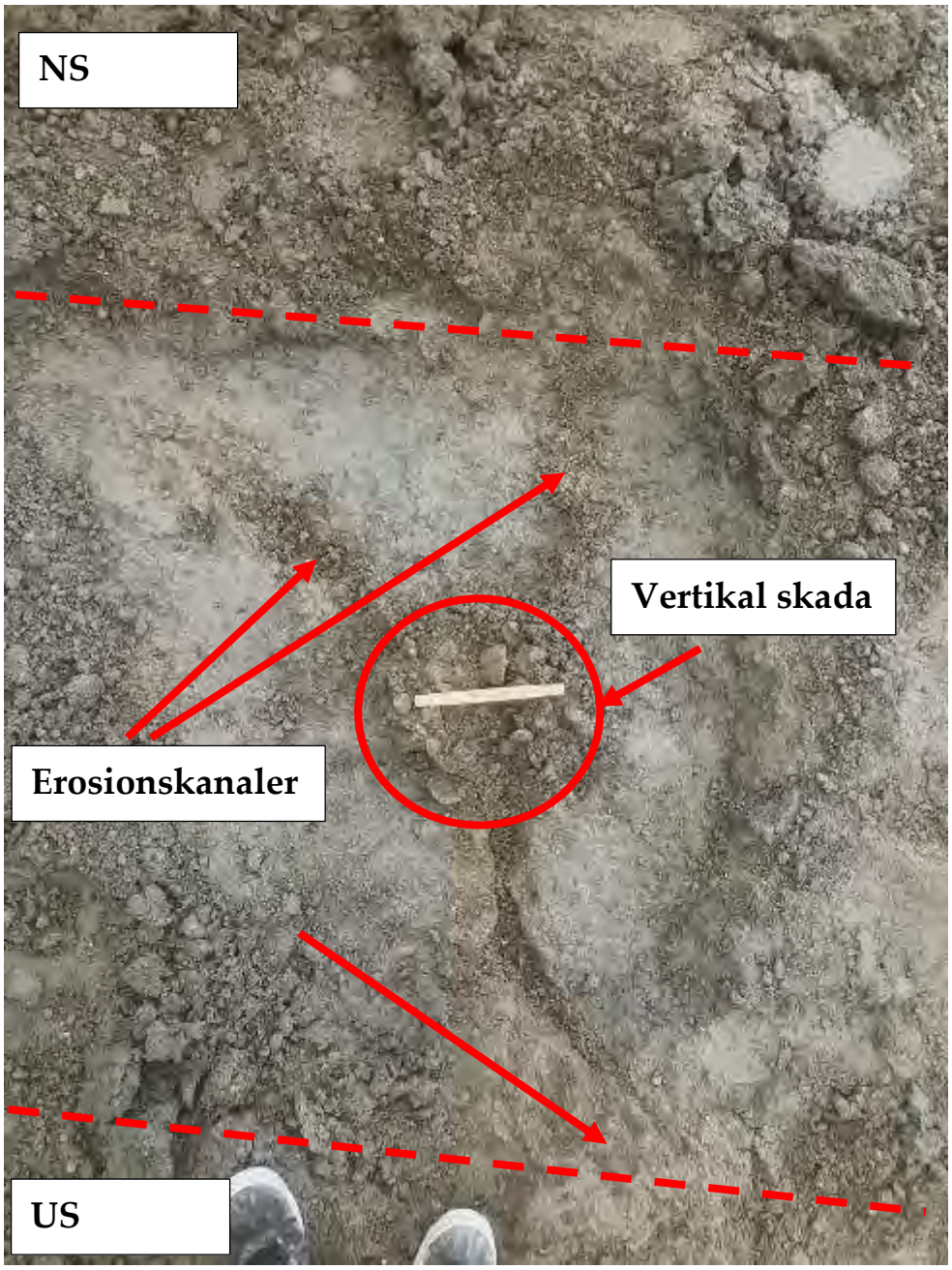
Figur 142. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Inge nerdrivning av dammen idag. Det fanns alldeles för mycket att titta på. Det har exploderat av småskador orsakade av inre erosion på denna nivå, ca 100 cm.

Vid den vertikala skadan 7,5m från vänster anslutning börjar vi nu närma oss botten. Vi är en pall från botten och botten på vertikal skada ligger på samma pall som botten på träkuben så där är ett bra riktmärke. Vi noterar att i botten på vertikal skada börjar det bli en ökning av finkornigt material (ler) men bara på dess NS sida. I anslutning till den vertikala skadan mot botten till hittade vi erosionsskador som gått rakt igenom tätjorden, se Figur 143 - Figur 145.

Figur 143. Vertikal skada nivå 110 cm. Fotot taget från NS sida mot US.

Figur 144. Vertikal skada nivå 110 cm. Fotot taget från US sida mot NS.



Figur 145. Vertikal skada nivå 100 cm. Fotot tagit över skadan. US uppåt i bild.

De urgrävda kanalerna på Figur 143 - Figur 144 bestod av grovsand och fingrus. Prov för tvättsiksanalys taget. Erosionskanalen hade tagit sig US in i US finfilter. På Figur 145 frilades jorden ner till 100 cm och där upptäcktes att erosionen även tagit sig NS in i NS finfilter. Detta innebar att det här utvecklats en skada kring den installerade vertikala skadan som skar igenom hela tätjorden. Kan inte minnas att vi hade ökade läckage i denna zon enligt våra flödesmätningar men ska dubbelkolla. Till slutrapporten har jag gjort denna analys.

På nivå 100 cm hittades även två mindre skador 12,2 (Figur 146) och 13,9 m (Figur 147) från vänster anslutning. För skada 12,2 m från vänster anslutning var som om att finfiltermaterial ”tryckts” in i pallskiftet och sedan, på US sida om skadan börjat

jobba sig nedåt i tätjorden. Skadan 13,9 från vänster anslutning var mer lokal men djupare. Utgrävning av dessa två skador påbörjades under fredagen och kommer att slutföras på måndag.

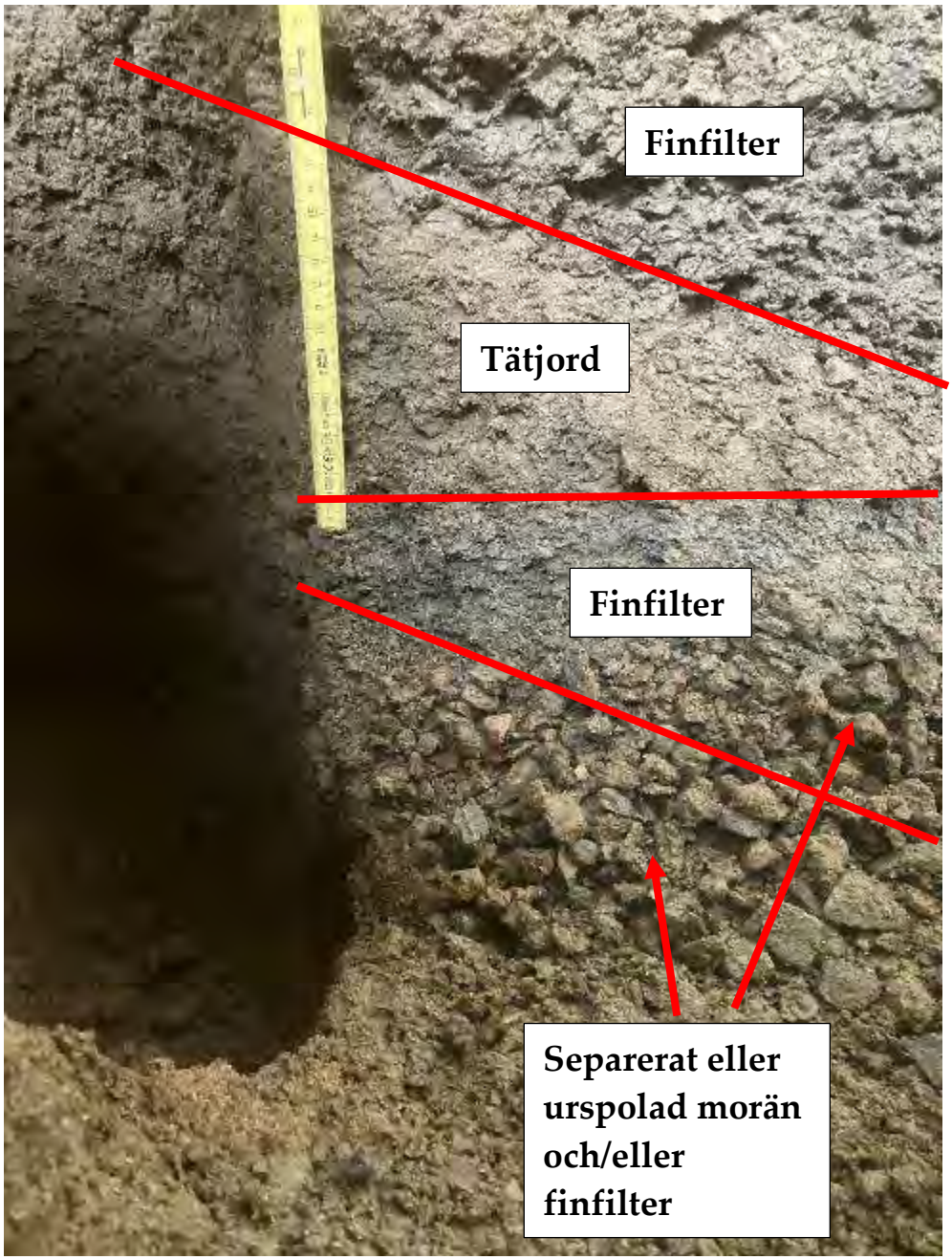
Figur 146. Mindre erosionsskada på nivå 100 cm 12,2 m från vänster anslutning. Fotot taget US mot NS.

Figur 147. Mindre erosionsskada på nivå 100 cm 13,9 m från vänster anslutning. Fotot taget US mot NS.

Den stora skadan som vi fann under gårdagen fortsatte vi att gräva ut under dagen. Botten på denna skada är nu på nivå 20 cm och vi är mycket nära de genomgående töjningskablarna. Nere på denna nivå fanns det vatten. Här finns det mycket kvar att gräva ut vilket vi gör på måndag. Skadan ligger även mycket nära NS portrycksgivare vilket kan förklara varför det uppmätts lägre tryck här än vad som förväntats. Detta hål (som varit fyllt med sand) har fungerat som ett dränage och därmed sänkt vattentrycket.

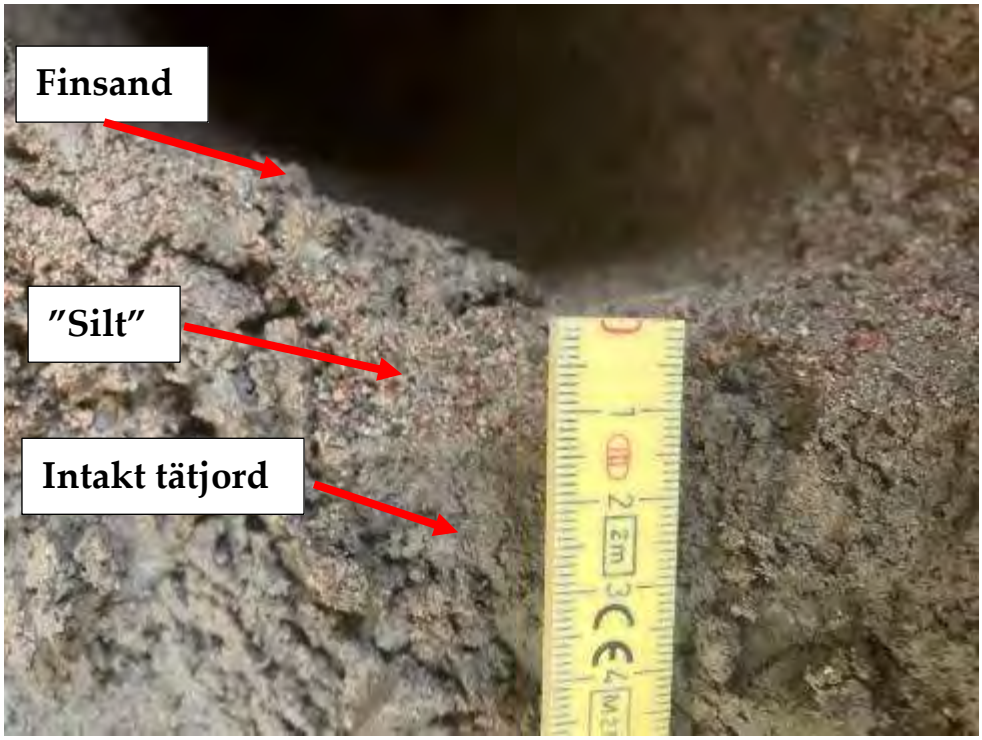
Figur 148. Stora skadan 17,7 m från vänster anslutning.

Skadan har även gått in i finfiltret och kan sägas löpa parallellt med det, Figur 149. Skadan har gått in i julgranen mellan tätjord och NS finfilter. Det finns dock inga tecken på större vattenströmningar just här. Troligtvis har vatten dränerats ut genom skadans botten och inte i dess NS framkant.



Figur 149. Skadan har gått in i julgranen. På sina ställen är det svårt att avgöra vad som är tätjord och vad som är finfilter. Kan inte se att vatten gått igenom. Troligtvis har hålet ”dränerat för bra”.

Apropå hålets fyllning så har det varit mycket finkornig sand och silt i toppen av det. Ju längre ner vi grävt så har materialet blivit grövre. Det har nästan uppstått en perfekt sortering med djupet. Nu är känslan inte så vetenskaplig, prover för kornfördelningar är tagna på olika nivåer. Invid skadans väggar är det mycket fin sand eller silt, se Figur 150

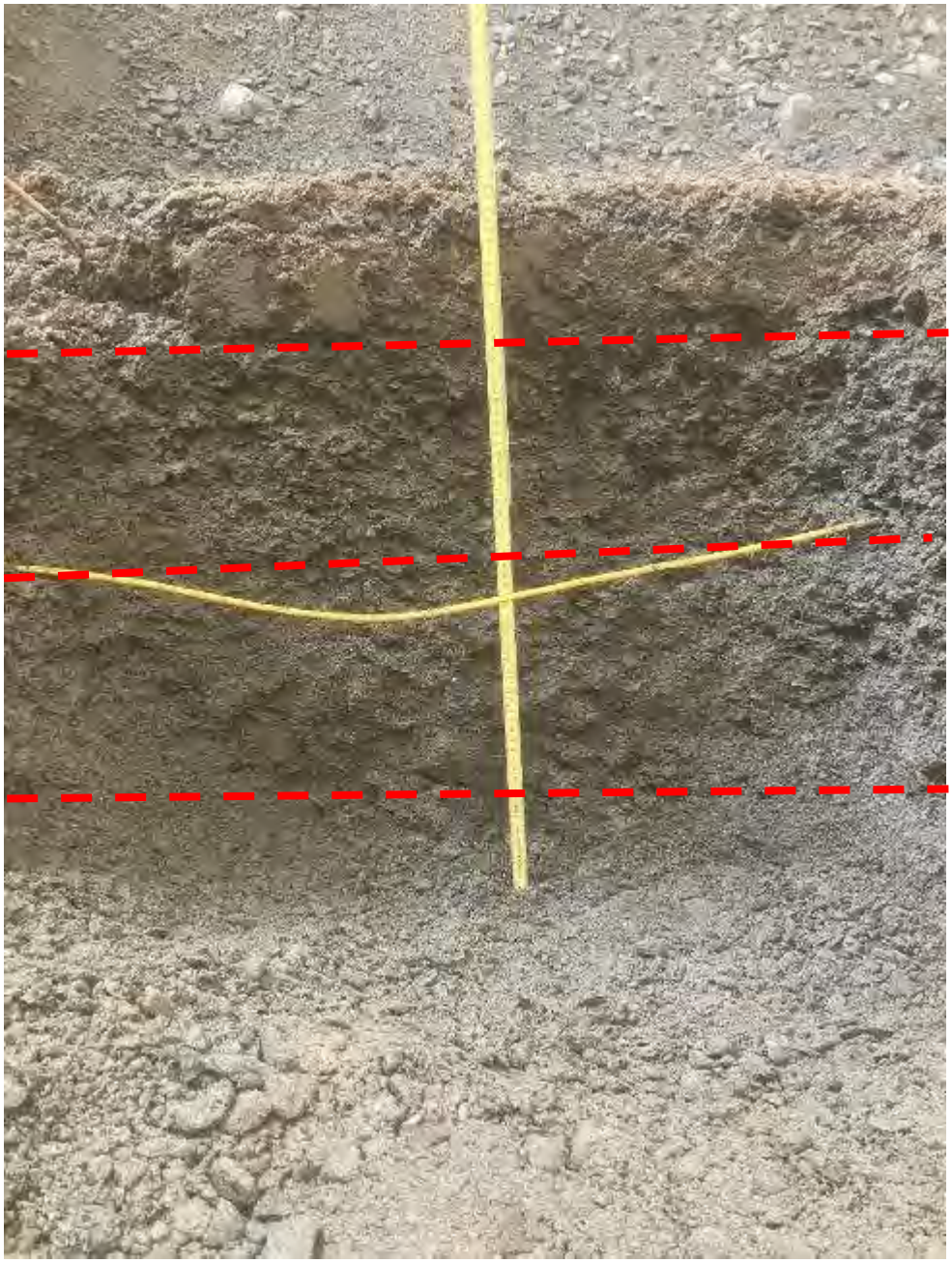


Figur 150. Övergång mellan intakt tätjord och skadan.

Just nu kan jag inte riktigt förstå denna uppdelning. Är sanden enbart en produkt från erosion av moränen? Varför finns det inga grövre fraktioner i toppen utan enbart i skadans botten? Jag har många frågor att fundera på.

Vi lyckades även frilägga en temperaturkabel som låg precis NS skadan. Vid dess markering 477 m lyckades vi få fram en referensmätning att jämföra med då dammen byggdes. Vi har några sådana mätningar. Dessa kommer att bli viktiga punkter att jämföra då vi ska utvärdera dammens sättningsbeteende.

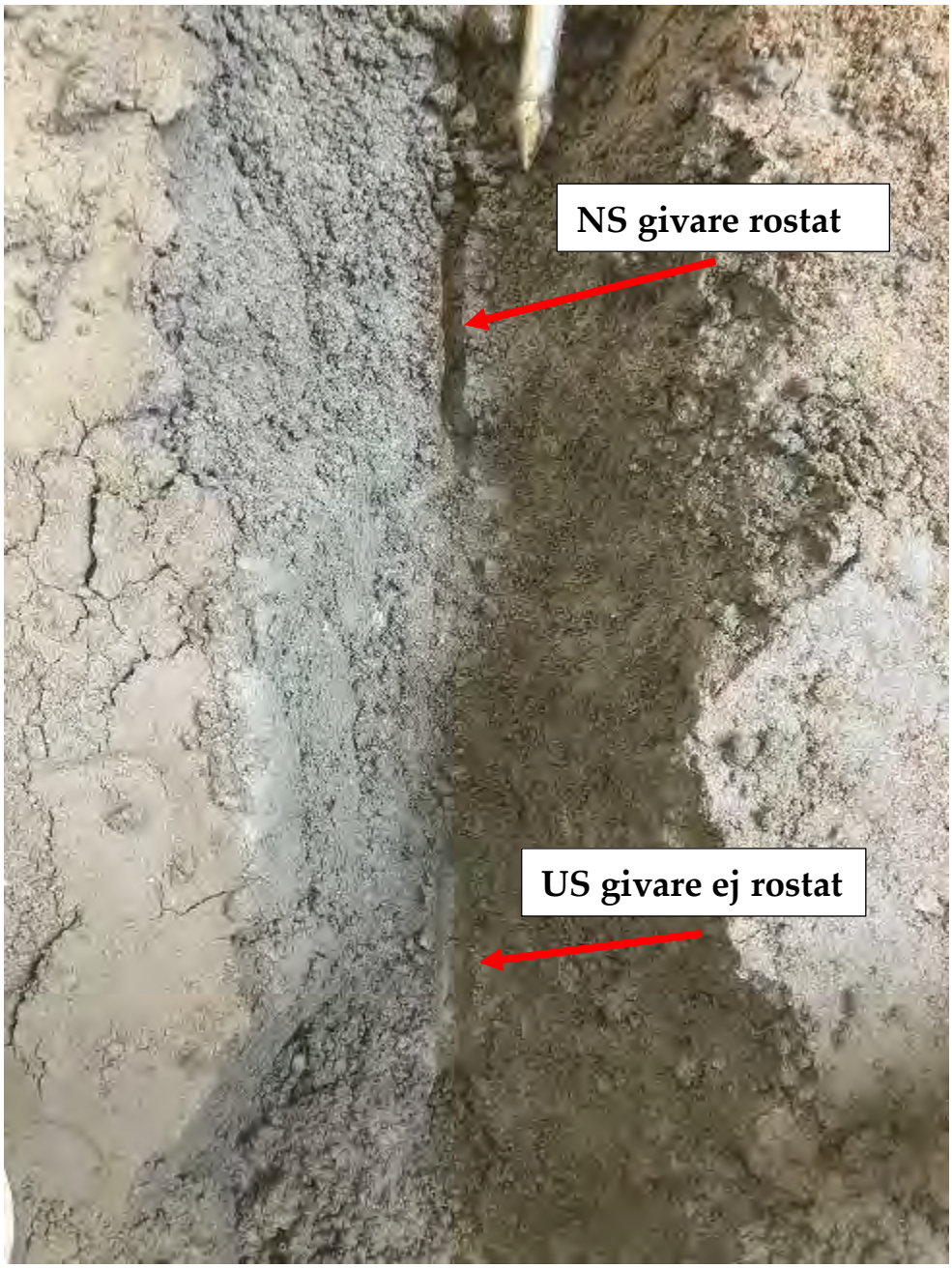
Figur 151. NS temperaturkabel på nivå 80 cm (innan jag började gräva ner skadan på des NS sida, dvs mellan kabel och skadan). Markering 477 m på kabel inringat



Figur 152. NS skadan. Pallskiften markerade med röda, streckade linjer.

Portrycksmätare på nivå 100 cm grävdes fram och mättes in, Figur 153. En intressant observation var att mätare NS hade rostat medan mätare US inte hade rostat, se Figur 154.

Figur 153. Portrycksmätare i tätjord nivå 100 cm. Notera den stora skadan i bildens övre högra hörn. Tätjordsmaterialet kring portrycksgivarna var mjukt och lätt att gräva i.



Figur 154. Bild på portrycksgivare efter borttagning. NS portrycksgivare efterlämnar en rostig färg i tätjorden.

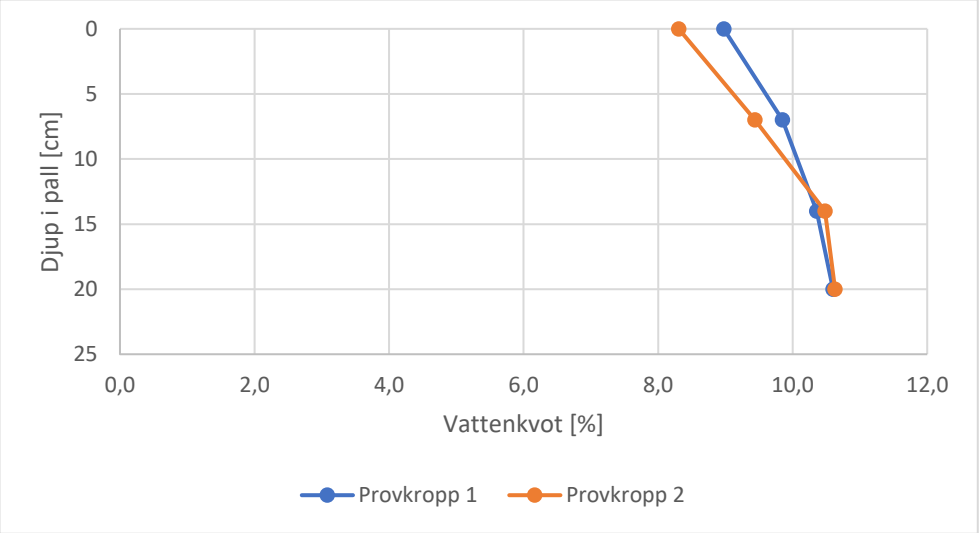
På nivå 180 cm hade båda givarna rostat och på nivå 280 cm hade ingen rostat. Portrycksmätarnas inmätning är nog de ”bästa” punkterna för att avgöra sättningarna i tätjorden då de ligger ovanför varandra på fyra olika nivåer, noggrant inmätta då dammen byggdes.

På dagens nivå tog vi även ut 20 vertikala provkroppar samt 20 horisontella. Vertikala provkroppar togs både vid vänster anslutning och centralt i dammen i tätjordens US respektive NS sida. Som komplement togs även 10 st stora vertikala provkroppar ut (diameter 100 mm, längd 250 mm), se Figur 155. Dessa ska användas för att undersöka skalfaktorn vid triaxtestningen eftersom d_{max} i tätjord egentligen är för grov för att prover ska kunna tas med 50 mm provrör. På så vis kommer vi

kunna avgöra hur väl vi kan relatera till våra resultat, uppmätta på 50 mm provkroppar.

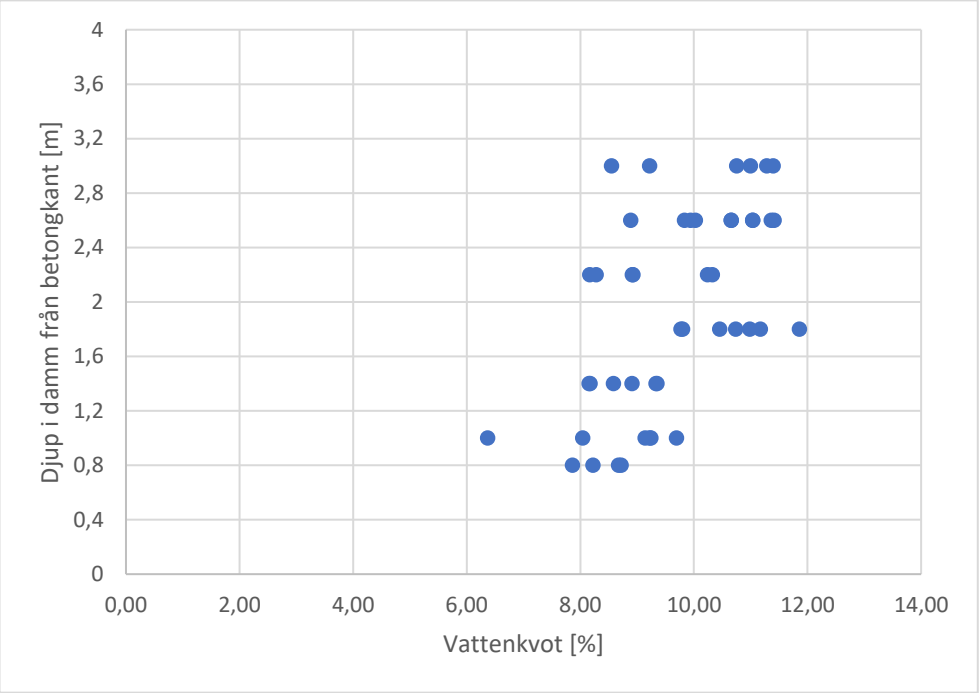
Figur 155. Provtagning vid vänster anslutning, horisontella prover. 50 mm prover uttagna, 100 mm prover nerslagna

Apropå stora provkroppar har vi nu fått ut vattenkvoter ur dessa sett till djupet i pallen. Vattenkvoten ökar med djupet på pallen, se Figur 156. Ska ta ytterligare prover längre ned



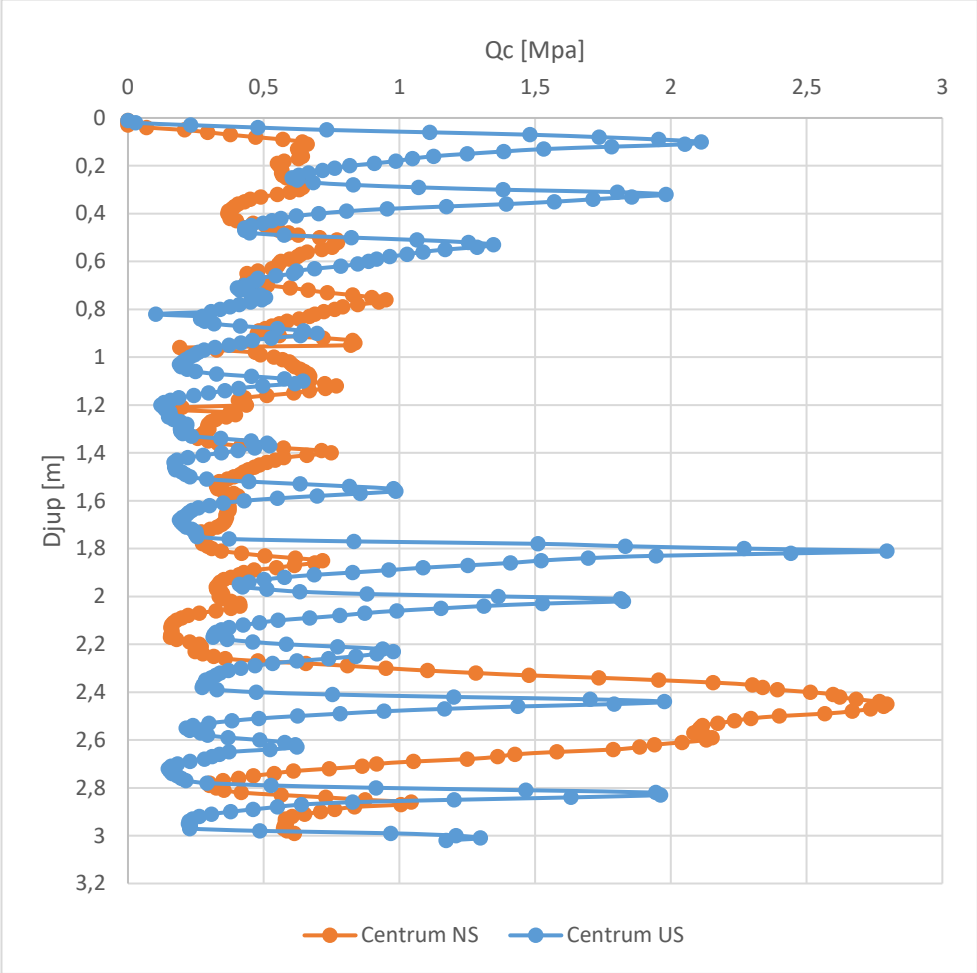
Figur 156. Vattenkvotens variation i provkropp med avseende på djupet. Prover tagna på djup 140 cm.

Den ökade vattenkvoten med djupet är en delförklaring varför tätjorden är mjukare längre ned i pallen. Som jämförelse presenteras mätta vattenkvoter som vi fått ut vid densitetsmätningarna, 6 mätningar på varje 40 cm nerdrivning, se Figur 157.



Figur 157. Vattenkvotens variation i tätjorden med avseende på djup. Notera att mätningar vid anslutningar US och NS samt centralt US och NS är blandat. Uppdelning görs i slutrapport.

Vattenkvoten ökar inte bara med djupet i varje pall utan även för djupet med hela tätjordsprofilen även om ökningen i vattenkvot verkar avta med djupet. Variationerna i vattenkvot på varje nivå är betydande och bör ha att göra med att när vi gräver ner tätjorden så hanar vi lite ojämnt i pallarna. Hamnar vi högre upp i pall blir det torrare (hårdare) och djupare blötare (mjukare). CPT sonderingarna innan utgrävningen bekräftar också detta, se Figur 158.



Figur 158. Uppmätta spetstryck under CPT sondering innan utgrävning av damm. Reservoar full. Notera att sondering påbörjades på tätjordens överkant, dvs 0,8 m djup.

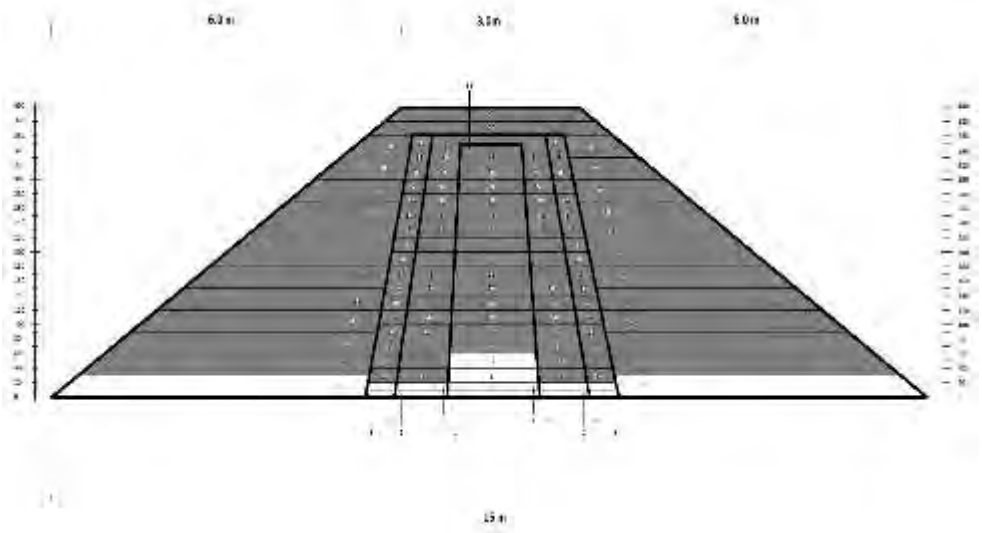
Notera hur avståndet i djupet mellan två toppar eller två dalar är i det närmaste identiskt med tjockleken på varje pall under bygget, ca 20 cm.

Kornfördelning ska göras på varje nivå i provet för att avgöra om kornfördelning ligger bakom den ändrade vattenkvoten. Jag tror att packningen ligger bakom allt. Vår morän var ”för blöt” när vi byggde dammen. Kunde inte alls packas så mycket jag önskade eftersom den efter ett tag började bli mjukare efter att initialt blivit hårdare. Detta ledde troligtvis till sämre packning djupare ner i pallen med ökade portal som följd. Denna ökade mängd porer kan ha orsakat att mer vatten bundits av jorden djupare ner varför den blivit mjukare. Notera att jag just nu teoretiserar. Dammen är otroligt komplex och inga faktorer kan isoleras. Däremot kan vi hitta saker att titta vidare på och bevisa i vidare försök av mindre komplex uppställning med möjlighet att isolera enskilda faktorer. När röken lagt sig kommer jag att vilja arrangera en workshop angående utgrävningen och dess fynd för att kunna plocka ut saker att detaljstudera. Kommer finnas hur mycket som helst.

Prover togs även horisontellt. 5st i pallskiftet och 5st mitt i pallen, både centralt och vid vänster anslutning men bara på US sida, 20 totalt.

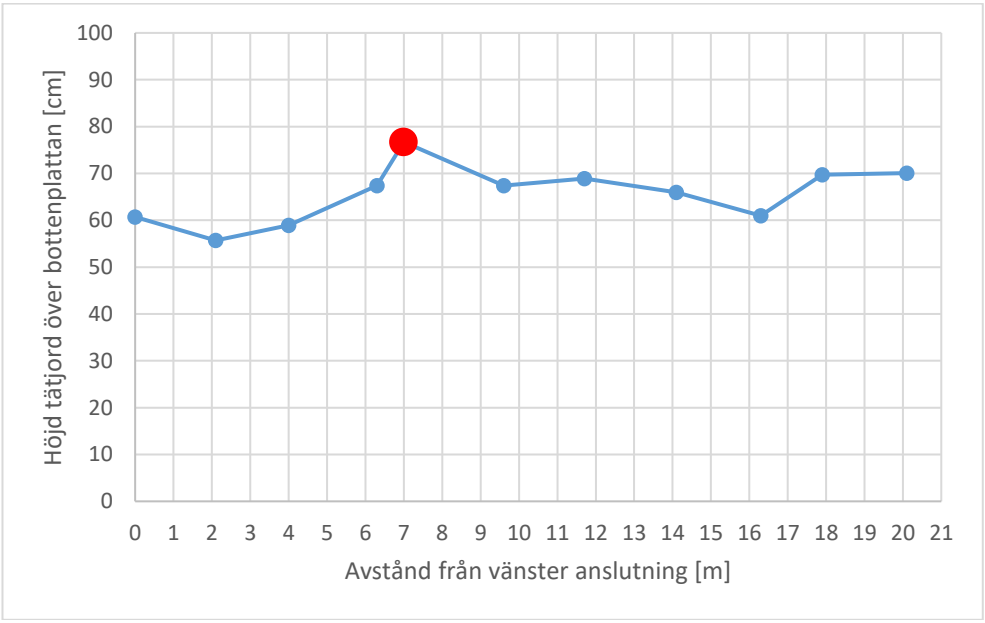
I morgon gräver vi vidare. Får se vad vi hittar då.

14.11 30TH OF SEPTEMBER 2024



Figur 159. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Inte mycket kvar nu. Yta på tätjord ojämn på grund av att om vi ser något misstänkt så gräver vi inte djupare. Dagens avvägningsprofil visas i Figur 101.



Figur 160. Avvägning av tätjord. Genomsnittlig nivå 65 cm. Röda punkt indikerar plats för vertikal skada (högsta punkten.

Det är riktigt mjukt nu. Vi är långt ner och reservoaren, den oväntade, tömdes bara för någon dag sedan. När vi går på tätjorden så sjunker skorna ner rejält, se Figur 161

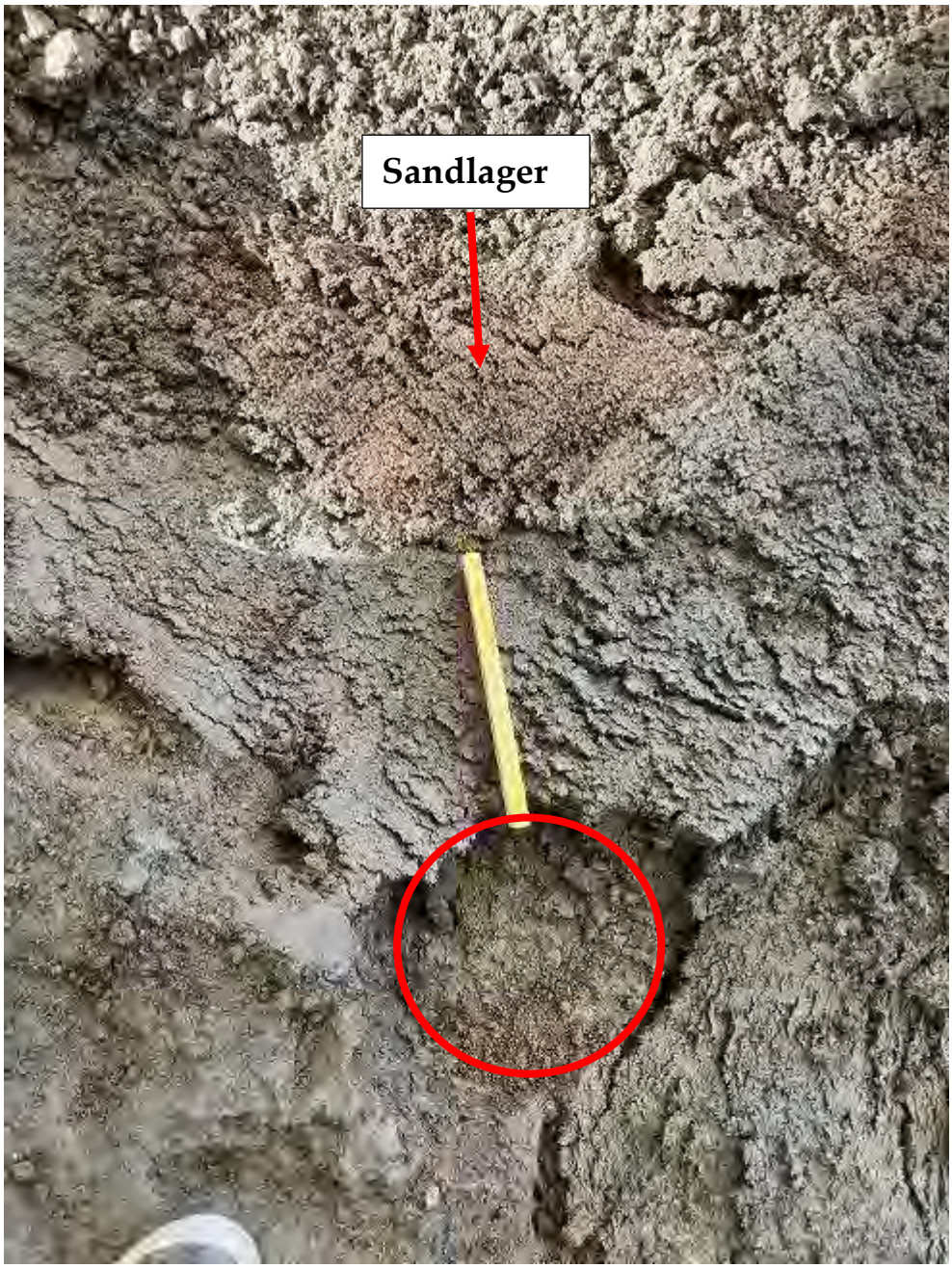
Figur 161. Mjuk tätjord på nivå 70 cm i dammens centrum.

I dag slutförde vi utgrävningen av den vertikala skadan. Vi är nu i dess botten. Vi har tagit ur material för tvättsiktsanalys. Materialet har en del ler i sig. Stor skillnad mot högre upp i skadan. Erosionen som utgått från botten på den vertikala skadan grävdes ur och var helt genomgående, dvs gick mellan NS till US finfilter, se Figur 162 och Figur 163.

Figur 162. Botten på vertikal skada med erosionskanaler. US är nedåt i bild. Erosionskanalen går in i US finfilter och är ca 20 cm djup, fylld med sand och fingrus.

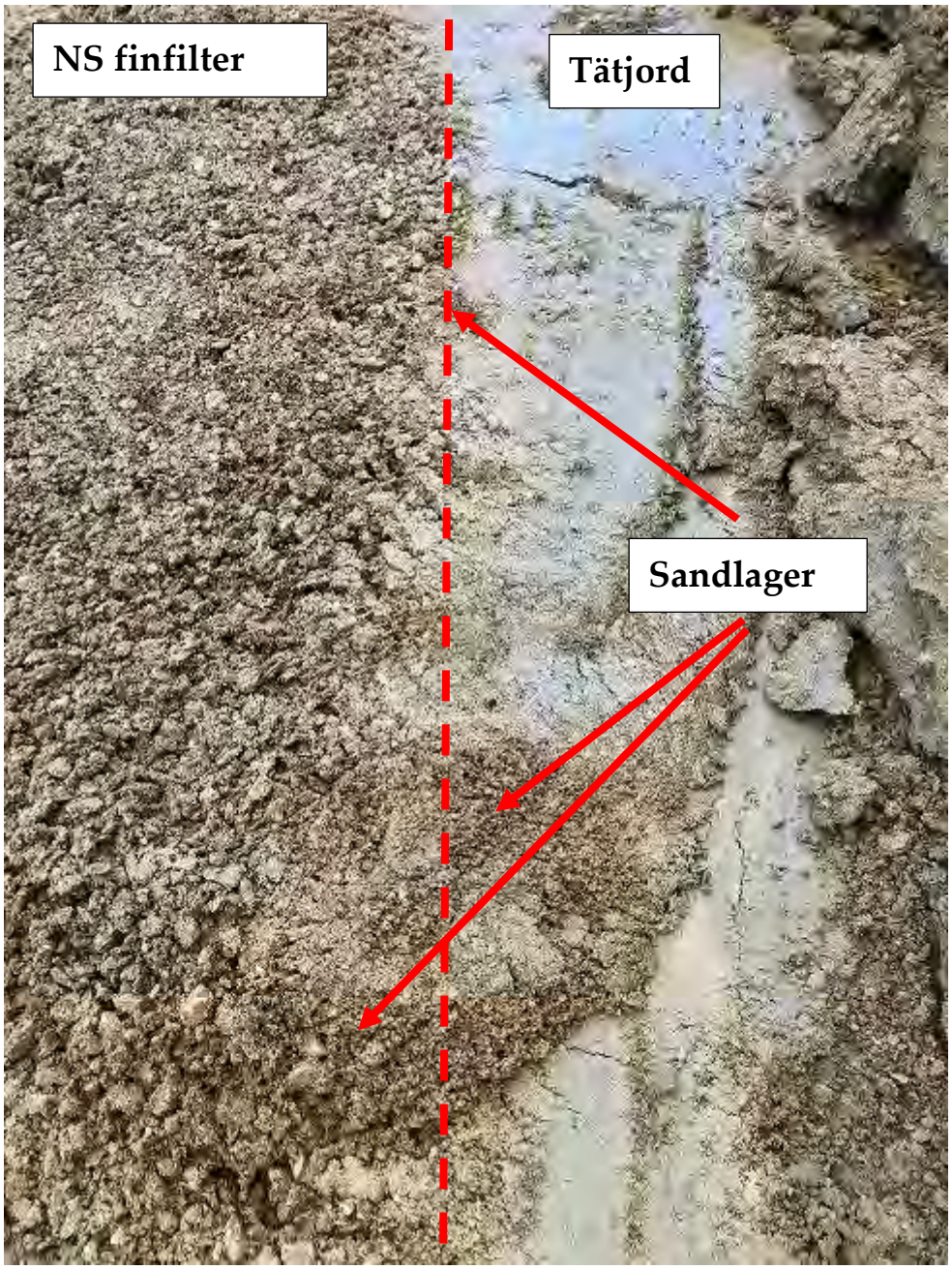
Figur 163. Botten på vertikal skada (överst i bild) med erosionskanaler. NS är nedåt i bild. Erosionskanalen går in i NS finfilter med en meanderform.

När vi grävde ur denna med grävaren ytterligare 20 cm avbröt vi eftersom det kom fram mer misstänkta erosionsskador, se Figur 164.



Figur 164. Botten på vertikal skada. NS skadan (uppåt i bild) upptäcktes ett nytt sandlager som sak undersökas i morgon.

Dessa sandlager har från och med 100 cm nivån formligen exploderat i förekomst. En generell uppfattning är att NS finfilter vid utgrävning ofta har en zon med detta sandmaterial, mellan NS finfilter och tätjorden, se Figur 165.



Figur 165. Sandlager uppstår ofta mellan NS finfilter och tätjord från nivå 100 cm och under.

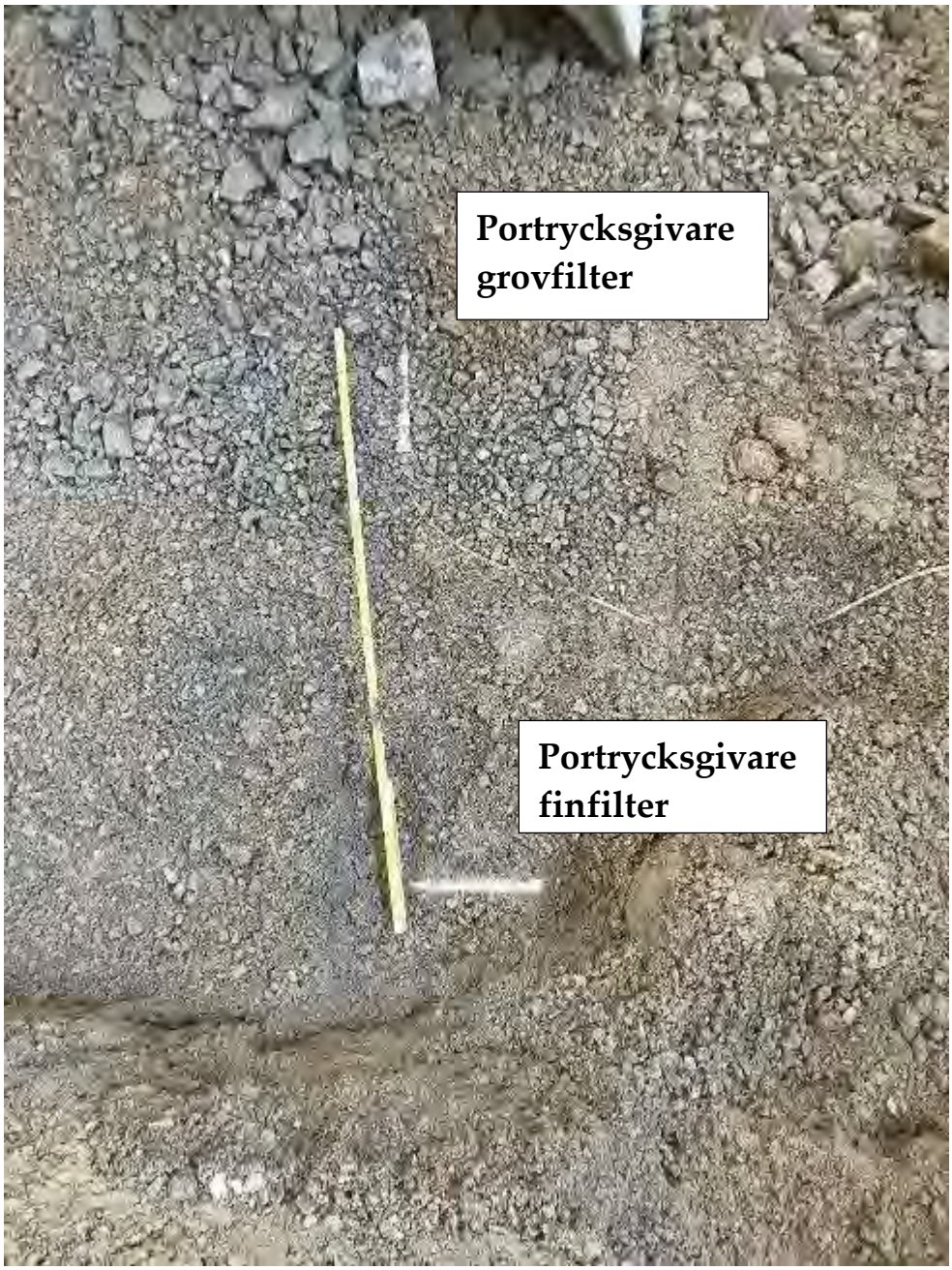
Ca 4,5 m från vänster anslutning upptäcktes ett misstänkt sandlager som utvecklats mitt i pallskiftet på nivå 90 cm, se Figur 166.

Figur 166. Sandlager som går genom tätjorden från NS till US. Sanden syns lite överallt i bild.

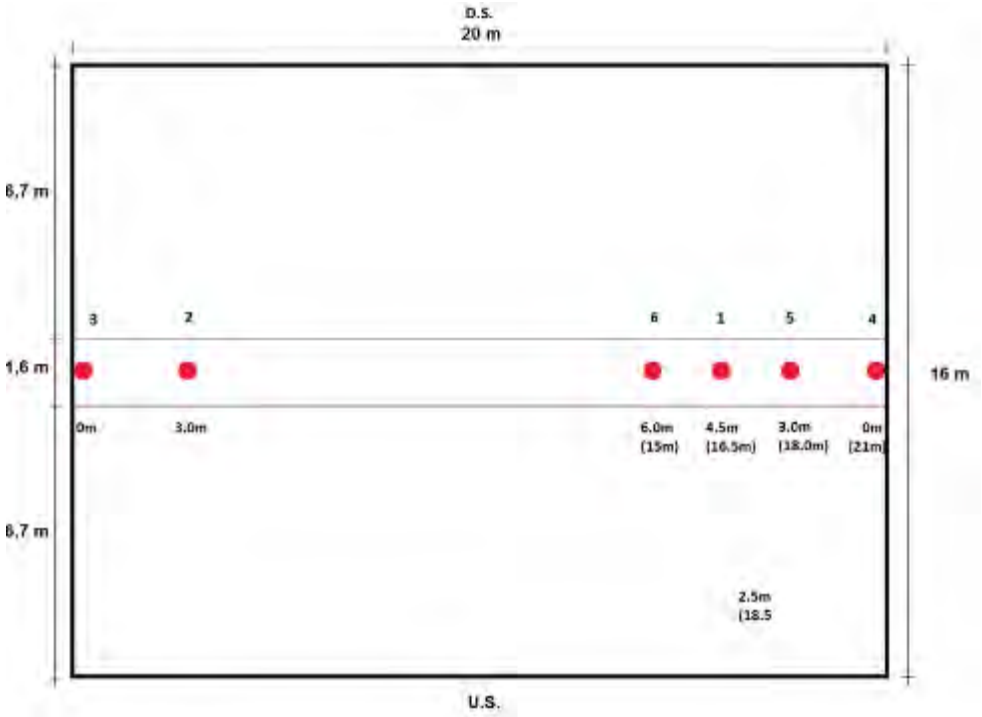
Den stora skadan har nu skrapats ut till en nivå som är några cm ovanför bottenplattan, se Figur 167. I botten börjar skadan vika av mot US sida ca 45 grader in mot mitten på dammen. Materialet nere i hålet är mycket löst. Utgrävning fortsätter under morgondagen.

Figur 167. Stora skadan 2,4 m från höger anslutning. Bild tagen från NS finfilter mot US

Jasminas portrycksgivare på nivå 40 cm hittades också under dagen. Inmätning sker i morgon. Vidare skall även portrycksgivare i tätjord på nivå 40 cm friläggas. Förhoppningsvis får NS portrycksgivare i tätjorden sin förklaring till att den gett lägre värden än förväntat. Denna portrycksgivare kommer att sitta mycket nära den stora skadan.



Figur 168. Portrycksgivare på nivå 40 cm på NS sida om tätjord.



Figur 169. Injekteringshålens placering.

Injekteringshål 1 kommer ett tag att vara det tråkigaste av alla hål eftersom inget händer. Bruket ligger inuti foderröret och vi har några dm kvar till dess botten. Fram till dess lär jag inte se något, se Figur 136. Injekteringsbruket har stelnat i toppen av foderröret på samma sätt som när en lera torkar (torrskorpekaraktär).

Figur 170.Foderrör i tätjord vid injekteringshål 1 enligt Figur 49. Bruket är fortfarande i röret. NS uppåt i bild.

Injekteringsbruk i hål 2 hade en viss förändring i form på nivå 90, se Figur 51. Vid närmare inspektion såg man att just på denna nivå inträffade ett pallskifte så injekteringsbruket hade trängt in några cm mot US till.

Figur 171. Injekteringsbruk (grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver) från hål 2 enligt Figur 49. Nivå 90 cm. NS uppåt i bild.

På efterföljande 10 cm nertagningar så såg injekteringsbruket ut som tidigare, se Figur 172.

Figur 172. Injekteringsbruk (grus, sand, kalkfiller och magnetitpulver) från hål 2 enligt Figur 49. Nivå 70 cm. NS uppåt i bild.

Injekteringsbruk från hål 3 identiskt med föregående nivåer, se Figur 52

Figur 173. Injekteringshål invid vänster anslutning (hål 3 enligt Figur 49). Nivå 70 cm. NS uppåt i bild.

Tätjorden invid anslutningen ser för övrigt förträfflig ut. Gäller båda anslutningar. Detta är den plats i dammen som tätjorden, än så länge, ”känns” bäst.

Injekteringshål 4, vid höger anslutning, var även det identiskt med föregående nivåer, se Figur 174.

Figur 174. Injekteringshål invid höger anslutning (hål 4 enligt Figur 49). Nivå 70 cm. NS uppåt i bild.

Injekteringshål 5, var en av dagens höjdpunkter. Vid 80 cm såg den ut som tidigare men vid 70 cm syntes plötsligt injekteringsbruk strax US om injekteringshålet, se Figur 54.

Figur 175. Injekteringshål 5 enligt Figur 49. Nivå 80 cm. NS uppåt i bild.

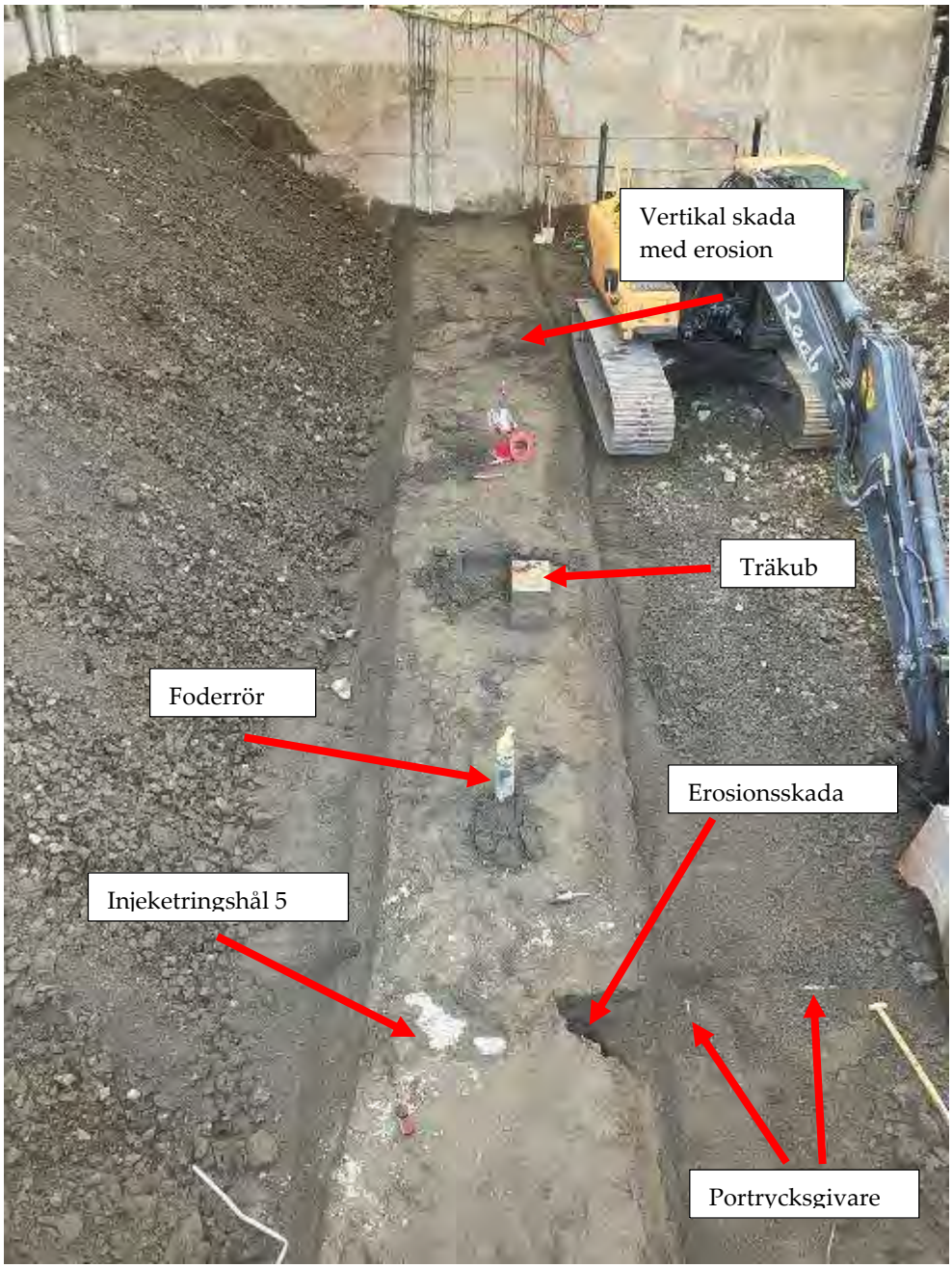
Efter ytterligare 10 cm så visade det sig att jag äntligen nått det djup vid injekteringshål där bruket ”spräckt” tätjorden och ändrat sin vertikala neråtriktade rörelse till att gå uppåt (hydraulisk upptryckning), se Figur 176. I morgon gräver jag fram denna del med injekteringsbruk. Kan tillägga att de töjningsmätningar som utfördes under injekteringen indikerade rörelser på denna nivå mot US. Ska hälsa Sam Johansson att det mättes rätt.

Figur 176. Injekteringshål 5 enligt Figur 49. Nivå 70 cm. NS uppåt i bild.

I injekteringshål 6 syns ännu inget bruk men för första gången så hittade vi material från krönet i borrhålet, se . Jag tror att vi snart kommer hitta bruk i detta hål.

Figur 177. Injekteringshål 6 enligt Figur 49. Nivå 70 cm. NS uppåt i bild.

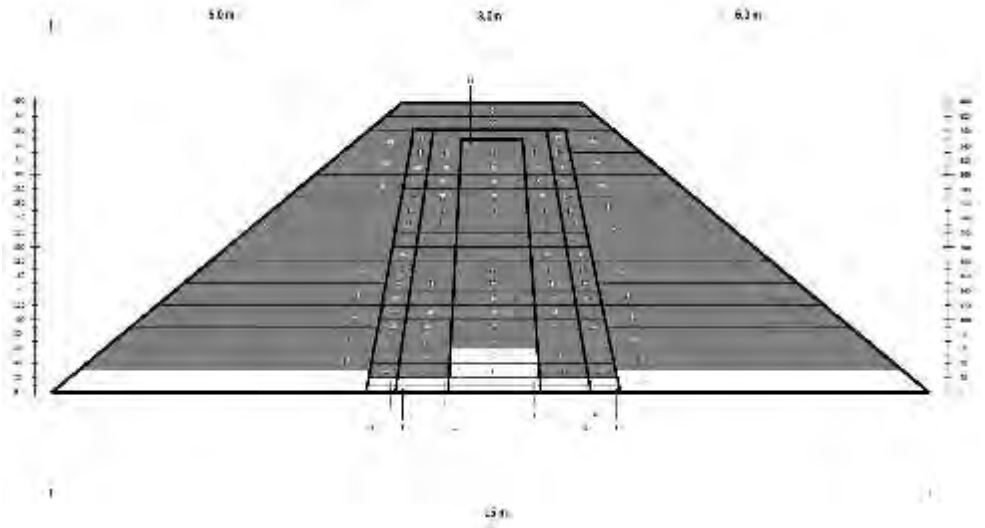
Till sist, bild på dammen sedd mot vänster anslutning innan hemgång, se Figur 99.



Figur 178. Dammen sedd från höger anslutning mot vänster. Tätjord ÖK är på nivå 70 cm. Stödfyllning, grov- och finfilter på nivå 20 cm.

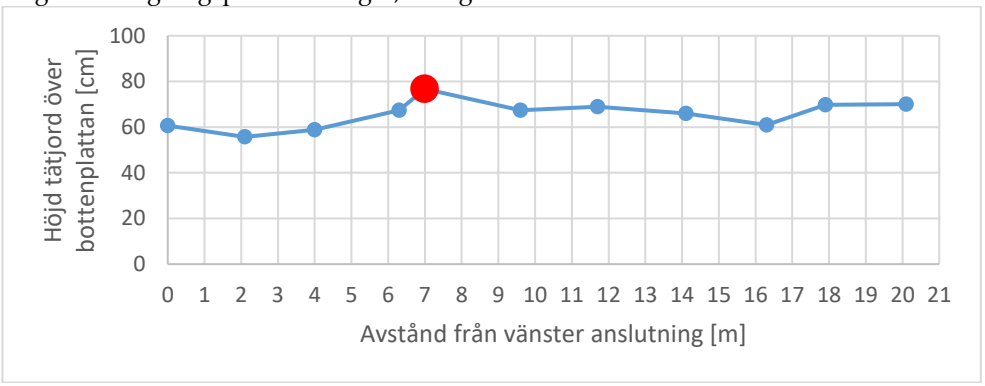
I morgon inspekterar vi tätjorden noggrant och gräver ut det vi hittar. Ingen neddrivning är planerad. Vi behöver en heldag med våra kära spadar, skyfflar, skedar och penslar.

14.12 1ST OF OCTOBER 2024



Figur 179. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Dagens avvägningsprofil som i går, se Figur 101.



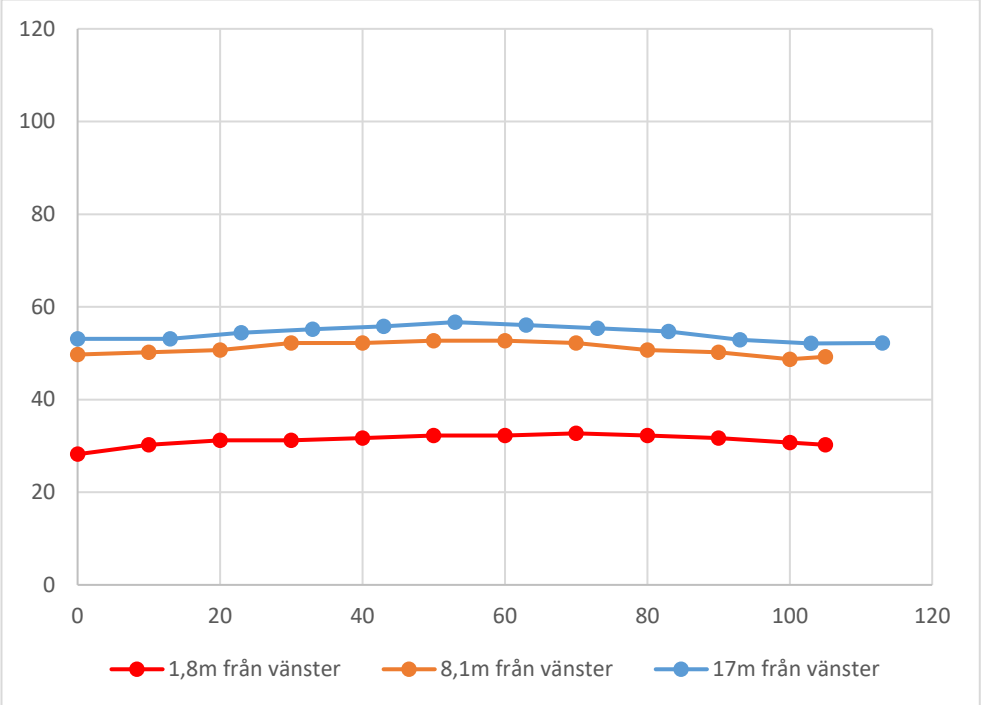
Figur 180. Avvägning av tätjord. Genomsnittlig nivå 65 cm. Röda punkt indikerar plats för vertikal skada (högsta punkten.

Slitsam dag. Otroligt slitsam. Bara handgrävning och nu är det uppenbart så att vi har två hot spots där de stora grejerna händer; vid vertikal skada och 2,5m från höger anslutning. Vi tar dessa lite senare.

Vid handgrävning kan man få fram lite mer detaljer som hur pallytorna ser ut. De är jättelätta att hitta. Man sätter ner spaden och trycker på lite lagom tills det tar stopp. Därefter kan man nästan skala av tätjorden med händerna så att den hårda överytan i underliggande pall friläggs. På tre ställen i dammen gjorde vi detta i dag för att kunna väga in pallytan US mot NS. Jag är intresserad av dess form efter 5 års drift. Ett typiskt utseende på pall visas i se Figur 161

Figur 181. Pallavvägning nivå 50. US mot NS. Grävmaskinens skopa står på NS stödfyllning.

De tre ställena låg från vänster anslutning 1,8 m, 8,1 m och 17,0 m, se Figur 162.



Figur 182. Avvägning av tre pallar. Pall 8,1 m och 17 m från vänster är samma pall medan pall 1,8 m från vänster är pallen under.

Pallarna har en i det närmaste identisk form där US och NS kanter har satt sig något jämfört med mitten på tätjorden. Apropå sättningar har vi även mätt in portrycksgivarnas nivå under utgrävningen för att följa dammens sättningar 3 m in från höger anslutning. Sättningarna visas i Tabell 1.

Tabell 1. Portrycksgivarnas sättningar från installation november 2019 till nertagning oktober 2024.

Givare	Ursprunglig nivå [m]	Nuvarande nivå [m]	Diff [cm]
Portrycksgivare 1	3.850	3.875	-2.5
Portrycksgivare 2	3.863	3.894	-3.1
Portrycksgivare 3	3.863	3.886	-2.3
Portrycksgivare 4	3.864		
Portrycksgivare 5	3.836		
Portrycksgivare 6	3.404		
Portrycksgivare 7	2.971	3.043	-7.2
Portrycksgivare 8	2.975	3.052	-7.7
Portrycksgivare 9	2.105	2.211	-10.6
Portrycksgivare 10	2.125	2.236	-11.1
Portrycksgivare 11	1.069	1.165	-9.6
Portrycksgivare 12	1.074	1.179	-10.5

Samtliga nivåer är avstånd från betonglådans överkant, det vill säga djupet. Portrycksmätare 1 sitter i NS grovfilter, portrycksmätare 2 i NS finfilter, portrycksmätare 5 i US finfilter, portrycksmätare 6 i US finfilter. Övriga portrycksmätare (3 – 4 och 7 – 12) sitter i tätjorden på fyra olika nivåer där de jämnt numrerade mätarna sitter på US sida och de ojämnt numrerade mätarna på NS sida. Sättningarna ökar som förväntat med djupet. Sättningarna i toppen på dammen är kring 10 cm och i botten ca 2,5 cm. Procentuellt sett så har det satt sig ca 3% i toppen (beräknat på 3,20m tätjordshöjd) men 10% i botten (beräknat på 20 cm tätjordshöjd).

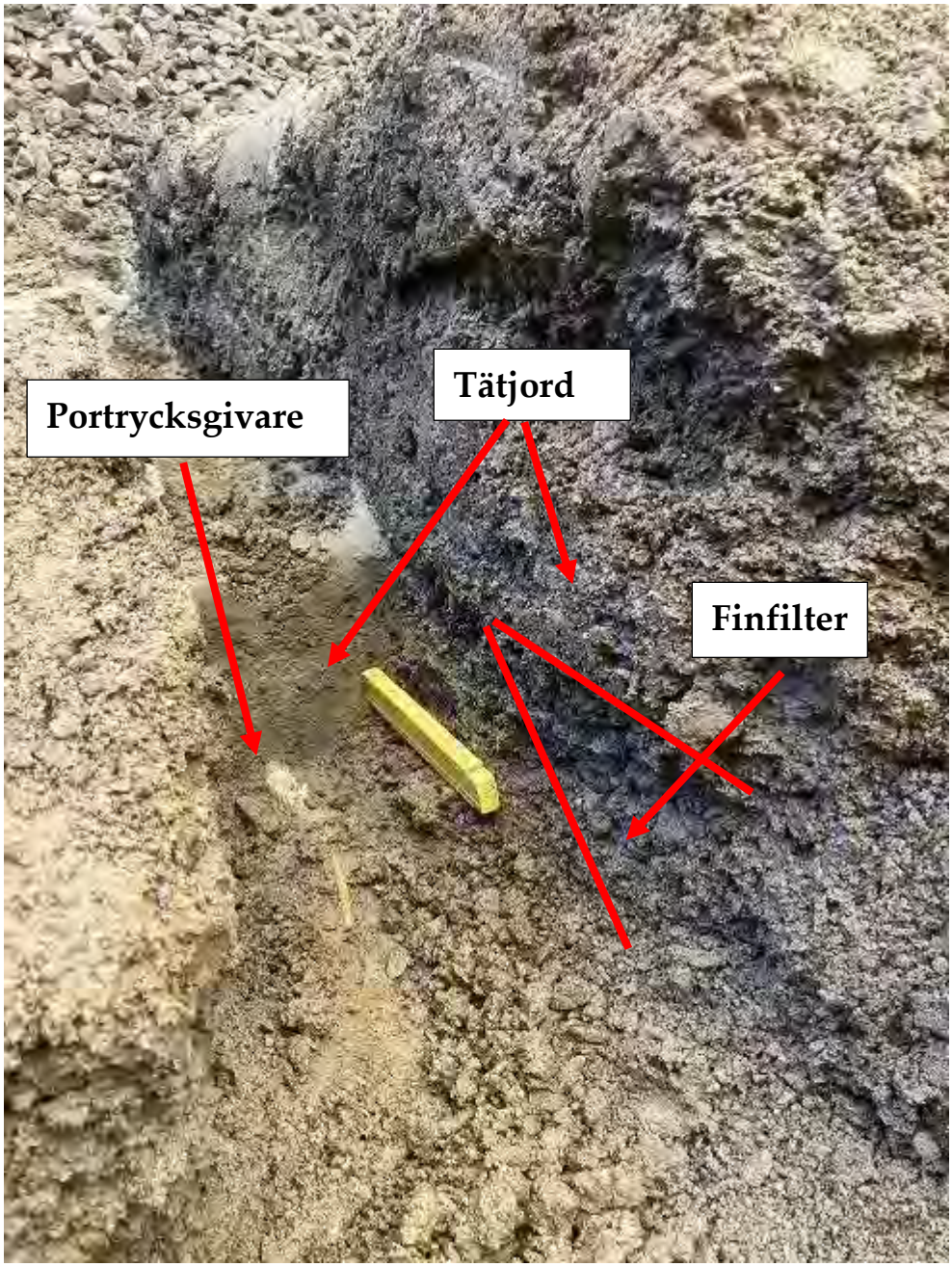
Inget av dessa sättningar har kunnat upptäckas vi scanning av dammen från utsidan under dammens livslängd. Scanning har utförts några gånger. Portrycksmätare 6 kommer vi aldrig få veta då den råkade bli uppgrävd av grävmaskinen. Portrycksmätare 4 och 5 har ännu ej grävts fram.

Frågor har ställt kring status på portrycksmätare 3 då denna konsekvent gett lägre mätningar än förväntat. Vid framgrävning befanns tätjorden kring denna betydligt blötare än runt de övriga, se Figur 183.

Figur 183. Portrycksmätare 3 på NS sida av tätjord på nivå 20 cm. Tätjord som omgav mätaren betydligt blötare än kring övriga mätare

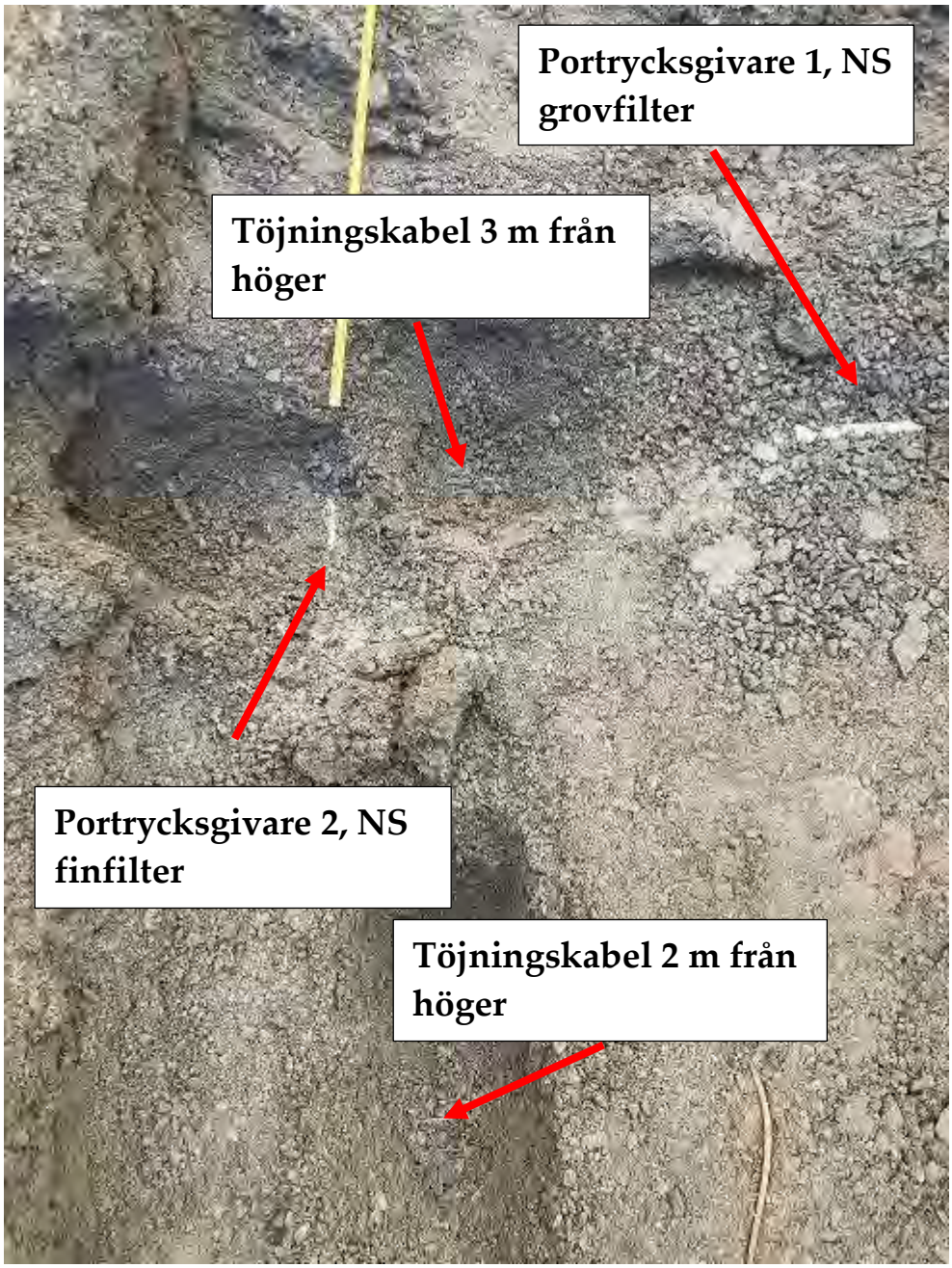
För att svara på varför jorden är blötare så har jag ännu inga svar. Kan konstatera att filtret på NS sida gick väldigt långt in i pallen strax ovanför portrycksmätaren. Detta

är något vi har sett lite här och där, att filtret kan gå riktigt långt in i tätjorden där i julgranen, se Figur 184

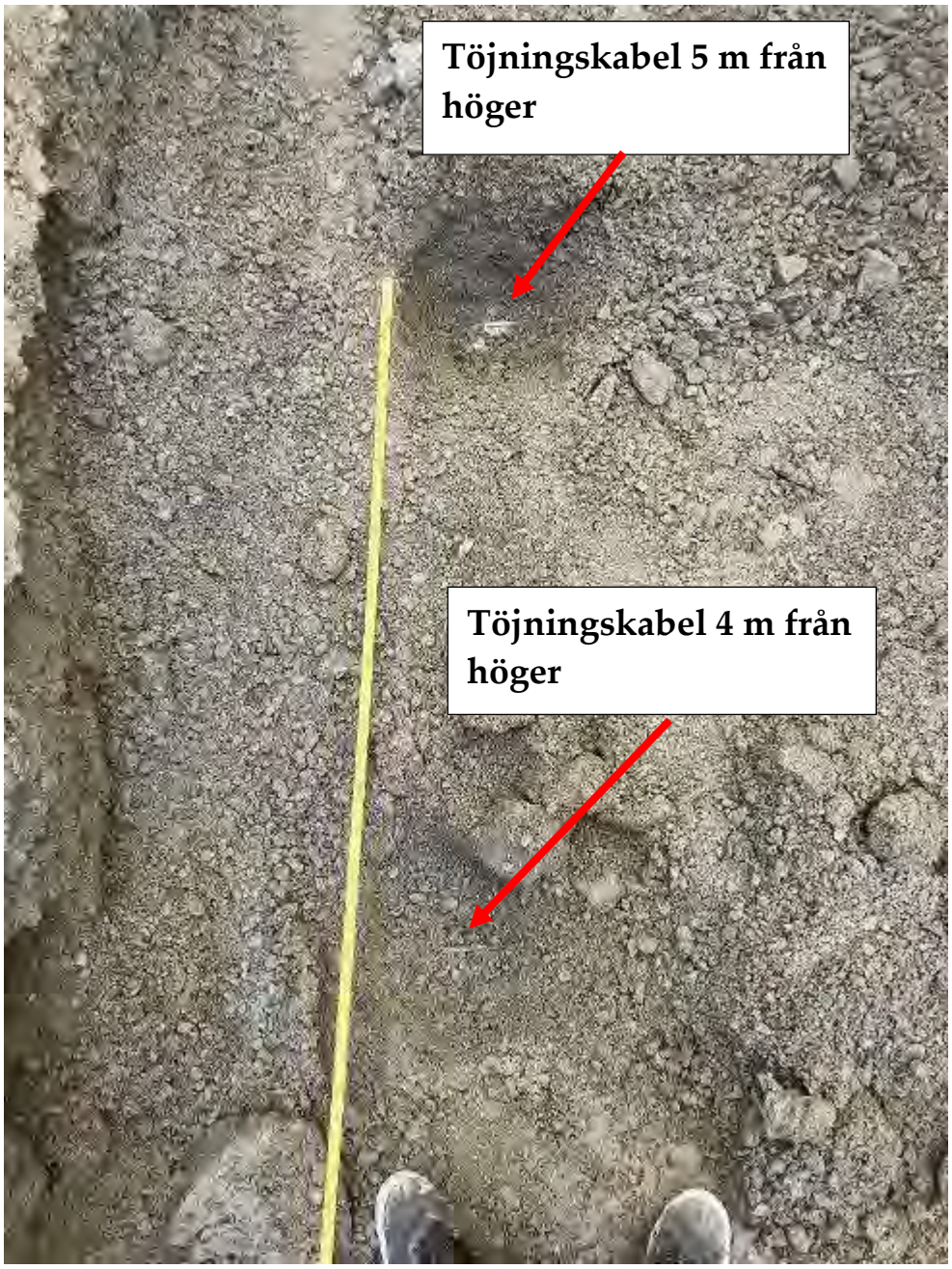


Figur 184. Finfilter just ovanför portrycksgivare har gått in ovanligt långt i tätjorden.

Det här området är långt ifrån färdiggrävt. Jag har en faktor som jag misstänker vara källan till all erosion som händer här och det är töjningskablarna som är dragna här, rakt US – NS på ca 10 cm nivå, 2, 3, 4 och 5 m från höger anslutning, se Figur 163 och Figur 164.

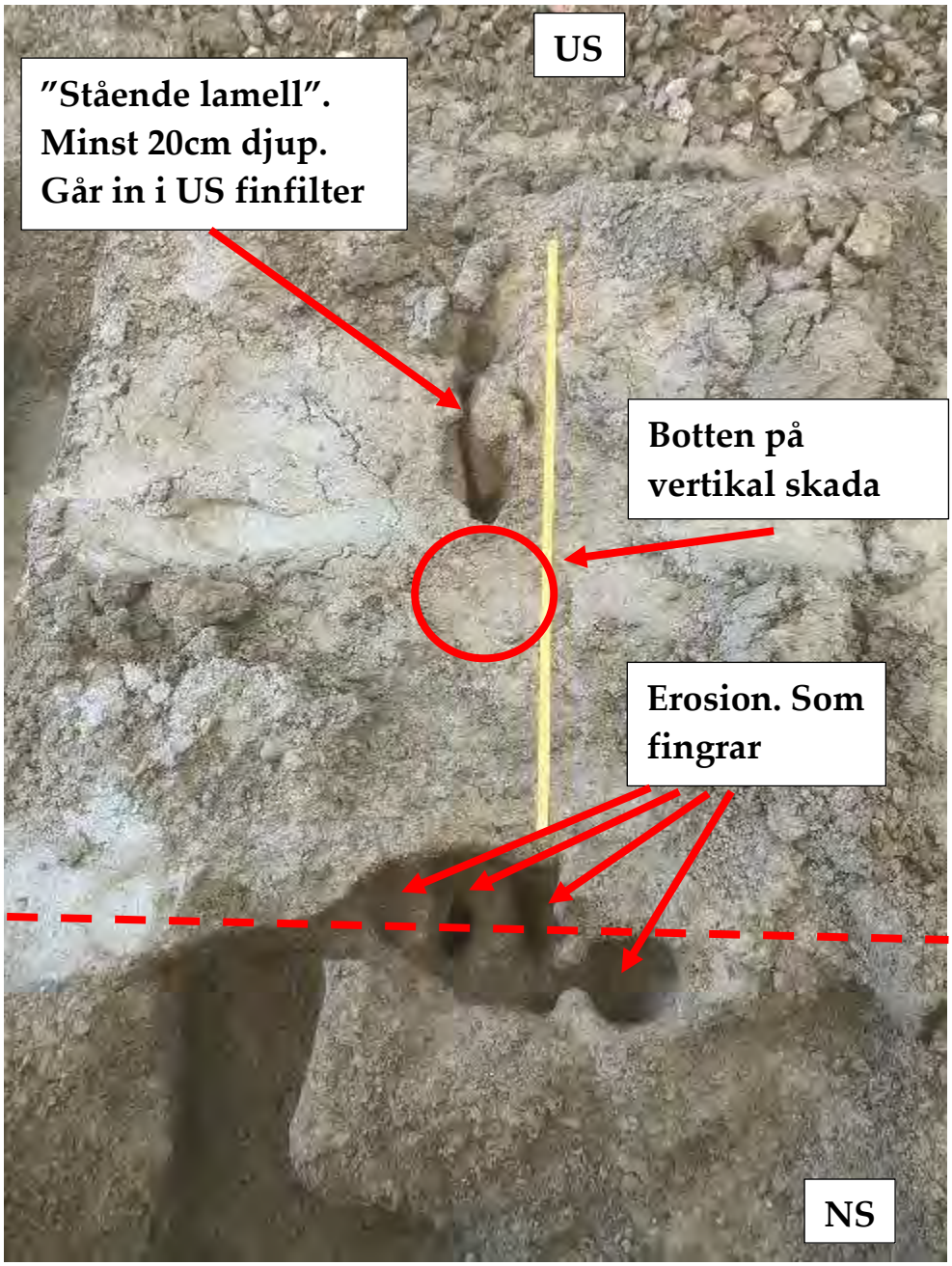


Figur 185. Töjningskablar (blåa) med kompletterande temperaturkablar (röda) framgrävda ur NS finfilter. Portrycksgivare 1 och 2 är också synliga.



Figur 186. Töjningskablar (blåa) med kompletterande temperaturkablar (röda) framgrävda ur NS finfilter.

Vid och under den vertikala skadan 7 m från vänster anslutning händer det mycket. Det går en smal men djup erosionskanal mellan US finfilter och skadan. Erosionskanalen kan bäst beskrivas som en stående lamell, minst 20cm djup. Den är troligen djupare men vi kommer inte åt det ännu. NS skadan är det kraftig erosion mellan tätjord och NS finfilter, se Figur 187.



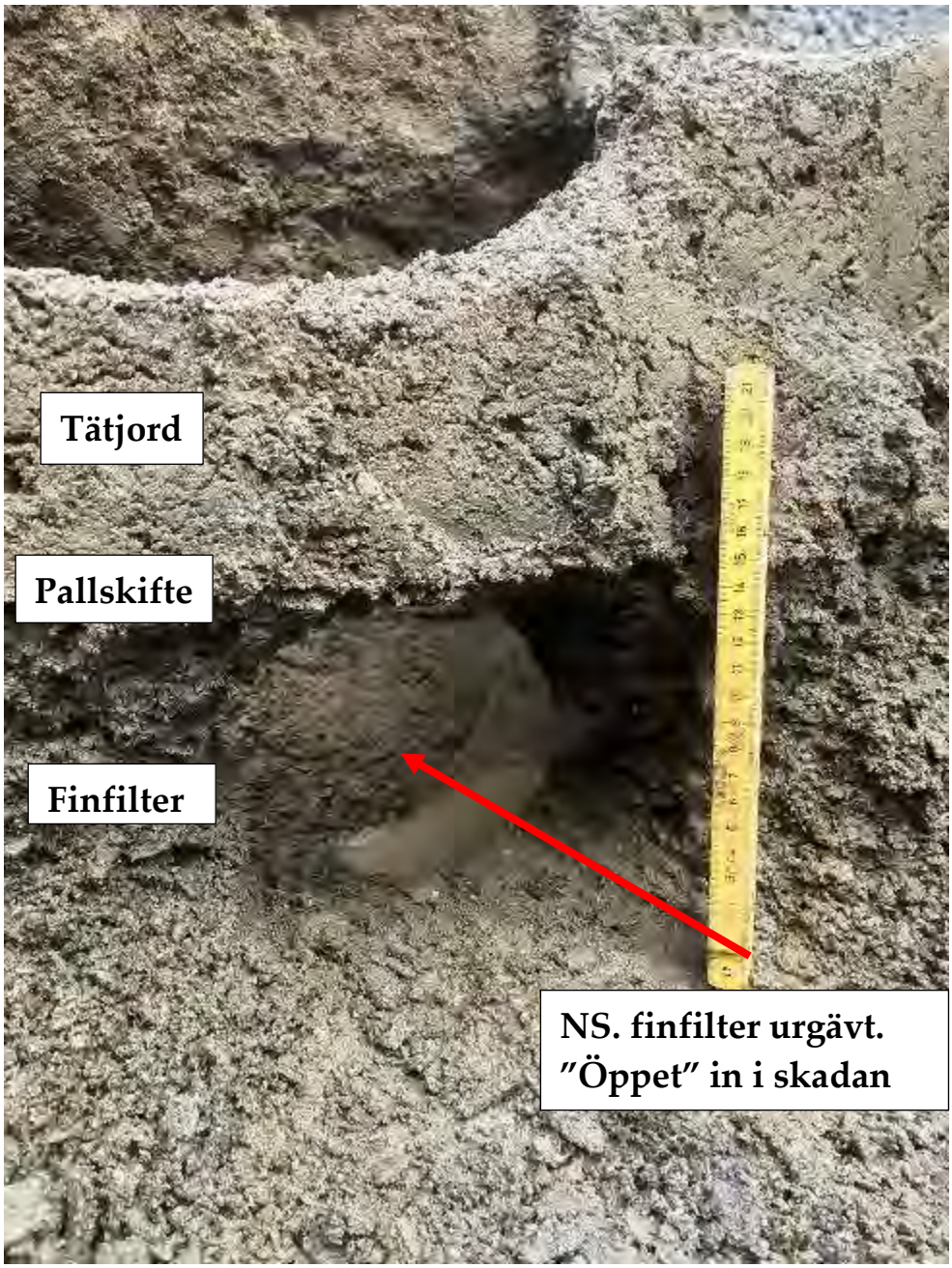
Figur 187. Erosion kring botten på vertikal skada.

Erosionen jobbar sig nedåt i gränszonen mellan tätjord och finfilter i stort sett samma vinkel som tätjorden har (ca 85°). Erosionen ser även ut som fingrar som lokalt tar sig nedåt på flera ställen. Utseendet kan bäst liknas vid jättegrytor. Vid framgrävningen är alla dessa erosionsskador fyllda med sandigt material. Över huvud taget är det väldigt svårt att avgöra inne i julgranens gränszoner vad som är vad. Tätjord och finfilter ”flyter” ihop. Det var lättare högre upp. Finfiltret går in längre i tätjorden vid pallskiftet än vad jag hade förväntat mig. Utgrävning av detta område fortsätter i morgon.

Utgrävningen vid den stora skadan fortsätter även den. Här ligger det mycket just nu som är av intresse, se

Figur 188. Situationen vid den stora skadan 2,5 m från höger anslutning.

Även här har en stor del av skadan utvecklats i gränszonen mellan NS finfilter och tätjorden, se Figur 166.



Figur 189. NS stora skadan. Finfilter har tagits bort på ett ställe för att visa hur skadan även gått in i NS finfilter.

Även här är det inte färdiggrävt. Finfiltret som tagits ut är väldigt grovt och ska siktas. Men det förklarar inte allt då skadan vill neråt och in mot dammens centrum (åt höger enligt Figur 166). Skadan grävdes ur mycket idag med handkraft då injekteringsbruket i injekteringshål 5 skulle undersökas. Injekteringshål 5 diskuteras strax men under dess framgrävning upptäcktes fler sandiga och grusiga zoner strax US om injekteringshål 5, se Figur 190 - Figur 192.

Figur 190. Nya erosionsstråk upptäckta US om stor skada och injekteringshål 5.

Den stora skadan har nu skrapats ut till en nivå som är några cm ovanför bottenplattan, se Figur 167.

Figur 191. Nya erosionsskadan. Utgrävning pågår. NS sida snett uppåt höger i bild.

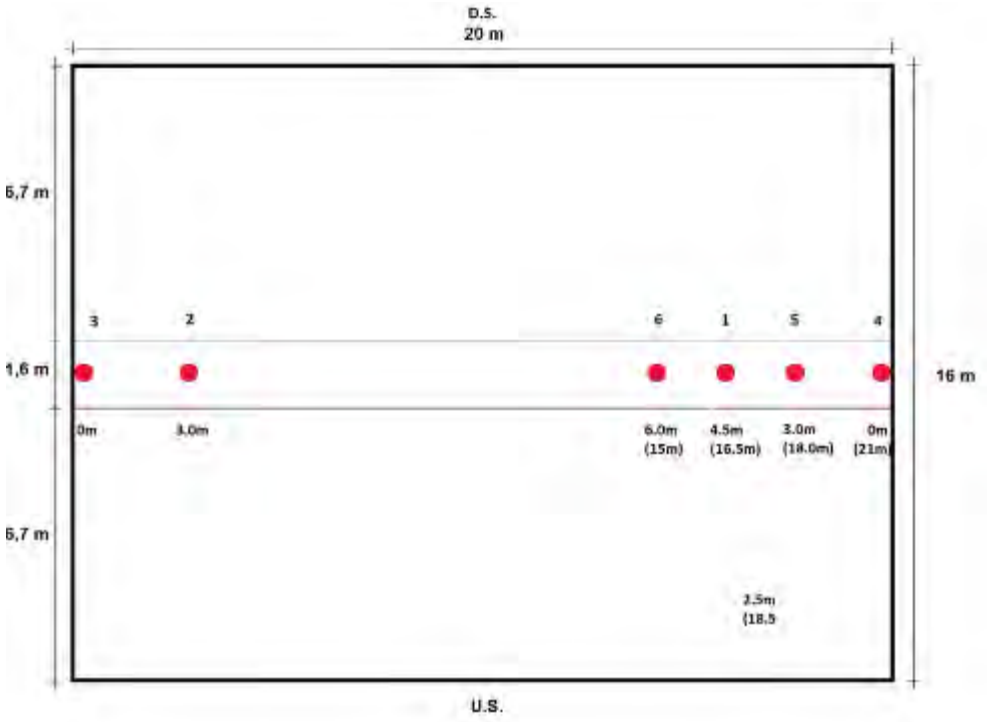
Figur 192. Nya erosionsskadan. Utgrävning pågår. NS sida snett nedåt vänster i bild. Skadan verkar ta sig in mot US finfilter. Botten av skadan är blöt. Botten på hål bara någon cm ovanför betongplattan.

Även denna skada verkar ha formen som en stående lamell som vi sett på US sida om den vertikala skadan, se Figur 187. Skadan upptäcktes just vid hemgång och vi fortsätter att undersöka den i morgon. ,

Även vid höger anslutning har vi sett små sandfyllda hål på NS sida om tätjorden, nära NS finfilter, se Figur 193. Dessa verkar inte leda någonstans men vi får veta mer när vi gräver ännu mer.

Figur 193. Erosionsskador vid höger anslutning på nivå 70 cm.

För att avsluta dagens inlägg så gör vi det med utgrävning av injekteringsbruk vid injekteringshål 5, se Figur 49.



Figur 194. Injekteringshålens placering.

Som tidigare nämnt händer mycket vid injekteringshål 5. Jag håller det dock som uteslutet att injeketringen har något med detta att göra. Tätjorden runt injekteringsbruket på dagens nivåer är markant mer kompakt än tätjorden en bit därifrån. Det indikerar att kompaktinjeketeringen (injektionsprocess där jorden utanför det injekterade bruket ”packas”, dvs. kompakteras) fungerat på ett bra sätt. Det var riktigt jobbigt att handgräva här idag.

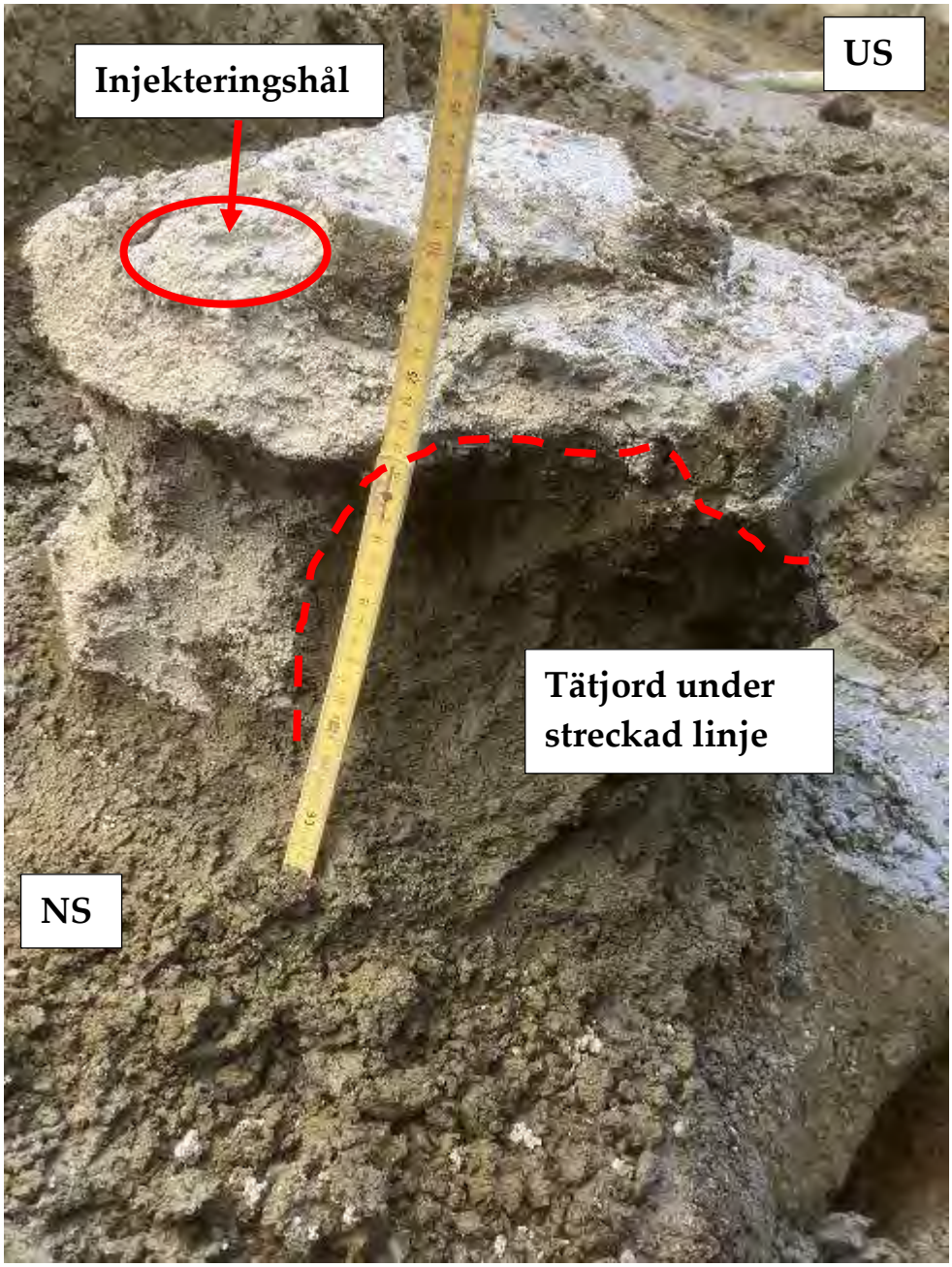
Situationen vid nedgrävnings början visas i Figur 195. Nivån vid utgrävningen start var på 70 cm.

Figur 195. Utgrävning av injekteringshål 5. Grävmaskinens skopa står på NS sida om tätjorden.

Igår hittade vi vad jag trodde var en stor injekteringsklump men det var fel. Det hade inte blivit en klump utan en stor del av den stora imnjekteringsbruksyta som frilades igår visade sig vara ett ganska tunt skikt (”svärdshugg”) som trängt in precis ovanför pallskiftet då injekteringröret drogs upp med bruket trycksatt, se Figur 196. Bruket har velat ta sig åt US till, dvs den våta sidan av tätjorden.

Figur 196. Bild tagen US injekteringshål 5. Tumstock står på samma ställe som i Figur 195.

Om man tittar noga i Figur 196 så ser man hur tunt injekteringsbruket är ute i kanten (vid tumstocken). Jag hade alltså fel när jag igår trodde att detta var toppen på en större bruksklump, så var ej fallet. Glöm det. Vi fortsatte att gräva oss runt injekteringsbruket, se Figur 197.



Figur 197. Injekteringsbruk framgrävt vid injekteringshål 5. Toppen av injekteringsbruket är är på nivå 70. Pelare ca 25 cm hög

Bruket fortsätter alltså vidare neråt i dammen. Jag var under gårdagen tämligen övertygad om att detta var slutstationen för injekteringsbruket i detta hål men det fortsätter, se Figur 198 - Figur 201.

Figur 198. Injekteringsbruk från injekteringshål 5, nivå 60 cm. Mitt i pall

Figur 199. Injekteringsbruk från injekteringshål 5, nivå 50 cm. Pallskifte.

Figur 200. Injekteringsbruk från injekteringshål 5, nivå 40 cm. Mitt i pall

Figur 201. Injekteringsbruk från injekteringshål 5, nivå 30 cm. Pallskifte.

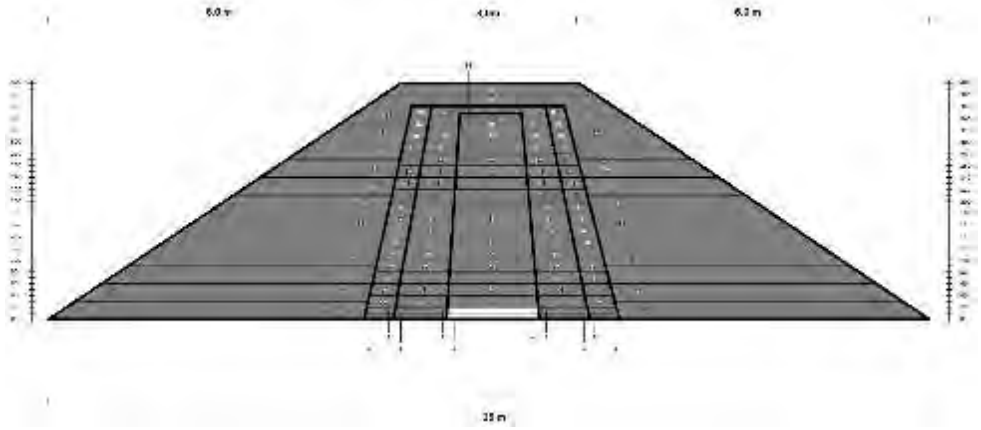
Notera hur diametern på injekteringsbruket ökar och minskar på varannan bild. Detta kan ha att göra med omgivande tätjords ursprungliga hållfasthet. Är vi mitt i pallen (Figur 198 och Figur 200) så är omgivande tätjord mjuk. Det trycksatta bruket tar sig då enklare in i den jorden innan det passiva jordtrycket i tätjorden är så pass högt att inträngningen av bruket stoppas. Det motsatta gäller när vi precis är under pallskiftet (Figur 199 och Figur 201). Då tränger injekteringsbruket inte in alls lika långt i omkringliggande tätjord.

En annan reflektion kring injekteringsbruket är hur väl det följer den naturliga tätjorden. Det var ett av mina mål med brukets sammansättning, att det skulle mekaniskt imitera tätjorden. Det har den gjort till 100 %. Det ”gifter sig även fint

med omgivande tätjord, svårt att gräva precis i gränsen mellan tätjord och injekteringsbruk. Dock ser jag något som gör mig ängslig. Jag upplever injekteringsbruket som lite ”grynigt”. Nu har det legat i backen i två år och jag utsatte det aldrig för åldring under mitt disputationsarbete. Jag misstänker att kalkfillern lakas ut, löses upp i det passerande vattnet. Om det är så är det såklart inte bra. Dock stoppade vi in ett injekteringsbruk med delvis magnetitpulver inblandat (injekteringshål 2 och 3 vid vänster sida, det ”svarta” injekteringsbruket). Detta upplever jag som mycket bättre i denna aspekt. Magnetitbruket innehåller mer finmaterial så det kanske är det allt handlar om. Måste fundera mera men om någon ska delvis slå ihjäl min forskning så är det väl lämpligast om det blir jag själv. Har tagit ut prov av injekteringsbruk för siktning.

I morgon fortsätter vi att gräva för hand och efter lunch tar vi ner tätjord till 30 cm där vi kan. Vi skrapar ca 10cm vid varje skoptag men stannar givetvis maskinen om vi hittar något. Känsliga områden som våra två hot spots får vi fortsätta handgräva. Riktigt slitsamt.

14.13 2ND OF OCTOBER 2024



Figur 202. Dammens tvärsnitt. Gråmarkering i figur visar utgrävt material.

Idag är sista dagen ni får en kvällsrapport. Vi klarar oss utan grävare nu, endast hjullastare behövs för det sista så jag har inte en tickande maskinnota i nacken längre. Jag har dessutom varit sjuk mestadels av rivningen så skulle må bra av lite lägre tempo. Tur jag haft mina fantastiska medarbetare Niklas, Baraa, Klara och grävmaskinisten Kim. Vi kommer nu köra de avslutande provtagningarna och handgräva det sista. Kommer jobba på dammen fram till kl 14 framöver och sedan skriva rapport innan hemgång. Det kommer nog en, max två rapporter till efter denna.

Dagens avvägningsprofil struntar vi i. Det går upp och ner beroende å vad vi hittade och just nu är känslan lite att sätter vi spaden i marken så hittar vi något. Nedersta metern har varit tuff. Precis överallt händer det något och vi har nog missat småsaker under rivningen. Alla stora saker är jag tämligen säker på att vi hittat. Figur 57 ljuger lite. Alla fyllningsmassor på US sida är kvar av praktiska skäl, se Figur 101. De kommer att få ligga kvar även när allt är utgrävt eftersom vi helt enkelt inte har plats för all ballast utanför tältet.

Figur 203. Fyllningsmassor kvar på US sida.

Vi fick fram en portrycksmätare till som mättes in, portrycksmätare 4. Portrycksmätare 4 hade liksom satt sig med spetsen nedåt (7°), snett inåt höger i dammen, se Figur 204Figur 205

Figur 204. Portrycksmätare 4. Mätare ligger på US sida om tätjorden med spetsen pekandes NS. Tumstock ligger horisontellt.

Figur 205. Portrycksgivare 4 US i tätjord. Spetsen har satt sig mot höger anslutning. Tumstock ligger helt i US – NS riktning.

Notera hur urspolat tätjorden är kring portrycksgivare 4 enligt Figur 205. Jämför jorden och positionen med situationen vid installation, se Figur 206,

Figur 206. Portrycksgivare 4 vid installation 25 oktober 2019. US nedåt i bild och NS uppåt.

Nu fattas bara portrycksmätare 5, den i US finfilter. Portrycksmätare 6 kommer vi inte att få alls. Den råkade ryka vid ett pallnedtag för två dagar sedan. Alla inmätningar av portrycksmätare visas i Tabell 1.

Tabell 2. Portrycksgivarnas sättningar från installation november 2019 till nertagning oktober 2024.

Givare	Ursprunglig nivå [m]	Nuvarande nivå [m]	Diff [cm]
Portrycksgivare 1	3,850	3,875	-2.5
Portrycksgivare 2	3,863	3,894	-3.1
Portrycksgivare 3	3.863	3.886	-2.3
Portrycksgivare 4	3.864	3,903	-3,9
Portrycksgivare 5	3.836		
Portrycksgivare 6	3.404		
Portrycksgivare 7	2.971	3.043	-7.2
Portrycksgivare 8	2.975	3.052	-7.7
Portrycksgivare 9	2.105	2.211	-10.6
Portrycksgivare 10	2.125	2.236	-11.1
Portrycksgivare 11	1.069	1.165	-9.6
Portrycksgivare 12	1.074	1.179	-10.5

Samtliga nivåer är avstånd från betonglådans överkant, det vill säga djupet. Portrycksmätare 1 sitter i NS grovfilter, portrycksmätare 2 i NS finfilter, portrycksmätare 5 i US finfilter, portrycksmätare 6 i US finfilter. Övriga portrycksmätare (3 – 4 och 7 – 12) sitter i tätjorden på fyra olika nivåer där de jämnt numrerade mätarna sitter på US sida och de ojämnt numrerade mätarna på NS sida. Sättningarna ökar som förväntat med djupet. Sättningarna i toppen på dammen är kring 10 cm och i botten ca 2,5 cm. Procentuellt sett så har det satt sig ca 3% i toppen (beräknat på 3,20m tätjordshöjd) men 10% i botten (beräknat på 20 cm tätjordshöjd). Inget av dessa sättningar har kunnat upptäckas vi scanning av dammen från utsidan under dammens livslängd. Scanning har utförts några gånger. Portrycksmätare 6 kommer vi aldrig få veta då den råkade bli uppgrävd av grävmaskinen.

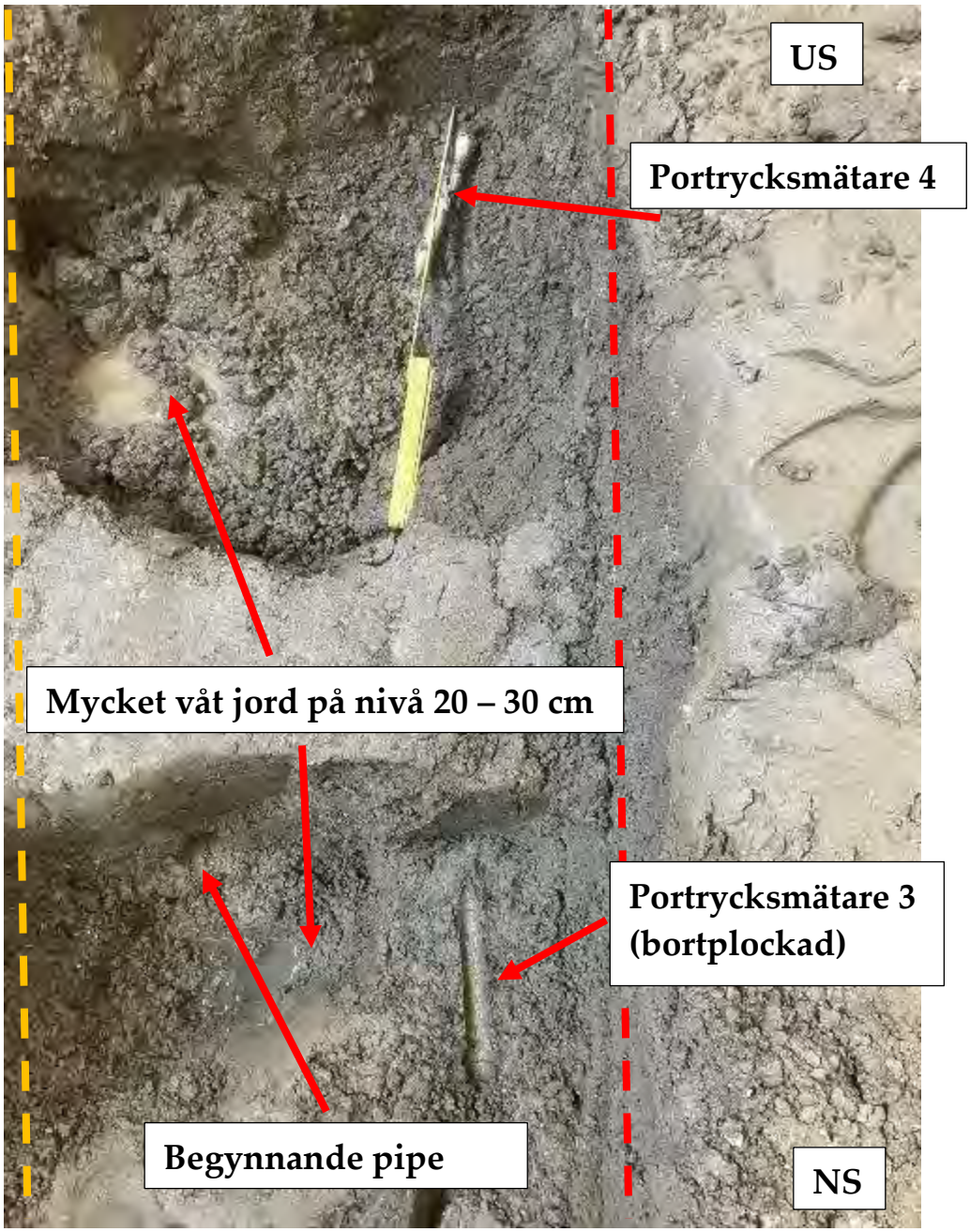
Töjningskablarna frilades idag, i alla fall påbörjades. Vid installation så packades kablarna in med bentonit, se Figur 207.

Figur 207. Töjningskablar som går igenom tätjord NS – US omgärdas med bentonitpulver under installation den 24 oktober 2019.

Jag har aldrig trott på denna lösning men döm av min förvåning att kablarna 5 år senare fortfarande är inbäddade i bentonit, se Figur 208. Samtliga fyra genomdragningar var fortfarande omgärdade av bentonit och bentoniten hade samma konsistens som tandkräm. Identiskt skulle jag vilja säga.

Figur 208. Töjningskabel på NS sida om tätjord 3 m från höger anslutning.

Nu hör det dock till sanningen att det hänt mycket just här i dammen. I synnerhet har det hänt mycket mellan töjningskablar 2 till 3 m från höger anslutning. Jorden här är markant blötare och tätjorden innehåller flertalet skador, se Figur 209 - Figur 211.



Figur 209. Linjer för töjningskablar inritade i blått (2m från höger anslutning) och rött (3 m från höger anslutning)

Figur 210. Urspolad jord mellan töjningskabel 2m och 3m (rött) från höger anslutning, nivå 20 cm.

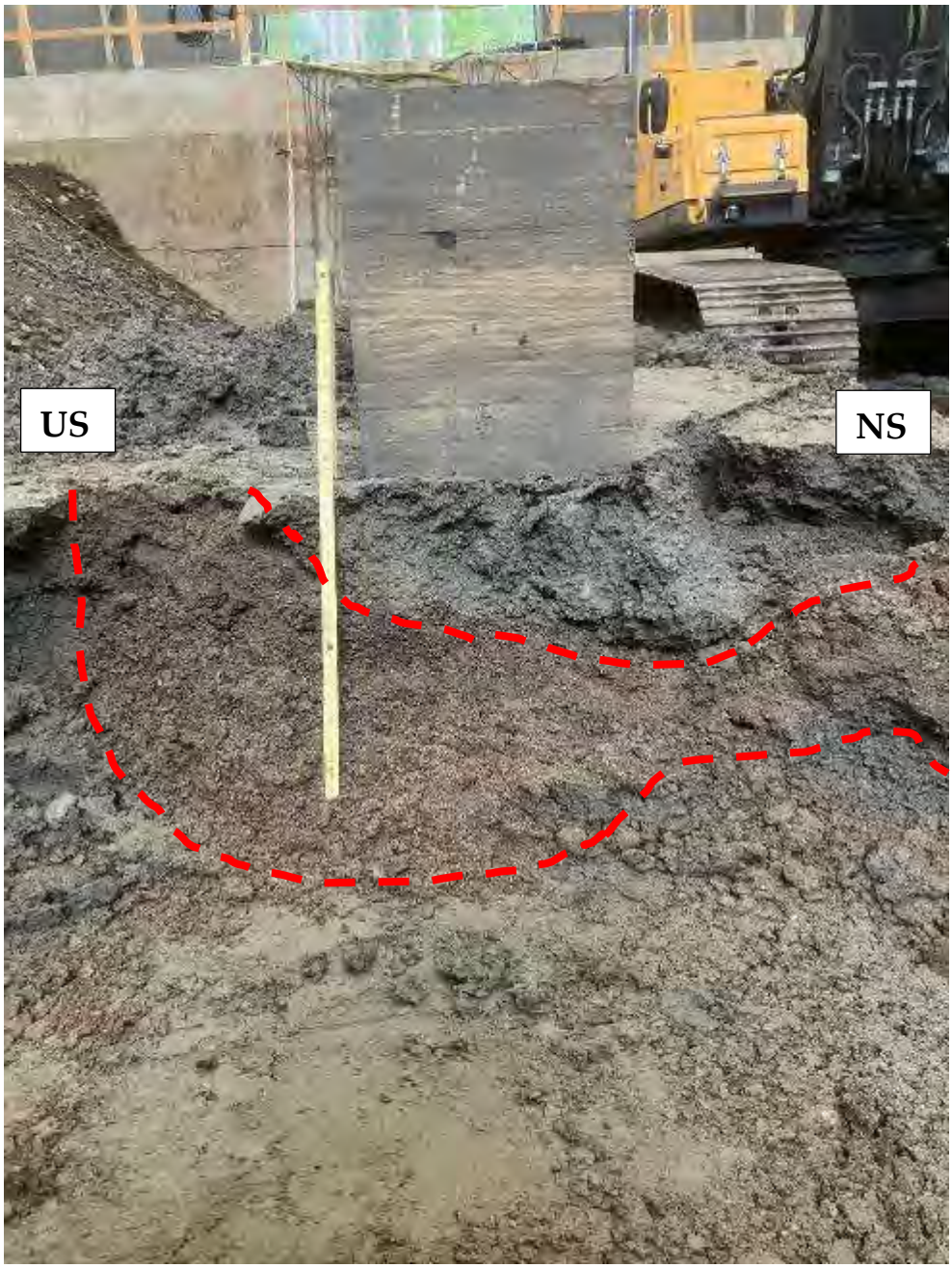
Figur 211. Material i den blöta tätjorden mellan 2m och 3m från vänster anslutning nivå 20 cm.

Dessutom var det i denna del av dammen som den stora skadan finns, som avhandlats i de två tidigare rapporterna. En hel del i denna zon återstår att handgräva och det kan ta någon dag. Ha tålamod!

Häromdagen upptäcktes en skada på ytan strax bredvid träkuben, 13,9 m från vänster anslutning. Denna grävdes ur och bedömdes som färdig, se Figur 184.

Figur 212. Skada upptäckt 13,9 m från vänster anslutning något US om tätjordens centrumlinje på nivå 100 cm.

Idag när vi drev ner detta område från 70 till 30 cm som lossnade en stor bit jord och avslöjade att skadan inte alls var färdigutgrävd, se Figur 213.

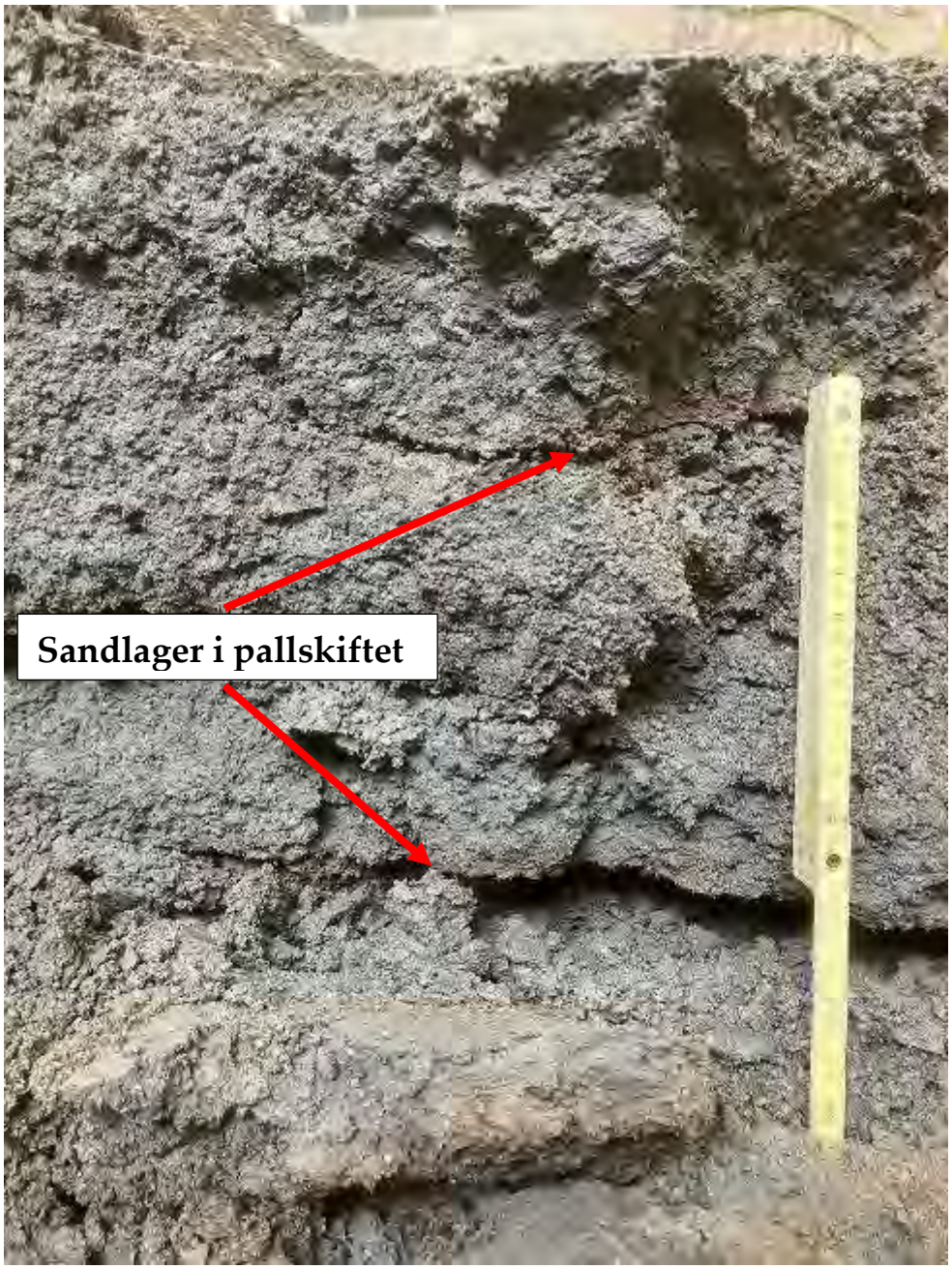


Figur 213. Sandlager genom tätjord. Notera att träkub flyttats ungefär till den plats i Figur 184 där den lilla spaden med grönt skaft ligger. Nivå överkant på skada 70 cm och underkant på 30 cm.

Hur otroligt det än låter så var vi nära att missa skadan då den var tunn, som en stående lamell. Skadan var full med sand och grus. Sand längre NS i skadan och grövre åt US skadan till. Detta har vi sett på fler ställen. Prover för kornstorleksbestämning uttagna. I Figur 163 kan man se hur mycket sand och grus som kunde grävas ut.

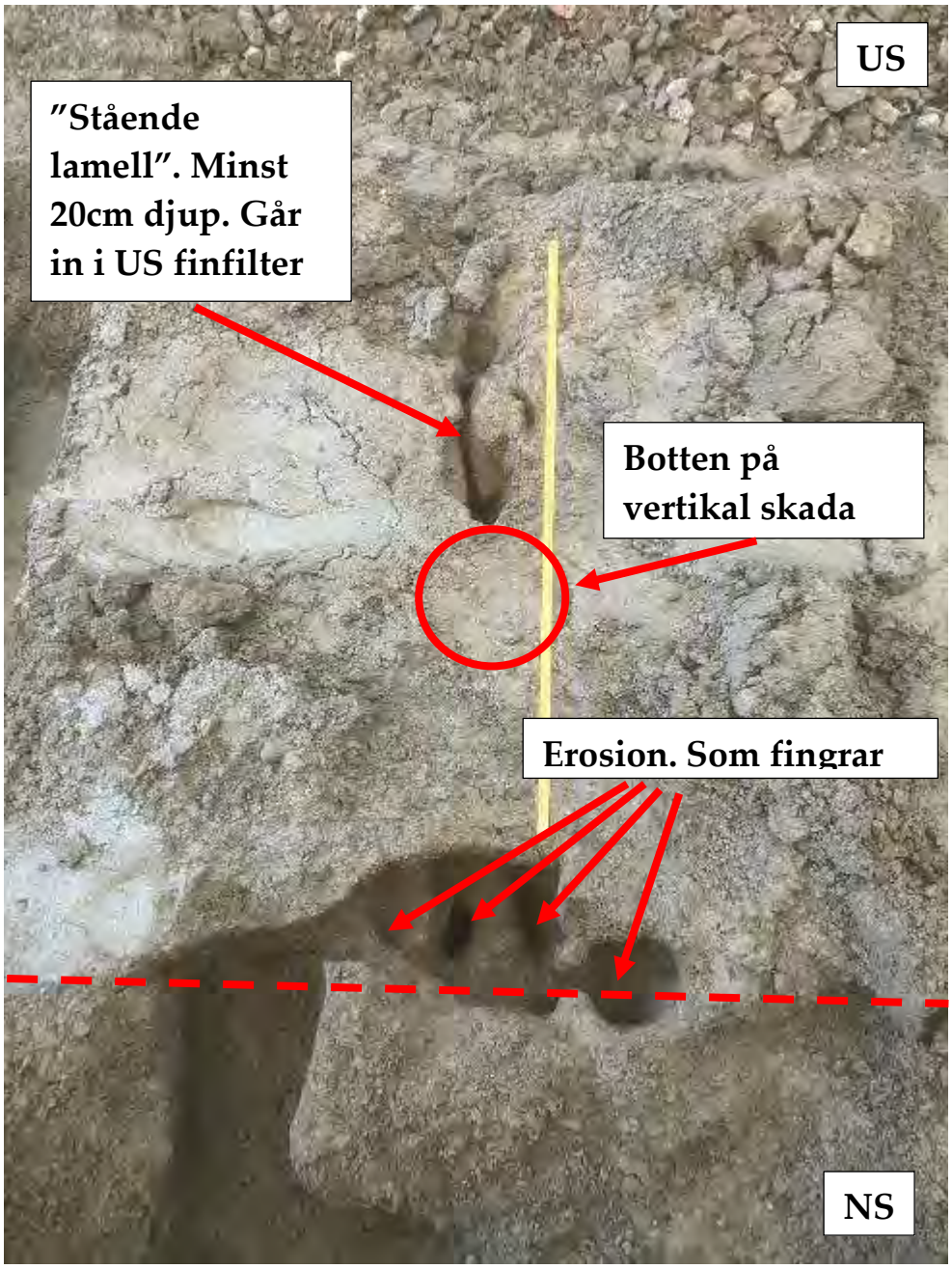
Figur 214. Samma skada som i Figur 213 men efter uttag av sand och grus.

Under nedgrävningen idag så upptäcktes även att tätjorden sprack upp lite ”väl” enkelt utmed pallarna. Vid närmare inspektion visade det sig att det i pallskiftena påbörjats erosion där tätjordens material blivit sandigare,



Figur 215. Sandlager har bildats i pallskiftet på nivå 60 och 40 cm 16,5 m från vänster anslutning

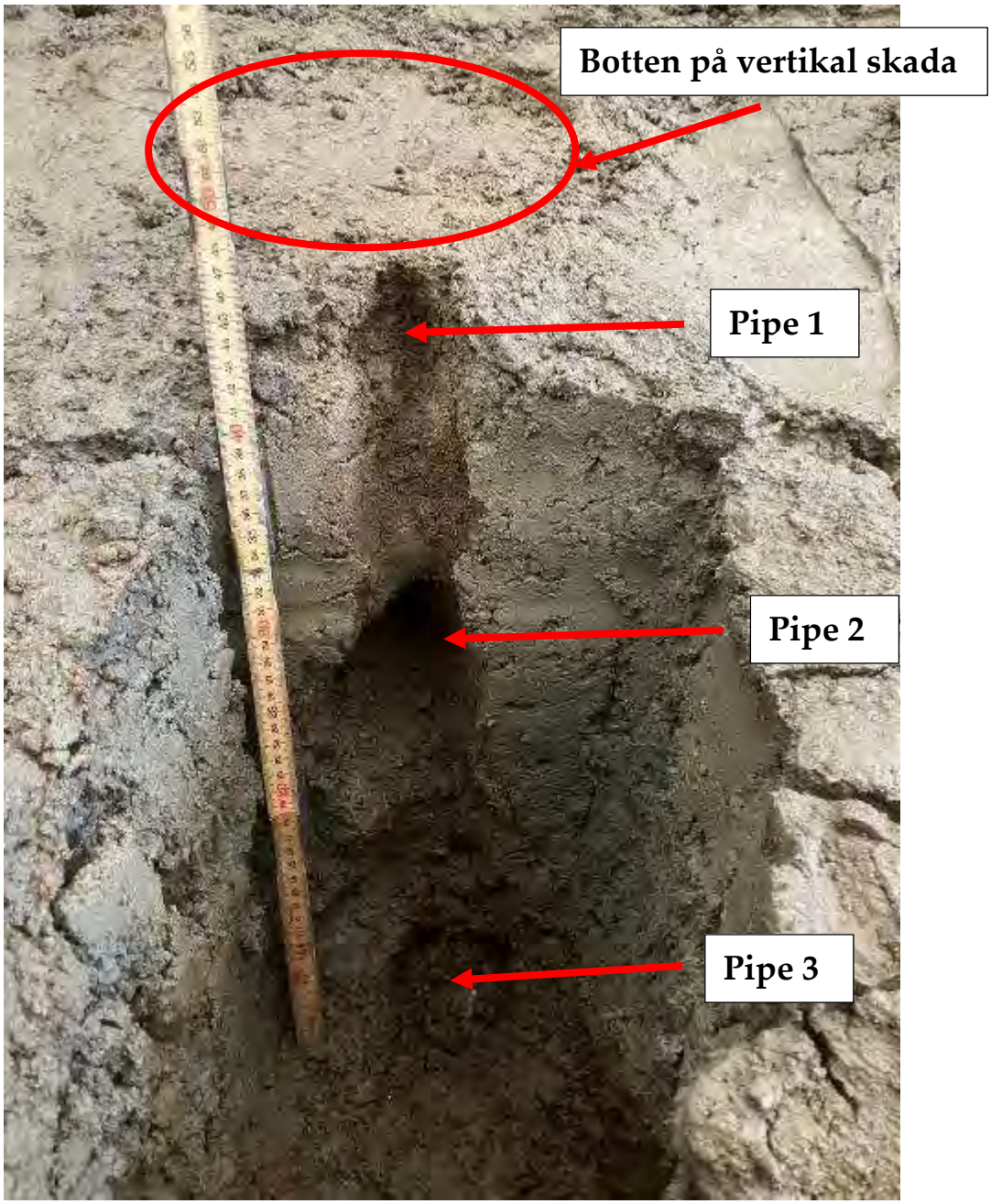
Vid och under den vertikala skadan 7 m från vänster anslutning händer det fortfarande mycket. Det går en smal men djup erosionskanal mellan US finfilter och skadan. Erosionskanalen kan bäst beskrivas som en stående lamell, minst 20cm djup, se Figur 187.



Figur 216. Erosion kring botten på vertikal skada.

Idag fortsatte utgrävning av denna skada med förträffligt resultat. Vi lyckade faktisk gräva ur sandlagren och det går en pipe (fylld av sand och grus) rakt igenom hela tätjorden. På Figur 217 till Figur 222 kan ni följa utgrävningen till fullt genomslag,

Figur 217. Ingrävning från US sida in mot skadan. Notera den stående lamellen fylld med sand och grus. Ett typiskt skadeutseende i dammen.



Figur 218. Ytterligare ingrävning. Notera hur ligger strax under varje palltopp i pallskiftet. Pipe 1 och 3 var ”återvändsgränder”. Pipe 2 ledde vidare.

Figur 219. Pipingen sett från NS sida. I pipen fick man in hela armen. Notera tätjordsslänten. Denna var tidigare helt täckt med finfiltermaterial. Pipen har alltså gått ut i finfiltret.

Figur 220. Inuti pipe från NS sida. Distans in är ca 50 cm

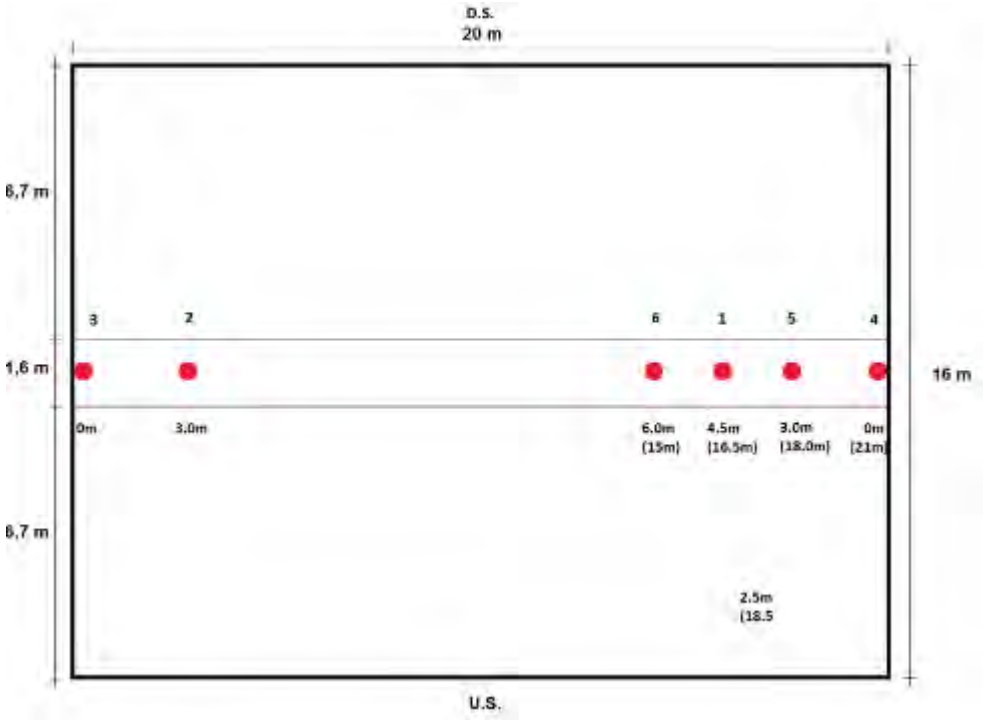
Figur 221. Fullt genomslag. Pipe 2 enligt Figur 218 ledde till en väg rakt igenom tätjorden.

Figur 222. Ytterligare bild på pipens genomslag. Den var betydligt större NS (diameter ca 10cm) än US (diameter ca 4 cm).

Tröskeln in i pipen på US sida låg på ca 40 cm och pipens lägsta punkt låg på nivå 15 cm. Botten på vertikal skada låg på nivå 80 och den ytan var mycket hård. Den vertikala skadan har sannolikt orsakat alla skador här men pipen gick en bra bit under den. Den helt frilagda pipen (taket borttaget) visas i

Figur 223. Vy ovanifrån över pipe när taket tagits bort. US pipe uppåt i bild.

Till sist lite injekteringshål. Ursprunglig placering visas i Figur 49.



Figur 224. Injekteringshålens placering.

Hann inte med att undersöka så många men Injekteringshål 1 står kvar i sitt rör, injekteringshål 2 och 3 är ej undersökta för dagen. Injekteringshål 4 har på nivå 60 cm spridit sig rejält, se Figur 225, Injekteringshål har tagit slut och injekteringshål 6 har jag inte hittat ännu. Som det verkar har 30 liter bruk bara förvunnit. Oroar mig att allt följt med i ett skoptag (har bruket spridit sig som en lamell med tjocklek under decimetern kan jag faktiskt bommat det helt) men vet mer säkert om några dagar.

Figur 225. Injekteringshål 4 nivå 60 cm. Bredd ca 20 cm, längd ca 40cm. Injektering har tryckts mot US (nedåt i bild)

Det som händer nu är att tätjorden är på varierande nivåer 20 – 60 cm och att all NS stödfyllning är borttagen se Figur 226

Figur 226. Rensning av stödfyllning NS sida av lådan.

Jag hade mycket små förhoppningar om att få ut något från själva bottenplattan vid dess friläggning. Maskinen har kört fram och tillbaka under snart två veckor och material har såklart trillat igenom. Vi kunde dock få vissa prover att testa. Det var klart så att det fanns en hel del finpartiklar blandat med vatten på botten. Några prover togs för sedimentationsanalyser, se Figur 227

Figur 227. Finmaterial på botten (brun ”gegga”) strax NS om grovfilter ca 10 m från vänster anslutning. Fanns en hel del av detta.

Sista bilderna innan slutkommentar visas i Figur 228 och Figur 229.

Figur 228. Damm betraktad från höger anslutning mot vänster.

Figur 229. Damm betraktad från vänster anslutning mot höger.

Så vad händer nu? I morgon och på fredag kommer vi att ta ut provkroppar (vertikala plus horisontella, 40st), kornfördelning på NS finfilter, fortsätta handgräva vid höger anslutning mellan alla töjningskablar, ta ut två stora vertikala provkroppar för vattenkvotsbestämning i bottenpallsprofilen. Sedan kommer vi nog på mer. Man får så mycket intryck och idéer när man spankulerar omkring där nere i hålet. Vi kommer dock släppa på gasen nu då vi inte har den löpande anläggarmaskinsräkningen igång längre. Då blir det inga sena nätter för mig mer utan skriver jag en dagsrapport är den klar innan hemgång. Jag återkommer med rapport när nästa är redo. Troligtvis på fredag. När jag väl checkar ut kommer jag även att försöka skriva in lite helhetsintryck åt er, de stora insikterna som dykt upp för mig här under resan. Dammen har haft många fler skador än jag kunde drömma

om vilket såklart är kul. Trots låga gradienter och rätt materialval. Mycket kan nog kopplas ihop med svårigheter att packa en alltför blöt morän i oktober och november månad när dammen byggdes.

Appendix B: Paper to EurCOLD's Working Group on internal erosion

A paper was submitted and presented on the 31st EWG-IE & 6th EWG-OOE meeting in Brno, 23-28 June 2025.

Dismantling a 4 m high experimental rockfill dam after four years of operation

J. Lagerlund[1], P. Viklander[2],

1. Vattenfall Research and Development, Älvkarleby, Sweden, Johan.Lagerlund@Vattenfall.com

2. HydroResearch AB, Täby, Sweden, and Luleå University of Technology, Luleå Sweden, Peter.Viklander@Hydroresearch.se

ABSTRACT: After four years of operation, a 4 m high, 20 m wide experimental embankment dam with a core of fine-grained moraine was dismantled and investigated for internal erosion. Even though the dam was designed according to Swedish standard, internal erosion was found at several locations at the lowest 1 m of the dam. Poor compaction during construction was thought to be the main reason behind the observed internal erosion. Furthermore, the downstream fine filter had become enriched by fines from the core.

Keywords: Internal erosion; moraine; embankment dam

INTRODUCTION

A 4 m high rockfill embankment dam, with a fine-grained glacial moraine core, two filters of sand and gravel, was built in a rigid, watertight, concrete box at Vattenfalls laboratory in Älvkarleby, Sweden. The core was 3.5 m high, 20 m wide and the dam was exposed to a water reservoir level of 3.3 m over four years from 2020 to 2024. The main goal was to investigate if six different types of built-in anomalies in the core (reported in Lagerlund et al., 2022), could be detected by blind tests using conventional geophysical methods and temperature measurements (Viklander et al., 2023). Another goal was to learn more about embankment dams and internal erosion as was pointed out at the ICOLD meeting in Marseille (Toromanovic et. al., 2022).

The dam was designed according to the Swedish dam safety guidelines, RIDAS (2012). The water content of the moraine was 4 - 5 % above optimum and could thus not be perfectly compacted according to normal standard. The degree of compaction and water content were continuously measured during construction as well as particle size distribution of the core soil and filters.

After four years of operation, the dam was dismantled. In this paper, key findings from the dismantling are presented. Full report on findings (raw data) is presented in Lagerlund (2025).

METHOD OF DISMANTLING

The dam was dismantled during three weeks in September 2024. Dismantling was done in sequences of 40 cm, utilizing an 18 ton excavator. In each sequence, the fine- and coarse filters were first removed and finally the core soil, see Figure . Documentation and sampling of the dam materials was performed continously.

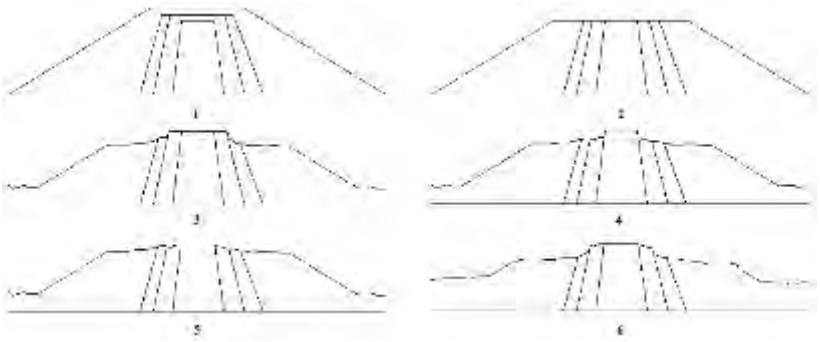


Figure 1. Dismantling sequence. Step 1 and 2 was only done initially. Step 3 to 5 was repeated until the dam was completely dismantled.

RESULTS AND DISCUSSION

Just before dismantling the dam, the core soil was investigated by CPT sounding at both abutments and in the dam line, before the reservoir was drained off. The CPT result showed a very distinct pattern of layers that coincided with the height of each compacted layer from the time of construction. The dam had been laser scanned on several occasions during its lifetime, but neither any significant movements nor settlements were ever detected. However, during dismantling, settlements of up to 10 cm of the core soil crest were measured.

Generally, at 3 m depth or greater from the crest, the boundary zones between adjacent core layers showed clear signs of internal erosion (Figure). During the dismantling, it was evident that each core soil layer was "stiff" at the top and "wet" at the bottom. Thus, boundary zones were present at every ~20 cm of the core soil, which had been identified by the CPT measurements. This feature was explained by difficulties in compaction work at the time of construction.

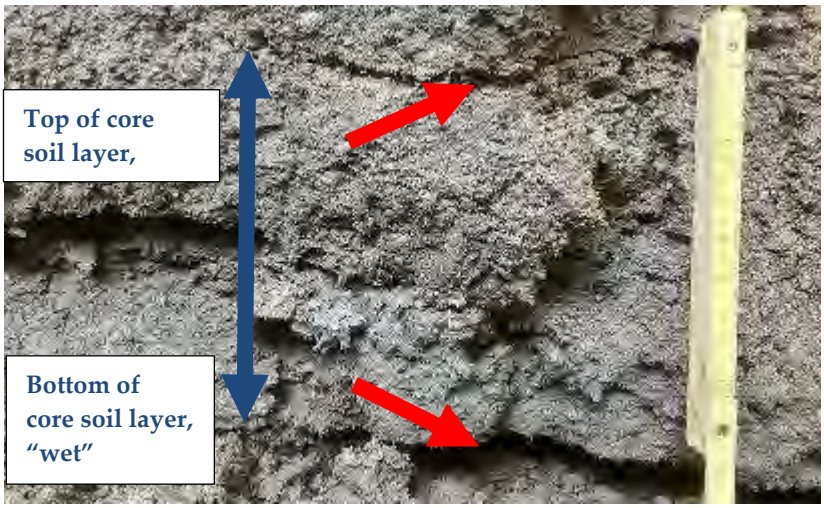


Figure 2. Red arrows show boundary zones between core soil layers. Blue arrow represents a layer of the core soil (Lagerlund, 2025).

Internal erosion was furthermore found at three main locations in the bottom part of the core. The ***first main location*** of found internal erosion was a sinkhole under development (Figure). It is labelled in this paper as a "sinkhole"; however, it was in fact a vertical zone filled with sandy and gravelly material (Figure), Given more time, this vertical zone would most likely transform into a sinkhole.

Figure 3. Sinkhole in the core soil after removing the remaining sandy gravelly material. Red dashed line marks the boundary zone between core soil and downstream fine filter. Total volume was approximately 400 litres (Lagerlund, 2025).

Material from the top of the sinkhole (140 cm above the dam foundation) and material from the bottom of the sinkhole (30 cm above the dam foundation) was sieved. Results from sieving of the sinkhole material were compared with the original particle size distribution of the core soil, see Figure . The results indicated; (1) a loss of fines has occurred in the whole sinkhole. (2) at the top of the sinkhole, the core soil material has transformed into a fine sand. (3) at the bottom of the sinkhole, the coarser material that could not be found at all at the top, were present. The reason for this difference by depth has yet not been fully explained. The downstream side of the sinkhole was merged with the downstream fine filter.

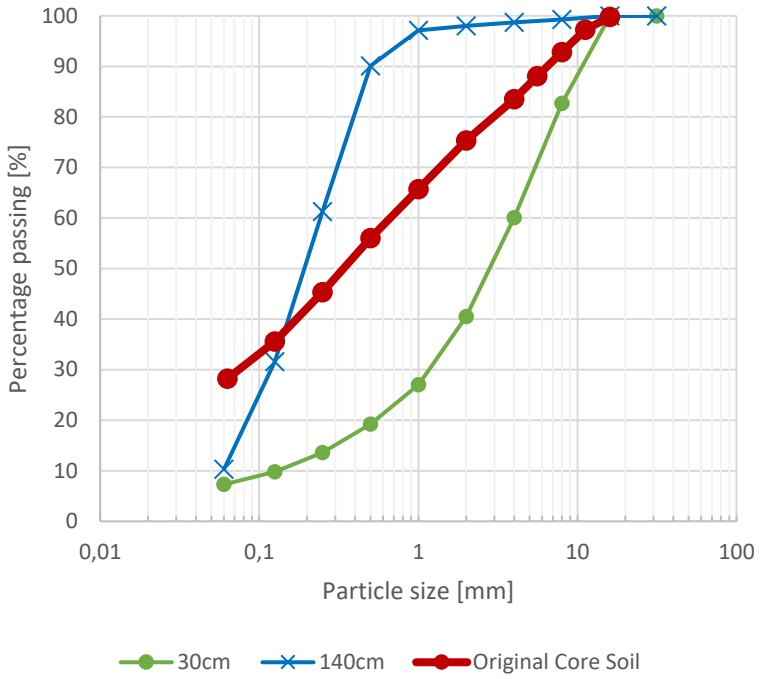


Figure 4. Particle size distribution of material from top (140 cm) and bottom (30 cm) of the sinkhole compared to original core soil. Adapted from Lagerlund (2025).

The root cause to internal erosion leading to the formation of the sinkhole was most likely due to a pre-tensed strain cable going through the core soil in an upstream to downstream orientation (Viklander et al., 2023). The bottom of the sinkhole was just centimetres above this cable and the core soil around the cable was very wet.

The ***second main location*** of found internal erosion was a set of three horizontal pipes just underneath one of the built-in anomalies, Figure . The three pipes at this location had developed at the boundary zones between the core soil layers. The pipes were not empty but filled with sandy material, like the appearance of the sinkhole. One of the three pipes went completely through the core soil, from the upstream to downstream fine filter. Downstream of the piping damages, sampling of fine filter material was difficult since the pipes and fine filter material had "merged". This made it impossible to distinct the eroded core soil from the fine filter material.

Figure 5. The three pipes at the second main location of internal erosion viewed from upstream side of the core soil during excavation (sandy material from the pipes is removed). The middle pipe, shown in the figure, went completely through the core soil. (Lagerlund, 2025).

The ***third main location*** of found internal erosion was a sandy zone through the core soil (Figure). Here, the internal erosion did not reach fully through the core soil. It was connected with the downstream fine filter but not with the upstream fine filter. The zone was up to 40 cm high but never wider than 10 cm.

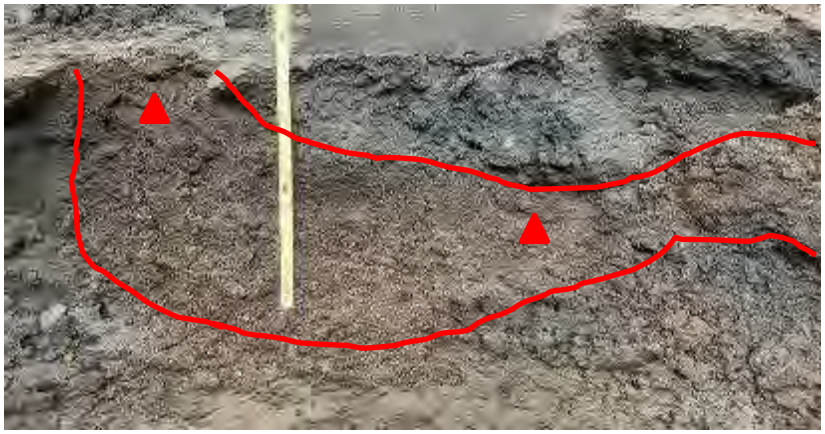


Figure 6. A sandy zone (inside the red lines) in the core soil. Left and right red triangle marks sample locations for sieving test "US Damage" and "DS Damage" respectively. Downstream side to the right in the figure. (Lagerlund, 2025)

Material from both upstream and downstream part of the sandy zone was sieved and results, together with the original particle size distribution of the core soil, is shown in Figure . Here it was found that a loss of fines had occurred, especially at the downstream side of the sandy zone. The fine filter located downstream of the sandy zone was damaged by the excavator just before sampling. The particle size distribution could therefore not be determined.

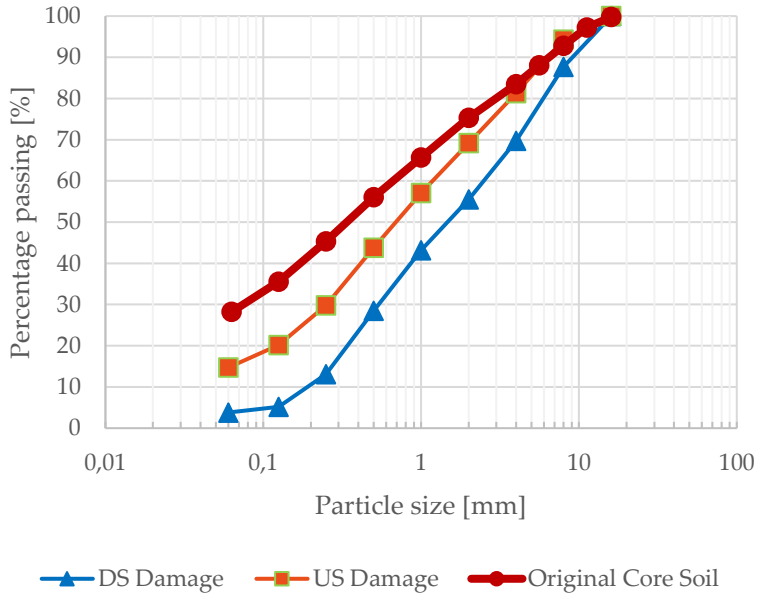


Figure 7. Particle size distribution of material from upstream and downstream part of the sandy zone together with original core soil. (Lagerlund, 2025).

In addition, internal erosion was also found at the bottom of the right abutment.

No sign of internal erosion around the original six built-in anomalies was found. Clay and silt particles could be found at the very bottom of the downstream coarse filter.

Sieving of the general sampled downstream fine filter material during dismantling was compared with fine filter material from the time of construction. Results showed that the fine filter was enriched with fines (

Table 8). In all locations but two, the measured amount of fines in the downstream fine filter were higher than the maximum allowed (5 % by weight) according to RIDAS (2012). This will increase the risk of crack development in the fine filter.

Table 8. Change in fine content of the downstream fine filter at various depths measured at both abutments and centrally in the dam. Positive percentage = increase of fines. From Lagerlund (2025).

	% change of fines		
Depth [m]	Left abutment	Center of dam	Right abutment
1.2	2	30	5
1.6	5	25	10
1.9	-28	38	120
2.3	21	21	20
2.6	13	41	-7
3.0	-26	44	56
3.4	8	21	30
3.8	33	36	57

Throughout the dam lifetime, i.e., four years of operation, seepage and turbidity was measured at the downstream dam toe in seven weirs and was slowly decreasing from the first filling to the time of dismantling (Hansson et al., 2024).

KEY FINDINGS

The test dam was built as a conventional embankment dam designed according to Swedish dam safety guidelines (e.g. RIDAS, 2012) and was in operation in four years. The following were found:

- No sign of internal erosion was found adjacent to the six built in defects.
- The dam was designed according to practice, i.e. with a suitable fine filter to hinder development of internal erosion.
- Three major locations with internal erosion were observed and documented.
- Fine particles were washed out locally leaving basically pure sand in the cavities in the moraine core.
- A lot of the initiated internal erosion was found in the boundary zones that were inadvertently created during the construction of the dam when a next layer of core soil was placed on top of the previous compacted layer.
- The dam was not fully constructed according to construction practice, i.e., due to poor compaction of the core soil of moraine wetter than optimum.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Vattenfall AB, Vattenfall Hydropower and Energiforsk AB for the funding of the dismantling work.

REFERENCES

Hansson, N., Helgesson, A. and Lagerlund, J. (2024). Embankment Test Dam of Älvkarleby – Data from seepage and turbidity measurements. Mendeley Data, V3, DOI: 10.17632/zhfx2g7s7b.3

Lagerlund, J., Bernstone, C., Viklander, P. and Nordström, E. (2022). Embankment Test Dam of Älvkarleby - Description of installed defects and their position., Mendeley Data, V3, DOI: 10.17632/k7zrrbxxnb.3

Lagerlund, J. (2025). Documentation from the dismantling of the Älvkarleby test embankment dam. Energiforsk Report 2025:XXX

Toromanovic, J., Laue, J., Mattsson, H., Knutsson, S., Viklander, P. and Bernstone, C. (2022). Observations From Initial Impoundment of an Experimental Embankment Dam – Field Data and Modelling. In Proceedings of the 27th Congress on Large Dams, 27 May - 3 June 2022, Marseille, France.

RIDAS (2012). Swedish Dam Safety Guidlines, Svensk Energi – Swedendergy - AB. (In Swedish)

Viklander, P., Lagerlund, J., Riaz, S. and Nordström, E. (2023). Non-destructive test methods for detecting defects in an experimental embankment dam. *International journal on Hydropower and dams 30(3): 74 – 79.*

DOCUMENTATION FROM THE DISMANTLING OF THE ÄLVKARLEBY TEST EMBANKMENT DAM

The Älvkarleby test dam was built in 2019 and served as a national and international test bed until the fall of 2024. After 4.5 years of operation, the dam was dismantled and thoroughly documented. The dismantling process revealed multiple instances of internal erosion, including signs of material displacement and seepage pathways, indicating potential vulnerabilities in the dam's structural integrity.

Overall, the dam exhibited significantly more damage than expected for a structure only five years old and operated for 4.5 years under a maximum hydraulic gradient of 3. Four primary factors are suspected to be the main drivers behind the anomalies observed in the dam: Inadequate compaction during construction, inherent weaknesses in the core soil, particularly at layer boundaries, use of fine filter material that did not conform to the design specifications and coarse filter separated during construction.

A new step in energy research

The research company Energiforsk initiates, coordinates, and conducts energy research and analyses, as well as communicates knowledge in favor of a robust and sustainable energy system. We are a politically neutral limited company that reinvests our profit in more research. Our owners are industry organisations Swedenergy and the Swedish Gas Association, the Swedish TSO Svenska kraftnät, and the gas and energy company Nordion Energi.

Energiforsk