

TBM-KAKS – KARAKTERISERING OG POTENSIALE FOR NYTTIGGJØRING, PÅ LAND OG I SJØ

Jenny Langford, Gunvor Baardvik og Espen Eek, NGI
Marianne Dahl, Statens vegvesen
Fredrikke Syversen, Ingjerd Mørck og Leon Eide, Oslo kommune VAV

SAMMENDRAG

Kornfordelingsanalyser på TBM-kaks viser at materialet kan karakteriseres som en velgradert, siltig, sandig grus. Til tross for dette ansees TBM-massen ofte som lite brukbar. I forskningsprosjektet GEORECIRC er mulighetene for nyttiggjøring av TBM-kaks vurdert, ved innhenting og sammenstilling av data fra gjennomførte prosjekter. I forbindelse med driving av Follobanen er det lagt ut en fylling ved Åsland for å etablere byggegrunn for ny bydel Gjersrud-Stensrud. Fyllingen er lagt ut lagvis og komprimert med normal komprimeringsenergi. Dokumentasjon viser at det er oppnådd høy tørrdensitet og tilsvarende lav porøsitet. Dette tilsier at det er oppnådd en fylling med stor stivhet og lavt potensial for setninger. Det er konkludert at det ved lagvis utlegging og normal komprimering kan etableres en kvalitetsfylling med TBM-kaks.

Det er i tillegg utført laboratorieforsøk for å vurdere hvordan TBM-massen kan oppføre seg ved utfylling i sjø, spesielt med hensyn til spredning av finstoff (turbiditet). TBM-kaket som er testet inneholder i størrelsesorden ti ganger mer finstoff enn sprengt stein. Forsøkene viser at turbiditeten er svært avhengig av vannets saltinnhold og finstoff holder seg lengre suspendert i ferskvann enn i saltvann. Men, forsøkene viser også at det er liten forskjell i turbiditeten fra TBM-kaks og sprengt tunnelstein i normalt sjøvann.

Det er konkludert med at TBM-kaks er godt egnet som fyllmasse på land. Forsøkene i laboratorium indikerer også at det kan være mulig å fylle denne type masse i sjø. Her må lokale forhold som vannets strømningshastighet, saltinnhold og fremtidig bruk av utfylt areal vurderes spesifikt.

SUMMARY

Grain size distribution analyses show that TBM-spoil is characterized as a well-graded, silty, sandy gravel. Despite of this, TBM-spoil is often considered of little value for re-use. In the research project GEORECIRC, the utilization of TBM-spoil as a fill material has been evaluated, based on testing and data collection from executed projects.

The material from tunnel construction of the Follo-line has been used to establish a fill at Åsland, for the new community Gjersrud-Stensrud. The fill is built up in layers, which are compacted with normal compaction energy. Documentation of the fill shows that the resulting dry density is high, which implies that it has a low porosity and high stiffness. The results demonstrate that it is possible to establish a high-quality fill with the TBM spoil in this way.

In addition, laboratory tests have been used to investigate the behaviour of TBM-spoil, for establishing underwater fills (land reclamation), with a focus on the suspension of particles in the water (turbidity). The TBM-spoil contains approximately ten times more fines than blasted rock. The tests show that the turbidity is strongly affected by the salt contents of the water, where fines remain suspended for a longer time in fresh water than in salt water. The tests demonstrate that there is subsequently little difference in the turbidity between TBM-spoil and blasted rock in salt water.

It is concluded that TBM-spoil is well-suited for establishing fills on land. Laboratory tests also indicate that it is possible to use TBM-spoil underwater for land reclamation. Local conditions such as the current, salt content and planned use of the reclaimed land needs to be considered.

INTRODUKSJON OG BAKGRUNN

I Norge ble flertallet av tilløpstunneler for vannkraftanlegg drevet med tunnelbormaskin (TBM) på 80-tallet. I disse prosjektene har overskuddsmassene fremfor alt blitt deponert på tipper i tilknytting til prosjektene. En grunn til dette kan være at mange TBM-prosjekter ble utført i områder med lite etterspørsel av steinmasser og det som er gjenbrukt er ofte brukt lokalt på anleggene.

Overskuddsmassen som genereres ved driving med TBM har en mindre gunstig kornfordeling sammenlignet med sprengsteinsmasse fra samme bergart. Muligheter for nyttiggjøring av massen må vurderes i forhold til materialets tekniske egenskaper. Det er imidlertid vår oppfatning at det nesten er blitt en myte om at TBM-kaks er en ubrukbar masse og at:

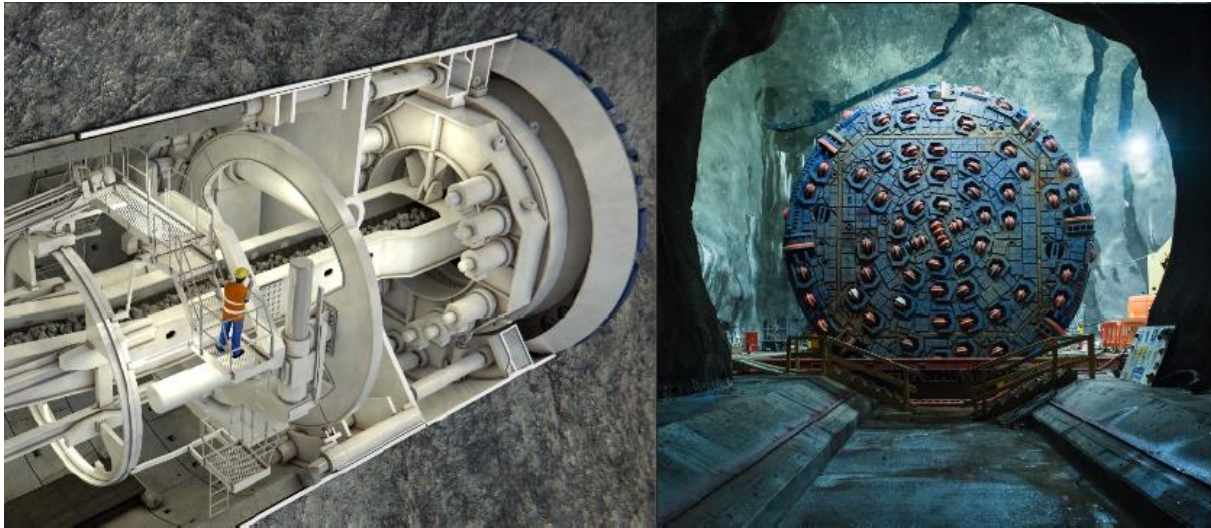
- Massen er forurenset og kan derfor ikke brukes
- Massen har dårlige geotekniske egenskaper og er ikke brukbar

I bygge- og anleggsprosjekter stilles det nå høye krav til sirkulærøkonomi og reduksjon i klimagassutslipp. Jord- og bergmateriale er en begrenset ressurs som må tas vare på. I tillegg er det dårlig utnyttelse å fylle opp godkjente deponier med masser som har et mulig bruksformål. Til sist så medfører utkjøring av masser til deponi og innkjøp av masser fra steinbrudd/deponi store CO₂-utslipp knyttet til transport. Bedre utnyttelse av ulike typer overskuddsmasse har vært bakgrunnen for forskningsprosjektet GEOreCIRC som ble gjennomført ved NGI 2016-2018. I dette prosjektet har nyttiggjøring av TBM-kaks som fyllingsmateriale blitt vurdert. I prosjektet er det innhentet og sammenstilt data fra utførte prosjekter. I forbindelse med planlegging og gjennomføring av større infrastrukturprosjekter med TBM som drivemetode er det viktig at man planlegger for god utnyttelse av overskuddsmasser.

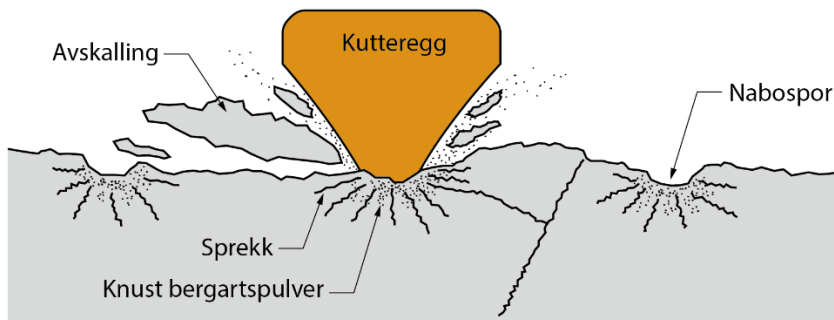
Miljøgevinstene ved å gjenbruke masse fra TBM-driving vil være betydelige, ettersom tunnelprosjektene vanligvis er store i omfang og derfor genererer enorme mengder overskuddsmasse.

DRIVEMETODE

Med en tunnelboremaskin tas berg ut i hele tunnelprofilen ved roterende stålkuttere som er montert på borhodet på TBM-maskinen (Figur 1). Borhodet roterer samtidig som TBM-maskinen trykkes fremover med et system som enten griper tak i tunnelveggene langs sidene på maskinen, eller trykker mot allerede installerte betongelementer. Massene faller ned innvendig i borhodet og fraktes ut på et transportbånd. Prinsippet for hvordan borkakset brytes ut av kutterne er vist i Figur 2.



Figur 1. TBM maskin for Follobanen (fra: www.banenor.no).



Figur 2. Prinsipp for bryting av borkaks med TBM (NVE/NTNU, 1991).

Kornfordelingen på masse tatt ut ved driving med TBM vil som nevnt være forskjellig fra masse som genereres ved tradisjonell boring og sprengning. Maksimal kornstørrelsen på massen som tas ut med TBM vil stort sett være begrenset til avstanden mellom kutterne (normalt 10-12 cm), men overstein kan forekomme. I tillegg vil drivingen resultere i en større andel finstoff enn ved driving med sprengning, samt mer flisete kornform. Eksempel på TBM-kaks som er siktet og vasket er vist i Figur 3.



Figur 3. Siktet og vasket TBM-kaks.

KARAKTERISERING AV TBM-KAKS

På 80-tallet sammenstilte NGI på oppdrag av Statkraft resultater av undersøkelser utført på TBM-masse fra norske bergarter, for å karakterisere massen. Rapporten er basert på prøver fra 11 prosjekter fra tunneler boret i forbindelse med vannkraftutbygging (Statkraft, 1986). Prøvene representerer ulike bergartstyper og det er boret med TBM-maskiner med ulike tverrsnittsstørrelse og fabrikat. I samtlige prosjekter var det brukt TBM-maskiner med disk-kuttere som opererte med høy matekraft.

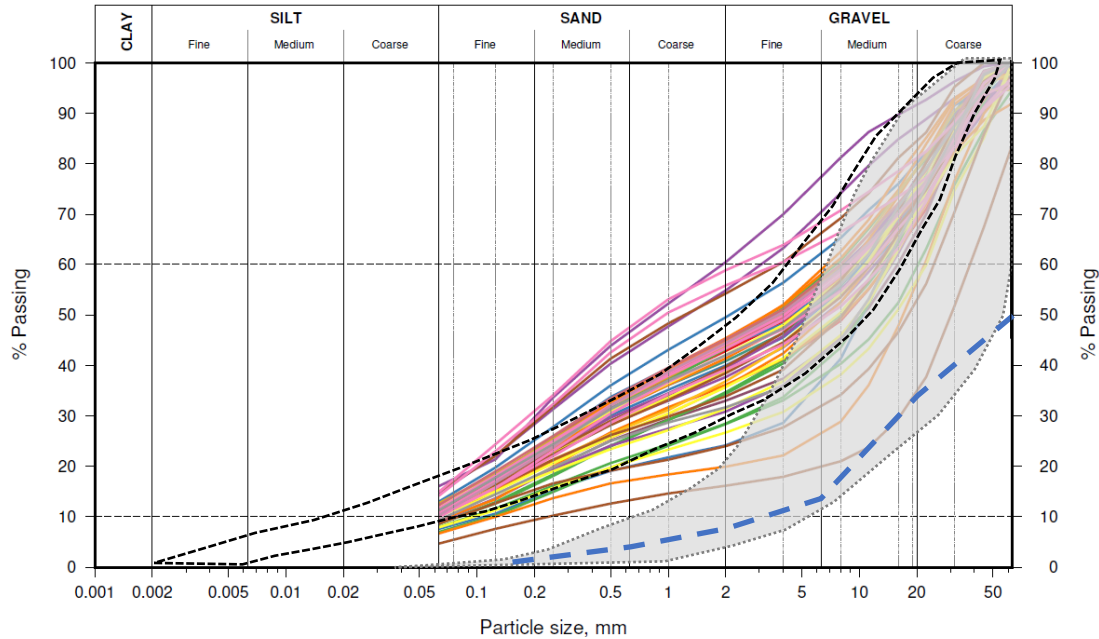
I forbindelse med Bane NORs utbygging av Follobanen er det boret med fire TBM-maskiner i gneiss. Massene er fylt opp ved riggområdet på Åsland, for å etablere byggegrunn for ny bydel Gjersrud-Stensrud. I dette prosjektet er det utført omfattende laboratorie- og feltforsøk, som er dokumentert i en masteroppgave fra NTNU (Dahl, 2018).

Kornfordelingsanalyser

Kornfordelingsanalyser fra alle prosjektene er sammenstilt i Figur 4. Fargede kurver er kornfordelingsanalyser gjennomført for masser fra Follobanen. Omriss med tykke, stiplede linjer viser grense på kornfordeling fra øvrige TBM-prosjekter (Statkraft, 1986). Til sammenligning er det vist typisk kornfordelingskurve-område for sprengstein fra dagbrudd med lysegrå skravur (ITA, 2019).

TBM-massene karakteriseres som sandig, (siltig) grus. Største kornstørrelse er begrenset til ca. 7-8 cm, med mulighet for noen større enkeltsteiner, og bestemmes av avstanden mellom disk-kutterne på maskinen. Ca. 50-70% av materialet er i grusfraksjonen. Målt finstoffinnhold (kornstørrelse < 0,06 mm) fra prøvene varierer mellom ca. 5-18%. I alt viser kornfordelingskurvene på TBM-massene begrenset med variasjon. Det kan antas at det vil være noe variasjon knyttet til bergart, men at kornfordelingen fremfor alt styres av selve drivemetoden.

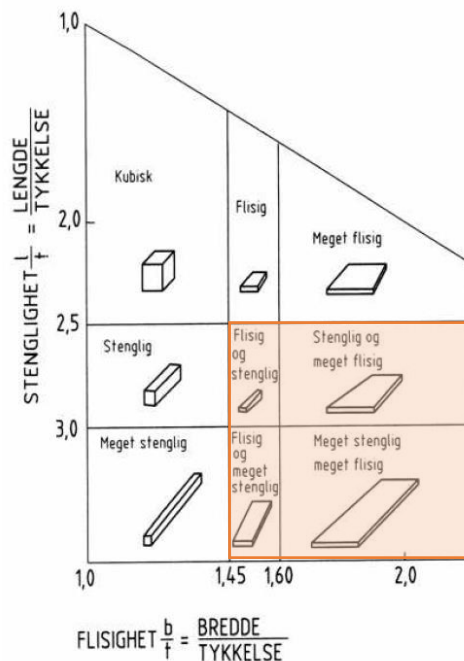
Graderingstallet $C_u = d_{60}/d_{10} > 15$ for samtlige prøver og massen er å anse som velgradert.



Figur 4. Kornfordelingskurver fra TBM ved Follobanen, gneiss (Dahl, 2018) og stiplet sort linje som viser grensekurver fra andre TBM-prosjekter (Statkraft, 1986). Grå skravur viser kornfordeling for sprengstein (ITA, 2019). Blå stiplet kurve er siktet sprengt tunnelstein (gneiss) fra Akershusstranda (se Figur 15).

Kornform

Kornformen på materialet baseres på målt bredde, lengde og tykkelse for enkeltkorn og klassifiseres i henhold til stenglighet og flisighet i Figur 5. TBM-materiale har en stenglig og flisig form og de fleste prøvene havner innenfor omrisset som er markert med rødt i figuren (Statnett, 1986). Kornformen er styrt av måten diskutterne bryter ut borkaks fra berget. Se også Figur 3 som godt illustrerer kornformen på TBM-kakset.

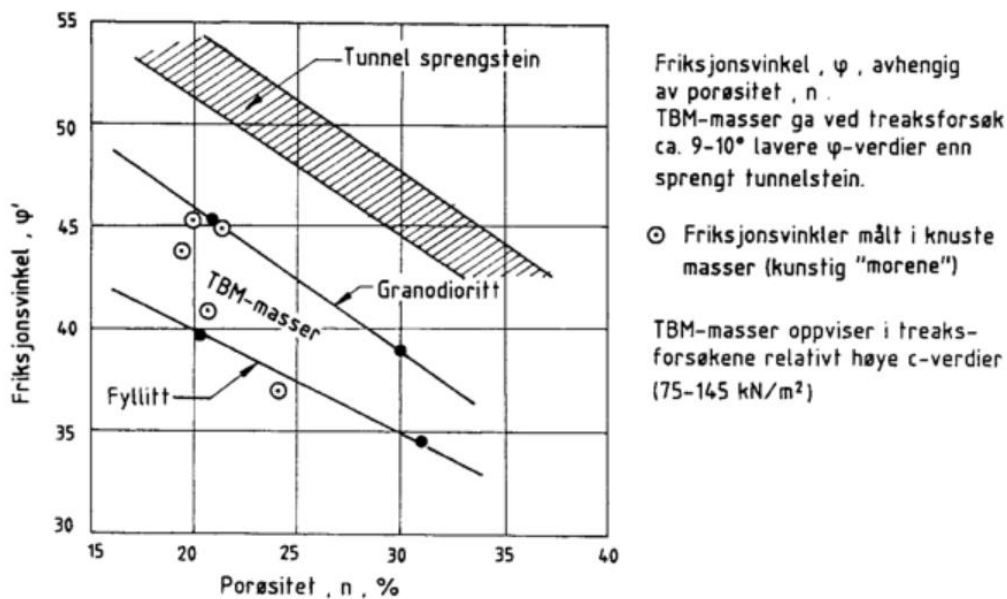


Figur 5. Kornform basert på målt bredde, lengde og tykkelse. TBM-stenen havner for det meste innenfor det røde feltet.

Skjærfasthet

Friksjonsvinkelen for TBM-kakset er bestemt ved treksialforsøk (Statkraft, 1986). Friksjonsvinkelen er målt til mellom 40-50° og tilsvarer skjærfastheten for en middels fast steinfylling, se Figur 6, med gode fundamenteringsforhold. Forsøkene viser at friksjonsvinkelen er lavere enn for sprengt tunnelstein, men den er vesentlig høyere enn friksjonsvinkelen for en naturgrus (Statens vegvesen, 2018).

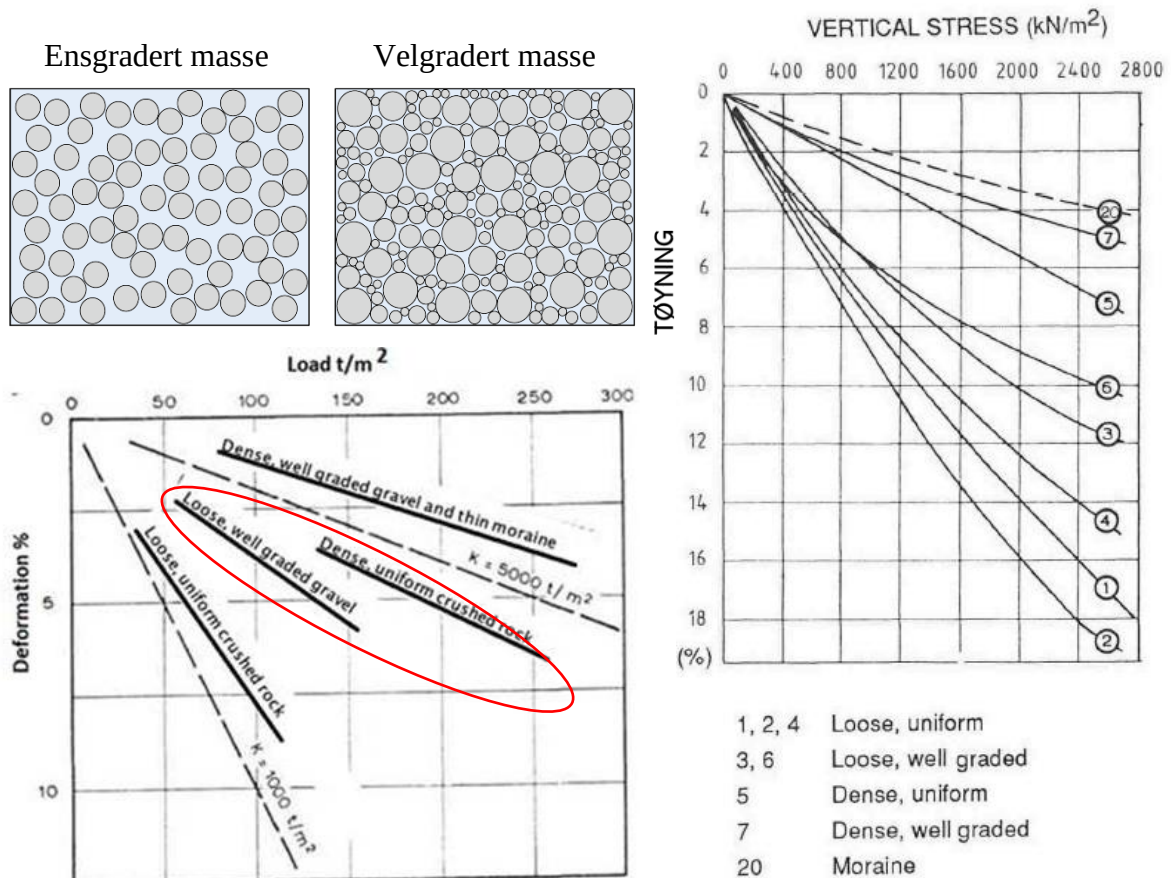
Figur 6 viser at variasjonen til friksjonsvinkelen med porøsitet (n) samsvarer med variasjonen for andre granulære masser. På masser fra Gjersrud - Stensrud er det tilbakeregnet en porøsitet etter komprimering tilsvarende 13 -23% (Bane NOR, 2018). Dette samsvarer godt med utførte forsøk i Figur 6, på porøsitet mellom 19 og 24%.



Figur 6. Friksjonsvinkel med tilhørende porøsitet fra treksialforsøk på TBM-masser (Kjærnsli, 1986).

Kompresjonsegenskaper

Setningsegenskapene for TBM-kaks er ikke blitt vurdert spesifikt tidligere. Figur 7 viser resultater av ødometerforsøk utført på ulike typer steinmasser for fyllingsdammer, med relativt høye spenningsnivåer. På NGI er det tidligere utført ødometerforsøk på ulike materialer med varierende pakningsgrad og steinsammensetning (Kjærnsli, 1968, Kjærnsli et al. 1992). Forsøkene viser kompressibilitet for velgradert grus (tilsvarende TBM-kaks) ved begrenset komprimering og fast lagret velgradert grus ved godt utført komprimering. I forsøkene er det indikert at det oppnås en høyere densitet når man komprimerer velgraderte masser enn ensgraderte masser. I de velgraderte massene fylles større andel av hulrommene med mindre korn og densiteten øker. Granulære masser med lite hulrom er som regel stivere og har lavere setningspotensiale enn masser med mye hulrom.

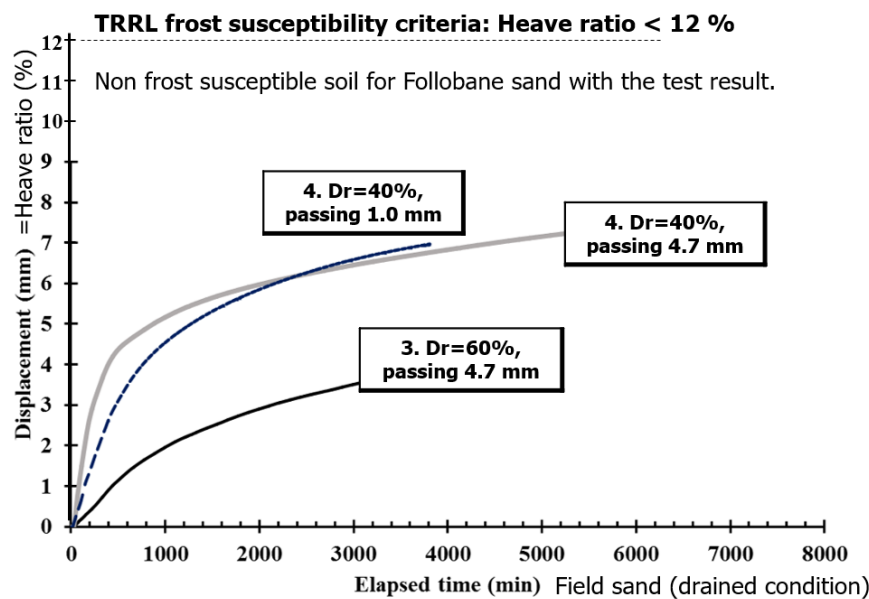
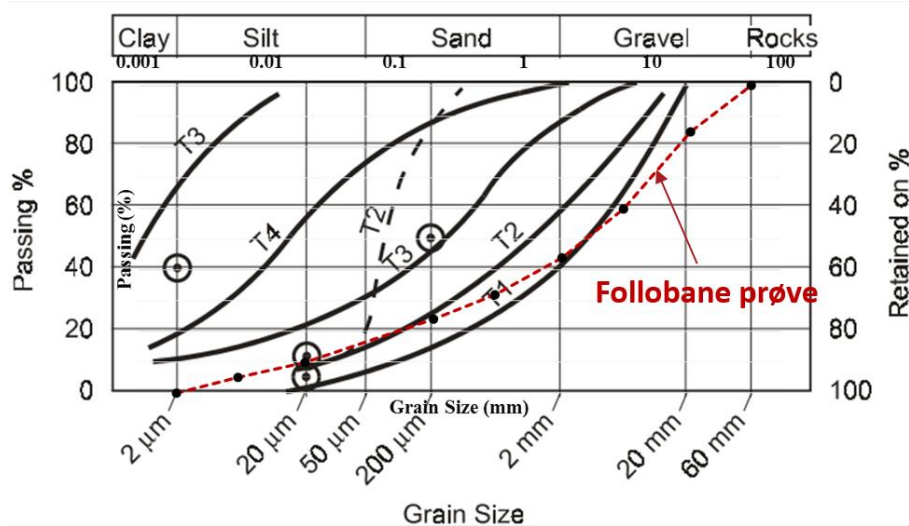


Figur 7. Figuren til høyre indikerer at løst lagrede, ensgraderte masser har større tøyning for samme last (spenning) enn løst lagrede, velgraderte masser Kjærnsli (1968). Det samme ser man for fast lagret masse. Figuren til venstre peker mot at en løst lagret, men velgradert grus, som TBM-massen kan karakteriseres som, har tøyninger i samme størrelsesorden som en godt komprimert, men ensgradert sprengstein Kjærnsli et al. (1992), se markering med rød oval.

Vannømfintlighet og telefarlighet

I Statens vegvesens Håndbok N200 betegnes materiale som vannømfintlig hvis $>7\%$ av materiale som er $< 22,4$ mm passerer 0,063 mm-siktet. TBM-kaks er i henhold til SVVs definisjon vannømfintlig. Dette tilsier at materialet ikke er fritt drenerende og vil holde på vann. Den vil ved utlegging og komprimering kunne oppleves som vannømfintlig.

I henhold til SVVs håndbok N200 vil materialet klassifiseres i telefarlighetsklasse T2 til T3 (lite til middels telefarlig). For at materialet skal få telehiv forutsettes at det finnes tilgang til fritt vann som kan suges oppover i massen og danne is-linser ved frysefronten. Det er utført fryse-tineforsøk ved NGI som viser at massen fra Follobanen ikke er telefarlig, som følge av at massen ikke har kapillærsug nok til at det skal kunne dannes is-linser, se nedre del av Figur 8.



Figur 8. Øvre del: Kornfordeling fra Follobanen plottet i diagram med eksempel på telefarlighetsklasser for ulike jordmaterialer (fra SVV, håndbok N200). Nedre del: Prøver i frostcelle på NGI viser at massene fra Follobanen likevel ikke er telefarlige, de har ikke tilstrekkelig kapillærsug.

Hydraulisk konduktivitet

Ved den komprimerte utfyllingen på Follobanen er den hydrauliske konduktiviteten tilbakeregnet fra infiltrasjonsforsøk i fire prøvesjakter i den utlagte og komprimerte fyllingen. Konduktiviteten ble vurdert i størrelsesorden 10^{-6} til 10^{-5} m/s (Dahl, 2018), hvilket tilsvarer hydraulisk konduktivitet for fraksjonen silt/sand.

Konduktiviteten er så høy at eventuell poretrykksoppbygging i en fylling vil utjevnes raskt, men materialet er ikke fritt drenerende.

Miljøanalyse av materialet

I prosjektene som er utført i Norge har det ikke vært nødvendig å tilføre tilsetningsstoffer. Bormassen fra Nye Ulriken-tunnelen og Follobanen er en grov, sandig grus og kleber ikke til utstyr, transportbelter eller tilsvarende.

Både på Follobanen og på Nye Ulriken-tunnelen er det utført kjemiske analyser av utboret bergmasse. Det er ikke påvist verdier over normale bakgrunnsverdier for bergarten det er boret i, for noen stoffer. Det ikke påvist olje eller nitrøse stoffer i TBM-massene som er analysert.

I sprengte tunneler kan man registrere nitrøse stoffer, olje og høy pH i sprengsteinen. Olje og nitrogenforbindelser kommer fra uomsatt sprengstoff, og høy pH skyldes bruk av sprøytebetong og injeksjonsmasser. Det finnes også plastrester fra tennere og koblingsledninger i sprengsteinsmasser, samt at man i prosjekter hvor det er brukt plastarmert sprøytebetong som midlertidig sikring vil få plasten fra dette blandet med sprengsteinsmassene.

ERFARINGER FRA ETABLERING AV KVALITETSFYLLING PÅ LAND - FOLLOBANEN

Ved Follobanen har Bane NOR og Oslo kommune inngått en avtale om å bruke TBM-kaks fra driving av de to 20 km lange tunnelene til utfylling, for planering av ulendt terreng. Arealet skal bli byggegrunn for ny bydel, Gjersrud-Stensrud. Det er etablert en inntil 30 m høy fylling med totalt 9 millioner tonn TBM-kaks. Det overordnede kravet er at deponering av masser skal tilrettelegge for at arealbruken som er fastsatt i reguleringsplanen kan gjennomføres, og at kvaliteten på fremtidig byggegrunn ikke blir dårligere enn den ville vært uten deponering. Krav til håndtering av massene, utlegging og komprimering er gitt i egen rapport (Bane NOR, 2013). En oversikt over fyllingen er vist i Figur 9.

For å redusere setninger i fyllingen som følge av en fremtidig pålasting er det nødvendig å legge ut TBM-massen lagvis med begrenset lagtykkelse. Valg av lagtykkelse ble bestemt på grunnlag av flere prøvefyllinger. Fyllingen er lagt ut i 0,7 m tykke lag og komprimert med seks overfarter med vibrovals på 25 tonn for hvert lag.



Figur 9. Oversiktsbilde av fylling ved Follobanen (bilde: Bane NOR).

Lagtykkelse, antall overfarter og vekt av komprimeringsverktøyet er videre sentrale faktorer som bidrar til å oppnå god komprimering. Et godt komprimert jordmateriale har høy stivhet, høy tørr densitet og lav porøsitet. Lagvis utlegging med komprimering av hvert lag utføres for å redusere fremtidige deformasjoner i massene og redusere setningspotensialet i en fylling.

Det er utført omfattende prøving under oppfyllingsarbeidet for å dokumentere kvaliteten på etablert fylling.

For å ivareta dette er massenes geotekniske egenskaper karakterisert og det er utført et omfattende kontrollregime under fyllings- og komprimeringsarbeidet. For hvert lag er det tatt prøver for bestemmelse av vanninnhold, kornfordeling og Standard Proctor. Komprimering under oppfyllingen er kontrollert ved måling av vanninnhold og tørrdensitet ved Troxler (isotopmålinger). I tillegg er det utført platebelastningsforsøk og fyllingens densitet er bestemt ved fire prøvesjakter. Data er sammenstilt i masteroppgave ved NTNU (Dahl, 2018). NGI har også utført stikkprøver på dokumentasjonen av komprimering på lagene som er kontrollert med platebelastningsforsøk og densitetsmålinger i felt (Bane NOR 2018 og 2020). Noe av resultatene er oppsummert nedenfor.

Andelen finstoff i TBM-kakset medfører at massen er vannømfintlig. Vanninnholdet på massen vil avhenge av bergets naturlige vanninnhold og driveprosessen. I tillegg vil vanninnholdet bli påvirket av eventuell nedbør i forbindelse med mellomlagring og transport. Vanninnholdet vil påvirke hvordan massen responderer på komprimering og hvilken energi som må tilføres for å få en tilstrekkelig densitet ved komprimering. På bakgrunn av dette og for å unngå at vanninnholdet var større enn det optimale vanninnholdet, ble det iverksatt overordnede tiltak for å hindre tilførsel av nedbør:

- Fyllmassen på transportbåndet og mellomlageret ble dekket med tak for å beskytte mot regn og snø (Figur 10).
- Det ble valgt å ikke legge ut masser ved nedbør, massene ble i stedet transportert ut av anlegget.



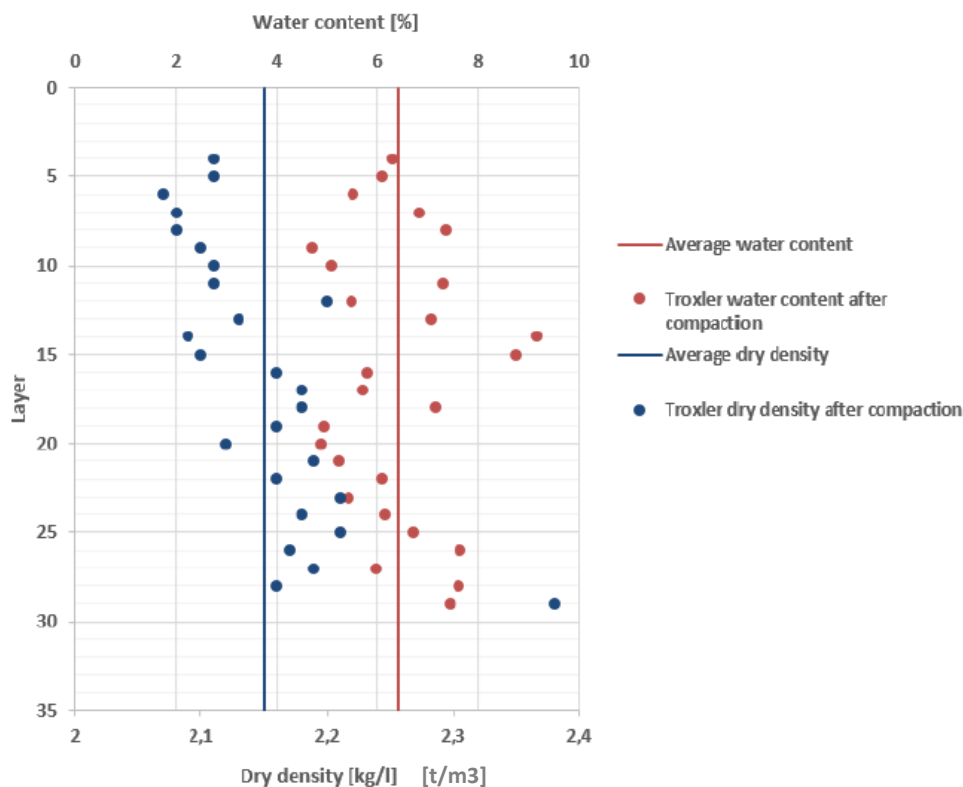
Figur 10. Oversikt over riggområdet hvor det tildekkede transportbåndet (blått) går fra tunnelmunningen ved E6 til Spoil shed lengst til høyre i bildet (bilde: Bane NOR).

Det oppnås best komprimering når massen ikke er for tørr eller for våt. Vann i små mengder fungerer som smøremiddel rundt kornene, og bidrar til en tettere pakning. Vann i store

mengder fyller porene mellom kornene og hindrer en tettere pakning. Det er derfor en optimal mengde vann i porene som gir en maksimal komprimering i masser som ikke slipper ut vann ved komprimering (ikke er fritt drenerende).

I Figur 11 er målt vanninnhold fra Troxler i de ulike lagene i fyllingen vist med røde symboler. Vanninnholdet varierer mellom 5-9%, med en middelerdi på ca. 7%. Dette er på størrelse med målt optimalt vanninnhold fra Standard Proctor på ca. 8-10%. Et vanninnhold på 7% tilsvarer en tørrdensitet i fyllingen på ca. $2,15 \text{ t/m}^3$ (Figur 11).

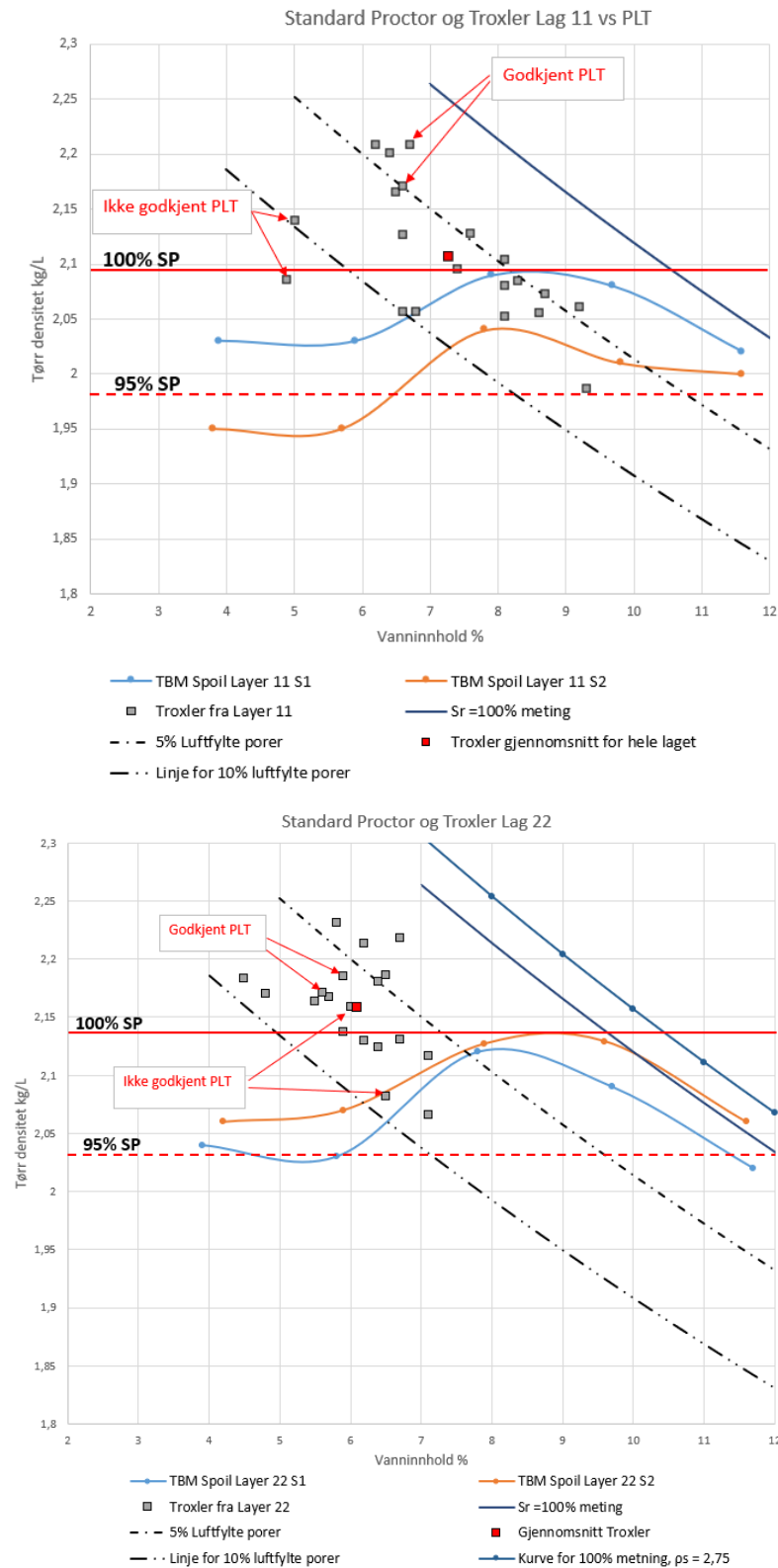
De utførte prøvesjaktene indikerer noe høyere tørrdensitet (ca. $2,28 \text{ t/m}^3$) enn den som er målt med Troxler. Resultatene fra Troxler-målinger og prøvesjekter viser at fyllingen oppfyller krav til 95% komprimering av maksimal densitet i Standard Proctor.



Figur 11. Målt vanninnhold fra Troxler og tilbakeregnet tørrdensitet i ulike lag i fyllingen ved Follobanen (Dahl, 2018).

Komprimeringen skulle også verifiseres med platebelastningsforsøk (PLT). Forsøkene viste seg å ikke oppfylle oppsatte krav til oppnådd deformasjonsmodul. Grunnen til dette er vurdert å være at det ikke var brukt avrettingslag eller gips før belastning, noe som er essensielt for å sikre representative resultater og kan resultere i et 50% avvik på stivhetsmodulen (Barnard and Heymann, 2015). I tillegg er flere av platebelastningsforøkene blitt utført rett etter komprimeringsarbeidet. Da vil laget kunne være noe mykere enn ventet ettersom vanninnholdet i massen ikke har hatt tid til å drenere (TBM-massen er ikke helt fritt drenerende). Denne effekten er også dokumentert i en masteroppgave ved NTNU (Andresdattir, 2019). For å vurdere kvaliteten av komprimeringen mer nøye er resultater fra platebelastningsforsøk, Standard Proctor og Troxler for samme lag plottet i samme diagram. Eksempler fra lag 11 og 22 er vist i Figur 12. I figuren er det lagt inn horisontale linjer for 100 Standard Proctor og 95% Standard Proctor. De fleste målepunktene ligger over 95% Standard Proctor og et stort antall ligger også over 100% Standard Proctor. Sammenstillingene fra hvert lag viser at komprimeringen tilfredsstiller kravet som er satt til en tørrdensitet tilsvarende

minimum 95% av maksimal tørrdensitet fra Standard Proctorforsøk. Sammenstillingen viser også at områder med ikke godkjente platebelastningsforsøk har tilfredsstillende tørrdensitet og komprimering.



Figur 12. Sammenstilling av måleverdier fra Troxlermålinger mot Standard Proctor-prøver fra lag hvor det er identifisert platebelastningsforsøk som ikke er godkjente fra 0. Måleverdiene for Troxlermålingene ligger over 95 % Standard Proctor, og komprimeringskravet er oppnådd.

VURDERINGER KNYTTET TIL UTFYLLING I SJØ

Utfylling av masser i sjø for å utvinne nytt landareal er god bruk av masser. Utfylling ved Kadettangen i Sandvika fra E16—utbyggingen er et godt eksempel på bruk av masser lokalt. De geotekniske problemstillingene ved etablering av fylling i sjø for å lage nytt landareal vil være de samme som ved fylling på land, ved at krav til stabilitet og setninger må ivaretas. Ved utfylling i sjø er det ikke samme muligheter for komprimering av fyllmassene som på land. En mulighet for å redusere porøsiteten er å legge på overlaster, som vil virke positivt både for skjærstyrken og fremtidig setningspotensiale. Når fyllingen når opp til vannflaten, er det også mulig å komprimere med dypkomprimering.

Ved utfylling i sjø vil det også være krav til tillatte grenseverdier for partikkelspredning (turbiditet). Spredning av partikler avhenger av flere faktorer som bl. a. massens innhold av finstoff og kornfordeling. Strømforholdene i vannet, strømmens styrke og retning, påvirkning fra båttrafikk, om vannet er ferskt eller salt og hvor sprangsjiktet ligger i forhold til hvor massene tippes er også faktorer man må ha kunnskap om for å kunne si noe om sedimenteringsegenskapene.

Det finnes informasjon fra noen prosjekter hvor det er utført utfylling med TBM-kaks i sjø. I Norge er masser fra Nye Ulriken-tunnelen brukt til tildekking av forurensede sedimenter i Puddefjorden i Bergen. Her ble det lagt ut et 45 cm tykt lag på 20 m vanndybde, fra lekter med nedføringsrør. Det er fylt ut til sammen 350 000 tonn TBM-masse. Ved utlegging av TBM-massene er det utført kontinuerlig overvåkning med turbiditetsmåler med alarm. Det har ikke vært stopp i arbeidet som følge av utlegging av TBM-massen ifølge sluttrapporten fra PEAB (2018). Det bemerkes at dette området ikke har sterk strøm som kan bidra til økt spredning av partikler.

Det er også funnet eksempler på utlegging av TBM-kaks fra Crossrail London, Norra hamnen i Malmö, og Nordhavnen i København. Masser fra Crossrail-prosjektet (London clay og kalkberg) er fraktet på lekter fra London til munningen av Themsen, hvor det er fylt ut for å reetablere et våtmarksområde og fuglereservat (<https://learninglegacy.crossrail.co.uk>) innenfor voller og sjetéer (voller) som sikret omgivelsene mot suspendert materiale. Masser fra jernbane og metroen i henholdsvis Malmö og København er fylt ut for å utvide havneområdene. Overskuddsmassene består av moreneleire og kalkbergarter. Massene er fylt ut innenfor sjetéer og spunt. Arealet er planlagt brukt til Havnevirkksomhet og det er funnet anbudsdokumenter som indikerer at det er utført noe dypkomprimering til slutt.

Laboratorieforsøk for å vurdere turbiditet og porøsitet

NGI har på oppdrag av Oslo kommune, Vann og avløpsetaten, VAV utført laboratorieforsøk på TBM-masser under vann, for å vurdere spredning av partikler i vannmassene (turbiditet) og porøsiteten til massene slik de kan legge seg etter sedimentasjon til bunnen ved utlegging. Det er utført to typer sedimentasjonsforsøk på prøver av TBM-masser fra Follobanen i Oslo:

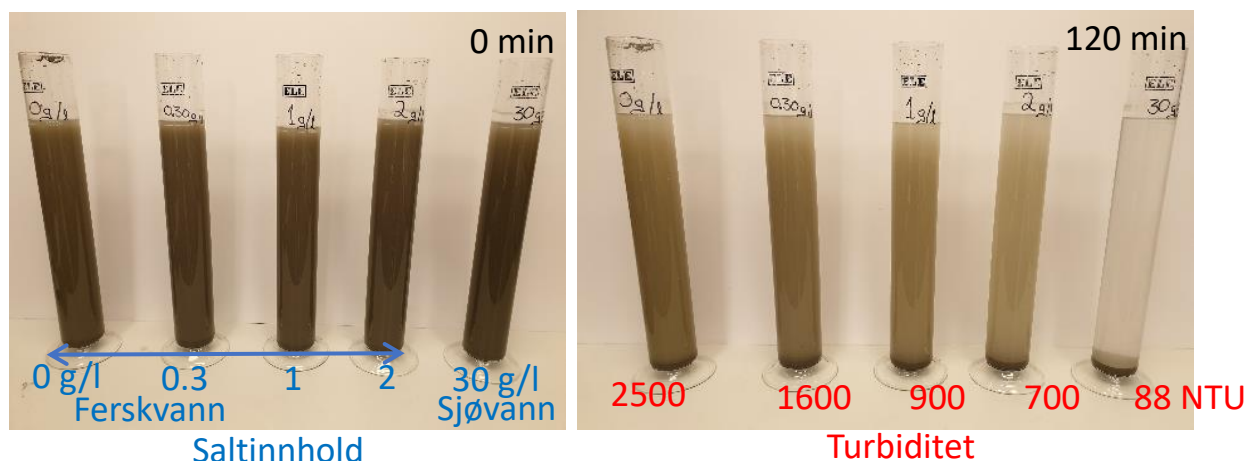
- 1) Sylindertester på finstoffdelen av prøvene (fraksjon <0.063mm), i 1 liters målesylindrer
- 2) Rørtester. Forsøk med hele materialprøven (fraksjon 0 – 90 mm) i rør med større dimensjon (rørdiameter: 480 mm, volum 253 l).

Begge forsøkene ble utført i vann med saltinnhold fra 0 til 30 g/l. 30 g/l tilsvarer normalt sjøvann.

Det er i tillegg utført rørforsøk på sprengt stein for å sammenligne resultatene fra TBM-forsøkene med resultater fra en type masse som er mye brukt til utfylling i sjø.

Utfylling med rene masser vil medføre at finstoff partikler sprer seg i vannmassene. Dette vil gi en estetisk effekt med grumsete vann og kan gi ulike negative effekter på planter og dyr i vannet (hindrer lys til planter, nedslamming av bunnfauna og påvirkning på fisk mm.). Grenseverdien er normalt bestemt på bakgrunn av risiko for oppvirvling av forurensete sedimenter ved utfylling på sjøbunn med forurenset slamslag, typisk maksimalt 10 NTU over målt bakgrunnsverdi. Denne grenseverdien kan overskrides over en bestemt tidsperiode.

Hensikten med sylindreforsøkene var å vurdere effekten av varierende saltinnhold på sedimentasjonshastigheten av finstoff. Forsøkene ble utført i fem 1-liters målesylindrer med rent vann tilsatt salt (NaCl) i ulike konsentrasjoner. Det er utført forsøk med saltinnhold på 0, 0.2, 2, og 30 g/l. I hver sylinder ble det tilsatt 30 g frasiktet TBM-kaks med partikkelstørrelse $<0.063\text{mm}$ (finstoff). Sylindrerne ristes etter tilsetning og det tas turbiditetsmålinger av vannet etter fastsatte tidspunkt. Resultater fra forsøkene er oppsummert i Figur 13. Forsøkene viser at sedimentasjonshastigheten er svært avhengig av saltinnholdet, og dette vil få stor innvirkning på hvor langvarig høy turbiditet vil vedvare.



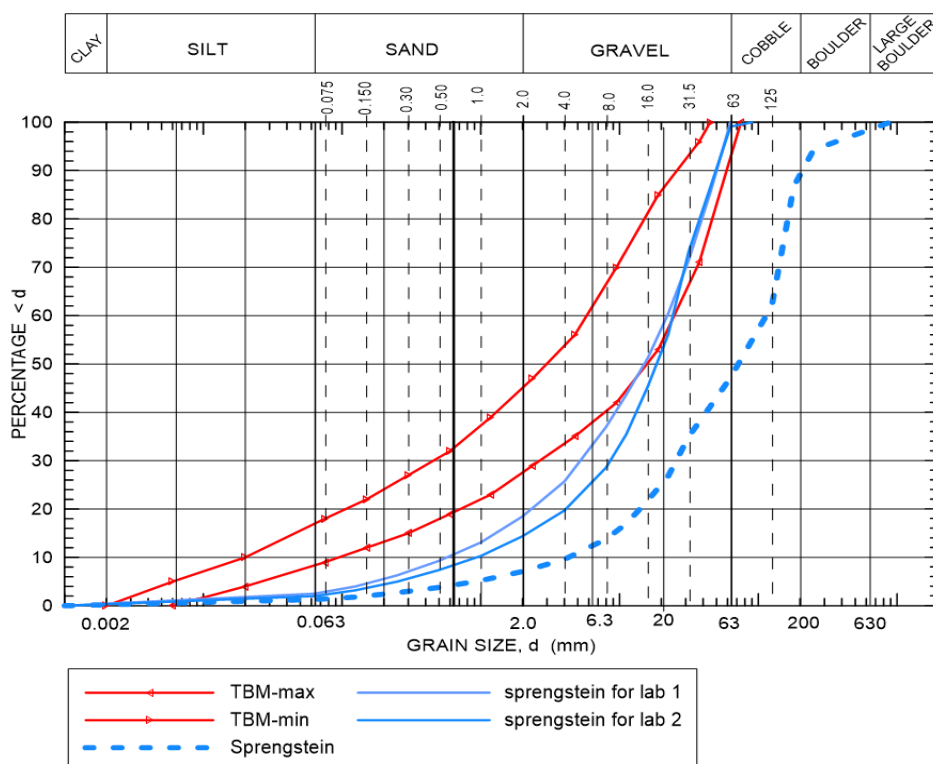
Figur 13. Sylindreforsøk med frasiktet finstoff (fraksjon $<0.063\text{mm}$) fra TBM-kaks, saltinnhold (fra venstre til høyre) på 0, 0.3, 1, 2 og 30 g/l, etter 0 min (venstre) og 120 min (høyre).

Det er deretter utført større rørforsøk på TBM-kaks og frasiktet sprengt tunnelstein (Figur 14). TBM-kakset er fra Follobanen og gravd frem fra fyllingen ved Åsland. Det er også siktet ut 0/63 mm stein fra utsprengt tunnelstein ved Akershuskaia. Begge steinmassene er av samme bergart (gneiss).



Figur 14. Masser for uttesting TBM-kaks fra fylling ved Follobanen (venstre) og sprengt tunnelstein fra Akershusstranda (høyre).

Det er utført sikteanalyse for et lass på 32 tonn med sprengt tunnelstein. Siktekurven er vist med blå stiplet linje i Figur 15. Det er utført to sikteanalyser på fraksjonen 0/63 mm av sprengsteinen, for å kunne sammenligne med TBM-kaks (innenfor samme øvre kornstørrelse). Disse er vist med blå linje i samme figur. Kornfordelingskurvene viser en total finstoffandel på ca. 1% for massen samlet, og ca. 2% for 0/63 mm fraksjonen (relatert til største korn i kurven). Målt kornfordeling ligger også innenfor rapportert erfaringsdata (ITA, 2019) og kan ansees som representativ for sprengt tunnelstein. I Figur 15 er også område for siktekurvene for TBM-kaks fra Follobanen lagt inn med røde linjer, til sammenligning. Den sprengte tunnelsteinen er karakterisert som er steinig grus med finstoffinnhold på 1%. TBM-kakset er karakterisert som er sandig, siltig grus, med finstoffinnhold på 8-18%.



Figur 15. Siktekurve for sprengt tunnelstein av gneis (stiplet blå) sammenlignet med kurver for TBM-kaks fra Follobanen (rød). Tynne blå kurver viser kornfordeling for 0-63 mm fraksjon, hvor >63 mm er frasiktet.

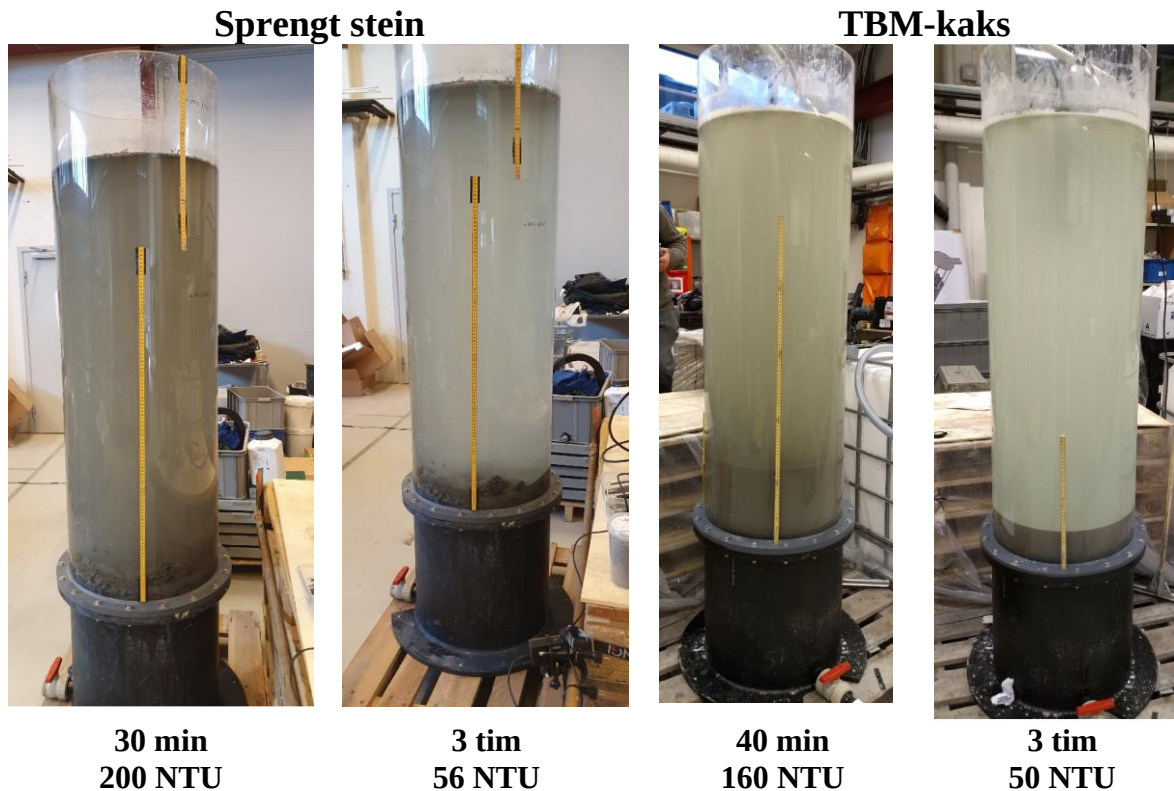
Det er utført modellforsøk med fylling av TBM-kaks i rør med diameter 0,48 m. Formålet med forsøkene er å bestemme densiteten (eller porøsiteten) i fylling som legges ut under vann. Under forsøkene er det også målt turbiditet i røret over tid. For hvert forsøk er det veid opp 180 til 200 kg masser i bøtter. I forsøket ble hver bøtte tømt ut manuelt i røret ved å senke ned bøtten under vannspeilet og tømme massen ned. Bilder fra forsøket er vist i Figur 16. Det er utført til sammen 9 forsøk i vann. Seks forsøk på TBM-masse, to forsøk hver med saltinnhold 0, 2, og 30 g/l. Deretter er det utført tre forsøk på sprengt tunnelstein med fraksjonen 0-63 mm, et forsøk hver med saltinnhold på 0, 2, og 30 g/l. I tillegg er det utført to forsøk med TBM-materiale uten vann, ved å helle den naturlig fuktige massen (3-5 % vanninnhold) ned i røret og måle densiteten uten noen form for komprimering.

Turbiditetsmålinger

Figur 17 viser bilder fra forsøkene i vann etter 30-40 minutter og 3 timer ved saltinnhold på 30 g/l. Resultatene viser liten forskjell i målt turbiditet mellom forsøkene på TBM-kaks og sprengt stein i saltvann.



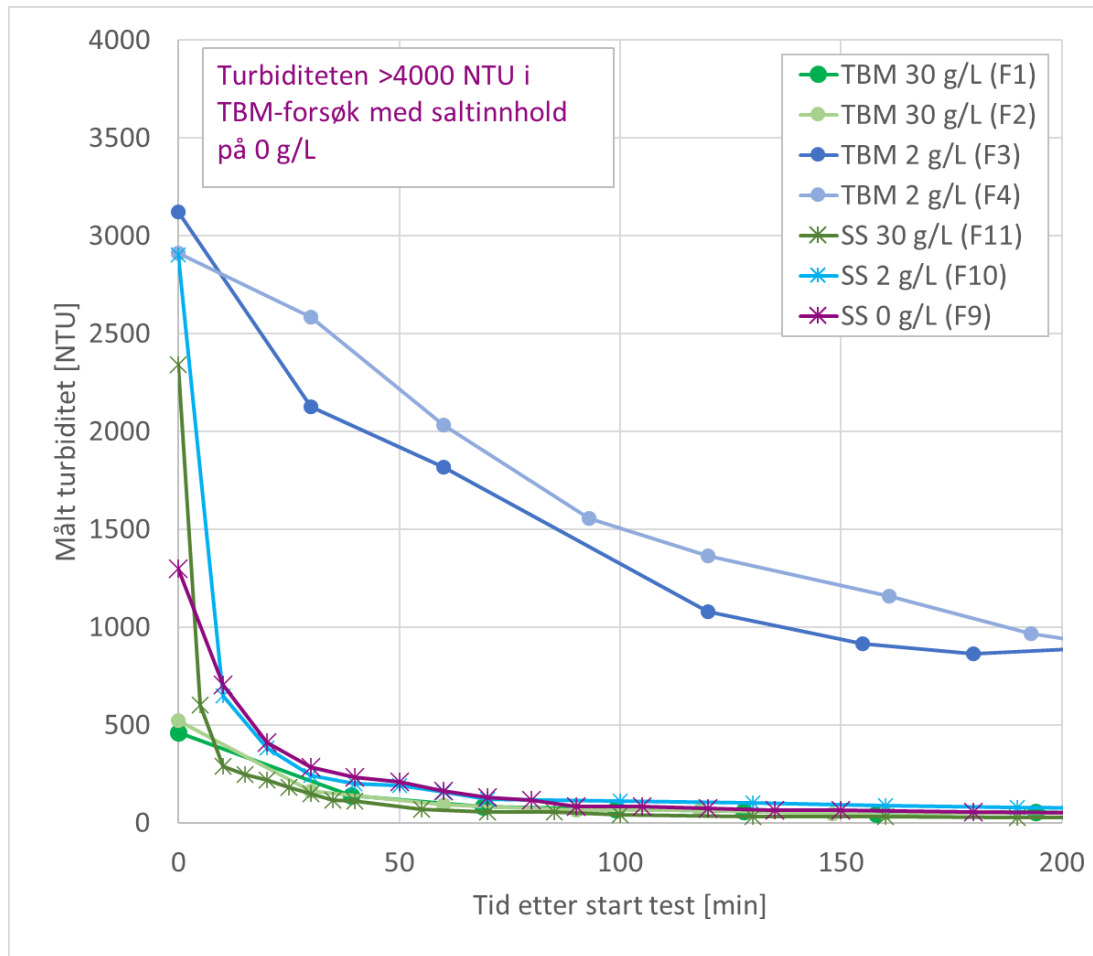
Figur 16. Bilder fra tømning av første bøtte med masse, fra film på utført rørforsøk.



Figur 17. Bilde av rørforsøk med sprengt stein (venstre) og TBM-kaks (høyre) og saltinnhold på 30g/l, resultater etter 30-40 min og 3 timer.

Resultatene fra alle forsøk utført i vann er vist i Figur 18. Diagrammet viser målt turbiditet i NTU ved ulike tidspunkt etter at massen ble tømt i røret. Alle forsøk med saltinnhold på 0 g/l er plottet med lilla kurver. I TBM-forsøkene med ferskvann ble det målt >4000 NTU i hele måleperioden og disse kurvene havner derfor utenfor diagrammet. Forsøk med saltinnhold på 2 g/l er plottet med blå linjer og forsøk med saltvann (30 g/l) er plottet med grønne linjer.

Resultatene viser at sedimentasjonshastigheten for TBM-kakset er sterkt avhengig av saltinnholdet i vannet. Sedimentasjonen for sprengt stein er ikke like følsom for saltinnholdet. Sedimentasjonshastighet for TBM-forsøkene utført i vann med saltinnhold på 30 g/l er i samme størrelsesorden som forsøkene med sprengstein og lavt saltinnhold (0-2 g/l). Det er imidlertid betydelig høyere turbiditet og lengre tid for sedimentasjon av finstoff i forsøkene med TBM-masse enn forsøkene på sprengstein når det er lite salt i vannet. Grunnen til dette er det høyere finstoffinnholdet og bidrag fra forskjellen i kornform, da sprengt stein har mer kubisk form og TBM-kakset er mer flisete. Partiklene vil sedimentere langsommere på grunn av større overflate i forhold til partiklenes vekt. De fineste partiklene vil også sedimentere langsommere på grunn av at overflaten er negativt ladet. I vann med ioner fra salt brytes de negative ladningene, partiklene klumpes sammen i aggregater som er større enn de opprinnelige partiklene og som igjen sedimenter raskere. I vann med lite salter er det mindre grad av aggregering og de fineste partiklene blir hengende lenger i vannsøylen.



Figur 18. Målt turbiditet i resultater fra rørforsøk på TBM-kaks og frasiktet sprengt steinmasse.

Forsøkene er imidlertid konservative i forhold til målt turbiditet i saltvann. Alle forsøkene er utført i stillestående vann, og med et begrenset vannvolum. Ved en reell utfylling vil det skje en generell fortykning som vil resultere i en lavere turbiditet enn det som er målt i forsøkene. TBM-massen som skal deponeres vil inneholde 80-90 % grove partikler per kubikkmeter materiale, disse vil synke med en gang. De store partiklene forventes også å dra med seg deler av finstoffet nedover og bidra til raskere sedimentasjon.

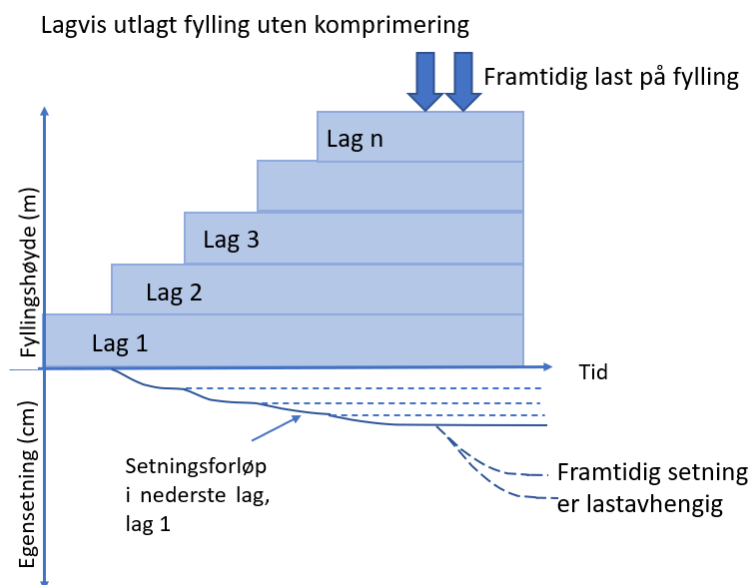
Det forventes dessuten at massen i saltvann vil synke et stykke som en samlet masse (turbiditetssky) siden vannet med innblandet TBM-masser har vesentlig høyere tetthet enn vannet omkring. Ettersom denne massen synker nedover, vil det blandes inn vann fra volumet rundt. Denne mekanismen vil bidra positivt ved at den transporterer mye av TBM-massene raskere ut av overflatevannet og ned under et eventuelt sprangsjikt der høyere salinitet også vil bidra til økt sedimentasjon (Sintef, 2008).

Porøsitetmålinger

Porøsiteten i TBM-kakset som er sedimentert i vann i forsøkene er beregnet fra 33 til 38%. Til sammenligning er porøsiteten i de to forsøkene uten vann bestemt til 38 – 39%. Disse kan antas å tilsvare ukomprimert masse lagt ut fra endetipp. På komprimerte TBM-masser lagt ut på land med lagvis utlegging og normal komprimeringsenergi oppnådde man en porøsitet mellom 20 og 25%. Forsøksresultatene fra rørforsøkene indikerer at det ikke har stor betydning om massene legges ut i vann eller om de legges ut løst på land. Det er mangelen på

komprimering som bidrar til den høyere porøsiteten. Førsøket gjelder for ett lag, uten belastning fra neste lag.

Ved lagvis utlegging vil hvert nytt lag medføre belastning på laget under seg og bidra til noe komprimering og reduksjon av porevolum i underliggende lag. Den målte porøsiteten på 33 til 38% gjelder derfor bare for utlagte masser som ikke er belastet av nye lag over seg. Ved lagvis utlegging vil hvert nytt lag medføre komprimering (reduksjon i porøsitet) og setninger i underliggende lag. Figur 19 viser setningsutvikling i det nederste laget som følge av gradvis utlegging av flere lag. Det vil etter ferdig utfylling være et gjenstående setningspotensial i de øverste lagene som har liten belastning fra masser over seg. Videre kan det utvikles setninger i fyllingen dersom den påføres laster fra fremtidig tilleggsbelastning som vekt av bygg, kraner eller konstruksjoner. En utfylling vil i tillegg medføre setninger i undergrunnen. Disse setningene vil kunne bli store hvis fyllingshøyden (vekten av utlagt fylling) er stor og undergrunnen er bløt (leire), og er uavhengig av fyllmassens egenskaper. For å forsure setninger i TBM-massen er forbelastning av fyllingen et godt virkemiddel. Den vil også være positiv for setninger i de underliggende massene. En forbelastning vil påskynde setningsforløpet og gi arealet reduserte setninger i framtiden.



Figur 19. Prinsippfigur som viser utvikling av egensetninger i det nederste laget ved lagvis utlagt fylling uten komprimering.

KONKLUSJONER

Nedenfor oppsummeres hovedkonklusjonene for nyttiggjøring av TBM-kaks som fyllingsmateriale, basert på blant annet omfattende karakterisering av TBM-kaks og sammenstilling av data fra utfylling ved Åsland i forbindelse med Follobane-prosjektet:

Massens egenskaper:

- TBM kaks karakteriseres som en sandig, siltig grus
- Massen er ikke forurenset (gjelder for TBM i norsk berg, hvor det ikke er behov for tilsetningsstoffer)
- Egner seg godt til tildekking av forurensete sedimenter

Utfylling på land:

- Egner seg godt som utfyllingsmateriale på land, hvor håndteringen må sikre at det ikke tilføres vann før utlegging og at massen legges ut og komprimeres lagvis. Det er etablert fylling ved Åsland hvor høy densitet, god bæreevne og lavt setningspotensiale er dokumentert.

Utfylling i sjø:

- Finstoff holder seg lengre suspendert i ferskvann enn i saltvann. Under sprangsjiktet er det liten forskjell i sedimentasjonen (turbiditeten) mellom TBM-kaks og sprengt stein i sjøvann.
- Dersom TBM-massene kan slippes i saltvann under sprangsjiktet, vil risikoen for overskridelse av partikkelspredning være i samme størrelsesorden som ved utlegging av sprengt stein. Mulige løsninger for dette vil være utlegging fra splitt lekter som går ned under sprangsjiktet (der dette ligger grunt), eller utlegging med nedføringsrør til dyp med høyere salinitet.

REFERANSER

Andresdottir Herbjörg, Plate load testing. Effects of in situ conditions, test procedure and calculation method. Master degree thesis NTNU. 2019.

Bane NOR (2013). UVB-30-A-70072 The Follo Line, Åsland. Application of TBM spoil as a quality fill for Gjersrud/Stensrud township. NGI rapport 20130559-15-R. Rev. 02. Datert 2016-06-10.

Bane NOR (2018). Kontrolldata fra fylling av borkaks fra Follobanetunnelen. Evaluering av geoteknisk kontroll av fylling av borkaks. NGI rapport 20180498-01-R. Rev. 0 datert 2018-09-12.

Bane NOR (2019). UFB-31-A-67013. The Follo Line Project, EPC TBM. Follobanen, Åsland. Spoil Area. Final report. Rev. 00E, 04-12-2019.

Bane NOR (2020). The Follo Line project. Deponiområdet Gjersrud – Stensrud. Vurdering av kvalitet av utført fylling ved Gjersrud – Stensrud. NGI rapport 20200443-1-R.

Barnard and Heymann, 2015. The effect of bedding errors on the accuracy of plate load tests. J. S. Afr. Inst. Civ. Eng. vol.57 n.1 Midrand Jan./Mar. 2015.

Dahl, Marianne (2018). Investigation of geotechnical properties of TBM spoil from the Follo line project. Master degree thesis. 2018.

ITA (2019). Handling, treatment and disposal of tunnel spoil materials. International tunnelling and underground space association. Working groups 14 and 15 Underground construction and the environment and mechanized tunnelling. Report no 21/April 2019. ISBN: 978-2-9701242-0-7.

Kjærnsli, B. (1968). Fundamentering på grus- og steinfyllinger. NGI Publikasjon nr. 73.

Kjærnsli, B., Valstad, T. & Høeg, K. (1992). Rockfill dams. Design and construction. Tapir, Tondheim, Norge. ISBN 82-7598-014-3.

NGI (2019). GEOreCIRC – GEOressurser i en sirkulær økonomi. Tunnelborkaks (TBM-kaks) – karakterisering og nyttiggjøring. NGI rapport 20160794-08-R. Datert 2019-12-13.

NVE/NTNU (1991). Fullprofilmasser. Materialelegenskaper og anvendelse. Prosjektrapport 16:91. NVE/NTNU.

PEAB (2018). Renere Puddefjord. Sanering av forurenset sjøbunn. Sluttrapport. Bergen kommune. Peab rapport 617391-RIGm-RAP-01. Datert 29. november 2018.

Statens vegvesen (2018). Geoteknikk i vegbygging. Håndbok V220. Vegdirektoratet 2018.

Statkraft (1986). Prosjekt fullprofilmasser materialelegenskaper. NGI rapport 85607-1. Datert 30. mai 1986.

VAV (2020). Vurdering av sedimentasjon av TBM-kaks i sjø. NGI rapport 20190407-02-R-rev02. Datert 2020-08-25.