



RAPPORT

Under Oslo - WP2

MÅLING AV INJEKSJONSRESULTAT MED
VANNTAPSMÅLINGER I TUNNEL

DOK.NR. 20200436-05-R
REV.NR. 0 / 2022-12-23

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekt

Prosjekttittel: Under Oslo - WP2
Dokumenttittel: Måling av injeksjonsresultat med vanntapsmålinger i tunnel
Dokumentnr.: 20200436-05-R
Dato: 2022-12-23
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: SP Under Oslo
Kontaktperson: Guro Grøneng
Kontraktreferanse: SP13

for NGI

Prosjektleder: Jenny Langford
Utarbeidet av: Eivind Stein
Kontrollert av: Jenny Langford

Sammendrag

Forsøk ved Fornebubanens hovedtunnel har demonstrert at vanntapsmålinger ved stoff kan gjøres enkelt og effektivt, med bruk av lett utstyr. Vanntapsmålingene viser lavt vanntap og meget tett bergmasse etter 2-steps injeksjon ved alle tre stuffer. Vanntapsmålingene egner seg til å utføre rask måling av hydraulisk konduktivitet, enten det er med hensikt å måle in-situ oppsprekking av berget, å bestemme injeksjonsmetodikk eller det er å undersøke/kontrollere injeksjonsresultat.

Innhold

1	Innledning	6
2	Metode	6
	2.1 Utstyr	7
	2.2 Prosedyre	8
3	Forsøk Fornebubanen	9
	3.1 Injeksjonsprosedyre og testoppsett	10
	3.2 Resultater	10
4	Diskusjon	13
	4.1 Usikkerheter i utførte målinger	14
5	Konklusjon	14
6	Referanser	15

Vedlegg

Vedlegg A Resultater vanntapsmålinger

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Flere store undergrunnsprosjekter er under planlegging og utførelse i Oslo-området. Ved tunneldriving i berg er det fare for at innlekkasje av grunnvann medfører poretrykksreduksjon i overliggende løsmasser. Slik poretrykksreduksjon kan medføre konsolideringssetninger i områder med leiravsetninger over berg.

For å redusere innlekkasje til undergrunnsanlegg utføres forinjeksjon i bergmassen foran tunnelstuppen. Metoden innebærer pumping av injeksjonsmateriale, ofte en blanding av sement og vann, i borede injeksjonshull 20-30 m foran tunnelstuppen. Injeksjonen har som formål å tette vannkanaler i bergmassen før tunneldriving.

Kontroll av tetthet etter injeksjon gjøres vanligvis ved å bore et bestemt antall kontrollhull for så å måle utlekkende grunnvann fra hullene. Kontrollhullene bores typisk 3 meter kortere enn injeksjonsskjermen. Basert på forhåndsbestemte grenser blir det bestemt om det er tørt nok til å fortsette drivingen eller om det er behov for en runde til med injeksjon.

Metoden med kontrollhull og utlekkasjemålinger har flere usikkerheter. Det er ofte usikkert om man har boret tilstrekkelig antall kontrollhull slik at man har et godt statistisk grunnlag for å si hvor mye vann man kan forvente fremover. Mange prosjekter i sensitive områder har lekkasjekrav ned til 1-3 l/min pr. 100 m tunnel. Da skal man i praksis ikke ha rennende vann på de neste 20 meterne for å klare kravet. Ved så strenge krav vil kravene til utlekkasje fra kontrollhull være svært lavt. Små vannmengder er vanskelig å måle nøyaktig. Lekkasje foran stoff vil kunne forsvinne i sprekkesystemer i hullet og ikke nå stoff. Om kontrollhullene er boret på synk vil vannet ikke rekke å fylle opp hullet før målinger er gjort. Sensitiviteten i metoden er stor ved strenge krav. Det er etter vår mening behov for bedre metoder for kontroll av injeksjonsresultatet ved strenge krav til tetthet.

I Norge har vanntapsmålinger blitt brukt i liten grad på stoff. Det har ikke vært vanlig å bruke vanntapsmålinger i borehull (sondér-/kontrollhull) for å kontrollere bergmassens hydraulisk konduktivitet. I Sverige er vanntapsmålinger blitt brukt i større grad for å vurdere bergmassens tetthet og resultat av injeksjon [1].

2 Metode

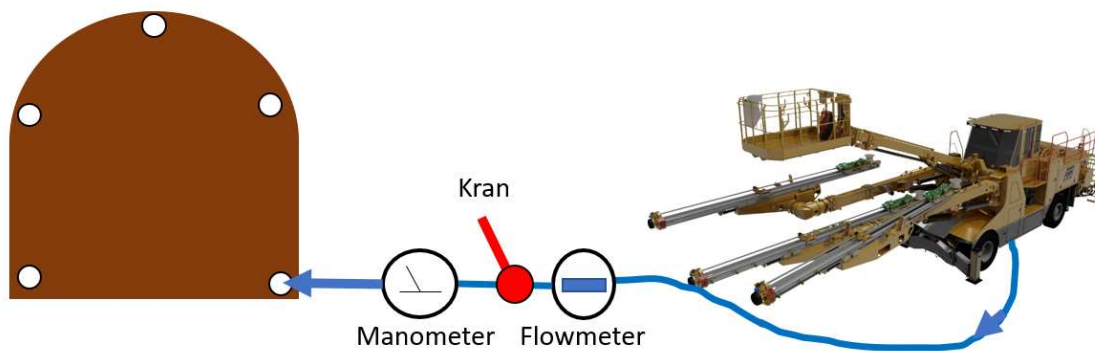
Vanntapsmålinger er tradisjonelt brukt i Norge i forbindelse med undersøkelser av borehull og brønner fra dagen, inkludert kjerneborhull. Metodikk og anbefalt prosedyre er beskrevet i [2]. Foreslått metode for vanntapsmåling i tunnel er en forenklet metode med formål å gjøre enkle, tidseffektive målinger som krever minimalt med tidsbruk, ekstra utstyr og rigging i tunnelen. Metoden følger derfor ikke standard, men er vurdert å gi resultater med tilstrekkelig nøyaktighet for formålet.

2.1 Utstyr

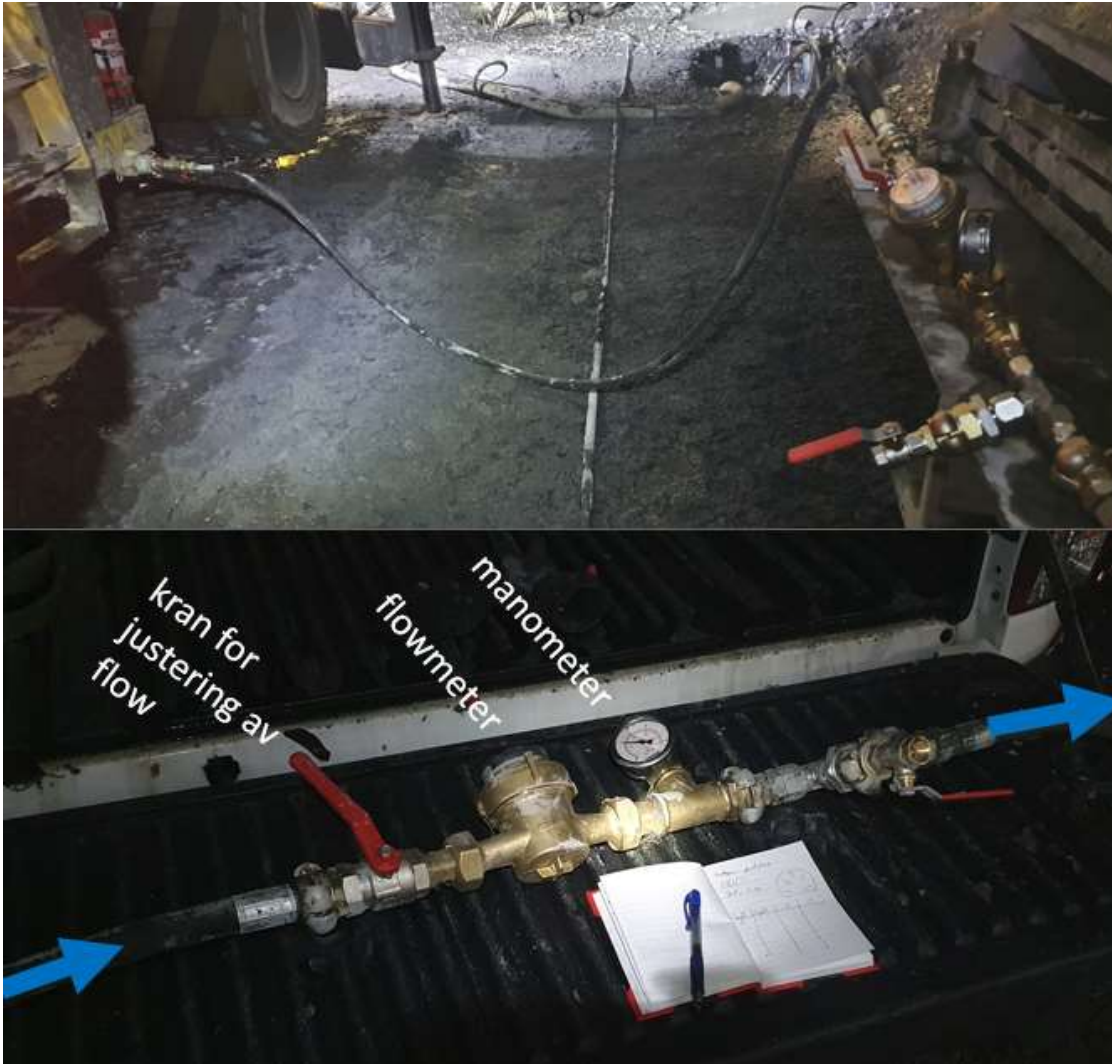
Følgende utstyr trengs for gjennomføring av vanntapsmålinger på stoff:

- Trykksatt vann på stoff med kapasitet >15 bar, typisk på tunnelrigg
- Slangor, koblinger og kraner, 1" dimensjon
- Flowmeter
- Manometer
- Injeksjonsstaver m/ pakkere

Manometer, kran for justering av vannstrøm og flowmeter kobles i serie som vist på Figur 1. Vannslange kobles fra instrumentene og på injeksjonsstav i kontrollhull.



Figur 1 Illustrativt oppsett for vanntapsmålinger på stoff. Vann hentes fra tunnelrigg. Mottrykk i borhull og vannstrøm måles med måleinstrumenter koblet i serie. Se Figur 2.



Figur 2 Utstyr for vanntapsmåling montert i tunnel.

2.2 Prosedyre

Følgende prosedyre brukes for vanntapsmålinger på stoff:

1. Kontrollhull bores opp. Hullene bores svakt på stigning. Kontrollhullene bør forsøkes å bores som en del av injeksjonsskjermen.
2. Utlekkasje av grunnvann fra kontrollhullene registreres.
3. Kalibrering av flowmeter gjøres om nødvendig med 10 liters bøtte. Vannmengde på flowmeter etter fylling av 10 liter registreres.
4. Hullnummer, plassering hull, lengde hull, installasjonsdybde pakkere, registrert utlekkasje av vann fra hullene registreres og noteres. Det tas bilde av stoff.
5. Hvis det er vannstrøm fra hull kan grunnvannstrykket måles med manometerkobling på injeksjonsstav.

6. Slange kobles på injeksjonsstav i borehull. Kran åpnes og det foretas hullfylling. Mottrykk bygges til slutt opp når hullet er fylt. Strømning justeres med kran slik at det blir jevn utstrømming av vann og trykket holdes stabilt. Det bør forsøkes å måle med 10 bar mottrykk dersom det ikke er registrert betydelig grunnvannstrykk i hullet.
7. Total vannstrøm registreres pr. to 5 minutter perioder.
8. Hvis vanninnngang mellom periode 1 og 2 er ulik foretas måling en tredje periode eller mer.
9. Etter endt måling kobles slange fra injeksjonsstav og det kobles til neste hull
10. Prosedyren gjentas for alle kontrollhull

Vanntapsverdiene tilsvarer målt vannmengde pr. 5 minutters intervall delt på 5 minutter. Vanntapsverdiene oppgis derfor i liter/minutt. Lugeonverdien for målt hull tilsvarer vanntapsverdien, men er korrigert for måleintervall (borehullslengde) og måletrykk.

$L = \text{Lugeon} = \text{liter/minutt/meter ved 10 bar overtrykk}$

10 bar overtrykk vil si at man måler 10 bar på manometer, uten at det finnes naturlig vanntrykk (mottrykk) i systemet. Hvis dette ikke er tilfellet, må man korrigere:

P_m	=	Måletrykk (bar)
P_g	=	Naturlig grunnvannstrykk (bar)
F	=	Målt vanntap (liter/minutt)
B	=	måleintervall (borehullslengde innenfor pakker) (meter)

$$L = \frac{10}{(P_m - P_g)} * \frac{F}{B}$$

Hydraulisk konduktivitet estimeres basert på målt Lugeonverdi i henhold til beskrivelser i [3]:

$$K \approx L \times 1,3 \times 10^{-7} m/s$$

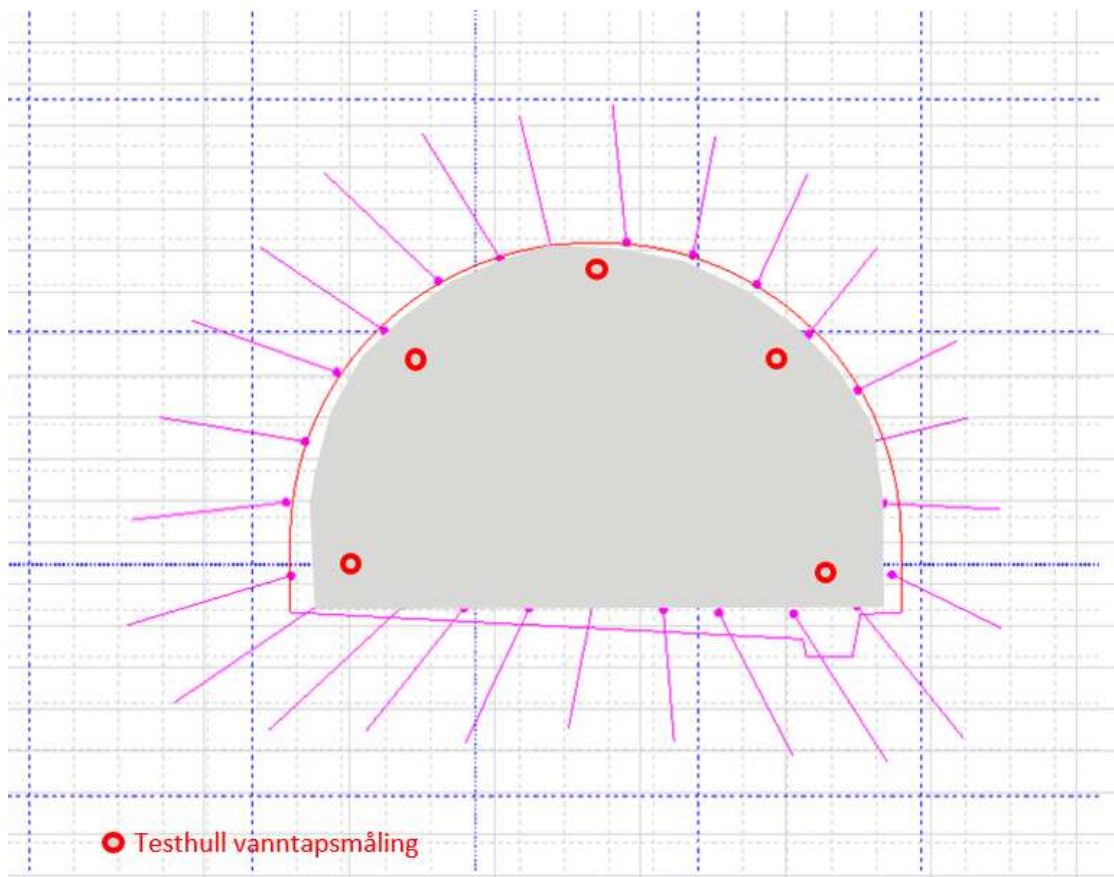
3 Forsøk Fornebubanen

Vanntapsmålinger på stoff er utført i en teststrekning på Fornebubanens hovedtunnel, nordgående retning fra byggegrop på Fornebu. Formålet med testene var å måle hydraulisk konduktivitet i bergmassen før og etter ulike injeksjonsskjermer. Testene ble utført ved tre ulike stuffer: Pelnummer 9600, 9568 og 9523.

3.1 Injeksjonsprosedyre og testoppsett

Injeksjonen ble utført som 2-steps injeksjon: En primærskjerm med mikrosegment ble boret og injisert først. Deretter ble det boret og injisert en sekundærskjerm med kolloidal silika. Begge skjermene besto av ca. 28 hull, med en avstand mellom hullene på ca. 1,5 m (Figur 3). Begge skjermene er foretatt fra samme stoff.

Vanntapsmålinger i kontrollhull ble utført i tre omganger: Vanntapsmåling 1 før primærskjerm (mikrosegment), vanntapsmåling 2 før sekundærskjerm (kolloidal silika) og vanntapsmåling 3 etter sekundærskjerm. Første vanntapsmåling ble utført for å måle in-situ hydraulisk konduktivitet. Andre vanntapsmåling ble utført for å måle primærskjermens effekt på bergmassens tetthet. Tredje vanntapsmåling ble utført for å måle effekt av sekundærskjerm, og effekt av begge injeksjonsskjermene på bergmassens tetthet. Det ble hovedsakelig benyttet fem kontrollhull, som vist i figur 3, med to unntak.



Figur 3 Injeksjonsskjerm med kontrollhull (tetshull)

3.2 Resultater

Resultatene fra vanntapsmålingene er vist i Tabell 1 - Tabell 3 og i Figur 4 - Figur 7. Resultatene er også vist i Vedlegg A. Det presenteres gjennomsnittlig vanntap basert på

målinger i alle kontrollhullene, i tillegg til maksimalt vanntap fra ett hull. I tillegg vises omregnet estimert hydraulisk konduktivitet, samt injisert mengde injeksjonsmateriale (kg).

Tabell 1 Resultater fra vanntapsmålinger under injeksjon ved stoff 9600

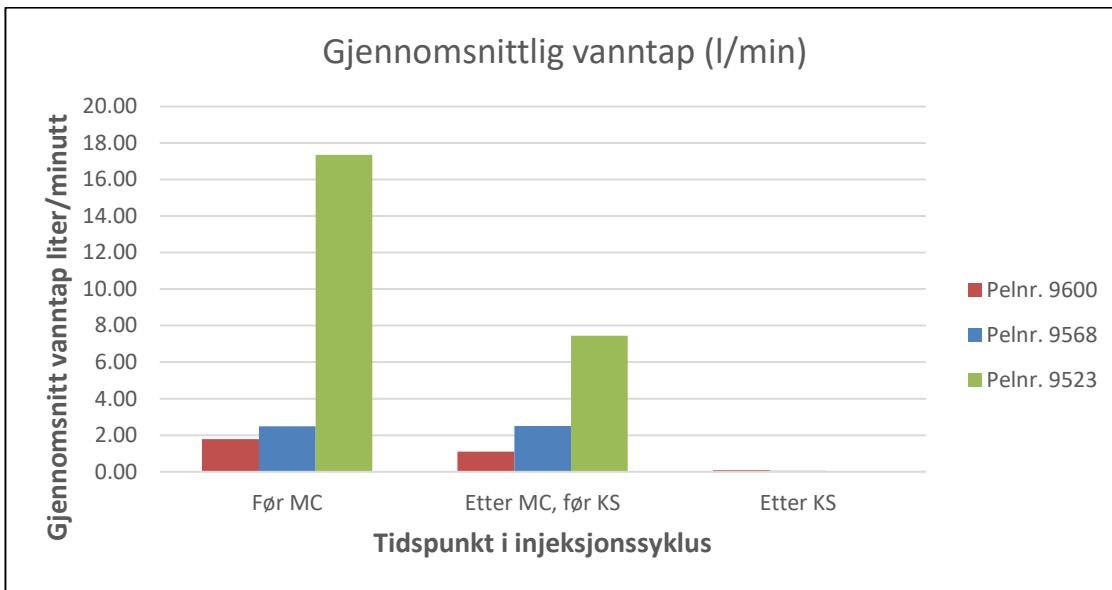
Pel 9600	Gjennomsnitt vanntap (l/minutt)	Maksimalt vanntap (l/minutt)	Gjennomsnitt Lugeon L	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Materiale	Injisert mengde (kg)
Vanntapsmåling 1	1,8	4,3	0,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$		
Primærskjerm mikrosegment					Norcem mikrosegment	24 000 kg
Vanntapsmåling 2	1,1	3,1	0,06	$7,9 \cdot 10^{-9}$		
Sekundærskjerm kolloidal silika					Masteroc MP320	3 300 kg
Vanntapsmåling 3	0,08	0,4	0,01	$6,9 \cdot 10^{-10}$		

Tabell 2 Resultater fra vanntapsmålinger under injeksjon ved stoff 9568

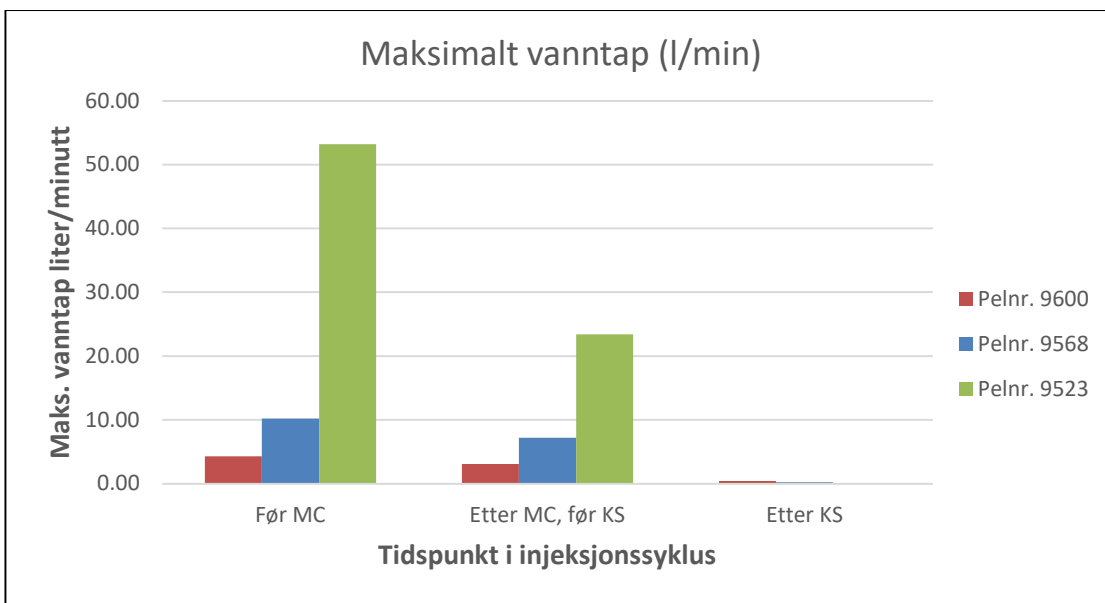
Pel 9568	Gjennomsnitt vanntap (l/minutt)	Maksimalt vanntap (l/minutt)	Gjennomsnitt Lugeon L	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Materiale	Injisert mengde (kg)
Vanntapsmåling 1	2,5	10	0,14	$1,8 \cdot 10^{-8}$		
Primærskjerm mikrosegment					Norcem mikrosegment	7 000 kg
Vanntapsmåling 2	2,5	7	0,14	$1,8 \cdot 10^{-8}$		
Sekundærskjerm kolloidal silika					Masteroc MP320	3 700 kg
Vanntapsmåling 3	0,04	0,2	0,0	$4,7 \cdot 10^{-10}$		

Tabell 3 Resultater fra vanntapsmålinger under injeksjon ved stoff 9523

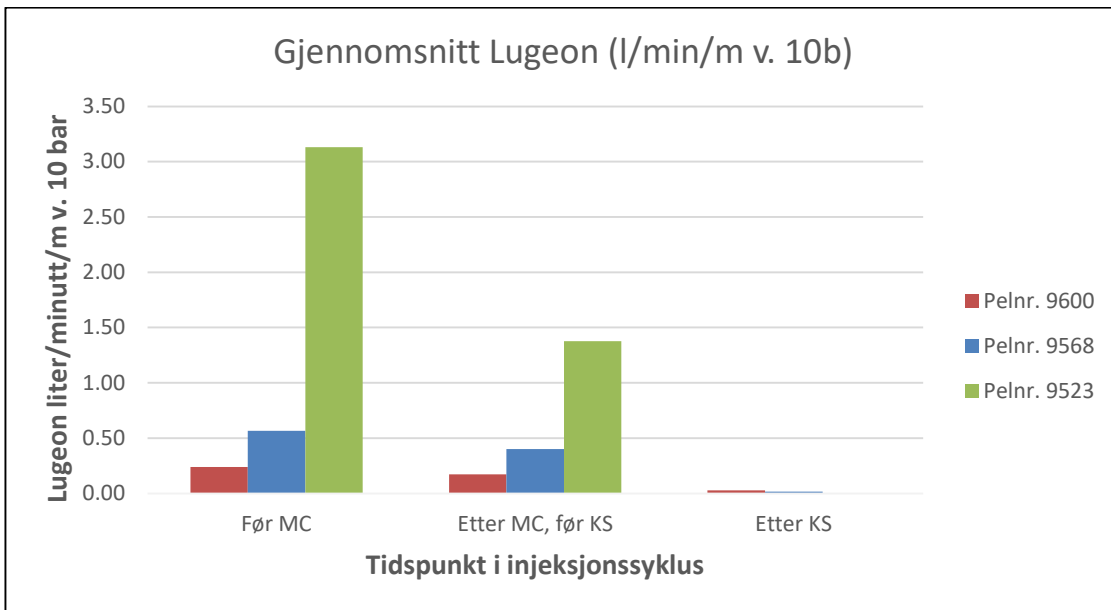
Pel 9523	Gjennomsnitt vanntap (l/minutt)	Maksimalt vanntap (l/minutt)	Gjennomsnitt Lugeon L	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Materiale	Injisert mengde (kg)
Vanntapsmåling 1	17	53	1,0	$1,3 \cdot 10^{-7}$		
Primærskjerm mikrosegment					Norcem mikrosegment	9 500 kg
Vanntapsmåling 2	7,4	23	0,4	$5,7 \cdot 10^{-8}$		
Sekundærskjerm kolloidal silika					Masteroc MP320	4 300 kg
Vanntapsmåling 3	0,0	0,0	0,0	0,0		



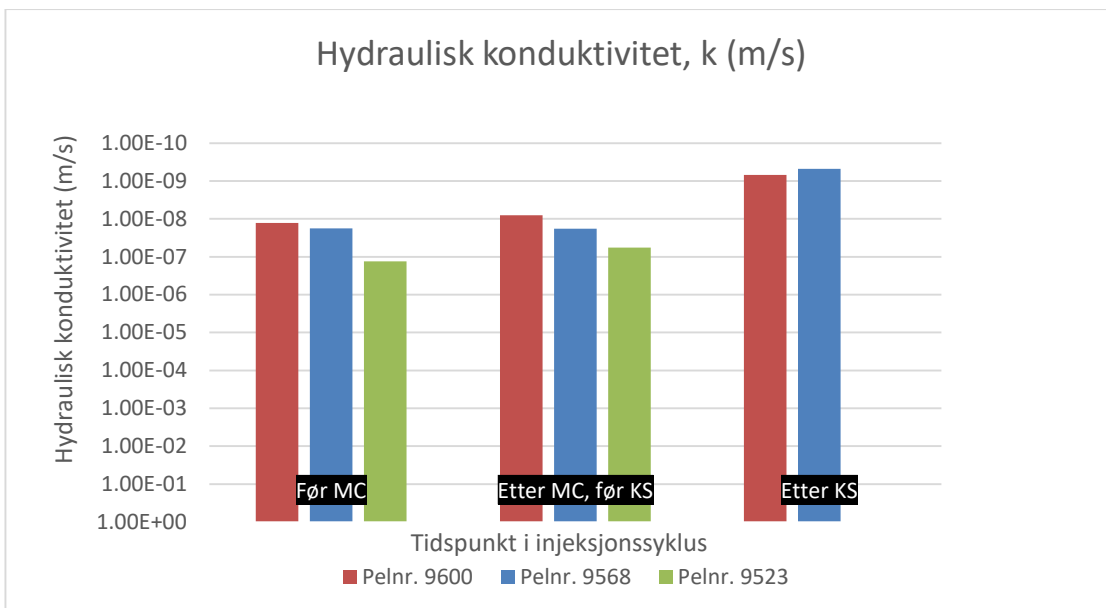
Figur 4 Gjennomsnittlig vanntap målt i tre omganger: Før primærskjerm (MC), Etter primærskjerm, før sekundærskjerm (KS) og etter sekundærskjerm (KS) ved stoff 9600, 9568 og 9523.



Figur 5 Maksimalt vanntap målt i tre omganger: Før primærskjerm (MC), Etter primærskjerm, før sekundærskjerm (KS) og etter sekundærskjerm (KS) ved stoff 9600, 9568 og 9523.



Figur 6 Gjennomsnittlig Lugeon målt i tre omganger: Før primærskjerm (MC), Etter primærskjerm, før sekundærskjerm (KS) og etter sekundærskjerm (KS) ved stoff 9600, 9568 og 9523.



Figur 7 Bergmassens hydrauliske konduktivitet målt i tre omganger, basert på målt gjennomsnittlig Lugeon-verdi: Før primærskjerm (MC), Etter primærskjerm, før sekundærskjerm (KS) og etter sekundærskjerm (KS) ved stoff 9600, 9568 og 9523.

4 Diskusjon

Vanntapmålingene etter både primær- og sekundærskjerm viser svært tett bergmasse for alle tre stuffer. Vanntapmålingene har verifisert effekt av forinjeksjon basert på

testmetoden. Det kan også sees av resultatene at hydraulisk konduktivitet i bergmassen reduseres mer mellom steg 2 og 3, enn mellom steg 1 og 2. Resultatene antyder at sekundærskjermen er mer effektiv enn primærskjermen når det kommer til tetting av bergmassen.

Om den gode effekten av sekundærskjermen skyldes supplerende boring og tettere hullavstand, valg av injeksjonsmateriale (kolloidal silika) eller en kombinasjon er mer usikkert og har ikke blitt målt i dette forsøket. Det kan hende at to injeksjonsskjermer med samme injeksjonsmateriale (for eksempel mikroement) ville gitt tilsvarende eller bedre sluttetthet. Det kan også hende at boring og injeksjon av én injeksjonsskjerm med dobbelt så mange hull ville gitt samme sluttetthet. For å undersøke dette må de ulike metodene testes og verifiseres med vanntapsmålinger før og etter under de samme geologiske forhold.

4.1 Usikkerheter i utførte målinger

Metode for vanntapsmåling beskrevet her har enkelte usikkerheter. Flowmeter bør kalibreres med bøtte eller målekar med jevne mellomrom for å undersøke fortsatt pålitelig vannstrømmåling. Kalibrering bør gjøres både ved høy og lav vannstrømning. Det antas at analoge flowmetere kan måle strømning ned mot ca. 1 liter/minutt, men det er usikkerhet rundt nøyaktigheten ved slik lav strømning. Det er derfor usikkerheter knyttet til nøyaktighet ved måling av lav strømning.

Naturlig grunnvannstrykk bør måles og korrigeres for dersom det er vannstrøm ut av kontrollhull. Dersom dette ikke gjøres kan det hende man måler lavere strømning inn i hullet enn det man ville ha gjort uten mottrykk. På denne måten kan man oppnå en lavere Lugeonverdi enn det som er tilfellet med korrigering for naturlig grunnvannstrykk.

Antall og plassering av testhull/kontrollhull har også betydning for resultatet, og om resultater er representativt for bergmassen foran stuff som helhet. Det er viktig at det blir boret og testet nok kontrollhull for å undersøke store nok deler av bergmassen, og for å ha størst mulig sjans til å bore gjennom eventuelt vannførende sprekker og svakhetssoner.

Når det gjelder beregning av hydraulisk konduktivitet for bergmassen foran stuff som helhet er det usikkert om gjennomsnittlige verdier av Lugeonverdier er riktig for dette formålet. Det anbefales å undersøke dette videre, spesielt probabilistiske tilnærminger til problemstillingen, som beskrevet i [4].

5 Konklusjon

Forsøk ved Fornebubanens hovedtunnel har demonstrert at vanntapsmålinger ved stuff kan gjøres enkelt og effektivt og med bruk av lett utstyr. Vanntapsmålingene viser lavt vanntap og meget tett bergmasse etter 2-stegs injeksjon ved tre ulike stuffer. Vanntapsmålingene egner seg til å utføre rask måling av hydraulisk konduktivitet, enten det er å undersøke/kontrollere injeksjonsresultat eller å bestemme

injeksjonsmetodikk/injeksjonsmateriale som skal brukes (sement/silika). Metoden har enkelte usikkerheter som bør belyses og eventuelt korrigeres for, blant annet tilstedeværelse av naturlig grunnvannstrykk i bergmassen, og usikkerheter rundt måling av lave verdier av vanntap. Dersom det planlegges lignende tester i fremtiden bør det forsøkes å benytte flowmetere med høyest mulig presisjon, samt måle naturlig grunnvannstrykk dersom det er oppdaget utstrømning av grunnvann fra testhull.

6 Referanser

- [1] Stiftelsen Bergteknisk Forskning (2009). Nyttan av vattenförlustmätningar vid tätning av tunnlar. Rapport 91. Stockholm, Sverige.
- [2] Standard Norge (2022). NS-EN ISO 22282-3:2012. Geotekniske felt- og laboratorieundersøkelser Hydraulisk prøving Del 3: Vanntapsmåling i berg (ISO 22282-3:2012).
- [3] Quiñones-Rozo, C. (2010). Lugeon Test Interpretation, Revisited. Collaborative Management of Integrated Watersheds – 30th anniversary USSD Conference, April 12-16, 2010. 405-414.
- [4] Hernquist, L. Gustafson, G. Fransson, Å, Norberg, T. (2013). A statistical grouting decision method based on water pressure tests for the tunnel construction stage – A case study. Tunneling and Underground Space Technology. 33: 54-62.

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Måling av injeksjonsresultat med vanntapsmålinger i tunnel		Dokumentnr./Document no. 20200436-05-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client SP Under Oslo	Dato/Date 2022-12-23
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract NGI		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 0 /
Distribusjon/Distribution FRI: Kan distribueres av Dokumentsenteret ved henvendelser / FREE: Can be distributed by the Document Centre on request		
Emneord/Keywords Injeksjon, forinjeksjon, vanntapsmålinger, tunnel, geologi		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country Norge	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality Oslo	Felt navn/Field name
Sted/Location Oslo	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: Øst: Nord:	Koordinater/Coordinates Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument	2022-12-21 Eivind Stein	<i>Velg kontrolldato</i> Ditt fulle navn her		

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 23. desember 2022	Prosjektleder/Project Manager <i>Prosjektleders fulle navn her</i>
--	---------------------------------------	--

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

