

Tetting av lekkasje fra totalsondering 323 i Lier

Reguleringsplan E134 Dagslett - E18
Erfaringsrapport

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1060



Tittel

Tetting av lekkasje fra totalsondering 323 i Lier

Undertittel

Reguleringsplan E134 Dagslett - E18
Erfaringsrapport

Forfatter

Heidi Kjennbakken, Arne Kavli, Eigil Haugen,
Daniel Jergling

Avdeling

Fagressurser Utbygging

Seksjon

Geofag Utbygging

Prosjektnummer

B12166

Rapportnummer

1060

Prosjektleder

Nils Brandt

Godkjent av

Roar Øvre

Emneord

Lekkasje, totalsondering, artesisk grunnvann,
tettemetode, tetting av lekkasje

Sammendrag

Det ble utført geotekniske grunnundersøkelser i Lier kommune for reguleringsplan E134 Dagslett-E18. En totalsondering (lokalitet 323) utført 3. oktober 2024, førte til punktering av en artesisk akvifer. Det rant vann opp av hullet umiddelbart etter at borestengene var trukket, noe som tyder på at det var større vannstrøm enn normalt, spesielt med tanke på at hullet var 40 m dypt. Lekkasjen viste seg å være unormalt kraftig og lot seg ikke tette med konvensjonelle metoder. Denne rapporten omhandler grunnforholdene og hvordan lekkasjen ble tettet. Metoden som fungerte her var bruk av mørtel som støttevæske.

Title

Sealing of artesian leakage from total sounding 323 in Lier

Subtitle

Zoning plan E134 Dagslett-E18
Experience report

Author

Heidi Kjennbakken, Arne Kavli, Eigil Haugen,
Daniel Jergling

Department

Planning and Engineering Services

Section

Geomechanics

Project number

B12166

Report number

1060

Project manager

Nils Brandt

Approved by

Roar Øvre

Key words

Leakage, artesian ground water, sealing of artesian leakage

Summary

Geotechnical ground investigations were carried out in Lier municipality for the zoning plan E134 Dagslett-E18. A total sounding (location 323) conducted on October 3, 2024, led to the puncturing of an artesian aquifer. Water flowed out of the hole immediately after the drill rods were pulled, indicating a greater water flow than normal, especially considering the hole was 40 meters deep. The leakage proved to be unusually strong and could not be sealed with conventional methods. This report addresses the ground conditions and how the leakage was sealed. The method that worked here was the use of mortar as a support fluid.



Innholdsfortegnelse

1.	Innledning.....	5
1.	Stedlige forhold.....	5
1.1.	Jordarter.....	7
1.2.	Poretrykk.....	8
1.3.	Tolkning av vannførende lag	8
1.4.	Stabilitetsvurderinger	8
1.5.	Tidlig vurdering av lekkasje og utvasking.....	9
2.	Mislykkede tetteforsøk	9
2.1.	Tetting med bentonitt	9
2.2.	Tetting med AUV mørtel.....	10
2.3.	Tetteforsøk med «foringsrør-prinsipp»	12
3.	Vellykket tetteforsøk – Forberedelser.....	16
3.1.	Forberedelser og innsamling av nye data	16
3.1.1.	Vurdering av hulrom i grunnen.....	16
3.1.2.	Måling pumperate og vannstand	17
3.1.3.	Utvasking	18
3.1.4.	Målinger av diameter på hulrom under foringsrør og vannstrøm.....	19
3.1.5.	Observasjoner av gjentakende kollaps	20
3.1.6.	Måling av stighøyde med foringsrør.....	22
3.1.7.	Terrengmålinger og setninger	22
3.1.8.	Oppsummert situasjon	24
3.2.	Beskrivelse av tetteforsøk.....	24
4.	Vellykket tetteforsøk – Teoretisk beskrivelse	25
4.1.2.	Valg av mørtelblanding.....	28
4.1.3.	Nok mørtel tilgjengelig/tilkomst for pumpebil og betongbiler	29
4.1.4.	Stabilitet ved tettingsarbeider.....	30
4.2.	Utførelse av vellykket tetteforsøk	32
4.2.1.	Utførelse.....	32
4.2.2.	Poretrykk før, under og etter tetting.....	40
4.2.3.	Suksesskriterier	41
4.2.4.	Sluttvurdering av situasjonen	41
5.	Læringspunkt for fremtidige lekkasjer	44
6.	Referanser.....	45

1. Innledning

I forbindelse med reguleringsplan E134 Dagslett–E18 ble det utført grunnundersøkelser i Lier kommune. En totalsondering (lokalitet 323) utført 3. oktober 2024, førte til punktering av en artesisk akvifer (Figur 1). Det rant vann opp av hullet umiddelbart etter at totalstrengene var trukket, noe som tyder på at det var større vannstrøm enn normalt, spesielt med tanke på at hullet var 40 m dypt. Lekkasjen viste seg å være unormalt kraftig og lot seg ikke tette med konvensjonelle metoder. Denne rapporten omhandler grunnforholdene og hvordan lekkasjen ble tettet.

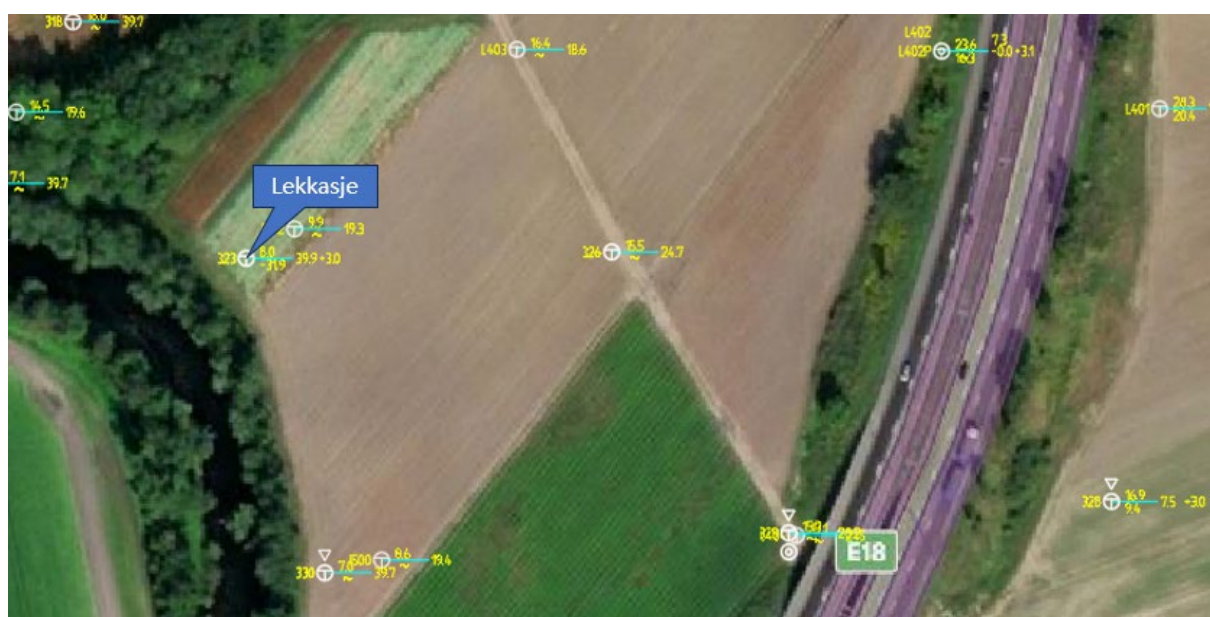
1. Stedlige forhold

Dette kapittelet beskriver grunnforholdene, enkelte forhold forstod vi etter at lekkasjen var tettet.

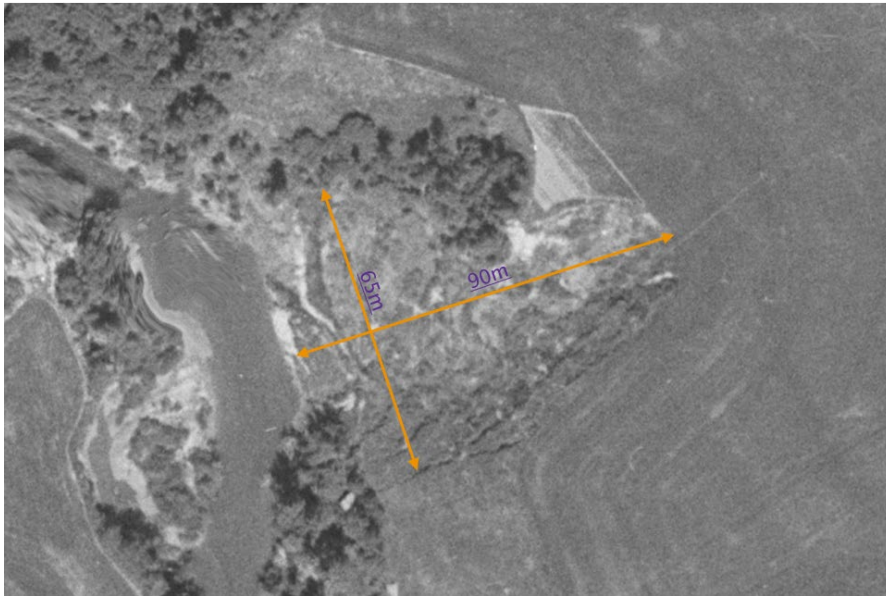
Kvartærgeologisk sett ligger Lierdalen under marin grense. Under deglasiasjonen var det flere tilbaketrekningstrinn. Dette gjorde at det blant annet ble avsatt israndavsetninger og breelvavsetninger, som ligger under de marine avsetningene. Lierelva renner igjennom Lierdalen, den har erodert i leiren og avsatt elveavsetninger. I tillegg har det vært flere bekker som har erodert i leiren og dannet flere raviner i området.

I 1963 skjedde en utglidning mot Lierelva (Figur 2). Utglidningen skjedde like utenfor lokalitet 323 og hadde et løseområde på ca. 90 m. I 1970 ble Lierelva flyttet og erosjonssikret. Arbeidet medførte at terrenget ved lokalitet 323 ble senket, slik at massene har hatt noe høyere overlageringstrykk enn i dag.

I dag ligger lokalitet 323 på dyrket mark, 7 moh. Marken heller slakt ned fra E18 mot Lierelva. Lokaliteten ligger 18 m fra Lierelva og 170 m fra E18 (Figur 1 og Figur 3). Tidligere grunnundersøkelser i området har vist at det er artesisk grunnvann i området.



Figur 1 Flyfoto som viser grunnundersøkelser i området og lokalitet 323 der lekkasjen oppstod.



Figur 2 Flyfoto over Lier 1964 (www.Norgebilder.no) som viser konturene av skredet i 1963, som ikke forplantet seg til E18.

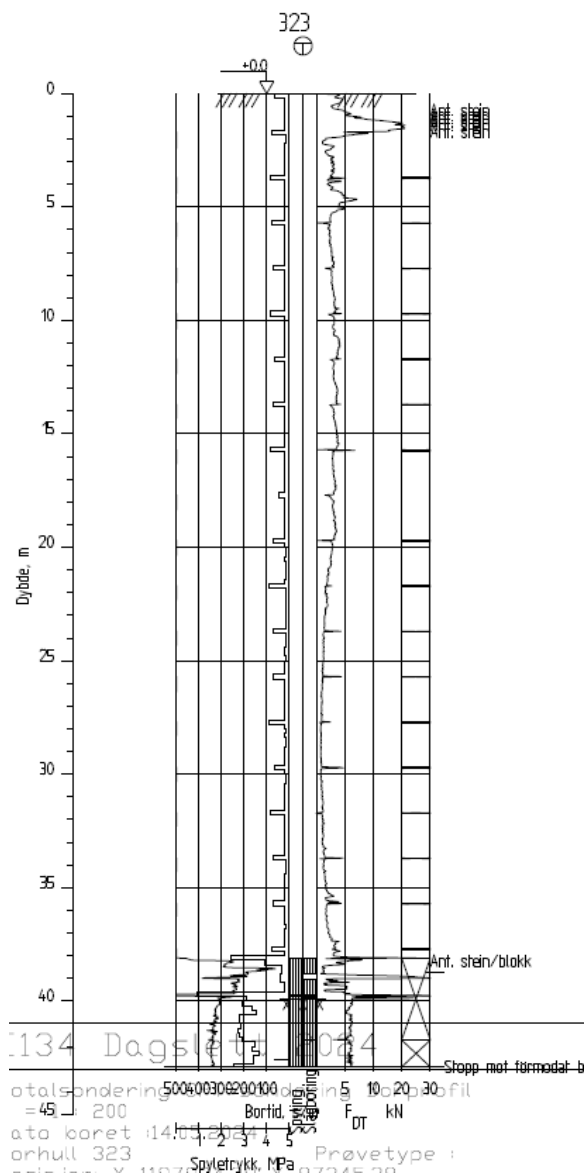


Figur 3 Oversiktskart som viser terrenget i området rundt totalsondering 323. Konturene etter skredet i 1963 er tegnet inn.

1.1. Jordarter

Området består hovedsakelig av bløt til middels fast leire, med enkelte forekomster av kvikkleire og sprøbruddmateriale.

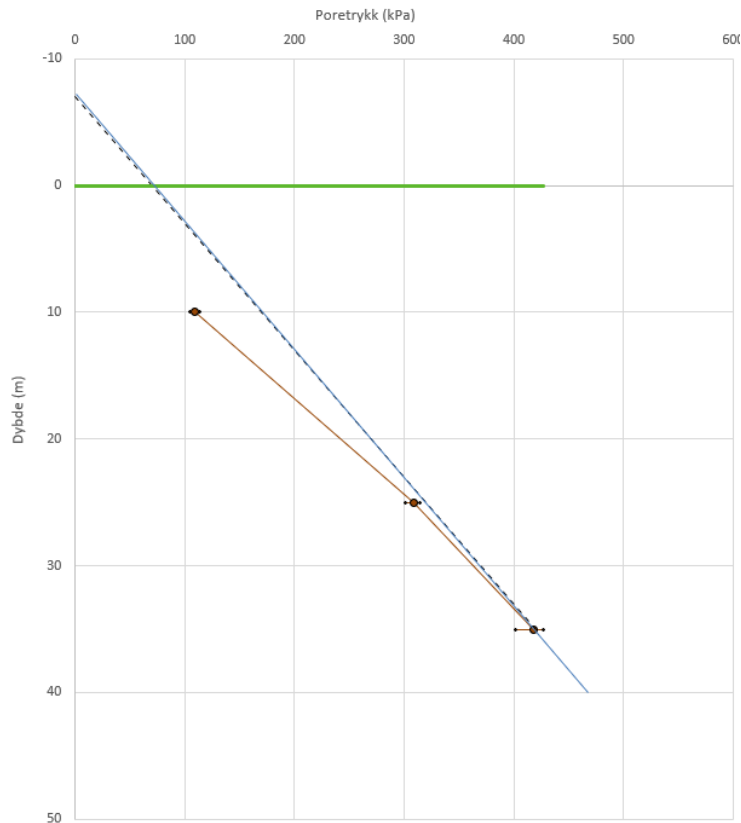
Totalsondering 323, viser et grovt lag på ca 1,5 m, deretter tolket sprøbrudd ned til 20 m og tolket kvikkleire ned til 38,5 m. Det er et fast lag over berg mellom 38,5 og 40 m. Typisk er dette finstoffholdig bunnmorene (Figur 4). Lengdesnitt er vist i Vedlegg 1.



Figur 4 Totalsondering 323.

1.2. Poretrykk

23. oktober ble det installert poretrykksmålere ca. 30 m nord for hull 323 på 3 dybder: 10m, 25m og 35 m. Poretrykksmålinger på 35 m dyp viste en stighøyde på 7 m over terreng (Figur 5).



Figur 5 Graf over poretrykksmålere installert på 3 dybder. Grafen er basert på verdier fra perioden mellom 30.10.2024 og 3.2.2025. Det er poretrykksmåler på 35 m dybde som er mest relevant for trykk fra vannførende lag.

1.3. Tolkning av vannførende lag

Det var usikkert om lekkasjen kom fra berg eller det faste laget over berg. Det var ikke entydige indikasjoner fra boringen hvor lekkasjen kom fra. Det er flere områder i Lierdalen med grove eskeravsetninger under de marine avsetningene. Disse avsetningene kan være meget vannførende. Lekkasje av den størrelsesordenen som observert fra 323 er likevel assosiert med vannførende soner i berg. Vannet kan komme fra en vannførende sone i berg som ble påtruffet under boring, eller en sone like i nærheten.

1.4. Stabilitetsvurderinger

Den 24. oktober ble det utført CPTu-målinger som ble brukt i stabilitetsvurderinger (se eget notat [3]). Kort oppsummert viser resultatene en dyp glidesirkel med en sikkerhetsfaktor på

1,08. Denne glidesirkelen ligger dypere enn 0,25H, og er iht. NVE veileder 1/2019 mindre relevant som et initialskred [3]. For lokalstabiliteten var sikkerhetsfaktoren på 1,56.

1.5. Tidlig vurdering av lekkasje og utvasking

Etter flere mislykkede tetteforsøk ble lekkasjen målt til 4–5 liter per sekund. Det var tydelig utvasking og det ble tatt vannprøver som bekreftet dette (Figur 6).

Ved utvasking av masser dannes et hulrom og/eller selvkollaps som fører til setninger. Selv om volum utvasket materiale er usikkert, ble det på dette tidspunktet grovt anslått til å være rundt 10 m³ «bulk jord» per uke.



Figur 6 vannprøve med sedimenterte løsmasser. Foto: Elisabeth Gundersen

2. Mislykkede tetteforsøk

2.1. Tetting med bentonitt

Den 3. oktober 2024 (samme dag som punktering) ble lekkasjen forsøkt tettet med bentonittstaver etter prosedyre beskrevet i Statens vegvesen veiledning N-V220 Geoteknikk i vegbygging [1].

For å få bentonittstavene ned i leira ble det boret et foringsrør igjennom det øverste grove laget (grove masser gjør at hullet kollapser). Deretter ble det presset ned ca. 30 bentonittstaver i leirhullet.

Etter tetteforsøket startet rant det fortsatt blakket vann opp av borehullet (Figur 7). Noen dager senere ble det også observert vann som sildret opp noen meter bortenfor borehullet, noe som kunne tyde på at lekkasjen hadde spredd seg ut til siden. Under senere tetteforsøk ble det observert at bentonittstavene hadde blitt presset opp og lå som en kake under det grove topplaget på 1,6 m. Dette kan forklare observasjonene av at lekkasjen hadde spredd seg ut til siden.

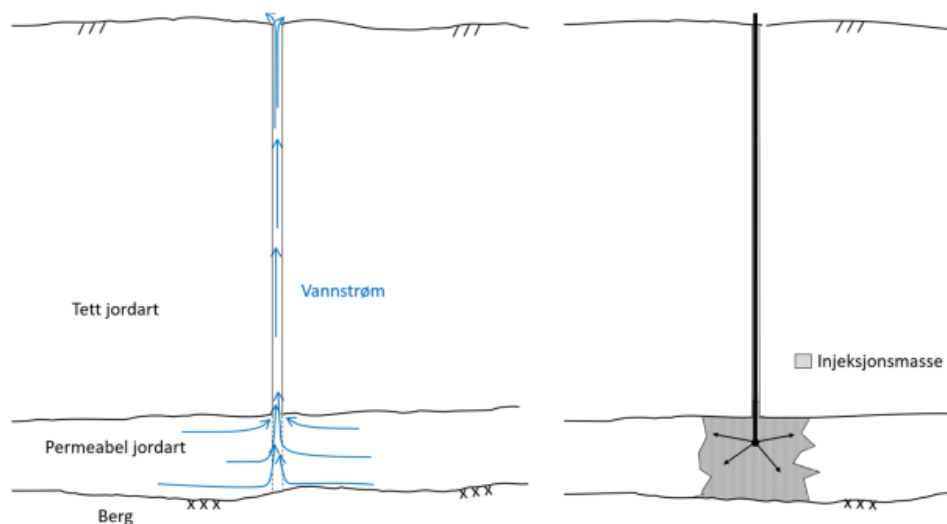
Det antas at denne metoden ikke fungerte pga. for høy vannstrøm og for stort vanntrykk.



Figur 7 Bilde av lekkasjen etter at det er forsøkt tettet med bentonittstaver, foto tatt den 3.10.2024 (Foto: Bjørn Wold)

2.2. Tetting med AUV mørtel

Mandag 7. oktober var boremannskap på plass med utstyr for å tette lekkasjen med injisering av AUV mørtel, iht. metode beskrevet i Statens vegvesen veiledning N-V220 Geoteknikk i vegbygging [1] og Statens vegvesen rapport 704 [2]. Prinsippet for metoden er vist Figur 8.



Figur 8 prinsippskisse som viser lekkasje fra vannførende lag og tetting med AUV mørtel (figuren er hentet fra [2]).

På grunn av tekniske problemer ble de to første tetteforsøkene utført feil. Etter dette forsøkte man å optimalisere tettemetoden ved å bytte til 1 toms rør med større indre diameter og borkrone med større åpning for å få presset ut mer AUV mørtel. Mørtelen som ble pumpet ned ble ført opp igjen på utsiden av rørstrengen av vannstrømmen (Figur 9). Totalt forsøkte man å tette fire ganger med denne metoden.

Det antas at denne metoden ikke fungerte pga. kombinasjonen av høy vannstrøm og høyt vanntrykk.



Figur 9 Bilde fra 4. tetteforsøk utført den 16.10.2024 med modifisert utstyr. Til venstre: vannstrøm opp før injisering. Til høyre: vannstrøm opp etter injisering med AUV mørtel, vannet har tydelig endret farge og viser at AUV mørtelen blir vasket opp. Foto: Daniel Jergling

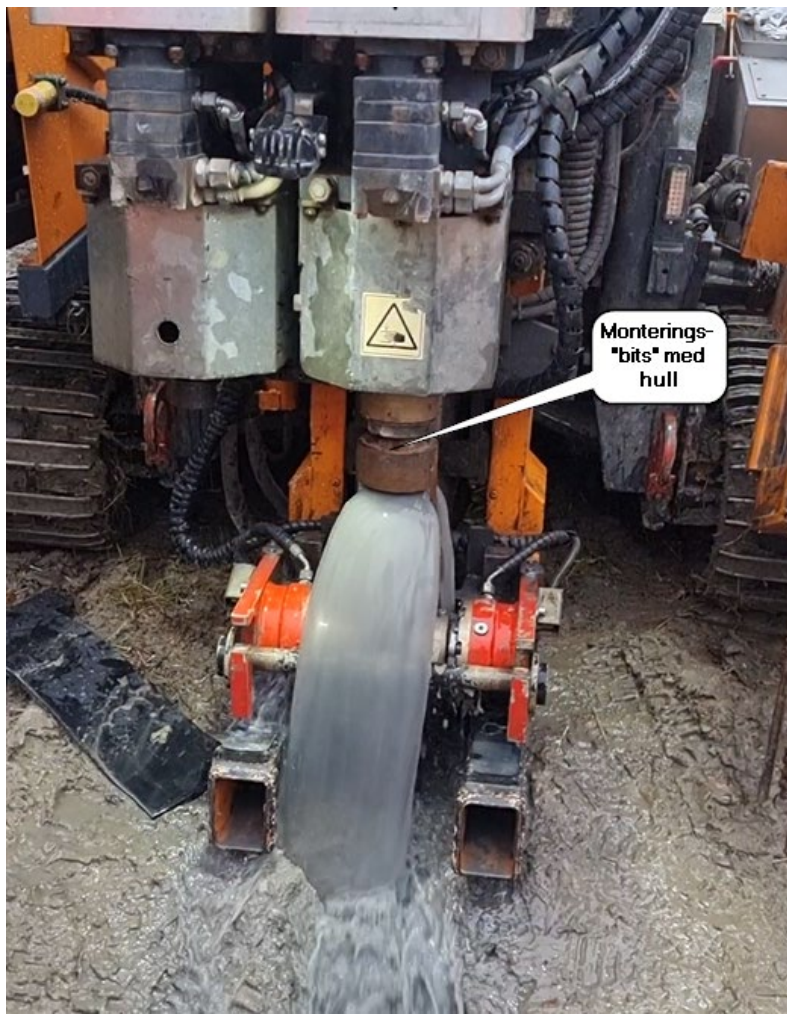
2.3. Tetteforsøk med «foringsrør-prinsipp»

For å få en kontrollert vannstrøm og å stoppe erosjon ble det forsøkt å bruke «foringsrør-prinsipp». Her var hypotesen at leira etter hvert skulle klebe seg til utsiden av foringsrøret. Dette prinsippet kunne potensielt redusere vannstrømmen nok til å muliggjøre injisering av mørtel i det vannførende laget.

Med dette prinsippet var det viktig å fange hele vannstrømmen i foringsrøret og gi minst mulig omrøring av leiren på utsiden av foringsrøret. Ved installasjon var det risiko for leirpropp i røret. Totalsonderingsstenger var derfor i beredskap slik at man kunne bruke boring og spyling for å åpne eventuelle tettheter i røret

Den 6. november ble 4 tommer foringsrør uten borkrone presset ned i leiren. Denne diameteren ble valgt fordi grunnboringsriggen kan installere disse rørene, i tillegg var diameteren stor nok til at vannet kunne renne fritt. Rørene ble levert som 1 m lange seksjoner som ble festet til hverandre med gjenger. Gjengefestene er utformet slik at de sammenkoblede rørene er glatte på innsiden og utsiden.

Foringsrørene ble forsiktig presset ned for å ha minst mulig omrøring av massene på utsiden. For å gjøre innsiden av foringsrøret til foretrukken vannvei ble utstyret modifisert slik at vannet kunne strømme igjennom røret i stedet for på utsiden (Figur 10). Under installasjon strømmet det likevel mye vann på utsiden av røret (Figur 11).



*Figur 10 Bilde av monteringsmodifikasjon for å ha åpen vannstrøm inni foringsrøret under installasjon.
Foto: Daniel Jergling.*



Figur 11 Bilde av vannstrøm inni og på utsiden av foringsrøret under nedpressing av foringsrør. Foto: Daniel Jergling.

For å få lengst mulig foringsrør som leiren kunne klebe seg til ble det satt ned 31 m rør (bunnen var 30,7 m under terreng). Jo lenger foringsrør jo mer leire kunne klebe seg til røret og sannsynligheten for å kunne strupe strømmen ble høyere. Røret ble stoppet i tolket kvikkleirelag. Deretter ble vannet pumpet ut for å lede det inn i foringsrøret, og dermed unngå utvasking på utsiden (Figur 12). For å forhindre at røret skulle synke ned i grunnen ble det sveiset på to ører som stenger ble trukket igjennom (Figur 12 og Figur 13).

Det ble installert sugepumpe med slange ned i røret. Pumperaten ble justert slik at man holdt grunnvannstanden ca 1–2 m under terreng. Det var ønskelig å pumpe med så lav rate som mulig for å unngå økt erosjon og utvasking.



Figur 12 bilde av foringsrør som blir pumpet for å få vannstrømmen inn i foringsrøret. Foto: Bjørn Wold.

Den 12. november forsøkte man å sette på 2 m rør (2 m stighøyde), for å kunne begynne å strupe vannstrømmen. Etter 15 minutter begynte vannet å renne på utsiden av foringsrøret (Figur 13). Forsøket ble avsluttet, men foringsrøret ble stående og man fortsatte å pumpe ut vann gjennom foringsrøret.



Figur 13 Til venstre: bilde av lekkasje med 2 m ekstra foringsrør over terreng, dvs. stighøyde på ca. 2,3 over terreng. Til høyre: Etter 15 minutter strømmer vannet på utsiden av røret. Foto: Bjørn Wold.

3. Vellykket tetteforsøk – Forberedelser

Den 14. november 2024 ble det satt ned en hurtigarbeidende ekspertgruppe. Gruppens mandat var å:

- Vurdere situasjonen fortløpende
- Samle mulige metoder for å tette lekkasjen og systematisk vurdere egnethet
- Velge metode og gjennomføre tetting
- Rapportere de endelige resultatene

Det ble raskt avdekket behov for å samle inn mer informasjon for å få bedre oversikt over situasjonen.

3.1. Forberedelser og innsamling av nye data

3.1.1. Vurdering av hulrom i grunnen

For å måle mulig hulrom i grunnen ble det senket et lodd ned igjennom foringsrørene. Den 14. november ble det målt en dybde på 34,7 m, noe som indikerte et hulrom på 3,7 m dybde under foringsrøret. Diameteren på hulrommet var ukjent, men ble vurdert basert på styrkeegenskaper fra CPTu.

Leiras skjærfasthet øker med dybden. Beregning i Tabell 1 viser et forenklet estimat av totalspenninger i leiren i et antatt punkt i en vertikal kant mellom leire og vann i et antatt hulrom nede i leieren.

Tabell 1 forenklet estimat av totalspenninger i leira på 32 m dyp (bunn foringsrør)

Leirdata				
Udrenert skjærfasthet s_u [kPa]		Maks. deviatorspenning, $q = 2 \cdot s_u$ [kPa]	Tyngdetetthet, leire γ [kN/m ³]	Tyngdetetthet vann γ_w [kN/m ³]
70 (60-100)		140	20	10
Spenning ved kant tenkt hulrom				
Dybde [m]	Overtrykk fra vann over terreng [kPa]	Vertikal totalspenning σ_v [kPa]	Horisontal totalspenning (= vanntrykket) σ_h [kPa]	Deviatorspenning q [kPa]
32	70	640	390	250

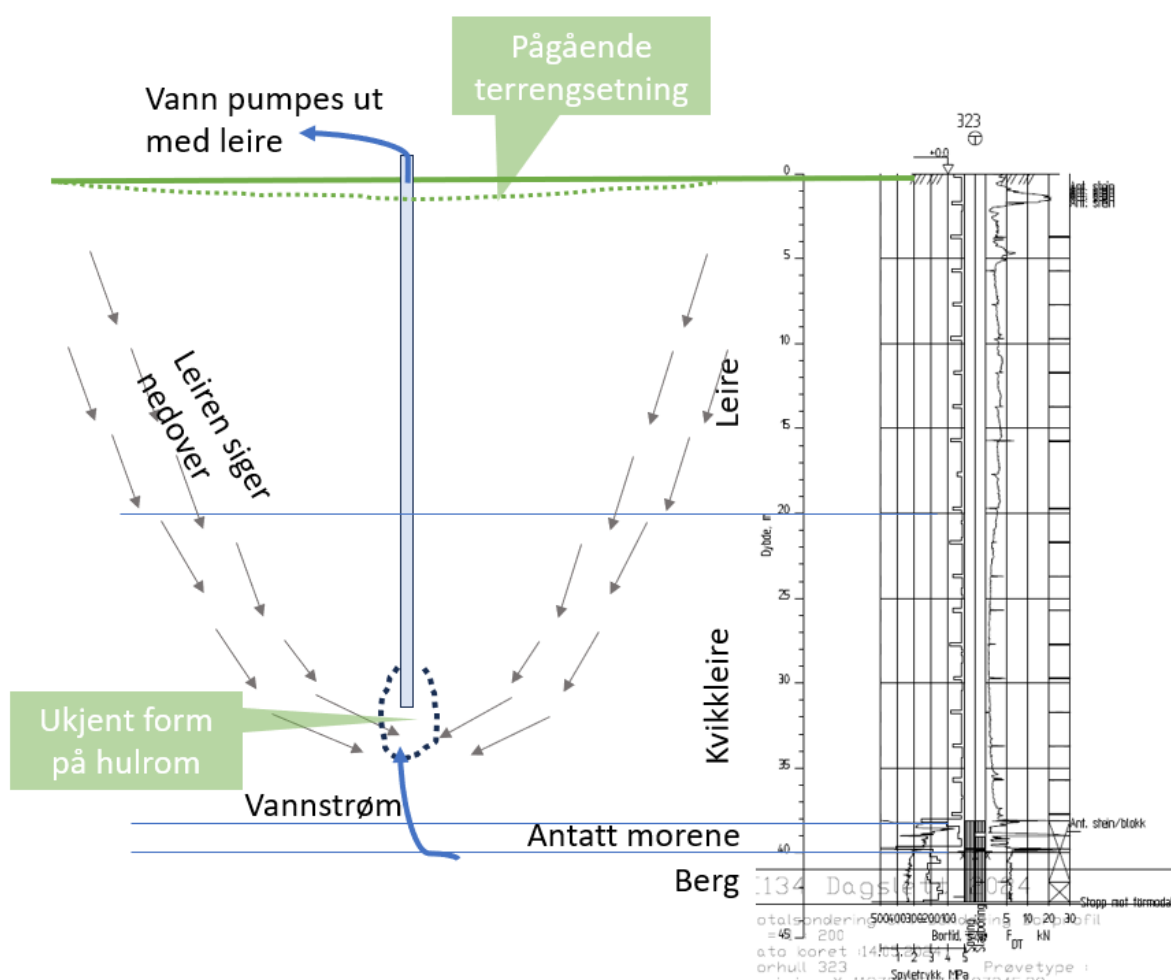
Forskjellen mellom vertikalspenning (640 kPa) og horisontalspenning (390 kPa) gir en deviatorspenning lik 250 kPa. Dette basert på at vi har et vanntrykk i hulrommet som tilsvarer en stighøyde over terreng lik 7 m, iht. poretrykksmål. Om vi setter inn et kanskje mer realistisk vanntrykk lik 55 kPa (5,5 m), jf. Kapittel 3.1.2, blir deviatorspenningen 265 kPa.

Deviatorspenningen kan maksimal bli lik $2 \cdot s_u = 140 \text{ kPa}$, altså langt under hva beregningen viser. Beregningen ser på et punkt ved vegg i et stort hulrom der 3D-effekter kan neglisjeres. Dersom man har lagt rett s_u til grunn kan man med andre ord ikke har store

hulrom nede i denne leiren uten at hullet kollapser og presses sammen fra omgivende leire. Det er noe usikkerhet rundt tolket Su.

Leirens fasthet gjør at hullet kollapser kontinuerlig når sidestøtten «fjernes» pga. eroderte masser. Når hulrommet blir mindre blir 3D-effekter betydelige gjennom såkalte bue- eller hvelvvirkning (arcing), så mindre vannfylt hulrom kan derved stå åpne. Tilsvarende vurdering kunne gjøres for «taket» i et hulrom, men slike avanserte beregninger er ikke utført.

Basert på disse beregningene ble det vurdert at leira må ha seget inn mot bunnen av foringsrøret med en pågående terrengsetning. Tolket situasjon er vist i Figur 14. Selv om det teoretisk ikke skulle være et stort hulrom viste målingene under foringsrøret at det måtte være et visst hulrom.



Den 18. november ble pumperate og vannstand målt. Det viste seg at vannet ble pumpet ut med en rate på 6,7 l/s. Da var vannstanden på 3,72 m under topp foringsrør (ca 3,2 m under terreng).

Da pumperaten ble redusert til 4,7 l/s stabiliserte grunnvannstanden seg på 1,12 m under topp foringsrør (0,6 m under terreng).

Disse enkle målingene viser at ved ca. 2 l/s reduksjon i uttak stiger vannspeilet med 2,6 m. Hvis man antar at denne «brønnen» har lineær kapasitet og vi reduserer uttaket med 4,7 l/s vil vannspeilet teoretisk stige med $(4,7/2) \times 2,6 \text{ m} = 6,11 \text{ m}$, dvs. 5,6 m over terreng. Dette antyder en lavere stighøyde enn poretrykksmåleren viste (se Figur 5).

3.1.3. Utvasking

Fra 18. november ble det tatt jevnlig vannprøver som ble tørket for å måle vekt sediment per liter vann (Tabell 2). Resultatene viser noe variasjon, men gjennomsnittlig viser prøvene en utvasking på ca 7 g tørrstoff per liter. Dette regnskapet inkluderer en prøve tatt rett etter en utrasingshendelse, hvor det naturlig vil være mer sediment per liter vann (se kapittel 3.1.5 for beskrivelse av hendelsen). Variasjon av sedimentinnhold i prøvene tyder på gjentakende kollaps, i tråd med vurderingene i kapittel 3.1.1.

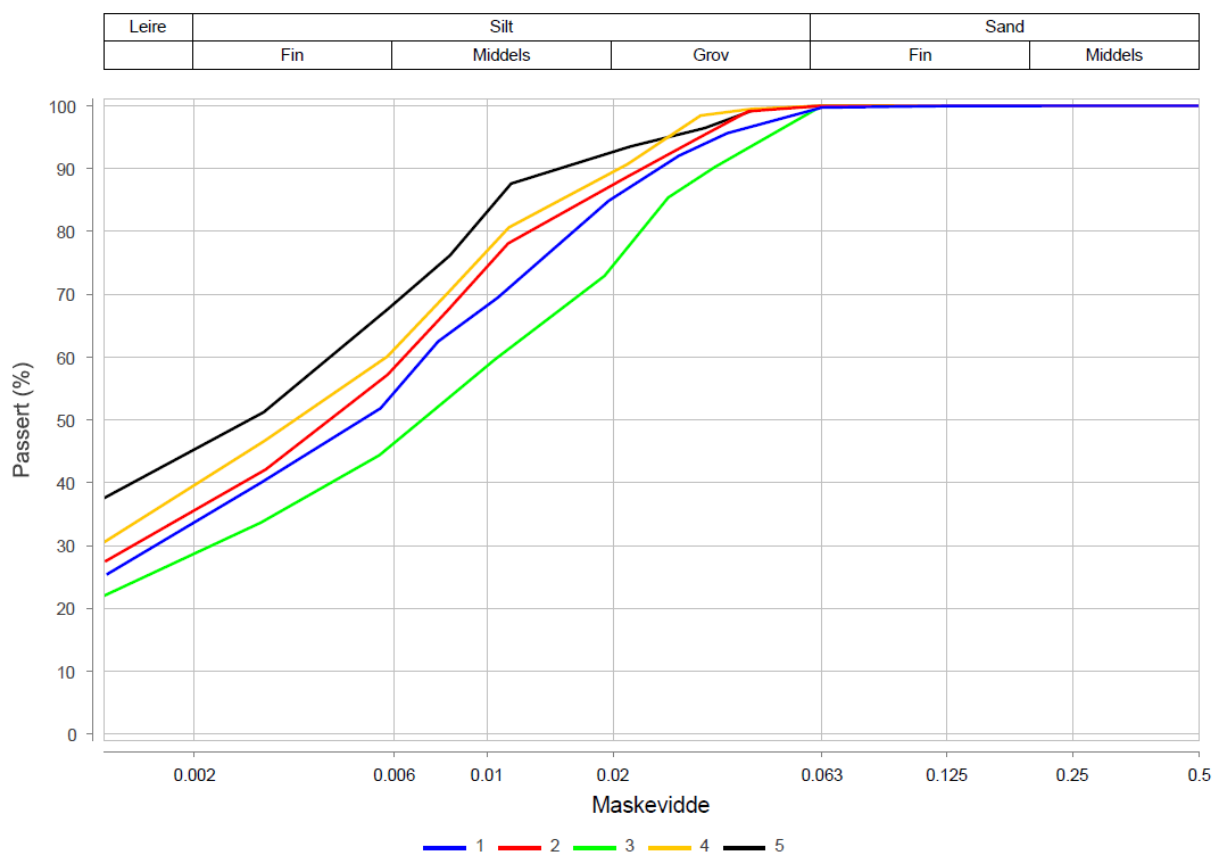
Tabell 2 laboratorieresultater som viser tørket prøve og gram tørrstoff per liter vann.

	Prøve 1 18.11.2024	Prøve 2 21.11.2024	Prøve 3 23.11.2024 (utrasing)	Prøve 4 25.11.2024	Prøve 5 26.11.2024
Mengde tørrstoff (g/l)	8,32	5,18	13,82	4,11	3,39

Med et gjennomsnittlig sedimentinnhold på 7 g/l og en vannstrøm på 5 l/s tilsvarer dette ca. 3 tonn utvasket tørrstoff per døgn, og ca. 90 tonn tørrstoff per måned. I ettertid viste det seg at det lakk i 56 dager, noe som gir en utvasking på ca. 168 tonn tørrstoff.

Masser ble vasket ut fra underkant foringsrør, på dette dypet er leira tilnærmet normalkonsolidert. Selv om det var en overlaging før tiltak i 1970, ville den ekstra vekten gitt en neglisjerbar påvirkning på konsolideringsgraden på 30 meter dybde, og er derfor ikke medregnet. Tidligere prøver i området viser et vanninnhold på 25 – 40 %, og en densitet på 1,8–2 tonn/m³ [5]. For normalkonsolidert leire med middels til høyt vanninnhold tilsvarer 90 tonn tørrstoff (1 måneds utvasking) et volum på 56–70 m³. I ettertid viste det seg at det lakk i 56 dager, dette tilsvarer et utvasket volum på 105–130 m³.

Korngraderingskurvene viser at det er leire som har blitt vasket ut, med 28–45 % leirinnhold og 55–72 % siltinnhold.

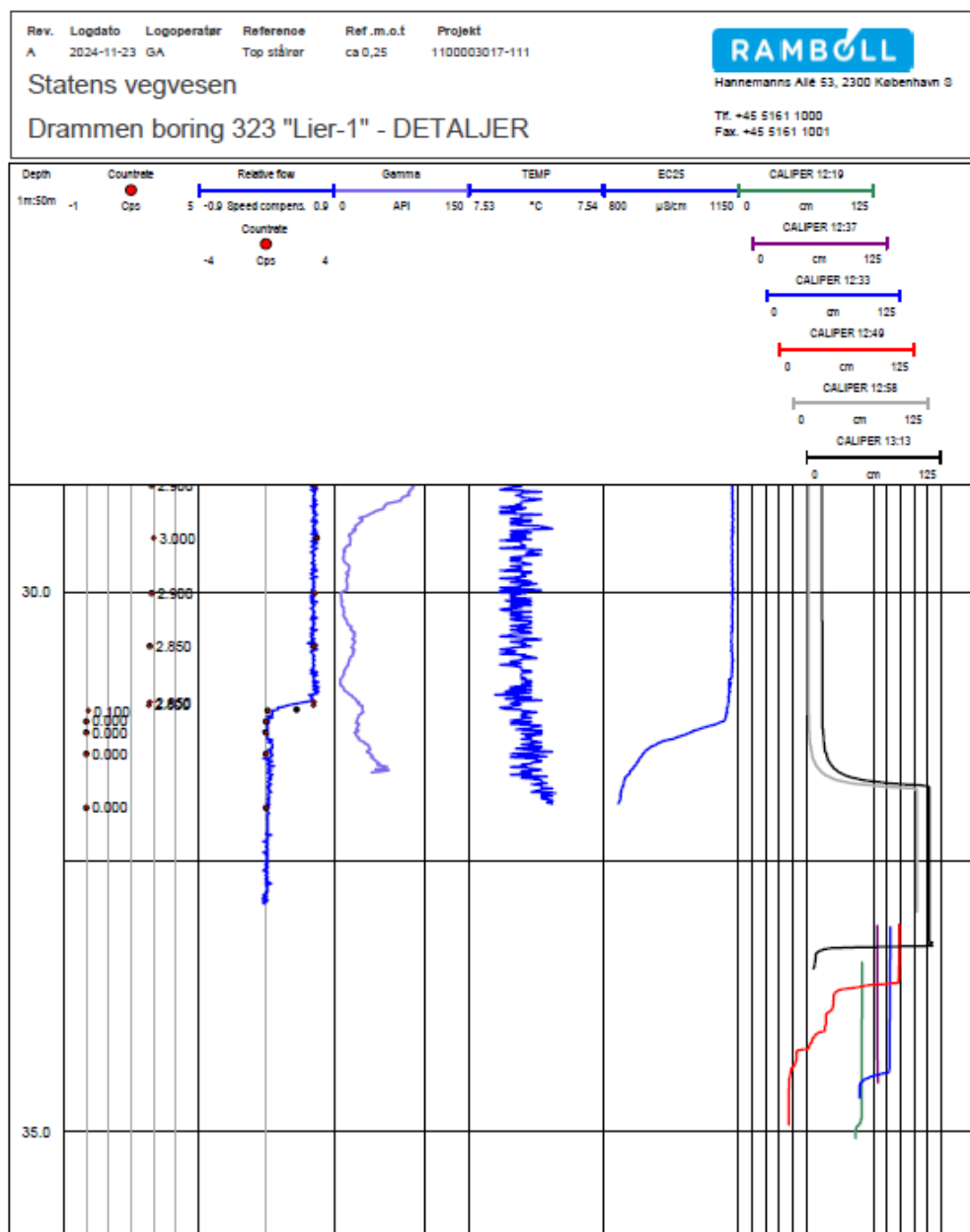


Figur 15 kornfordelingskurve av utvasket materiale, se Tabell 2 for prøvedato av de 5 vannprøvene.

3.1.4. Målinger av diameter på hulrom under foringsrør og vannstrøm

Den 23. november logget Rambøll Danmark hulrommet under foringsrøret med en spesialtilpasset caliper (utstyr som normalt brukes i borehullslogging), som kunne måle hulldiameter opptil 1,15 m. Målingene viste at diameteren var over 1,15 m uten antydning til å komme borti leirveggene. Det ble målt flere ganger. Rambøll målte også vannstrøm med et flowmeter, som viste en jevn strøm i røret på 0,4 m/sek (tilsvarende 5 l/sek igjennom et 4 tomms rør). Hastigheten sank umiddelbart under foringsrøret, hvor det ikke var målbar strøm (Figur 16). Disse målingene indikerte at det må ha vært et visst hulrom under foringsrøret, da man ellers ville forventet noe strøm fra leirbunn opp til foringsrør.

Det ble planlagt å logge med en akustisk televiewer, men denne ble av ulike årsaker ikke medbragt. Dette instrumentet kunne gitt indikasjoner om mulig hulrom på utsiden av foringsrøret. I ettertid ser man at dette ville vært meget nyttig.



Figur 16 resultater fra Caliper målinger og flowmålinger under foringsrøret.

3.1.5. Observasjoner av gjentakende kollaps

Under logging av hulrommet den 23. november 2024 ble det observert at vannstrømmen opp av røret nesten stoppet, og det kom opp vesentlig mer leire. Etter omtrent 10 minutter var vannstrømmen gjenopprettet, men vannet var tydelig mer grått (Figur 17). En vannprøve fra denne situasjonen dokumenterte høyere utvasking enn normalt, og med økt siltinnhold (prøve 3 i Tabell 2 og Figur 15). Dette tyder på at det oppstod en kollaps/utrasing av hulrommet mens vi logget.

Før utrasingen hadde vi kontrollmålt dybde til leirbunn fra topp foringsrør til 34,7 m. Etter utrasingen var dybden 33,5 m, noe som indikerer at kollapsen hadde fylt opp ca 1,2 m av hulrommet. Dette laget må ha stoppet noe av vannstrømmen i ca. 10 minutter før den tok seg opp igjen.

En liknende hendelse med mye leire i utpumpet vann ble observert påfølgende dag. Dette hadde ikke blitt observert tidligere, til tross for daglige inspeksjoner av lekkasjen. Disse to observasjonene rett etter hverandre kan tyde på at situasjonen endret seg på denne tiden.



Figur 17 bilde øverst til venstre viser utstrømning før loggeforsøk, bilde øverst til høyre viser utstrømning da det skjedde en kollaps, bildet nederst viser utstrømningen etter ca 10 minutter. Her har vannstrømmen tatt seg opp, men det er tydelig mer utvasking. Foto: Heidi Kjennbakken.

3.1.6. Måling av stighøyde med foringsrør

Ettersom lekkasjen på utsiden av foringsrøret kom da man forsøkte å strupe strømmen ble det antatt at denne situasjonen var mulig å gjenskape. Den 25. november ble det forsøkt å trigge lekkasje på utsiden av foringsrøret. Det ble koblet på 4 m foringsrør (stighøyde på ca 4,3 m over terreng). I starten rant det over røret, men etter ca. 15 minutter sluttet det å renne. Det var noen glipper mellom foringsrørene der det lakk vann, noe som har bidratt til at full stighøyde ikke ble oppnådd (Figur 18). Selv om det sluttet å renne over toppen, ble det ikke observert at vannstrømmen kom på utsiden av foringsrøret, slik som første forsøk på å strupe strømmen. Dagene før denne testen hadde det blitt dannet frost i bakken, og det er uvisst hva som skjedde med vannet under frostlaget. Den mest naturlige forklaringen er at vannet beveget seg i det grove laget 1,5 m under terreng. Etter en time ble forsøket avsluttet for å ikke lage nye vannveier. Dette forsøket viste også at stighøyden lå nærmere 5,5 m over terreng som antydte med pumpetesten (se kapittel 3.1.2).



Figur 18 Bilde av 4 m foringsrør (4,3 m over terreng) som viser at det sluttet å renne fra toppen, men det rant ut gjennom nederste gjengekobling. Foto: Heidi Kjennbakken

For å vurdere om leiren hadde klebet seg til røret ble røret løftet noen cm med grunnboringsriggen. Det var ingen merkbar motstand, og derfor antatt at røret stod løst i leiren.

3.1.7. Terrengmålinger og setninger

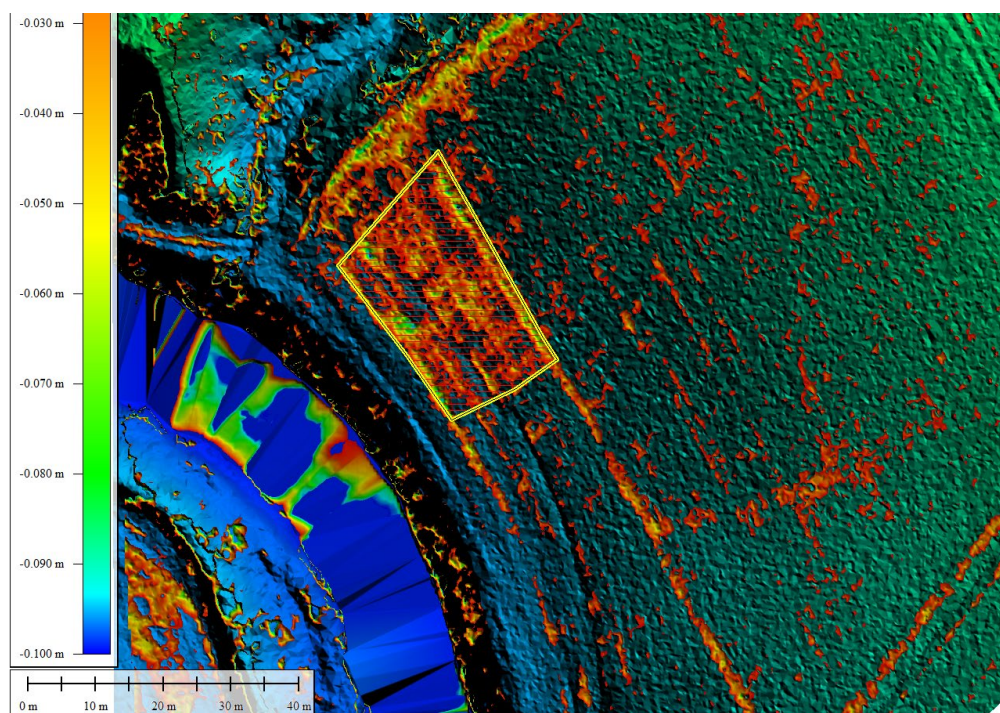
Det var usikkert hvor mye terrenget hadde satt seg, men mengde utvasket materiale tydet på at det skulle ha oppstått målbare setninger. Den 26. november 2024 ble terrenget skannet med en Matrice 350 RTK drone. RTK (Real-Time Kinematic) er en teknologi som forbedrer

nøyaktigheten til posisjonsdata fra GPS-systemer, og gir presisjon på cm-nivå. Dronen var utstyrt med en L2 sensor med LiDAR-teknologi, som muliggjorde nøyaktig kartlegging av terreng. Høyden på E18 ble brukt for å korrigere høydedata fra 2022 (fra www.hoydedata.no). Ettersom området var på et dyrket jorde, forventes en del terrengendringer fra år til år. Under planlegging av tettearbeider ble det ikke tid til å analysere lidardataene nøye, og ved første analyse var det ikke tydelig hvor mye setninger som hadde oppstått.

Analyser i ettertid hvor terrengdata fra den 26. november 2024 ble differensiert fra terrengdata 2022 (www.hoydedata.no), viste en konsentrert terrengendring rundt lekkasjen og langs ravinen i nord. For å tydeliggjøre forskjellene er positive verdier fjernet (Figur 19). Setninger langs ravinen er resultat fra at Statens vegvesen hadde kjørt både rigg og lastebil.

Terrengendringene rundt lekkasjen tyder på at det hadde oppstått setninger på opptil ca. 5 cm i en avstand på ca. 20 m fra lekkasjen (Figur 19). I en indre radius på 1,5–2 m har terrenget har satt seg med ca 8–9 cm. Ned mot Lierelva var det ikke målbare terrengendringer.

Setninger på 5 cm innenfor et areal på 630 m² gir et volum på ca. 30 m³. Dette er langt mindre enn målt utvasking skulle tilsi (se kap. 3.1.2 der estimert utvasket volum er på 105–130m³).



Figur 19 Lidar data 26.november 2024. Over lidardata er det lagt på terrengforskjeller mellom lidardata fra 2022 og 2024 (www.hoydedata.no). Negative verdier viser der terrenget før tetting (26.11.2025) lå lavere enn i 2022, dvs. setninger. Positive verdier er fjernet. Gult polygon (630 m²) markerer området som antas å reflektere setninger fra lekkasjen.

3.1.8. Oppsummert situasjon

Under siste tetteforsøk var ikke alle data ferdig analysert, vi satt med følgende forståelse:

- Det var målt et visst hulrom under foringsrøret. Dybden under foringsrør varierte fra 3,7–2,5 m. Diameteren var over 1,15 m. Diameteren kan ikke være veldig stor pga. styrken i jorda. Basert på estimerte totalspenninger var stort hulrom beregnet til ikke å stå åpent. Det ble antatt at leire seg sakte nedover mot bunnen av foringsrøret og gav en pågående terrengsetning (Figur 14).
- Utvasking av tørrstoff var vurdert å tilsvare 90 tonn per måned, tilsvarende et jordvolum på 56–70 m³ per måned.
- Tolkning av terrengendringer basert på lidar-data viste ikke store setninger. Innmåling av poretrykksrør hadde heller ikke gitt noen tegn på store setninger.

Vi hadde ikke god forståelse av setningsforløpet, sett i sammenheng med gjenværende hulrom. Lidardata som er presentert i kapittel 3.1.6 er mer detaljerte terrenganalyser/ bearbeiding av data som ble gjort i ettertid. Vi antok et visst hulrom, men antok at det var maks 20 m³.

Vi forstod også på dette tidspunkt at dette var en ustabil situasjon. Det var viktig å tette dette raskt. Vi antok dette til slutt ville føre til en større ukontrollert kollaps, hvis ikke stoppet.

3.2. Beskrivelse av tetteforsøk

Ekspertgruppen utviklet flere løsningsforslag for å tette lekkasjen som ble systematisk gjennomgått og vurdert. Det ble til slutt besluttet å bruke et løsningsforslag som utnyttet den aktuelle situasjonen. Det bestod i å bruke en sementbasert blanding som støttevæske, se kapittel 4.

De mest aktuelle forslagene som ikke ble valgt er kort beskrevet nedenfor, fordi det kan være gode løsninger for lekkasjer med andre egenskaper:

- **Tetting med grovt granulært materiale:** Ved å tilføre grovere masser gjennom foringsrøret kunne vannstrømmen bremses, noe som ville gi mulighet for å legge et lag med filtersand. Ved å redusere vannhastigheten ville erosjonen avta og utvaskingen reduseres. I tillegg ville filterlaget fange opp en del av det utvaskede materialet. Dette kunne gitt en mer kontrollert lekkasje med vesentlig mindre utvasking, og på sikt kunne denne løsningen tettet seg selv. Filterløsninger har blitt brukt og har fungert tidligere [6]. *Denne løsningen ble ikke valgt på grunn av usikkerhet om gradering av lag og lang tids oppførsel ved ev. tetting.*
- **Tetting i antatt kildelag med AUV-mørtel med grunnboringsrigg:** Bruke samme prinsipp som tidligere, men optimalisere enda mer for bedre gjennomstrømning av AUV mørtel ned i det vannførende laget. *Ble valgt bort pga usikkerhet om man kunne greie å optimalisere metoden tilstrekkelig. Og metoden var uprøvd med så høy vannstrøm som her.*
- **Tetting i antatt kildelag med AUV-mørtel med brønnboringsrigg:** Veldig likt prinsippet som tidligere forsøkt, men man ville hatt større diameter på rørgata, fått boret

foringsrøret bedre ned i vannførende lag (mer kraft) og hatt større matetrykk på pumpa. Man ville boret ned et nytt 4 tomms rør til rett over berg. Det hadde vært behov for betongpumpebil og betongbiler. Pumpeslangen fra betongpumpebil skulle kobles på topp foringsrør for å pumpe ned AUV mørtel. Røret skulle heises mens man injiserte mørtel. Det hadde også vært behov for kranbil e.l. for å håndtere foringsrøret over bakken. *Valgt løsning ble ansett bedre tilpasset situasjonen. Metoden ble beholdt som et andrevalg hvis ikke valgte løsning hadde fungert.*

- **Avlastningsbrønner** ble vurdert for å redusere vannstrøm for å forenkle tettejobben og for å redusere/stoppe utvasking. Vi hadde kontakt med 2 brønnboringsleverandører, begge frarådet etablering av avlastningsbrønner. Ved å installere avlastningsbrønner kunne man risikert nye lekkasjer med mer utvasking som ville være like vanskelige å tette. Denne ideen gikk vi derfor raskt bort fra.

4. Vellykket tetteforsøk – Teoretisk beskrivelse

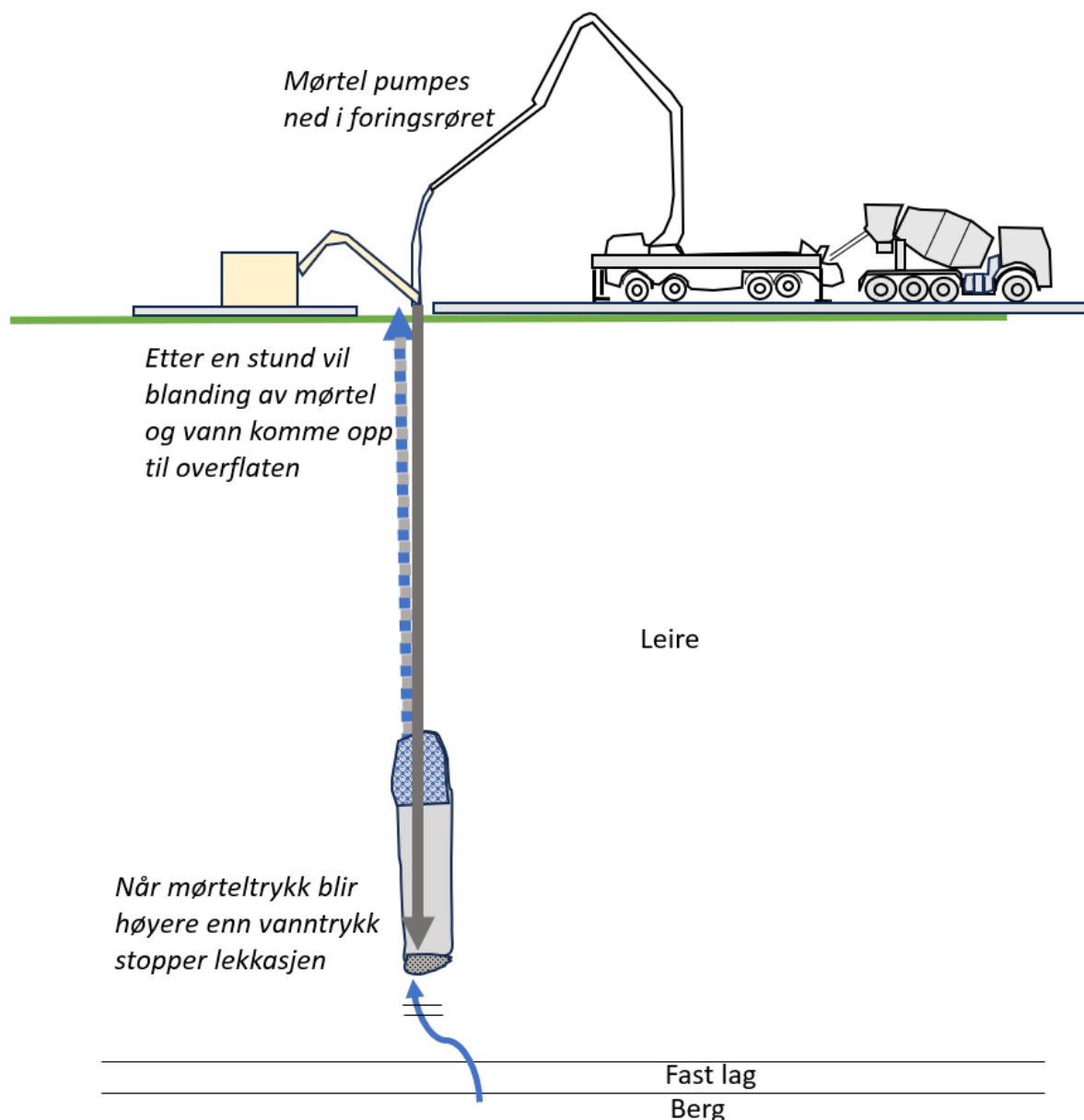
Valgte tettemetode gikk ut på å pumpe mørtel gjennom eksisterende foringsrør. Mørtel skulle fylle tomrommet, og også følge vannstrøm opp langs utsiden av foringsrøret. Det ble antatt at fluidtrykk fra ca. 10 høydemeter mørtel ville bli større enn vanntrykket og lekkasjen ville stoppe (Figur 20).

Dette tetteforsøket var tilpasset den situasjonen som hadde oppstått, der lekkasjen kom fra ca. 40 m dyp og vi hadde installert et foringsrør (uten borkrone) ned til 30,7 m under terreng. Vannstrømmen på utsiden av foringsrøret kunne tilbakeføres ved å strupe vannstrømmen i røret. Hulrommets størrelse var ukjent, men det ble antatt at det ikke kunne være veldig stort.

Mørtel har høyere romvekt enn vann og ville derfor fungere som en tung støttevæske og fortrenge vannet. Etter hvert som høyden av mørtelstrengen økte skulle fluidtrykket fra mørtelen bli høyere enn vanntrykket fra kilden. Om overtrykket fra lekkasjen var 100 kPa og mørtelen hadde romvekt på ca 20 kN/m³, ville balanse inntreffe når mørtelhøyden var $100/(20-10) = 10$ m over bunnpunktet til mørtelen. Ettersom lekkasjen var såpass dyp hadde vi god høyde til å oppnå nok trykk av mørtel med riktig romvekt.

Det var nødvendig at vannet rant på utsiden av foringsrøret da forsøket startet, slik at vann og etter hvert mørtel kom opp utenfor røret. Da ville ikke pumpetrykket bli et problem, og mørtelen ville presse vannet foran seg opp på utsiden av foringsrøret.

Mørtelen måtte pumpes ned vesentlig raskere enn den eksisterende vannstrømmen (hastighetsovertak) slik at vannstrømmen ikke fikk tid til å utvanne mørtelen for mye og ønsket romvekt kunne oppnås. På grunn av vannstrømmen på 5 l/sek ville noe av mørtelen bli utvannet til lavere romvekt. Da økte også behovet for nødvendig mørteltykkelse, men det var nok margin til å håndtere denne problemstillingen. Det ble vurdert at pumping av mørtel skulle foregå med dobbel rate av vannstrømmen (10 l/s). Det var ikke ønskelig å pumpe alt for fort, ettersom det kunne føre til erosjon opp langs røret som vi ikke hadde helt kontroll på.



Figur 20 Prinsippskisse av vellykket tetteforsøk

For at dette prinsippet skulle fungere måtte mørtelen være noenlunde ensartet, homogen og gjerne blande seg med vannet. Man kunne for eksempel ikke ha herdede klumper hvor vannet kunne begynne å strømme imellom, da kunne erosjon og nye kanaler raskt oppstå. Mørtelen måtte også bevege seg mest mulig som en væske og ikke som en seig klump. Hvis den la seg som en seig klump kunne vannet strømme på utsiden og danne nye kanaler. Hvis mørtelen beveget seg mest mulig som en væske ville den legge seg godt inntil leirveggene. Det var bedre at mørtelen ble litt vannet ut og var noenlunde homogen, enn at den ikke ble vannet ut og beveget seg som en seig masse eller skilte seg.

For å unngå at foringsrørene hindret fordeling av mørtel inn mot leira ble det vurdert som en fordel å trekke foringsrøret opp samtidig som det ble støpt videre. Med romvekten på 20 kN/m³ ville mørtelen gjenskape nesten samme trykk (noe høyere) mot leiren som in situ, og permanent tetthet var realistisk. En litt høyere romvekt kunne føre til at betongen på sikt

setter seg litt. Dette kunne presse laget under mørtelen mer sammen, men dette kunne være en gunstig tilleggseffekt for å oppnå permanent tetting.

Forutsetninger for å lykkes med konseptet

1. Det måtte være en lekkasje på utsiden av foringsrøret
2. Høy nok pumperate av mørtel for å overvinne vannstrømmen
3. Riktig mørtelblanding (homogen masse, selv i kontakt med vann og vannstrøm)
4. Nok mørtel tilgjengelig til at man kunne fullføre prosessen uten stopp.
5. God nok stabilitet til å gjennomføre arbeidene
6. God forberedelse, alle visste hva man skulle gjøre

Nedenfor er en gjennomgang av disse 6 punktene

4.1.1.1. Betongpumpe og pumperør

For å lykkes måtte det pumpes ned vesentlig mer mørtel enn vann som strømmet opp. Det ble vurdert nødvendig å pumpe 10 l mørtel per sekund, dette tilsvarer 36 m³ per time.

Det finnes betongpumpebiler med teoretisk kapasitet på 160 m³/time. For å kunne pumpe så store mengder var det nødvendig å koble slangen rett på foringsrøret (4 tommer). Det var ikke mulig å pumpe ned nok mørtel med en 3 tommers slange. Med gjenget foringsrør var det mulig å modifisere et rør, så det ble til et «pumperør» med påsveiset flens, løfteører og gjengetapp til lufteventil. Det ble laget to pumperør, et til bruk og et til reserve (Figur 21). Heiseørene kunne brukes både til å holde foringsrøret stabilt under pumping og til å trekke det opp under pumping.

For å pumpe ned mørtel med en hastighet på 36 m³/time brukes et relativt høyt trykk (ca. 40 bar). Men mørtel beveger seg ikke som vann, det er en bingham væske hvor det er interne skjærkrefter som må brytes for å få en mørtel til å bevege seg. Så selv om det var et høyt pumpetrykk for å få mørtelen igjennom rørgata, ville det ikke være samme trykk på mørtelen som kommer ut i enden av røret. Ettersom det skulle etableres en lekkasje på utsiden av foringsrøret var ikke trykkoppbygning i leira et problem.



Figur 21 pumperør med påsveiset flens, heiseører og gjengetapp til lufteventil. Foto: Bjørn Wold.

4.1.2. Valg av mørtelblanding

Neste utfordring var valg av sementbasert blanding. Sementen trengte noe å binde seg i, og siden det var et ukjent hulrom ble det anbefalt å ha noe sand i blandingen. Derfor ble det en mørtel (sement med sand) og ikke en slurry (bare sement). Siden blandingen skulle oppføre seg mest mulig som en væske var det ikke ønskelig med stein eller grus (betong).

Betong med AUV stoffer benyttes ofte i undervannstøp, den vannes ikke ut av vann som en «vanlig» betong og den beveger seg sakte med gode utflytende egenskaper. AUV benyttes også når man tetter i en artesisk lekkasje fra totalsondering [1]. Betong og mørtel egner seg dårlig i kraftig vannstrøm og den kan da separeres. Dette var egenskaper vi egentlig ikke ønsket i dette konseptet.

Den andre muligheten var en mørtel av finsats med noe silika; B45M40 med 0–8 sand. Mørtelen ble tilsatt noe silika for at den skulle være med å smøre rørgata. Bruk av silika bidrar til at mørtelen blir noe seigere pga. partikkelstørrelsen. Partiklene er betydelig mindre enn sementens partikkelstørrelse, og silika bidrar til å pakke hulrommene mellom sementpartiklene, noe som gjør at blandingen blir seigere.

De første mengdene mørtel ville bli pumpet rett ned i høyt vanntrykk, noe som påvirker egenskapene i mørtelen umiddelbart. Det ble antatt at en del av sanden i mørtelen ville sedimentere og sementen vaskes ut i starten. Dette ble ikke ansett som et veldig stort problem, for sanden ville være med på å tilføre tyngde og dempe vannstrømmen slik at man gradvis får bygget opp et tykt nok lag med mørtel.

For å få til en god start, smøre rørgata og «beskytte» den andre mørtelen i møtet med vann ble det anbefalt å begynne med 3 m³ AUV og deretter fortsette med B45M40 mørtel med 0–8 finsats. Betongteknologer i Hokksund betong samarbeidet med betongteknologer i Statens vegvesen for å finne en resept som møtte de kriteriene vi hadde.

Det ble bestilt en halv bil (3 m³) med AUV mørtel og 4 fulle biler (4*7 m³) med B45M40 mørtel med 0–8 finsats.

Under tetteforsøket viste det seg å være vanskelig å få pumpet ned AUV-blandingen pga. seigheten i sammensetningen. Under pumping klumpet og tettet det seg, blandingen hadde for stor friksjon mot veggen i pumpe slang. Vi ønsket ikke å risikere å tette foringsrøret med en mørtelblanding med AUV, så pumpe slang ble koblet av foringsrøret, og vi stoppet prosedyren med AUV. Leverandør forklarte at de hadde brukt mye tid på å få AUV blandingen med gode nok flyteegenskaper, og det var utfordrende uten stein-tilsetning.

Utfordringen med å blande AUV-mørtel på blandeverk kontra bruk av ferdige sekker med AUV-mørtel er tilpasningen av flyteegenskaper ved bruk av tilgjengelig sement på blandeverket, stedlig tilslag og de aktuelle tilsetningsstoffene blandeverket har. I sekker med AUV-mørtler er blandingsforholdene nøye tilpasset, tilsetningsstoffene tilsatt som tørrstoff og spesielt egnet i tillegg til at vannmengden som behøves er nøye angitt. Å blande AUV-mørtel er atskillig mer krevende enn å blande AUV-betong på ett blandeverk. Kort beskrevet er det enklere å få god flyt med mindre totalt overflateareal. Jo mere sand, jo større overflateareal. Ved bruk av steinfraksjoner går det totale overflatearealet ned.

Mengdene det var behov for på stedet utgjorde så stort volum at det ble valgt å blande det på ett ferdigbetong-blande verk. Det hadde ikke vært mulig å basere seg på blanding med sekker på stedet for å oppnå de volum som var krevd her.

B45M40 mørtel med 0–8 sand hadde en litt tykkere konsistens enn vi ønsket, den ble justert med superplastiserende tilsetningsstoffer på stedet for å få den mer flytende.

Det er viktig å nevne at for ev. nye lekkasjer av samme slag, må finsatsen proporsjoneres og tilpasses lokalt for å finne de rette flyteegenskapene. Dette er aldri helt hylle vare.

4.1.3. Nok mørtel tilgjengelig/tilkomst for pumpe bil og betongbiler

For å sørge for jevn tilførsel av mørtel var det en fordel å lage en tilkomstvei. For å unngå pumpestopp måtte to betongbiler rygges helt inntil pumpa, slik at en sementbil kunne fylle på pumpa, mens forrige bil kjørte ut og neste bil rygge inntil osv.

For å ha tilkomst til lekkasjen ble det lagt 500 m grusvei på eksisterende traktorvei med 0–60 masser over en separasjonsduk. På snuhammer og oppstillingsplass nede ved lekkasjen

(plass til en pumpebil og to betongbiler) ble det brukt 0–120 masser på separasjonsduk og geonett.

500 m vei med snuhammer og oppstillingsplass ble påbegynt 25. november og ferdigstilt 27. november kl 20:00 av Holthe anlegg AS.

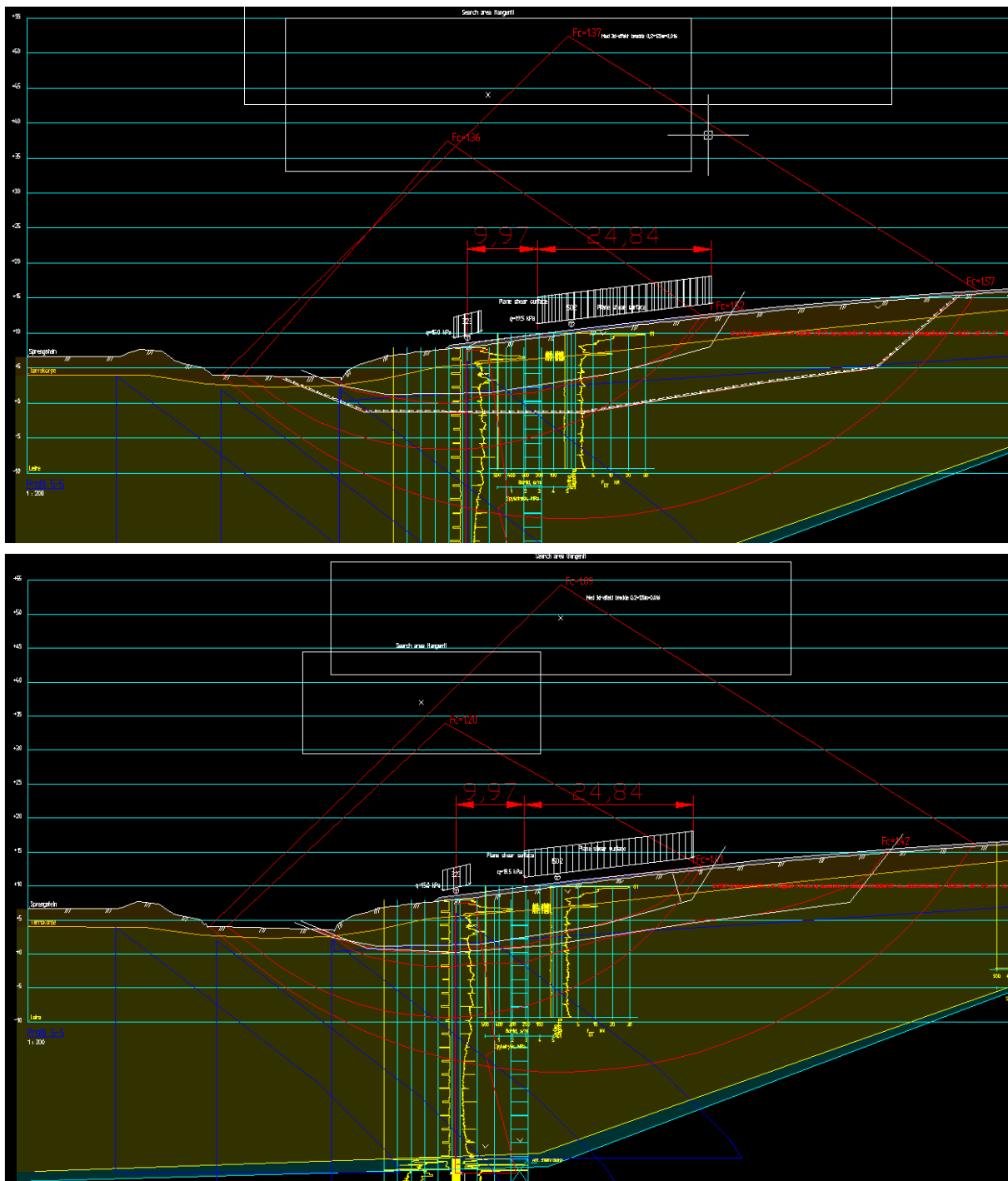
Dersom det ikke hadde vært mulig å kjøre pumpebilen bort til lekkasjen er det mulig å legge flere 100 m med pumperør. Det kompliserer prosessen noe, men er fullt ut mulig dersom man har en lekkasje som ligger langt borte. Da bør man ha befaringsbefaring med betongpumpeleverandør for å finne ut hva som er mulig.

4.1.4. Stabilitet ved tettingsarbeider

Det ble utarbeidet et eget notat for stabilitetsberegning for anleggsarbeidene som var på utvidet kontroll. I utgangspunktet var lokalstabilitet ned mot Lierelva 1,56. De ekstra lastene fra grusvei og maskiner (1 pumpebil på 19 tonn, 1 gravemaskin på 17 tonn, 2 betongbiler på 35*2 tonn og 1 grunnboringsrigg på 7 tonn) påvirket stabiliteten.

Stabilitetsberegningene viste en reduksjon i sikkerhetsfaktor ved anleggslast i forbindelse med tetting av borehullet (Figur 22). Beregningene viste at i en udrenert situasjon er sikkerheten på kritisk skjærflate $\gamma_M = 1,20$ (uten 3D-effekt) og $\gamma_M = 1,36$ (med 3D-effekt).

Dyperegående skjærflater med betydelig lavere sikkerhet var uendret.



Figur 22 stabilitetsberegninger av anleggssituasjonen med 3D effekt øverst, uten 3D effekt nederst.

Det ble vurdert at tiltaket med midlertidig anleggslast ikke ville medføre stor fare for utløsning av skred basert på:

- Terrenget i området har stått høyere tidligere (har hatt høyere mobilisering tidligere)
- Skredet som skjedde i 1963 medførte ikke retrogressiv bruddmekanisme bakover i terrenget
- Sikkerhetsfaktor med anleggslaster både udrenert og drenert, $\gamma_M \geq 1,2$
- Dyperegående skjærflater med lav sikkerhetsfaktor var uendret

Arbeidene ble fulgt opp av geotekniker under utførelse, geotekniker fulgte med på terrengendringer, og det var en evakueringsplan dersom terrenget skulle endre seg.

4.1.4.1. Forberedelse og planlegging

Det var nødvendig med forberedelse og befaring med alle entreprenørene. Dette var en ny operasjon for alle aktører og det var viktig å møtes i felt og diskutere gangen i alle operasjonene slik at dette kunne gå sømløst.

Følgende entreprenører samarbeidet i tetteforsøket:

- grunnborere til å håndtere rør,
- gravemaskin til å heise rør,
- sveiser til å kappe rør,
- pumpebil med mannskap,
- betongleverandør.

I tillegg hadde statens vegvesen en koordinator og to geoteknikere på plassen.

Under utførelsen forventet vi at det kom opp en del vann, deretter en del vann blandet med sement før vi kunne stoppe tetteforsøket. Dette var en situasjon som gjorde det sannsynlig at man ville få behov for faglig diskusjon under prosedyren. Derfor hadde vi en geotekniker på stedet sammen med koordinator som styrte prosedyren med pumping og situasjonen rundt lekkasjen. Den andre geoteknikeren fulgte med på terrengendringer og om det kom opp mørtel andre steder.

4.1.4.2. YM tiltak

Det ble bygget en fangvoll for å unngå at betongen skulle renne ut i Lierelva.

Det er viktig å huske at pumpa må tømme restbetongen en plass når operasjonen er ferdig.

4.2. Utførelse av vellykket tetteforsøk

4.2.1. Utførelse

I dette prosjektet koordinerte Statens vegvesen arbeidsoperasjonen. Betongpumping ble levert av Bull betongpumping AS, som stilte med pumpebil som har teoretisk kapasitet på 160 m³/time. Hokksund betong AS leverte betong og fant egnet resept sammen med statens vegvesen. Holthe anlegg AS lagde tilkomst og stilte opp med gravemaskin og sveiser.

Opprigging startet kl 08:00.

Før vi kunne starte tetteforsøket måtte vi få tilbakeført vannlekkasjen på utsiden av foringsrøret. Leiren hadde klebet seg til røret, men ved å legge på mottrykk (skru på flere rør og et lokk) og heise og senke røret flere ganger 10 cm kom vannet etter hvert på utsiden av røret (Figur 23 og Figur 24). Denne operasjonen tok ca. en time. Deretter ble pumperøret koblet på (Figur 25). Hulrommet under foringsrøret ble målt til å være ca 2,5 m dypt (33,5 m fra topp foringsrør ned til leirbunn).



Figur 23 her legger graveskuffen på litt trykk, det ble etter hvert skrudd på et lokk som var delvis tett. Foto: Martin Møller



Figur 24 Bilde av gravemaskinen som heiste røret ca 10 cm og senket det rolig ned igjen. Foto: Daniel Jergling



Figur 25 Bilde av vannstrøm som er etablert på utsiden av foringsrøret, og pumperøret er satt på. Foto: Knut Arne Tho.

Da strømmen på utsiden var opprettet og alt utstyr var rigget til var det klart til å få ned betongbilene. Kl. 10:00 fikk Hokksund betong klarsignal til å kjøre inn betong, de ankom plassen med første bil ca. kl. 10:45 (Figur 26). For å sørge for jevn strøm betong var det satt opp en kjøreplan.



Figur 26 første pumpebil rygger ned mot pumpa. Gravemaskin står på siden av foringrøret, pumpebil står ovenfor røret, og det var plass til to betongbiler bak pumpa. Foto: Knut Arne Tho.



Figur 27 Bilde av pumpebilen som pumper mørtel ned, her hadde bil 1 kjørt opp, bil 2 leverer mørtel mens bil 3 var på vei ned. Foto: Knut Arne Tho

Før mørtelen ble pumpet ned ble tyngdetettheten målt med en enkel bagasjevekt og litermål. AUV mørtelen veide 2,2 kg/l, B45M40 mørtelen som ble pumpet ned veide 2,1 kg/l. Vannet som lakk opp på utsiden av foringsrøret veide naturlig nok 1 kg/l (Figur 28).



Figur 28 Bilde av veiing av vann med litermål og enkel bagasjevekt. Foto: Daniel Jergling

Det ble først pumpet AUV betong, men det var vanskelig å få pumpet ned AUV-blandingen pga. seigheten i sammensetningen. Under pumping klumpet og tettet det seg i pumpeslangen, blandingen hadde for stor friksjon mot veggen i pumpeslangen. For å unngå at det klumpet og tettet seg i foringsrøret ble pumpeslangen koblet av foringsrøret, og vi stoppet prosedyren med AUV. Klumper i foringsrøret hadde komplisert prosessen veldig.

Vi gikk over til B45M40 mørtel med 0–8 sand. Den hadde en litt tykkere konsistens enn ønsket, på stedet ble det derfor tilsatt superplastiserende tilsetningsstoffer for å få mørtelen mer flytende. Konsistensen ble som en tykk suppe, med samme romvekt (2,1 kg/l). Pumping av B45M40 mørtel startet fra kl. 11:15. Denne mørtelen kunne pumpes uten utfordringer.

Vi holdt pumperate på ca 35 m³/timen for å ikke trigge for høy vannstrøm på utsiden av røret, dette ville medført ekstra erosjon. I tillegg ønsket vi ikke pumpestopp, så det var greit å ha tid til at betongbilene kunne stille seg opp.

Etter at det var pumpet ned ca 25 m³ mørtel hadde vi en test-stopp, da rant det fortsatt vann på utsiden av røret. På dette tidspunktet innså vi at vi ville gå tomme for mørtel før vi hadde fått tettet lekkasjen. Vi bestilte mer betong, der ny bestilling var jevn tilførsel av mørtel til det ble tett. Hokksund betong omorganiserte bilene sine og leverte 4 biler i jevn runde inn mot lekkasjen. Dette førte til at vi hadde et opphold på ca 30 minutter, før vi fikk vi ny kontinuerlig tilførsel av mørtel (se Tabell 3).

Da vi hadde pumpet ned ca. 40 m³ mørtel begynte vannet som kom opp på utsiden av foringsrøret å få endret karakter (Figur 29). Fargen ble lysere og strømmen ble litt seigere, men romvekten var fortsatt ca. 1 kg/l. Under planlegging av type mørtel som skulle brukes ble det forutsatt at med blandingen vi valgte ville noe av sementen bli vasket ut mens sanden ville sette seg. Dette var antakelig den utvaskede sementen som kom opp.

Etter hvert som vi pumpet ned mer betong viste målinger at vannet på utsiden av foringsrøret ble tyngre, men med en del variasjoner. Da det var pumpet ca. 65 m³ lå tyngdemålingene jevnt mellom 1,9 og 1,7 kg/liter. Da ble det besluttet å løfte røret ca. 4 meter mens vi pumpet og tømte den 11. og siste betongbilen. Etter at røret var heist 4 m koblet vi av pumpa og avsluttet tetteforsøket kl. 14:45. Da hadde vi pumpet 70 m³ mørtel ned i grunnen.

Under hele tettearbeidet holdt strømmingen seg jevn, og det var ingen merkbar endring i trykk.



Figur 29 Bildet til venstre viser hvordan vannet strømmet opp i starten, mens bildet til høyre viser hvordan vannet endret farge og seighet da vi hadde fylt ca 40 m³. Foto: Heidi Kjennbakken

Tabell 3 Oversikt over lossing av mørtel med tidspunkter/mengder iht. kjøresedler

Mørtel	Akkumulert mengde (m3)	Loss start	Retur	Kommentar
B45 M40 D16 75%red AUV	(3)	10:55		Klumper seg og pumperør går tett, kobler fra foringsrør, tømmer ut det som er i pumpa, og rest-AUV sendes i retur.
B45 M40 finsats	7	11:09	11:56	Oppstart pumping ned gjennom foringsrør (noe ventetid pga AUV håndtering)
B45 M40 finsats	14	11:40	12:07	
B45 M40 finsats	21	11:50	12:19	

B45 M40 finsats	28	12:15	12:37	Teststopp, lekkasjen opprettholdes, går tom for mørtel
				Ventetid
B45 M40 finsats	35	12:57	13:32	Oppstart pumping ca kl 13:00
B45 M40 finsats	42	13:19	13:50	13:20, noe endret karakter på vann utenfor foringsrør (Figur 29)
B45 M40 finsats	49	13:25	14:06	
B45 M40 finsats	56	13:55	14:21	Tyngdemålingene begynner å vise tyngre væske, men fortsatt noe varierende
B45 M40 finsats	63	14:12	14:36	Tyngdemålingene stiger til 1,8–1,9 kg/l
B45 M40 finsats	70	??	15:00	Begynner å heise foringsrør mens vi pumper resten av mørtelen

I utgangspunktet hadde vi tenkt at vi måtte pumpe mer mørtel mens vi heiste røret, men blandingen og strømmingen på utsiden var god så vi kunne pumpe mørtel helt opp til overflaten uten noen som helst problemer (Figur 30). Derfor ble det vurdert at vi ikke trengte å koble på pumpa og pumpe mer etter at røret var heist 4 m.

Etter å ha heist røret 4 m stod det av seg selv på spissmotstand og friksjon i mørtelen.

Resten av røret ble heist og kappet utover kvelden (Figur 31). Vi antok at dette gav større mulighet for at mørtelen fikk lagt seg godt ut til leirkantene. Etter at røret var heist og kappet ble den øverste meteren med vann, sediment og mørtelblanding gravd bort, slik at området kunne tilbakeføres til dyrkbar jord.

Det var ingen observasjoner av mørtel på avveie, så det er grunn til å tro at mengden nedpumpet mørtel (70 m³) fylte et vannfylt hulrom.

Jevnlige inspeksjoner i ettertid har ikke vist noen tegn på lekkasje (Figur 32).



Figur 30 Bilde av mørtelblanding som kom opp da forsøket ble avsluttet. De sorte boblene er det man ofte ser når silika reagerer med superplastiserende tilsetningsstoffer, et tydelig tegn på at hullet var fylt igjen. Foto: Heidi Kjennbakken



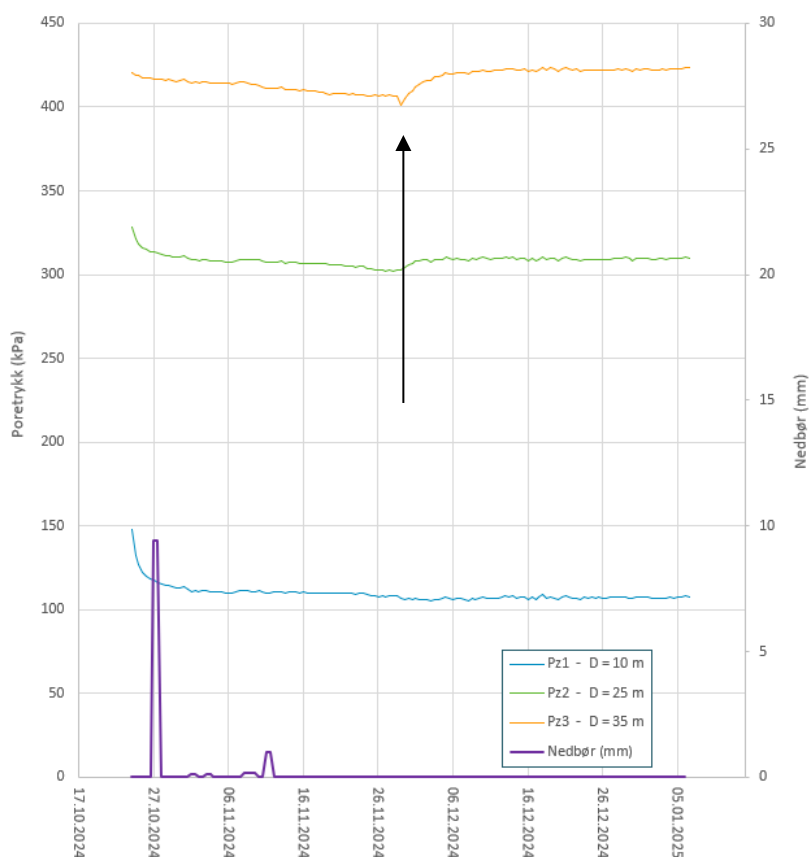
Figur 31 Bilde som viser heising og kapping av røret. Foto: Heidi Kjennbakken



Figur 32 bilder av situasjonen i ettertid, oppstillingsplassen ble stående i 2 måneder tilfelle det skulle bli nødvendig å komme tilbake, og av praktiske hensyn. Foto: Heidi Kjennbakken

4.2.2. Poretrykk før, under og etter tetting

Den dypeste poretrykksmåleren installert på 35 m dybde viser en gradvis reduksjon i poretrykk frem mot tetting (Figur 33). Etter tetting stiger poretrykket fra 406 kPa til 422 kPa i løpet av 12 dager. Stigningen i poretrykket tyder på at tetteforsøket var vellykket.



Figur 33 poretrykksmålinger, pil indikerer dato for tetting den 28.11.2024.

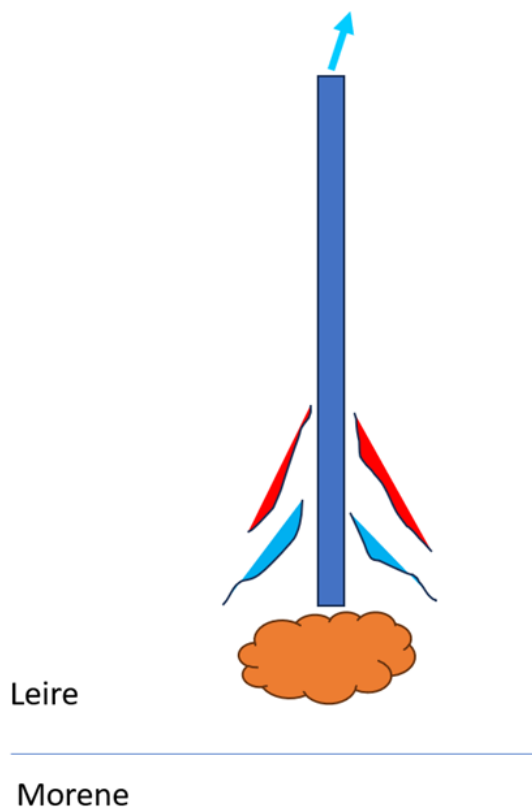
4.2.3. Suksesskriterier

- Dette var en lekkasje utenom det vanlige. Etter gjentatte mislykkede tetteforsøk bidro en hurtigarbeidende ekspertgruppe til å se situasjonen med nye øyne. De nye forslagene ble systematisk presentert og gjennomgått. Gruppen hadde fokus på å finne løsning som passet den faktiske situasjonen. Det gjorde at vi kom frem til en omforent løsning vi kunne jobbe videre med.
- Metoden var tilpasset de stedlige forholdene
- I tillegg til ekspertgruppen hadde vi tilgang på interne eksperter og kollegaer som hjalp oss med mørtelblanding, laboratorieanalyser og feltanalyser.
- Statens vegvesens egne grunnborere stod på tidlig og sent for å hjelpe til med ytterligere analyser, praktisk tilrettelegging og gjennomføring i felt. Grunnborerne er vant til å håndtere artesisk grunnvann, noe som var viktig i planlegging og gjennomføring av feltoperasjoner.
- Godt samarbeid med entreprenørene. Statens vegvesen koordinerte Bull Betongpumping, Hokksund betong og Holthe Anlegg AS. Selv om det var ulike firma fungerte samarbeidet optimalt.
- Det var stor vilje til å hjelpe til og alle var fleksible og løsningsorienterte.

4.2.4. Sluttvurdering av situasjonen

Vurdering av størrelsen og formen på det vannfylte hulrom har blitt analysert i ettertid. Hulrommet var vesentlig større enn først antatt. Lidardata viste et setningsforløp som tilsvarte ca. 30 m³. Pumpet betong tilsvarer et volum på 70 m³. Dette tyder på at det ble vasket ut ca. 100 m³ leire, noe som er i tråd med tørrstoffanalysene (105–130 m³). Ettersom det ble pumpet ned ca. 70 m³ mørtel tyder dette på at 2/3 av utvasket volum stod igjen som et åpent vannfylt hulrom. Dette var overraskende.

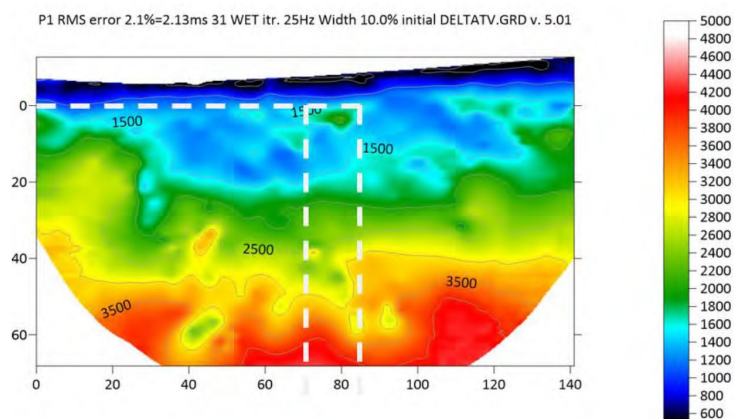
Vi vet av likevekt og stedlig skjærstyrke at store hulrom ikke kunne stå åpne nedi den dybden. Men med mindre diameter så vil hvelvvirkningen gjøre det mulig. Derfor er ny hypotese at det oppstod en konstant erosjonsprosess fra underkant rør. Og så har det gjentatte ganger rast inn i dette hullet. Det vet vi også ut fra observasjoner av vannstrømmen. Men utrasingene har ikke utelukkende kommet fra sidene, men mest ovenfra langs røret, se Figur 34.



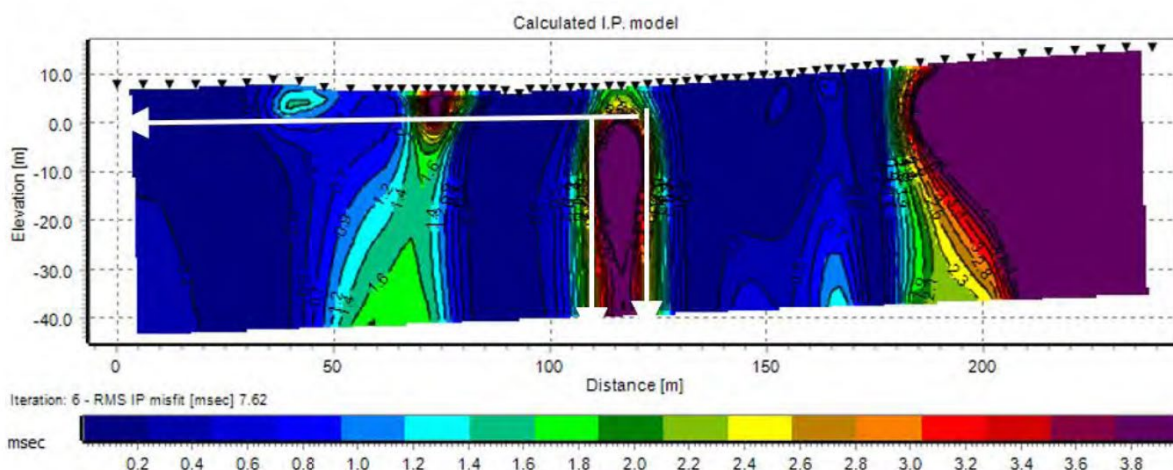
Figur 34 skisse som viser hypotese av hendelsesforløpet med utrasing opp langs foringsrøret

Denne hypotesen understøttes av geofysiske undersøkelser.

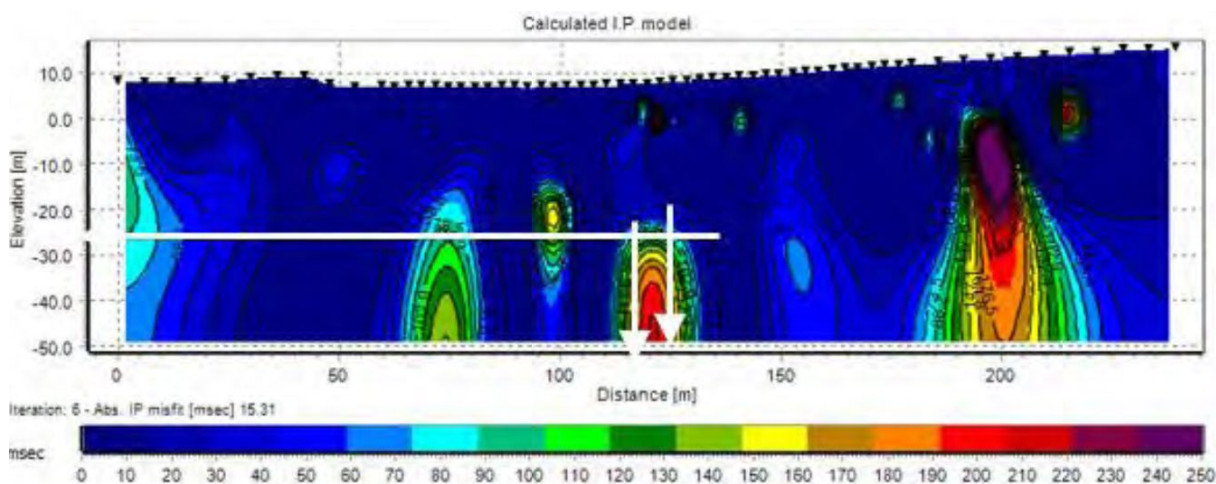
For å kartlegge mørtelen ble det utført resistivitetsmålinger og seismikk i et grid på terreng over tidligere lekkasje [7]. Det er en del usikkerhet knyttet til disse undersøkelsene, men både resistivitetsmålingene og seismikkresultatene viser en anomali ca. 8 m under terreng (Figur 35 og Figur 36). Ut fra oppløsning på dataene (1 m elektrodeavstand) kan man anta at denne anomalien har en diameter på ca. 1 m. Resistivitetsdataene utført for dypere lagdeling (3 m elektrodeavstand) viser en anomali rundt 32,7 m under terreng (Figur 37). Dette kan tyde på at mørtelen har en noe større diameter lenger ned, kanskje nærmere 3 m. Det var ikke tilsvarende observasjon av dyp anomali i seismikkresultatene.



Figur 35 seismisk profil viser anomali på ca kote 0, dvs ca 7,7 m under terreng. Midten på profilet er lekkasjepunktet [7].



Figur 36 Resitivitetsprofil som viser anomali på ca. kote 0, dvs. ca. 7,7 m under terreng. Midten på profilet er lekkasjepunktet [7].



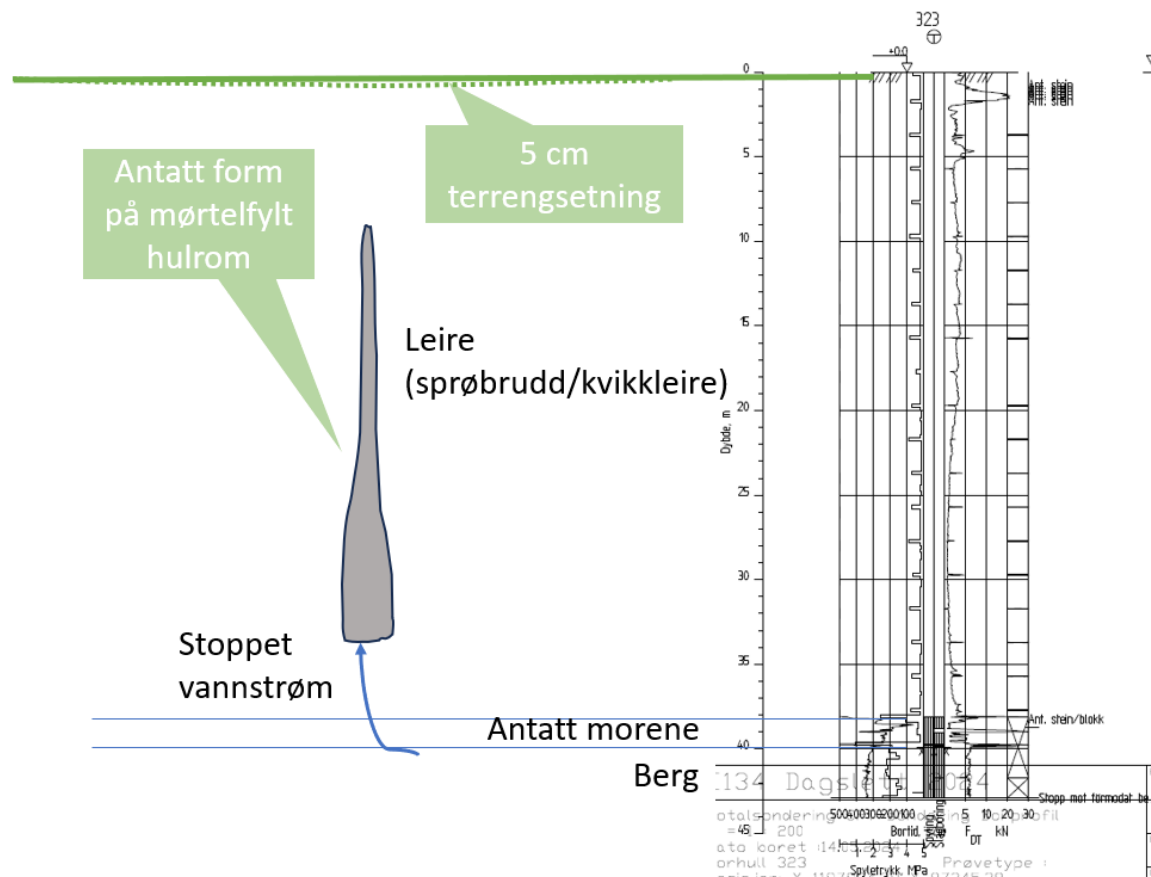
Figur 37 Resitivitetsprofil med større penetrasjon som viser anomali på ca. kote -25, dvs. ca. 32,7 m under terreng. Midten på profilet er lekkasjen [7].

Før tettejobben startet ble bunn på hulrommet målt til å være 33,5 m under terreng, dersom geofysiske data stemmer er topp mørtel på ca 8 m under terreng.

Vi antar at hulrommet har vært pæreformet med størst diameter nederst. Dersom man forenklet beregner dette som en kjegle og man antar at høyden fra geofysikken stemmer ($33,5\text{m} - 8\text{m} = 25,5\text{ m}$) og at hulrommet var 70 m^3 tilsvarer dette en diameter på litt over 3 m nederst.

Man kan også vurdere formen på hulrommet ut fra pumpestoppen. Etter å ha fylt 28 m^3 hadde vi pumpestopp hvor det fortsatt rant vann på utsiden av foringsrøret – dvs. mørteltykkelsen var ikke stor nok til å tette lekkasjen. Det betød at høyden på mørtelen ikke kunne være mer enn 5,5 m. Dersom man bruker dette til å vurdere diameter på hulrommet viser dette at det var en minste diameter på 2,5 m. Dersom man antar at mørteltykkelsen var 4 meter ville minste diameter vært 3 m.

Hver av disse analysene er usikre isolert sett, men sammenfallet mellom de ulike tilnærmingene gir grunn til å tro at diameteren på hullet var ca. 3 m nederst, og at det ble smalere oppover. Tolket form på hulrommet er skissert i Figur 38.



Figur 38 Skisse over antatt situasjon etter tetting utført.

5. Læringspunkt for fremtidige lekkasjer

Det er viktig å tette lekkasjen tidlig, spesielt i områder med stor utvasking.

Det er viktig å finne en metode som er tilpasset de stedlige forholdene. Denne metoden fungerte her fordi lekkasjen var såpass dyp og fordi det var forholdsvis enkelt å få vannstrømmen til å renne på utsiden av foringsrøret.

Dersom man ikke lykkes første gang bør man raskt utføre flere undersøkelser for å forstå settingen, for eksempel tørrstoffanalyser, vanntrykk, vannstrøm etc.

Drone som gir detaljerte LiDAR-målinger er meget nyttig, dette gir informasjon om setningsforløpet, og da kan man bruke dette til å vurdere dannelsen av et potensielt stort hulrom.

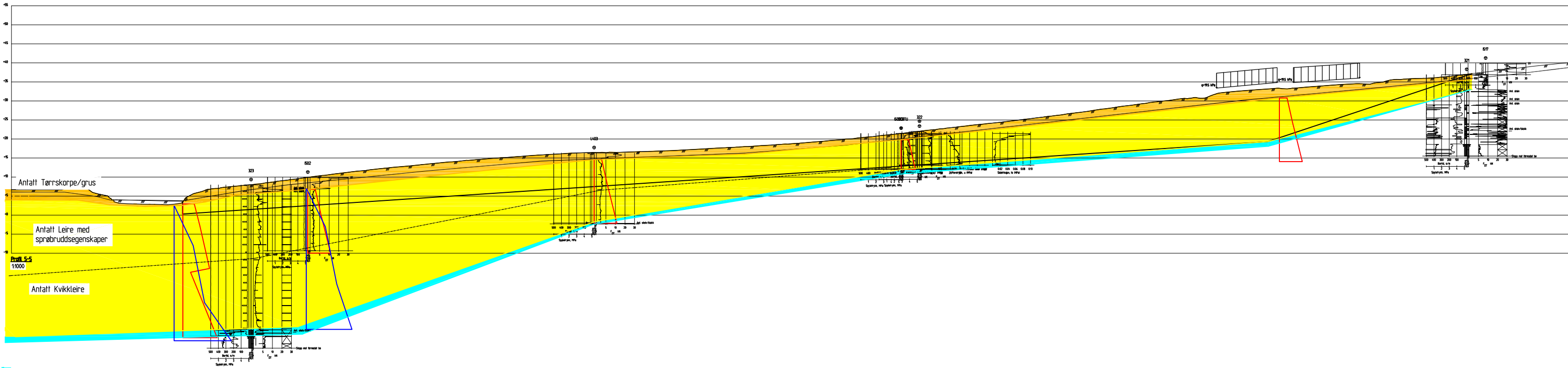
Dersom det ikke er mulig å anlegge grusvei, er det mulig å ha en lang pumpeledning (flere 100 meter, ta kontakt med betongpumpeleverandør). Det er viktig å være klar over innstillingene på pumpa og grovt hvordan den fungerer, slik at man har kontroll på trykk og mating og at man setter fornuftige stoppkrav. I vårt tilfelle hadde vi en erfaren pumpesjåfør som hadde telt stempeltiden. Han visste at dersom stemplene gikk jevnt hvert 4,5 sekund var det ikke noe overtrykk. Hvis stemplene gikk saktere, var det tegn på mottrykk. Andre pumper har andre egenskaper.

Sementblandinger har ulike egenskaper. Det er viktig å være bevisst på hvilke egenskaper man vil ha i blandingen som brukes for å tette lekkasjen, slik at man får riktig type. Man bør få hjelp av betongteknologer for å finne den blandingen som egner seg best. Blanding av AUV mørtel på verk kan være vanskelig å få stabil med mye sand og lite stein.

Dersom man skal sette ned et foringsrør bør borkrona stå på slik at man senere kan bore ned til kilden eller til rett over berg og injisere mørtel via det samme foringsrøret.

6. Referanser

- [1] Statens vegvesen (2023) Veiledning N-V220 Geoteknikk i vegbygging
- [2] Statens vegvesen rapport (2021) Tetting av lekkende borhull med injeksjonsmasse, rapport nr. 704
- [3] Statens vegvesen notat (2024)
- [4] Norges vassdrag og energidirektorat () Kvikkleireveilederen
- [5] Statens vegvesen (2023) Geoteknikk Datarapport E1 34 Dagslett-E1 8 kommunedelplan
- [6] Statens vegvesen (1989) Fv H44 Vallebøvegen. Artesisk grunnbrudd.
- [7] GeoPhysix (2024) Elektriske resitivitetsmålinger og refraksjonsseismiske undersøkelser med bruk av tomografi for om mulig kunne identifisere og kartlegge betongstruktur i leire ved Lier i Buskerud. Dokumentnummer: GPX24491-rapport





Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag