



earthresQue

**Gjenvinning av TBM-
masser:**

On-line karakterisering av masser

December, 2022

sf  Senter for
forskningsdrevet
innovasjon

Norges forskningsråd

Forsidebilde: banenor.no

Gjenvinning av TBM-masser: On-line karakterisering av masser
earthresQue Report no. 3
ISBN: 978-82-575-2978-9
RCN project 310042

Illustration front cover, header and end page: earthresQue
Publisher: NMBU – Norwegian University of Life Sciences

earthresQue,
Rescue of earth materials and wastes in the circular economy,
Centre for Research-based Innovation
www.earthresQue.no
www.earthresQue.com

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 endres uten samtykke fra earthresQue.

Rapportbeskrivelse

Rapporttittel:	Gjenvinning av TBM-masser: On-line karakterisering av masser
earthresQue Report no.:	3
ISBN:	978-82-575-2978-9
Dato:	[2022-12-31]
Rev.nr./ Rev.dato:	0 / [Dato]
Utarbeidet av:	Erlend Skretting (NGI), Gudny Okkenhaug (NGI), Stefan Ritter (NGI), Andreas Botnen Smebye (NGI)

FORSKNING



PRIVAT SEKTOR



OFFENTLIG SEKTOR



Sammendrag

Behandling og gjenvinning av tunnelmasser er et viktig aspekt i forbindelse med et tunnelprosjekt, og har fått økt oppmerksomhet de siste årene. En optimalisering av resirkuleringsprosessen vil være både kostnads- og miljøbesparende. Behandling og gjenvinning av masser fra tunneler drevet med tunnelboremaskiner (TBM) er i mindre grad innarbeidet og optimalisert sammenlignet med behandling av tunnelmasser fra konvensjonell driving. Denne rapporten adresserer potensialet ved å optimalisere en karakteriseringsprosess av TBM-masser. Det er lagt vekt på mulighet for å implementere såkalte *on-line* analyser på transportbåndet til en TBM som kan gi sanntidsinformasjon om element- og mineralinnhold til TBM-massen. On-line analyse av massene vil gi et bedre og raskere beslutningsgrunnlag for å bestemme gjenvinningspotensialet, samt at det fører til en mer strømlinjeformet håndtering av massene. Rapporten er basert på eksisterende litteratur om temaet og gjengir hvilke verktøy og teknologi som finnes for karakterisering og behandling av TBM-masser. Det er lagt spesielt vekt på teknologier som er relevante for norsk geologi og TBM-prosjekter.

Innhold

1	Innledning	6
1.1	Bakgrunn	6
1.2	TBM-masse	6
1.3	Karakterisering og analyse av tunnelmasse	7
1.4	Metode og litteratursøk.....	8
2	Generelt om gjenvinning av tunnelmasser.....	9
2.1	Regelverk knyttet til disponering av tunnelmasser	9
2.2	Gjenvinning av TBM-masser	11
2.3	Aktuelle gjenvinningsklasser for TBM-masse.....	13
2.3.1	Klasse 1a – TBM-masse til bruk som tilslag	13
2.3.2	Klasse 3 – TBM-masse til bruk som konstruksjonsmateriale og fyllmasse.....	16
2.3.3	Klasse 4 – Deponimasser	16
3	On-line karakterisering og analysemetoder	17
3.1	X-ray fluorescence (XRF) spektroskopi.....	17
3.1.1	Metode og anvendelse.....	17
3.1.2	Markedsoversikt.....	18
3.2	Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA).....	19
3.2.1	Metode og anvendelse.....	19
3.2.2	Markedsoversikt.....	20
3.3	Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS).....	21
3.3.1	3.3.1 Metode og anvendelse.....	21
3.3.2	3.3.1 Markedsoversikt.....	23
3.4	Hyperspektral og multispektral avbildning	24
3.4.1	Metode og anvendelse.....	24
3.4.2	Markedsoversikt.....	25
4	Materialflyt av TBM-masser ved bruk av on-line analyser.....	26
4.1	Implementering av on-line analyser på TBM	27
5	Eksempelprosjekter	29

5.1	Follobanen	30
5.2	Nytt RKV	30
6	Oppsummering	32
7	Referanser.....	34

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bygg- og anleggsbransjen har de siste årene rettet et særskilt fokus mot å oppnå sirkulær økonomi og å redusere klimagassutslipp. Gjenvinning av tunnelmasser er et viktig bidrag i denne sammenheng, og det har derfor blitt et økt fokus på å i størst mulig grad nyttiggjøre seg av overskuddsmasser knyttet til tunnelprosjekter. I Norge har tunneler tradisjonelt blitt drevet ved konvensjonell boring og sprengning. De siste årene har derimot flere tunneler blitt drevet med tunnelboremaskin (TBM), og flere TBM-tunneler vil bli drevet kommende år. Behandling og gjenvinning av TBM-masser er i mindre grad innarbeidet og optimalisert sammenlignet med behandling av tunnelmasser fra konvensjonell driving. Kunnskap om muligheter for karakterisering og gjenvinning av TBM-masser er viktig for å i best mulig grad nyttiggjøre seg av TBM-masser.

Denne rapporten er utarbeidet i forbindelse med SFI earthresQue. Rapporten tar for seg hvilke verktøy og teknologier som finnes for karakterisering og behandling av TBM-masser. Det er i hovedsak fokusert på teknologi og metoder som kan anvendes på TBM-maskinen (transportbåndet) og anleggsområdet, slik at egnetheten til gjenvinning av TBM-masser lettere og raskere kan avgjøres.

Bidragstyttere til rapporten har vært:

- Erlend Skretting, Stefan Ritter, Gudny Okkenhaug og Andreas Botnen Smebye, NGI
- Andreas Olaus Harstad, Skanska
- Thomas Jølstad Henriksen, AF Decom
- Div. kontakt med utstyrsleverandører

1.2 TBM-masse

TBM-masse anses ofte som vanskeligere masse å gjenvinne og nyttiggjøre sammenlignet med overskuddsmasse generert fra boring og sprengning. Langford et al. (2020) peker på to grunner til at TBM-masse ofte blir ansett som lite brukbare:

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

Førstnevnte punkt kan knyttes til både bergmasse og drivemetode, da driving med TBM fører til overskuddsmasser med en ugunstigere kornstørrelse, kornform og kornfordeling sammenlignet med tunnelmasser fra konvensjonell driving. TBM-masser har også en høyere finstoffandel enn sprengstein (Langford, et al., 2020).

Sistnevnte punkt kan knyttes til bergmassen det drives i, som bestemmer de petrografiske og geokjemiske egenskapene til TBM-massen. I et prosjekt drevet med TBM har man ikke de samme mulighetene for visuell geologisk kartlegging av tunnelstoff som i et prosjekt hvor det drives ved konvensjonell boring og sprengning. Kvantitativ informasjon om TBM-massenes geokjemiske og petrografiske sammensetning begrenses derfor ofte til undersøkelser av stikkprøver fra lagringshauger av TBM-massen. Dette fører til vesentlig usikkerhet i resultatene, samt at undersøkelsene ofte er tidkrevende da materialprøver må sendes til laboratorier for analyse.

1.3 Karakterisering og analyse av tunnelmasse

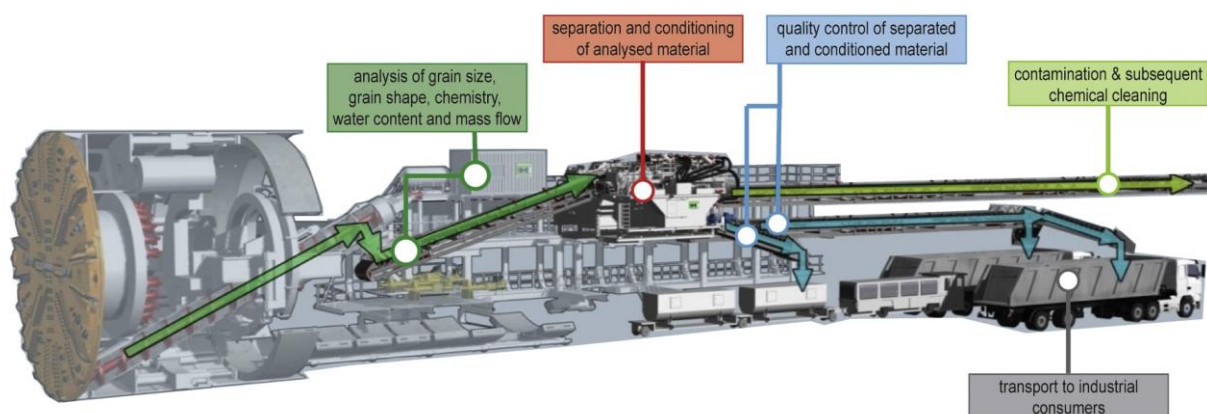
I planleggingsfasen av et tunnelprosjekt er det nødvendig å utføre undersøkelser for å få informasjon om påtruffen bergmasse i prosjektet. Eksempler på slike forundersøkelser er geologisk kartlegging, kjerneboring, bergmekaniske undersøkelser, og geokjemiske og petrografiske laboratorieundersøkelser.

Uavhengig av drivemetode vil slike forundersøkelser gi det første grunnlaget for å vurdere hvilke anvendelsesmuligheter tunnelmassene har. Informasjon om bergmassens geotekniske, geokjemiske og petrografiske egenskaper er styrende i planleggingen av massenes gjenvinningspotensiale – for eksempel om massene må deponeres, eller om de kan brukes internt i prosjektet som fyllmasse eller tilslag.

I et TBM-prosjekt fraktes TBM-massene ut av tunnelen på et transportbånd. Dette muliggjør for en on-line analyse av massene på transportbåndet. Med *on-line analyse* menes kontinuerlige analyser av TBM-massen på transportbåndet. Slike analyser vil gi kontinuerlig og sanntidig informasjon om for eksempel mineralogisk sammensetning eller geotekniske parametere til TBM-massen, og gjør det mulig å karakterisere og klassifisere massen uten at materialprøver trenger å sendes til et laboratorium for videre undersøkelse. Gjennom kontinuerlig prøvetaking vil on-line analyser kunne detektere endringer i mineralsammensetningen til TBM-massen.

En on-line analyse av TBM-masse muliggjør for en mer nyansert klassifisering av tunnelmassene ettersom analysene kontinuerlig kan gi kvantitativ data om massenes egenskaper. Disse dataene kan settes opp mot satte grenseverdier for elementinnhold, som baseres på lovverk og forundersøkelser. Kapittel 2 fordyper seg mer i regelverk for gjenvinning av tunnelmasser.

Figur 1-1 viser et eksempel på on-line karakterisering av TBM-masse på transportbåndet til en TBM-maskin. On-line analyse av TBM-masser er per i dag i utforskningsstadiet, og er foreløpig ikke kjent implementert i stor-skala for et TBM-prosjekt. Det siste tiåret har det derimot vært gjennomført flere forskningsprosjekter som har omhandlet ulike utfordringer relatert til håndtering av tunnelmasser. Felles for prosjektene er at de har som hensikt å øke ressurseffektiviteten av overskuddsmasser gjennom optimalisering av karakteriserings- og resirkuleringsprosessen av massene.



Figur 1-1 Skjematisk eksempel på on-line analyse og håndtering av TBM-masse (Haas, Galler, Luigi, S., & Benedikt, 2020)

Flere av forskningsprosjektene omhandler TBM-masser direkte gjennom eksempelprosjekter hvor TBM er brukt som drivemetode. Resultatene fra disse forskningsprosjektene danner derfor grunnlaget for mulighetene knyttet til videreutvikling av optimalisering av behandling og gjenvinning av TBM-masser. Kapittel 5 tar for seg hvordan materialflyten av TBM-masser ved bruk av on-line analyser kan gjøres.

Kort oppsummert er tanken at on-line analyser vil kunne:

- Optimalisere karakteriseringsprosessen av TBM-masser
- Gi et bedre beslutningsgrunnlag for å avgjøre gjenvinningspotensiale
- Føre til en mer strømlinjeformet håndtering av massene

Økt gjenvinning av TBM-masser vil også ha store miljømessige fordeler gjennom reduserte klimagassutslipp, samt føre til økonomiske fordeler (Haas, Galler, Luigi, S., & Benedikt, 2020). Materialflyt av TBM-masser ved bruk av on-line analyser er beskrevet ytterligere i kapittel 4.

Denne rapporten sammenfatter forskningen og litteratur som foreligger innenfor håndtering og karakterisering av TBM-masse, og oppsummerer mulighetene og begrensningene for å gjennomføre on-line analyser av TBM-masser i et tunnelprosjekt, samt hvilke teknologier som er relevante.

1.4 Metode og litteratursøk

Rapporten er skrevet som en litteraturstudie som baserer seg på tidligere utført forskning og informasjon om aktuell teknologi og tidligere relevante tunnelprosjekter. Google Scholar er i hovedsak brukt som oppslagsverk for å finne relevant litteratur. Eksempler på søkeord som er brukt i ulike kombinasjoner er: "online characterization", "online analysis", "TBM", "TBM muck", "Tunnel muck", "rock mass", "conveyor belt". Forskning som omhandler on-line analyse av bergmasse innenfor andre industrier, typisk malm- og kullindustri, har også blitt ansett som aktuelt og relevant.

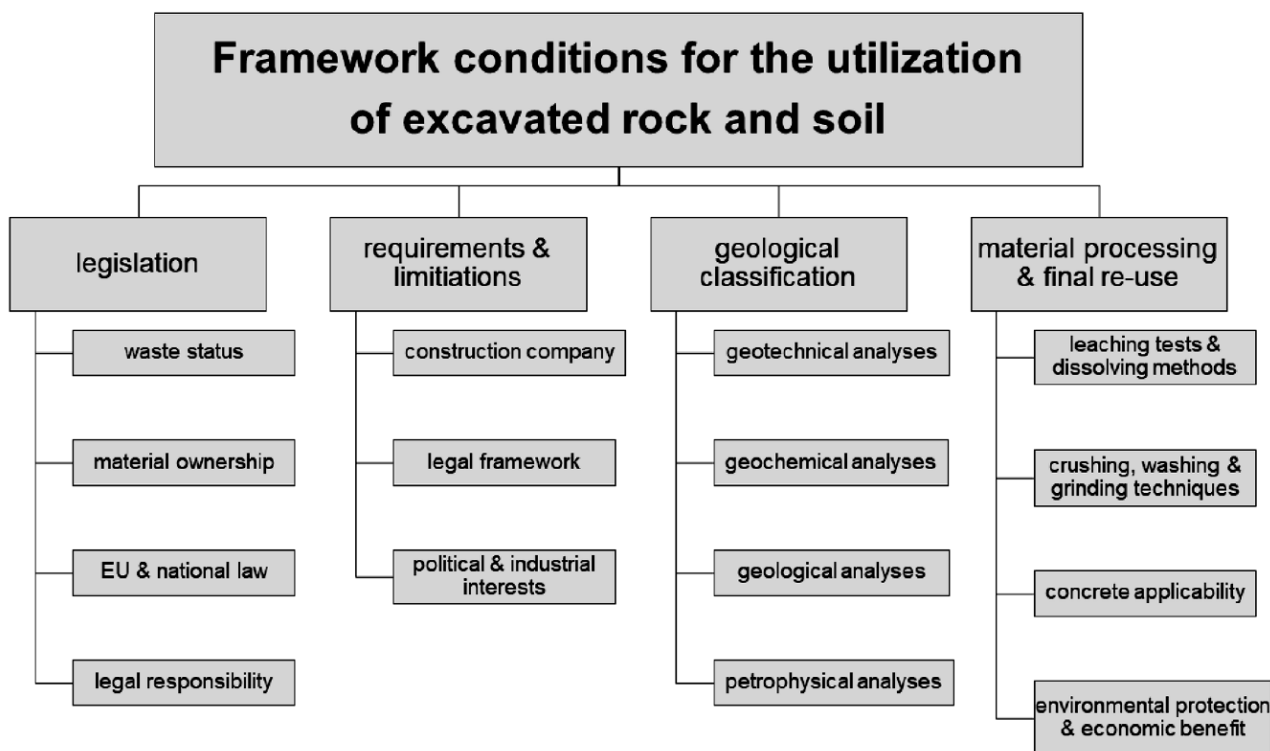
For hver av de nevnte analysemetodene (XRF, PGNA, LIBS og hyperspectral/multispectral imaging) er det brukt følgende søkeord: "metode" + "online analysis", "conveyor belt", "tunnel", "tunnel muck" eller "TBM tunnel".

For å undersøke markedsoversikten til de nevnte analysemetodene er Google brukt som søkemotor. Typiske søkeord har vært: "metode" + "conveyor belt" og "online analysis". Også informasjon fra artikler som omhandler aktuelle produkter har vært relevant for å undersøke markedsoversikten. For å få innsikt i prisnivå har det blitt forsøkt å ta kontakt med firmaer som distribuerer aktuelle analyseinstrumenter for on-line karakterisering av TBM-masse. Hvilke firmaer som har svart på henvendelsen fremkommer i kapittel 3.

Det europeiske forskningsprosjektet [*DRAGON*](#) (Development of Resource-efficient and Advanced underGround techNologies, 2012-2015) tar i stor grad for seg det samme temaet som denne rapporten omhandler. Rapporter og artikler som kommer fra DRAGON har derfor stått sentralt i innhenting av relevant informasjon. Merk at selv om DRAGON offisielt pågikk fra 2012-2015, har det i ettertid kommet flere artikler som tar utgangspunkt i resultater fra forskningsprosjektet.

2 Generelt om gjenvinning av tunnelmasser

Figur 2-1 gir en generell oversikt over hvilke lovverk, krav, geologiske analyser, samt prosesserings- og gjenvinningsmuligheter som er gjeldende for tunnelmasser, hentet fra Haas, Galler, Luigi, S., & Benedikt (2020). Dette kapittelet vil først ta kort for seg gjeldende regelverk for gjenvinning og deponering av tunnelmasser i kapittel 2.1, svarende til hovedpunktene "legislation" og "requirements & limitations" i Figur 2-1. Kapittel 2.2 tar i større grad for seg geologiske og fysiske egenskaper som er gunstige til ulike gjenvinningsformål for TBM-masser, samt regelverk knyttet til TBM-masse til bruk som tilslag, konstruksjonsmateriale og fyllmasse, svarende til "geological classification" og "material processing & final re-use" i Figur 2-1.



Figur 2-1 Generell oversikt over hvilke lovverk, krav, geologiske analyser, samt prosesserings- og gjenvinningsmuligheter som gjelder for tunnelmasser (Haas, Galler, Luigi, S., & Benedikt, 2020).

2.1 Regelverk knyttet til disponering av tunnelmasser

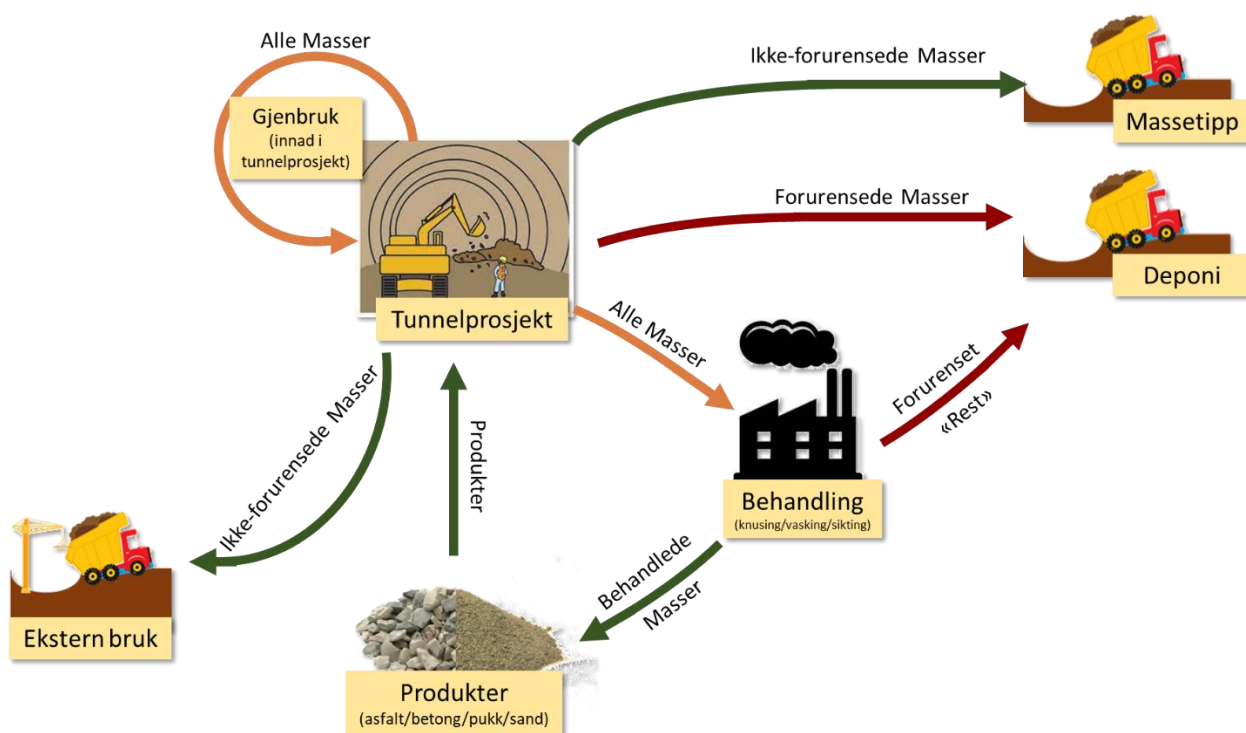
Basert på mineralogisk sammensetning og innhold av helse- og miljøfarlige stoffer vil jord- og steinmasse karakteriseres som enten forurenset, eller ikke-forurenset. Denne klassifiseringen, i tillegg til fysiske egenskaper og kvalitet til massen vil avgjøre hvilke muligheter som eksisterer med tanke på gjenvinning.

Forurenset jord- og steinmasse defineres ut fra forurensningsforskriften (Klima- og Miljøverndepartementet, 2022) som masse som:

- har høyere konsentrasjonen av helse- eller miljøfarlige stoffer enn fastsatte normverdier,
- danner syre eller andre stoffer som kan medføre forurensning i kontakt med vann og/eller luft. Steinmasser med opphav i syredannende bergarter, eksempelvis alunskifer, anses alltid som forurenset dersom ikke annet blir dokumentert.

For TBM-masse påpekes at selve uttaksmetoden med TBM ikke tilfører forurensningskomponenter til massen, slik at den kan klassifiseres som ren masse, tilstandsklasse 1, jf. (SFT, 2009; NGI, 2019). Innholdet av helse- og miljøskadelige stoffer for TBM-masse er altså kun knyttet til bergmassens mineralogiske sammensetning. Ved konvensjonell tunneldriving derimot, kan sprengstein inneholde rester av plast, sprøytebetong og sprengstoff, noe som kan føre til at massen karakteriseres som forurenset masse (Miljødirektoratet, 2019).

Figur 2-2 oppsummerer ulike gjenvinningsmuligheter og en mulig materialflyt for masser i et tunnelprosjekt.



Figur 2-2 Mulig materialflyt for tunnelmasse

For ikke-forurensete masser kan massene enten brukes til intern bruk, eksempelvis som tilslag eller konstruksjonsmateriale, det kan brukes eksternt i andre byggeprosjekter, eller det kan deponeres (massetipp). Miljødirektoratet har utarbeidet en veileder for [Disponering av jord og stein som ikke er forurenset](#). Veilederen gir en oversikt over krav, ansvar og myndighet ved disponering av denne type masse. Disponering omfatter gjenvinning, annen disponering og permanent disponering (deponering/massetipp).

For forurensete masser er mulighetene enten intern eller ekstern bruk, eller at massene sendes til et godkjent deponi. Type deponi er avhengig av graden av forurensning. Kriterier og grenseverdier som gjelder for de ulike deponiene er gitt i avfallsforskriften, kapittel 9 og 11. Regler om håndtering av jord- og steinmasser finnes i forurensningsloven. For intern og ekstern bruk kan det være massene må gjennomgå behandling for å brukes til tenkt formål. Men, man kan også gjenbruke forurensete masser internt i tiltaket/prosjektet hvis miljørisikoen er akseptabel. I særlig tilfeller kan man også bruke

de forurensede massene i andre prosjekter dersom man med søknad og dispensasjon fra Miljødirektoratet kan vise at bruken ikke medfører nevneverdig fare for forurensning (SFT, 2009). Avfall som oppstår i forbindelse med samferdselsutbygging og andre anleggsarbeider er å regne som næringsavfall, jf. forurensningsloven § 27a annet ledd. Overskytende jord- og steinmasser fra slik virksomhet, som ikke skal brukes på samme lokalitet som de er gravd opp, vil normalt være å anse som næringsavfall – med mindre det er sikkert at massene vil utnyttes som byggeråstoff eller fyllmasser i et annet prosjekt. I henhold til forurensningsloven §27 tredje ledd kan avfallet opphøre å være avfall når følgende fem minimumsbetingelser er oppfylt:

1. har gjennomgått gjenvinning,
2. er alminnelig brukt til bestemte formål,
3. kan omsettes i et marked eller er gjenstand for etterspørsel,
4. innfrir de tekniske kravene som følger av de aktuelle bruksområdene og eventuelle produktkrav og -standarder, og
5. ikke medfører nevneverdig høyere risiko for helseskade eller miljøforstyrrelse enn tilsvarende gjenstander og stoffer som ellers kunne blitt brukt.

Forurensningsmyndigheten kan i det enkelte tilfelle bestemme om avfall har opphørt å være avfall. For mer detaljer om lovverk knyttet til forurensningsloven §27, vises til Prop. 72 LS (Klima- og Miljødepartementet, 2022).

2.2 Gjenvinning av TBM-masser

Basert på inndelingen til Erben & Galler (2014) (se Tabell 2-1), er det foreslått en inndeling av TBM-masser inn i fire hovedklasser utfra "gjenvinningsgrad". Inndelingen gjør det lettere å forklare prinsippet om gjenvinning og karakterisering av TBM-masser. Det vil henvises til klassifiseringen gitt i Tabell 2-1 flere ganger senere i rapporten.

*Tabell 2-1 Kategorisering av gjenvinningsgrad, basert på Erben & Galler (2014). *: Merk at masser sendt til deponi for ikke-forurensede masser eller lett forurende masser (inert) har potensiale til å bli klasse 3 dersom massene opphører som næringsavfall (se kap 2.1).*



Klasse 1	Masse som kan brukes internt på prosjektanlegget
Klasse 1a	Konstruksjonsråstoff på byggeplass: Tilslag til betong (f.eks segmentbetong, sprøytebetong), tilslag til asfalt
Klasse 1b	Gjenvinning som konstruksjonsmateriale i tilknytning til prosjektet: Vegkonstruksjon (strengere krav) Vegunderbygning, fyllingsmateriale
Klasse 2	Gjenvinning som industriråvare (eksternt): Tilslag, gips, murstein, sement, glass, slipemidler, etc.
Klasse 3	Materiale for landskapsarbeid (eksternt) Vegunderbygning, fylling for terrengarronding, motfylling til veg og jernbane, tildekking av forurensede sediment, etc.
Klasse 4	Deponimasser
Klasse 4a	Mottak for ikke-forurenset (ren) masse* (massetipp)
Klasse 4b	Mottak for lett forurensede masser (inerte masser)*
Klasse 4c	Mottak for ordinært avfall (ordinære masser)
Klasse 4d	Mottak for farlig avfall

Sammenlignet med ordbruken i kapittel 2.1 kan:

- Klasse 1 regnes som ikke-forurenset masse til intern bruk
- Klasse 2 og 3 er ekstern bruk av ikke-forurenset masse
- Klasse 4 er enten forurenset masse (4b-d) eller næringsavfall (4a-b/c).

For å utnytte tunnelmasser i et prosjekt på en best mulig måte må man i tillegg kartlegge materialets egenskaper slik at gjenvinningsformålet kan bestemmes. I et tunnelprosjekt vil forundersøkelser legge føringer for hvilke anvendelsesmuligheter som finnes for tunnelmassen. Fra forundersøkelsene får man et inntrykk av hvilke gjenvinningsmuligheter som er aktuelle for et tunnelprosjekt. Ettersom en bergmasse kan ha lav grad av homogenitet og variere over avstand, vil det imidlertid alltid være en usikkerhetsmargin knyttet til resultatene fra planleggingsfasen.

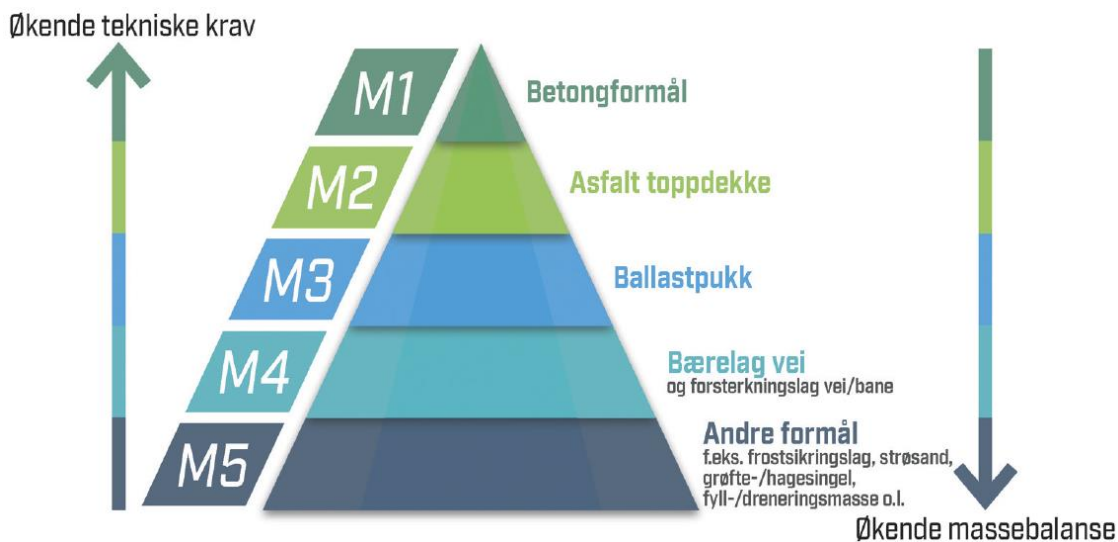
I forskningsprosjektet *Kortreist stein* ble det publisert en geologisk veileder som har som formål å "hjelp planleggere i infrastrukturprosjekter med å utnytte overskuddsmasser bedre (...) ved å beskrive hvilke geologiske og materialtekniske forundersøkelser og vurderinger som bør gjøres i de ulike planfasene" (Aasly, Erichsen, & Rise, 2019). Veilederen skal være et supplement til håndbøker og veiledere som allerede eksisterer for infrastrukturprosjekter. I motsetning til eksisterende håndbøker og veiledere, som i større grad fokuserer på ingeniørgeologiske, drivetekniske og økonomiske forhold, fokuserer veilederen fra Kortreist stein mer på utnyttelse av overskuddsmasser. Det henvises til rapporten for mer generell informasjon om planlegging og forundersøkelser knyttet til utnyttelse av overskuddsmasser.

En mer optimalisert karakteriseringsprosess av TBM-masser muliggjør for en klassifisering av massene slik at de i størst mulig grad gjenvinnes så gunstig som mulig. On-line analyser av TBM-masse vil aldri kunne erstatte viktigheten av gode forundersøkelser, men det kan være et verdifullt styringsverktøy i tilfeller hvor man er på grensen mellom to anvendelsesområder, dvs. når usikkerhetsmarginen overlapper to gjenvinningsklasser (se Tabell 2-1). Eksempler på to slike tilfeller er gitt i kapittel 5.

Tabell 2-2 gir en generell oversikt over hvilke testmetoder som er relevant for all overskuddsmasse. Disse testmetodene er standardisert innenfor EU/EØS, og brukes i stor grad for å vurdere materialets potensiale som byggeråstoff (Aasly, Erichsen, & Rise, 2019). Tabell 2-2 er inkludert for å gi en oversikt over hvilke testmetoder som er relevant innenfor ulike bruksområder for tunnelmasse. Se Figur 2-3 for rangering av gjenvinningspotensiale (M1-M5) som det refereres til i Tabell 2-2.

Tabell 2-2 Oversikt over relevante testmetoder for de ulike bruksformålkategoriene. Hentet fra Aasly, et al. (2019).

Bruksformål		Flisighetsindeks (FI)	Los Angeles-verdi (LA)	Micro-Deval-koeffisient (M_b)	Kulemølle-verdi (A_N)	Totalt svovelinnhold	Petrografisk analyse
M1	Egnet til betongformål	X	X			X	X
M2	Egnet til asfalt toppdekke	X	X		X	X	X
M3	Egnet til ballastpukk	X	X	X	X		X
M4	Egnet til bærelag veg og forsterkningslag veg/bane	X	X	X	X		X
M5	Egnet til andre formål (spesifiser: frostsikringslag, strøsand, grøfte-/hagesingel, fyll-/dreneringsmasse o.l.)		X				X
M0	Ikke egnet som byggeråstoff eller forurenset fyllmateriale						



Figur 2-3 Rangering av gjenvinningspotensiale, hentet fra Rise, et al. (2019).

2.3 Aktuelle gjenvinningsklasser for TBM-masse

Tabell 2-2 gir en generell oversikt over hvilke testmetoder som er relevant for *all* overskuddsmasse. Ettersom denne rapporten retter seg spesifikt inn mot gjenvinning av TBM-masse, er det i de neste delkapitlene beskrevet hvilke egenskaper og mineraler som er styrende for tre av de nevnte gjenvinningsklassene gjengitt i Tabell 2-1, henholdsvis klasse 1a (tilslag i betong og asfalt), klasse 1b og 3 (konstruksjonsmateriale og fyllmasse) og klasse 4 (deponimasser). Disse klassene anses som mest aktuelle med tanke på on-line kategorisering og gjenvinning av TBM-masse.

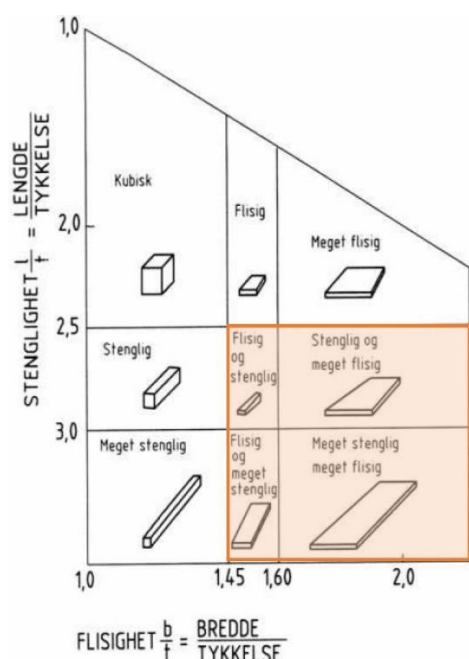
2.3.1 Klasse 1a – TBM-masse til bruk som tilslag

For at et materiale skal kunne brukes som tilslag i betong og asfalt, stilles det krav til egenskaper som materialets styrke, kornform (flisighet og stenglighet), kornfordeling, korndensitet,

vannabsorpsjonsevne og kjemiske og petrografiske egenskaper (innhold av uønskede mineraler og kjemiske forbindelser) (NGI, 2019).

En TBM-masse som skal kunne brukes til tilslag må for det første ha en høy nok styrke (Petitat, von Allmen, & Burdin, 2015). Det er mulig å få informasjon om bergartsstyrke fra selve TBM-maskinen under driving, gjennom TBMs DCLM-system (Disc Cutter Load Monitoring). Det er foretatt flere studier relatert til dette. Blant annet undersøkte forskningsprosjektet DRAGON sammenhengen mellom slitasje av kuttere og kutterlast opp mot bergartsstyrke (Petitat, von Allmen, & Burdin, 2015). Merk at dette temaet er ikke omtalt videre i denne rapporten.

TBM-massens kornform har, som følge av hvordan diskutterne bryter bergmassen, en ugunstig form med hensyn til mekaniske egenskaper og komprimering (Langford, et al., 2020), se Figur 2-4. For å oppfylle de krav som stilles til mekaniske egenskaper til et tilslagsmateriale, må massen ofte bearbejdes ved knusing og sikting.



Figur 2-4 Kornform basert på bredde, lengde og tykkelse. TBM-masse havner typisk innenfor det oransje feltet. Figur fra Statens vegvesen (2014).

TBM-massen må også tilfredsstillere petrografiske krav for å kunne brukes som tilslag til betong. Innhold av glimmer, svovel, klorid og organisk karbon må ikke overstige kravene som er satt til tilslagsmateriale, ettersom for høyt innhold av nevnte elementer vil ha negativ påvirkning på betongkvaliteten. Analyse for å detektere glimmer- og svovelinnhold i dag gjøres gjennom tidkrevende laboratorieanalyser eller ved visuell analyse av materialet på makro- eller mikronivå (tynnslip) (Petitat, von Allmen, & Burdin, 2015).

Krav for tilslagsmateriale til bruk i betong er bestemt i Norsk Standard for betongtilslag, NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA:2016 (Standard Norge, 2016). Krav for tilslagsmateriale til bruk i asfalt er bestemt i Norsk Standard for Tilslag for bituminøse masser og overflatebehandlinger for veier, flyplasser og andre trafikkarealer, NS-EN 13043:2002+NA:2008 (Standard Norge, 2008), samt bestemmelser i Statens vegvesens håndbok for vegbygging, N200 (Statens vegvesen, 2021). I disse

standardene er det blant annet satt krav til gradering, kornform, fininnhold, mekaniske egenskaper og petrografisk innhold (Kortreist stein, 2019). Se også Tabell 2-2 for gjenvinningsgruppe M1 og M2 for relevante testmetoder for å teste materialets fysiske egenskaper og petrografiske innhold med tanke på bruk som tilslag til betong og asfalt. Med tanke på mulighetene ved on-line analyse av TBM-masse, er de petrografiske kravene som er av størst interesse for denne studien og vies mest oppmerksomhet til.

For tilslag til asfalt gjelder det fra N200 at mineralogiske og petrografiske egenskaper skal dokumenteres. Det er vist at glimmer kan være skadelig for bestandigheten til asfaltdekke, men det er ikke satt noen krav til glimmerinnhold i dagens versjon N200 (Kortreist stein, 2019).

For betongtilslag gjelder følgende petrografiske krav:

- Svovelinnhold:* Krav til maksimalt 1,0 vektprosent svovel i tilslaget. Ved påvist magnetkis (detektert ved DTA-analyse) reduseres grenseverdien til 0,1 vektprosent svovel. Det skal alltid analyseres for magnetkisinhold med DTA. Magnetkis i kombinasjon med svovel fører til svelleegenskaper som kan skade betongen over tid.
- Glimmerinnhold:* Glimmerminerale har stor overflate som kan binde mye vann. Dette fører til økt WC-behov, og kan gi redusert fasthet. Anslås ved tynnslipanalyse. NS-EN 12620 har ikke krav til glimmerinnhold. Statens vegvesen har krav om maksimalt 20 % fri glimmer i fraksjonen 0,125-0,250 mm (Statens vegvesen, 2015).
- Kloridinnhold:* Klorider er ikke skadelig for selve betongen, men kan føre til korrosjon på armeringsstålet. Kloridinnhold skal oppgis, men det er ikke satt spesifikt krav i NS-EN 12620. Statens vegvesens håndbok R762 har satt krav til kloridinnhold < 0,01 % (Statens vegvesen, 2015).
- Alkalireaktivitet:* Alkalireaksjoner (AAR) er en kjemisk-fysisk prosess som skjer ved at alkaliioner i betongen reagerer med kvarts i reaktive bergarter, hvorpå det dannes en silikagelé som sveller ved tilførsel av vann. Dette kan over tid føre til oppsprekking i betongkonstruksjonen. Alkalireaktivitet anslås ved identifisering av tilslagets mineraler i tynnslipanalyse. I NS-EN 206 (Standard Norge, 2014) er det satt krav til at betongtilslag må være i samsvar med Norsk Betongforening publikasjon nr. 21 (Norsk betongforening, 2017) når det gjelder å undersøke tilslagets reaktivitet (Kortreist stein, 2019)

Analyse av petrografi og bergartsstyrke vil uansett utføres i prosjekteringsfasen av et prosjekt. Likevel vil slike analyser inneholde en del usikkerhet ved seg, og det forutsettes en homogen bergmasse for at resultatene skal være helt representative. En on-line analyse av TBM-masse vil derimot kunne gi et bedre styringsgrunnlag for å kontinuerlig under prosjektet avgjøre om TBM-massen oppfyller de petrografiske kravene som stilles for at massen kan benyttes som tilslag i betong. Aktuelle on-line petrografiske analyser er presentert i kapittel 3.

Et eksempel hvor bergmassen var noe annerledes enn hva prosjekteringsgrunnlaget tilsa, er bygging av Follobanen. Her var det opprinnelig planlagt å bruke TBM-masse som tilslag til betong i

produksjon av betongelementer til tunnelen, men bergmassen viste seg å stedvis ha for høyt svovelinnhold til å sikre tilfredsstillende bestandighet. Eksempelet er omtalt mer i detalj i kapittel 5.1.

2.3.2 Klasse 3 – TBM-masse til bruk som konstruksjonsmateriale og fyllmasse

Forskningsprosjektet *GEORECIRC* har undersøkt muligheten for å bruke TBM-masse som fyllmasse, både på land og i sjø. Her kommer det frem at TBM-masse er en ressurs som er spesielt egnet til fyllinger (NGI, 2019). Generelt sett er ikke steinkvaliteten av størst betydning ved utfylling, men sterkt forskifrete eller forvitrede bergarter, samt bergarter med høyt glimmerinnhold er mindre egnet til fyllingsformål. Andelen finstoff i TBM-massen er derimot av større betydning ettersom det påvirker blant annet komprimeringsprosessen, komprimeringsgraden og telefarligheten (NGI, 2019).

På grunn av typisk kornform og kornfordeling, tilfredsstiller ikke en TBM-masse de krav til materialtekniske egenskaper som må oppfylles for å kunne brukes som bære- og forsterkningslag i en vegkonstruksjon (klasse 1b). Fin-innholdet i massen er også typisk for høyt, noe som medfører for stor telefarlighet i vegkonstruksjonen. TBM-masser kan likevel brukes til underbygning av en vegkonstruksjon (NGI, 2019).

Andre mulige bruksområder for TBM-masse hvor det ikke er spesifikke krav til bæreevne og setninger som trekkes frem i rapporten fra NGI (2019) er fylling for terrengarronding, motfylling til veg og jernbane, og støyvoller.

Bruk av TBM-masse til fylling krever komprimering av massene. I den forbindelse stilles det krav til geotekniske og materialtekniske egenskaper som kornform, kornfordeling og korndensitet, nedknusningsevne og slitestyrke, samt vanninnhold. Data for disse egenskapene fås i hovedsak gjennom laboratorieundersøkelser, se Tabell 2-2. On-line analyser av TBM-masse, som beskrevet i kapittel 3, kan derfor i mindre grad erstatte laboratorieanalyser for denne gjenvinningsklassen.

2.3.3 Klasse 4 – Deponimasser

Tunnelmasser må deponeres i tilfeller hvor massene ikke tilfredsstiller de krav som gjør at de kan brukes direkte til gjenvinning (klasse 1-3). I deponiforskriften til Miljødirektoratet er det definert tre deponiklasser, hhv. farlig avfall, deponi for ordinært avfall og deponi for inert avfall. Gjenvinningsklasse 4 i Tabell 2-1 tar utgangspunkt i deponiforskriftens tre deponiklasser *lett forurenset masse* (inert) (klasse 4b), *ordinært avfall* (klasse 4c) og *farlig avfall* (klasse 4d), samt at *ikke-forurensede masser* (klasse 4d) er inkludert. Merk at masser sendt til deponi for ikke-forurensede masser (massetipp) eller lett forurende masser (inert) har potensiale til å bli klasse 3 dersom massene opphører som næringsavfall (se kap 2.1).

Noen bergarter inneholder mineraler som er skadelig for omgivelsene dersom de ikke håndteres riktig. I Norge er blant annet syredannende svart leirskifer med høyt svovelinnhold, deriblant alunskifer, ansett som problemavfall. Det stilles strenge krav til andel syredannende skifer som kan inngå i den totale tunnelmassen for at det ikke kategoriseres som farlig avfall. Også bergarter som er radioaktive eller inneholder asbest kategoriseres som farlig avfall (Rohde, 2016).

I denne rapporten er det viet fokus til masser som ligger i grensen mellom to deponiklasser, eksempelvis mellom klasse 4b (inert masse) og 4c (ordinært avfall). For slike tilfeller dreier det seg i hovedsak om klassifisering av bergmassen for å undersøke om andelen uønsket materiale er lav nok til at massen kan sendes til den "reneste" deponiklassen. Av on-line analyser er det derfor analyser som direkte eller indirekte kan detektere elementinnhold eller mineralinnhold som er aktuelle.

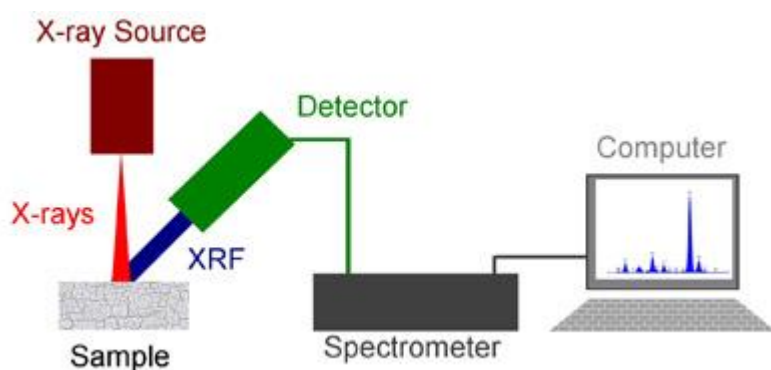
3 On-line karakterisering og analysemetoder

Det finnes i dag flere metoder for å innhente informasjon om tunnelmassers egenskaper knyttet til geotekniske parametere og mineralogisk sammensetning. Flere av disse metodene krever behandling av prøvemateriale før de utføres i et laboratorium, noe som gjør metodene kompliserte og tidkrevende. Noen av karakteriseringsmetodene er imidlertid videreutviklet slik at det er mulig å utføre dem på transportbåndet på en TBM-maskin. Dette kapittelet inneholder korte oppsummeringer av relevante teknologier og analysemetoder som er vurdert til å være aktuelle å anvende for on-line karakterisering av TBM-masse. Det er også gitt en markedsoversikt for hver analysemetode.

3.1 X-ray fluorescence (XRF) spektroskopi

3.1.1 Metode og anvendelse

X-ray fluorescence spektroskopi (heretter XRF) utføres ved at prøvemateriale bestråles med røntgenstråling, som fører til at bestrålt materiale sender ut fluorescensstråling, se Figur 3-1. Den utsendte fluorescensstrålingen registreres i et spektrometer. Etersom ulike elementer har karakteristiske bølgelengder og energi, kan resultatet av den utsendte strålingen som vises på en datamaskin gi informasjon av prøvematerialets sammensetning (Himmelsbach, et al., 2014). Innenfor XRF skilles det mellom bølgelengde-dispersiv XRF (WDXRF) og energi-dispersiv XRF (EDXRF), avhengig av om det er henholdsvis bølgelengder eller energi som måles og gir informasjon om prøvematerialets elementære sammensetning. Ved anvendelse av XRF-teknologi on-line på en TBM er det oftest EDXRF som er mest aktuelt.



Figur 3-1 Prinsippskisse for XRF-analyse. Figur fra PhysicsOpenLab (2016).

For å kunne innhente kvantitativ informasjon om sammensetningen av TBM-massen kreves en kalibrering fra referanseprøver som samsvarer med materialet som blir analysert på transportbåndet. Etersom XRF bestråler overflaten av prøvematerialet, er det viktig at overflaten av analysert materiale er representativ. Det mest ideelle er derfor om TBM-massen gjennomgår en knuseprosess først, slik at overflaten av prøvematerialet er uforvitret og frisk (Himmelsbach, et al., 2014).

Det er verdt å merke seg at en XRF-analyse gir elementinnholdet til massen som analyseres, og ikke direkte informasjon om hvilke forbindelser eller mineraler som eksisterer i massen. Elementinnholdet kan likevel gi en indikasjon på hvilke mineraler massen består av gjennom konvertering fra elementinnhold til mineralinnhold, ved hjelp av referanseprøver hvor mineralinnholdet er kjent gjennom laborietesting.

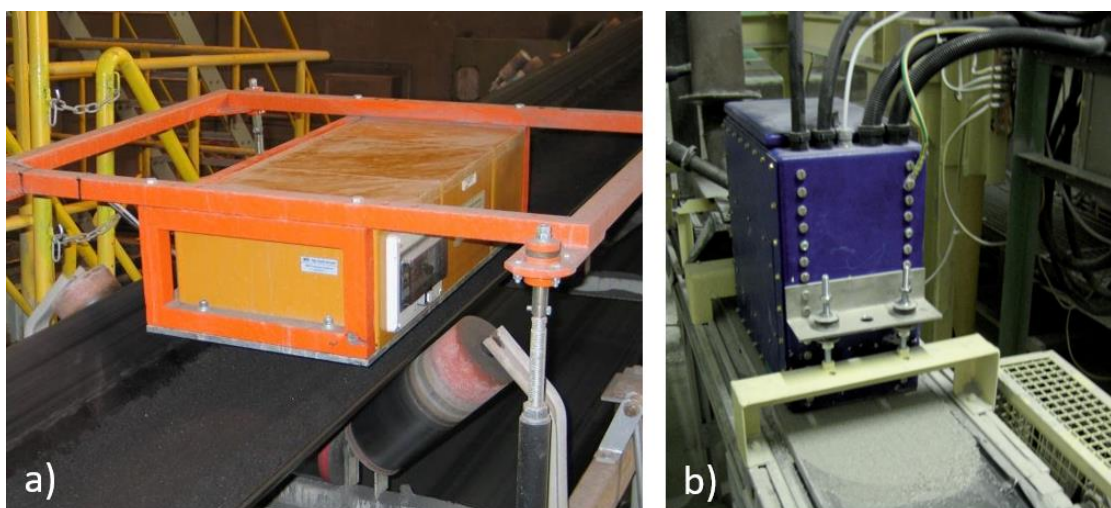
On-line karakterisering av bergmasse ved bruk av XRF benyttes i dag innenfor malm- kull- og sementindustrien. Zhang, et al. (2016) har undersøkt mulighetene for bruk av XRF on-line på transportbånd innenfor kullindustrien for å detektere tungmetaller i kullet. En studie utført av Kondratjevs, et al. (2020) har undersøkt bruk av on-line XRF-analyse for å bestemme mineralkonsentrasjon i malmer. Begge studiene viser at resultatene fra on-line XRF-analysen er i god overenstemmelse med tradisjonelle laboratorieundersøkelser vedrørende konsentrasjon av analyserte mineraler. Det antas at resultatene fra disse studiene også er relevante for TBM-prosjekter ettersom transportmetoden og analyseprinsippet for massene er det samme.

I forbindelse med DRAGON-prosjektet ble det utviklet en prototype for on-line karakterisering av TBM-masse (se kapittel 4.1), hvor en XRF-analysemaskin ble benyttet for å identifisere mineralogiske egenskaper til TBM-massen (Edelmann, Himmelsbach, & Barwart, 2015). Artikkelen presenterer derimot ikke noen resultater fra selve XRF-analysen.

3.1.2 Markedsoversikt

Følgende produkter er funnet til å kunne utføre on-line XRF-analyse av en bergmasse:

- CON-X produsert av Baltic Scientific Instruments (BSI)
- OXEA produsert av Indutech
- Fast Conveyor Analyzer (FCA) produsert av IMA engineering
- TEXAS produsert av J.C. Bachmann



Figur 3-2 Produkter for on-line XRF-analyse. A): CON-X av Baltic Scientific Instruments (BSI, 2021), b): OXEA-system av Indutech (Indutech, 2021).

CON-X og OXEA er vist i Figur 3-2. Felles for alle maskinene er at de i hovedsak benyttes i kull- og malindustrien til å identifisere konsentrasjon av ønskede og uønskede mineraler. Basert på

litteratursøk er det funnet at OXEA er den eneste maskinen som er benyttet for karakterisering av TBM-masse, i forbindelse med forskningsprosjektet DRAGON, se kapittel 4.1.

Generelt kan maskinene detektere elementkonsentrasjon fra Na ($Z=11$) til Al ($Z=13$) og oppover. Det er litt forskjell på hvilke fraksjoner maskinene kan utføre XRF-analyse på, men det antas at alle i hovedsak skal fungere for TBM-masse, ettersom alle maskinene brukes innenfor malm- og kullindustrien som analyserer fraksjoner innenfor samme fraksjonsintervall som TBM-masse. Når det gjelder begrensninger knyttet til transportbåndets bredde og hastighet, vil generelt sett høy hastighet og bredere transportbånd sammenlignet med analyseenhet gi noe mindre nøyaktige måleresultater.

Det er sendt ut henvendelse til alle de fire bedriftene som distribuerer de nevnte XRF-maskinene for å få et prisoverslag på hvor mye det vil koste å implementere en XRF-analyse i et TBM-prosjekt for å karakterisere TBM-masse. Prisoverslag er gitt i Tabell 3-1. Tabellen gir også oversikt over de fire XRF-maskinene vedrørende hvilke elementer som kan detekteres, hvilken kornstørrelse maskinene fungerer for, samt begrensninger knyttet til transportbånd (bredde og hastighet).

Tabell 3-1: Oversikt over de ulike XRF-maskinene

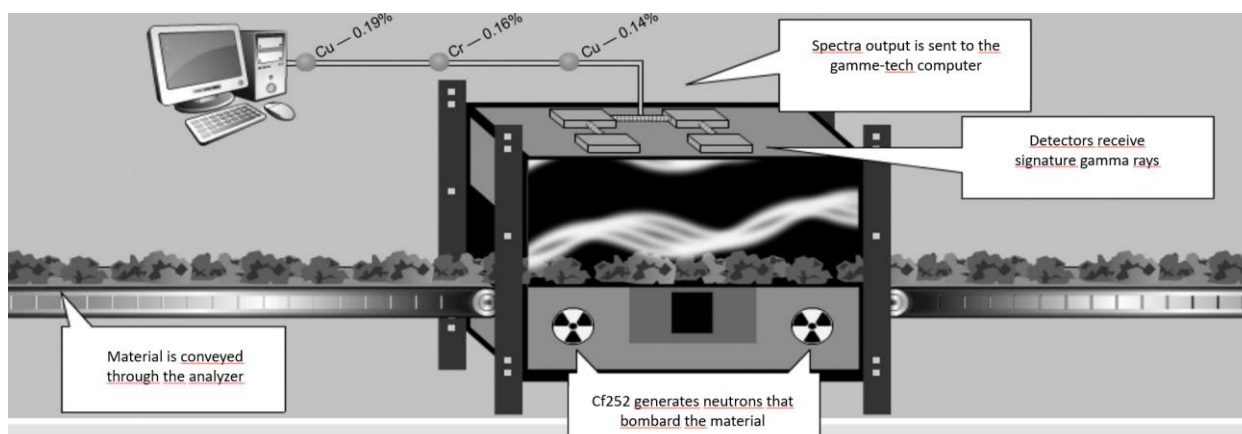
Navn på maskin	Elementanalyse	Kornstørrelse	Begrensninger ifm. transportbånd: Bredde/hastighet	Pris [euro]
CON-X (BSI)	$12 < Z < 92$	Ikke spesifisert, men oppgitt at den fungerer for varierende kornstørrelse	Opp til 1 m / 0,5 m/s	Ca. 200 000
OXEA (Indutech)	$10 < Z < 92$	Maksimal øvre kornstørrelse på 50-100 mm	Ikke oppgitt / Opp til 3 m/s	Ikke svart på henvendelse
FCA (IMA)	$Z > 13$, gitt konsentrasjon over 100 ppm	Alle fraksjoner	Ingen begrensninger	Ca. 500 000
TEXAS (J.C. Bachmann)	$Z > 12$	Opptil ca. 70 mm	0,4 – 1,8 m / Ikke oppgitt	Ca. 200 000

3.2 Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA)

3.2.1 Metode og anvendelse

Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (heretter PGNAA) fungerer ved at prøvemateriale bestråles av nøytroner som absorberes av atomkjernene i materialet. Dette fører til at atomkjernene blir midlertidig ustabile. For å komme tilbake til en stabil tilstand, sender de bestrålte atomkjernene ut høyenergi gammastråling. Gammastrålingen fanges opp av en natriumjodert krystall og måles med et spektrometer. Ettersom energien til disse gammastrålene er karakteristisk for hvert element, gir den utsendte gammastrålingen informasjon om materialets sammensetning. Intensiteten til toppene ved de ulike energiene angir hvert elements konsentrasjon. Figur 3-3 viser hvordan PGNAA fungerer. Analysen fungerer best dersom det blir kalibrert mot referanseprøver som samsvarer med materialet som blir analysert på transportbåndet, og/eller som inneholder nøkkelementene som er ønskelig å detektere. Metoden påvirkes ikke av partikkelstørrelse, hastighet på transportbånd eller

fuktighetsinnhold i analysert masse ettersom nøytron- og gammastråling har høy gjennomtrengningsevne (Kurth, 2013).



Figur 3-3: Prinsippskisse for PGNAA-analyse. Figur hentet fra (Madias, 2014).

PGNAA benyttes i størst grad til on-line analyse innenfor kull- og sementindustrien for å måle konsentrasjon av elementer som påvirker kull- og sementkvaliteten. Mest vanlig er det å måle konsentrasjonen av Ca, Fe, Si, Al, S og askeinnhold i kull. Metoden gir ikke direkte informasjon om hvilke mineraler massen består av, men måler elementkonsentrasjon enten direkte i elementform, eller i oksidform, for eksempel hhv. som S og SO₃ (Kurth, 2013). For å indikere mineralinnhold, for eksempel glimmer, må elementer som inngår i mineralet, og deres forhold, detekteres på forhånd. Det er derimot knyttet noe usikkerhet til en slik måling.

Innenfor tunnelindustrien er det gjennomført en studie hvor on-line PGNAA-analyse ble benyttet for å undersøke SO₃-innhold i tunnelmasser på Mont Cenis Base Tunnel (Hugot, Burdin, Brino, Schriqui, & Parisi, 2019). Hensikten var å undersøke om tunnelmassene hadde lavt nok SO₃-innhold for å kunne benyttes som tilslag til betong. Resultatene viste at det var god overenstemmelse mellom målt SO₃-innhold fra laboratorieundersøkelser og resultater fra PGNAA-analysen. Det ble også målt innhold av Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, Na₂O, MgO, K₂O, SiO₂ og CaO. For de fire førstnevnte elementene var det god overenstemmelse mellom resultater fra laboratorieundersøkelse og PGNAA-analyse, mens for de fire sistnevnte var det noe avvik, trolig grunnet at det ikke ble kalibrert mot en referanseprøve i forkant av PGNAA-analysen.

I samme studie ble det også undersøkt hvorvidt PGNAA tilfører residual radioaktivitet i den bestrålte tunnelmassen. Det ble konkludert med at i løpet av noen timer vil det ikke være rester av radioaktivitet som kan skilles fra den naturlige radioaktiviteten i tunnelmassen (Hugot, Burdin, Brino, Schriqui, & Parisi, 2019).

3.2.2 Markedsoversikt

Det er funnet fire produkter hvor PGNAA kan anvendes til on-line analyse:

- Geoscan-m, produsert av Scantech, se Figur 3-4
- AllScan, produsert av Real Time Instruments
- EADS Sodern, produsert av PANanalytical
- CB Omni Fusion Online Elemental Analyzer, produsert av Thermo Fischer

Produktene retter seg i hovedsak mot sement-, malm- og kullindustri.

Det er gjort forsøk i å få et prisoverslag fra flere av de nevnte produktene, men det er kun Scantech som har svart på henvendelsen. De anslår en pris i området 350 000 – 450 000 euro, i tillegg til installasjonskostnader, for deres produkt. Scantech opplyser at de har vært i kontakt med flere firmaer angående on-line karakterisering av TBM-masse i prosjekteringsfasen av tunneler i sentral-Europa.

Geoscan-m kan konfigureres til å måle elementinnhold i intervaller på ned til 30 sekunder. Eksempler på elementer som kan detekteres er: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe, CaO, MgO, Na_2O , TiO_2 , K_2O , Cl, S, Mn, P, Cu, Ni, Cr, Zn, Pb, Hg, Au, Ag, fuktighetsinnhold.

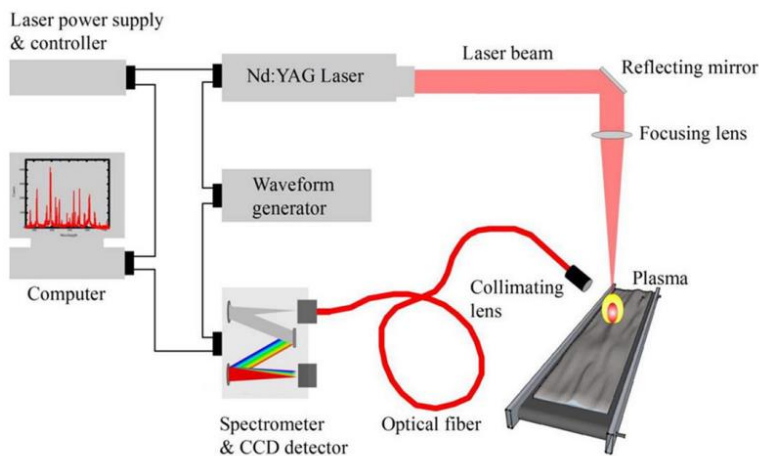


Figur 3-4: GeoScan-m, PGNAA on-line analyseverktøy produsert av Scantech.

3.3 Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

3.3.1 3.3.1 Metode og anvendelse

Laser induced breakdown spectroscopy (heretter LIBS) fungerer ved at et materiale bestråles av en laser som varmer opp prøven til flere titusen grader celsius, noe som genererer et plasma. Ved denne energitilførselen vil elektroner føres opp til et høyere energinivå. Når laseren stopper å sende ut stråling vil elektronene falle tilbake til sitt opprinnelig energinivå og sende ut lysenergi (Himmelsbach, et al., 2014). Strålingen går gjennom en optisk fiber til et spektrometer som gir informasjon om bølgelengdene til den utstrålte strålingen, se Figur 3-5. Ved å analysere de utstrålte bølgelengdene kan man få informasjon om det bestrålte materialets sammensetning.



Figur 3-5: Skisse av prinsippet for LIBS (Bakker & Xia, 2015).

I motsetning til XRF-analyse kan LIBS detektere konsentrasjon av *alle* elementer i det periodiske system. LIBS har derimot en lavere oppløsning og analyserer en mindre overflate enn en XRF-analyse, noe som fører til at LIBS er mindre pålitelig enn XRF for inhomogene materialer (Khajehzadeh, Haavisto, & Koresaar, 2016). Som for XRF, kan man kun få direkte informasjon elementinnholdet til massen som analyseres. Mineralinnhold kan indikeres gjennom element-mineral-konvertering, men resultatene fra en slik konvertering er noe mer usikre (Khajehzadeh, Haavisto, & Koresaar, 2016).

Pedarnig, et al. (2021) oppgir at innenfor kullindustrien har LIBS blitt brukt til å detektere konsentrasjon av S, Al, C, Ca, K, Mg, Na, Fe, Si og Ti. Studien viser at for analyse av svovelinnhold er det god overenstemmelse mellom resultatene fra on-line LIBS analysen og referanseanalysene fra laboratorieforsøk. LIBS markedsføres også til bruk innenfor mineral- og malminindustrien, enten ved at uønskede mineraler kan detekteres og fjernes i prosesseringsprosessen, eller ved at ønskede elementer detekteres, se Figur 3-6. Det er ikke funnet litteratur hvor LIBS-analyse er anvendt innenfor et TBM-prosjekt.



Figur 3-6: Prinsippskisse av LIBS-analyse brukt for å skille mellom malm og avfall (Eijkelkamp, u.d.) 3.3.1 Markedsoversikt

Det er funnet fem produkter hvor LIBS-teknologi kan anvendes til on-line analyse:

- SPECTRAL Conveyor Belt LIBS sensor, produsert av Spectral industries
- LIBS In-line Grade Skanner, produsert av Eijkelkamp
- MAYA produsert av Lyncis
- Orespex produsert av IMA
- FiberLIBS SP produsert av SECOPTA

Generelt retter produktene seg i hovedsak mot malm- og kullindustri. Det er ikke gjort et forsøk på å ta kontakt med produsentene for å få et prisoverslag. I samtale med IMA, som leverer både LIBS-teknologi og XRF-teknologi for on-line analyse, ble det påpekt at XRF var et bedre alternativ enn LIBS for on-line karakterisering av TBM-masse.

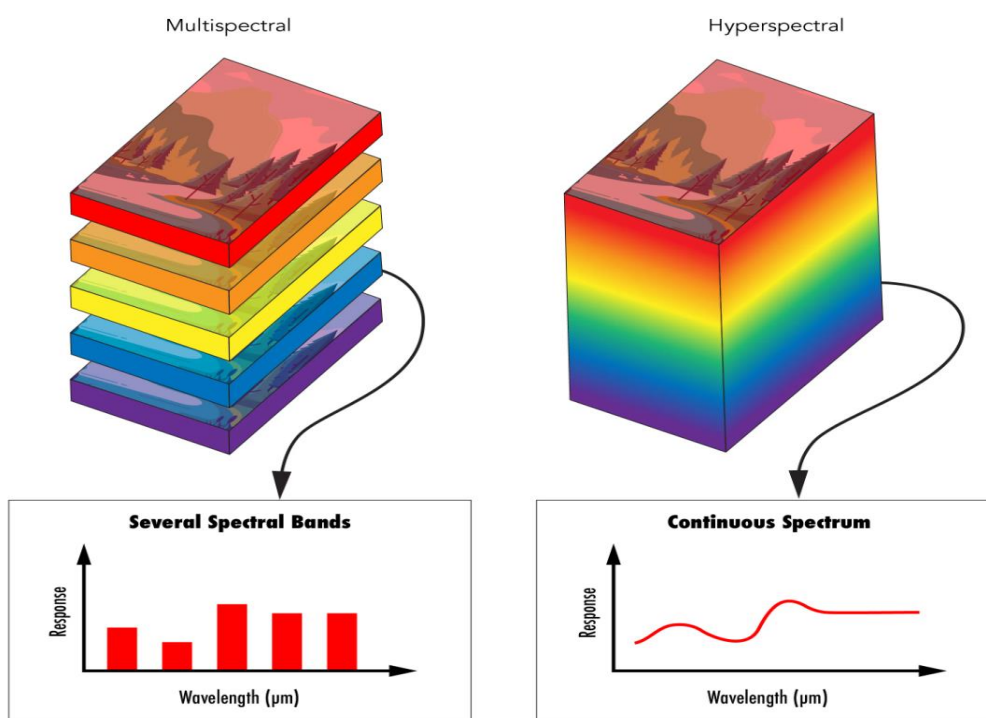


Figur 3-7: Produkter for on-line LIBS-analyse. Til venstre: SPECTRAL Conveyor Belt LIBS sensor (Spectral Industries). Til høyre: MAYA produsert av Lyncis.

3.4 Hyperspektral og multispektral avbildning

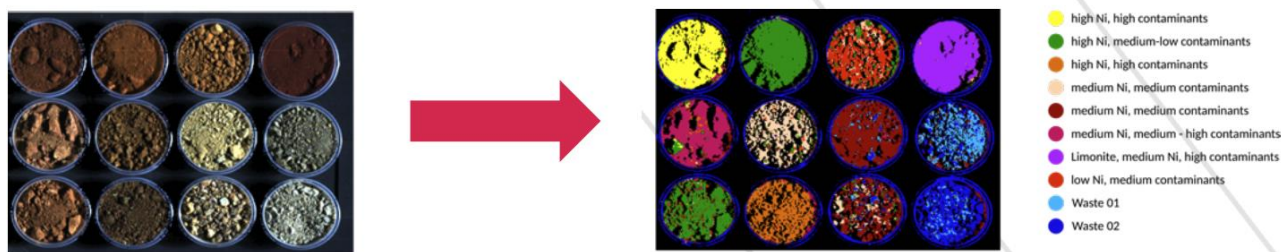
3.4.1 Metode og anvendelse

Hyperspektral og multispektral avbildning er en teknologi som kombinerer digital avbildning og spektroskopi. Et vanlig kamera har tre spektrale bånd (rød, grønt og blått, RGB), hvor fargen i hver piksel er en variasjon av sammensetningen av hver primærfarge. Spekteret til et bilde tatt med et hyperspektralt kamera inkluderer derimot flere hundre sammenhengende spektralbånd, og inkluderer både synlig lys, og infrarød og ultrafiolett stråling. Hver piksel i et hyperspektralt bilde inneholder derfor et bredt spektrum av energibølgelengder (HySpex, 2022), mens for multispektral avbildning bruker man færre forhåndsvalgte spektralbånd til å analysere materialets sammensetning (Edmund Optics, u.d.). Figur 3-8 illustrerer forskjellen i de spektrale dataene fra multispektral og hyperspektral avbildning. Enkelt kan man si at multispektral avbildning har en noe lavere oppløsning enn hyperspektral avbildning.



Figur 3-8: Prinsipiell skisse som viser forskjellen i prosessering av spektrale data mellom multispektral og hyperspektral avbildning. Figur hentet fra Edmund Optics (u.d.).

De spektrale dataene brukes til å innhente informasjon om et materials sammensetning. Med bruk av spektroskopi kan man lage modeller som kan oversette spektrene til nyttig informasjon om for eksempel materialets kjemi og mineral-/elementinnhold. For at spektrene skal kunne brukes til å identifisere og gi ønsket output, eksempelvis mineralinnhold, kreves det gjerne at modellen kalibreres mot referanseprøver med kjent mineralinnhold. Bølgelengdespekteret fra hver piksel vil da kunne gi informasjon om petrografisk sammensetning til scannet materiale. En modell vil da trenes til at en gitt input (sammensetning av spektral data innenfor en piksel) tilsvarer en gitt output. Et eksempel på bruk av hyperspektral avbildning er vist i Figur 3-9, hvor konsentrasjon av nikkell er forsøkt anslått ut fra hyperspektrale bilder.



Figur 3-9: Eksempel på bruk av hyperspektral avbildning til identifisering av nikkell. Bilde er hentet fra HySpex (2022).

Hyperspektral avbildning er allerede i bruk innenfor malminindustrien til å anslå kvaliteten til malmen ved å kvantifisere innhold av ønskede/uønskede mineraler. Bruk av hyperspektral avbildning til on-line TBM-analyse vil basere seg på samme bruk av teknologien, hvor det er mest relevant å detektere innhold av uønskede mineraler. Det er ikke funnet litteratur som viser til at multispektral eller hyperspektral avbildning er brukt til on-line analyse av tunnelmasse, men i Galdames et al. (2022) er det vist at hyperspektral avbildning kan brukes til litologisk klassifisering av steinmasse på transportbånd. Hvorvidt klassifiseringen fungerer for uvaskede steinmasser (som kan være tilfelle for tunnel- og TBM-masser) er uvisst.

3.4.2 Markedsoversikt

Det er funnet to produsenter av produkter som bruker multispektral/hyperspektral avbildning til karakterisering av bergmasse som kan brukes til on-line analyse:

- HySpex by Neo (holder til i Oslo)
- Steinert (Tyskland)

Det er kun tatt kontakt med HySpex, som spesialiserer seg på hyperspektral avbildning. Produktene deres er delt i to klasser; VNIR (visible and near-infrared), som opererer i spektralområdet fra 400 til 1000 nm, og SWIR (short-wave infrared light), som opererer i spektralområdet fra 950 til 2500 nm. Hvilket spektralområde som passer best, avhenger av hvilke mineraler man ønsker å detektere. HySpex oppgir at deres kameraer og teknologi fungerer best for mineralgjenkjenning, og er mindre presis for å analysere elementinnhold. Noen mineraler er derimot vanskeligere å detektere enn andre da de ikke reflekterer karakteristiske spektraldata. Eksempler er pyritt og magnetkis, som oppgis å gi for "flate" spektre til at de er lette å gjenkjenne.

Prisoverslag er gitt i punktlisten under. Merk at SWIR-produktene er noe dyrere enn VNIR. I tillegg kommer software, som oppgis å ligge rundt 10 000 euro. Installasjon er ikke inkludert i prisoverslaget.

- HySpex Baldur V-1024 N: ca. 35 000 euro
- HySpex VNIR-1800: ca. 65 000 euro
- HySpex Baldur S-384 N: ca. 80 000 euro
- HySpex Classic SWIR-384: ca. 100 000 euro, se
- Figur 3-10.

HySpex har ikke gjort analyser av tunnelmasser på transportbånd før. Hvorvidt massene må gå gjennom en vaskeprosess før scanning er derfor uklart. Det vil derfor være aktuelt å gjøre forsøk på tunnel/TBM-masse for å finne ut hvordan deres teknologi fungerer best for on-line karakterisering av TBM-masse.

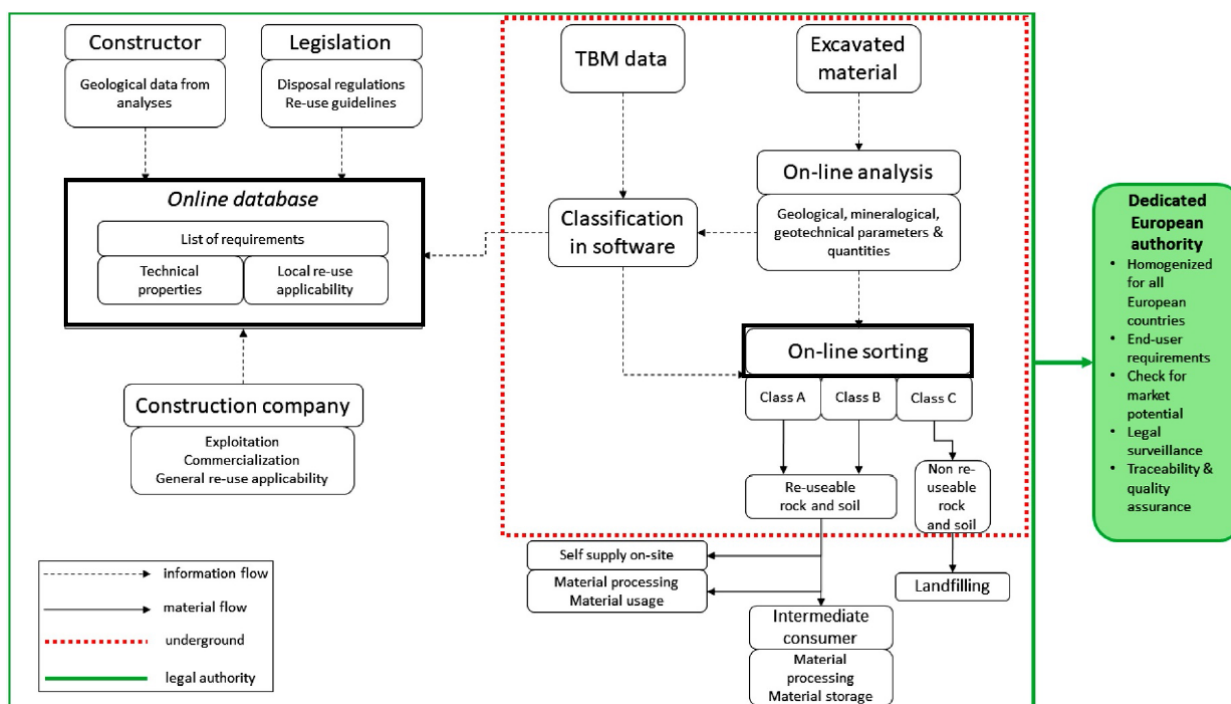


Figur 3-10 HySpex SWIR-384 montert over et transportbånd. Bilde hentet fra www.hyspex.com.

4 Materialflyt av TBM-masser ved bruk av on-line analyser

I det europeiske forskningsprosjektet *DRAGON* ble det utarbeidet et tenkt analysekonsept som skal optimalisere materialflyten i et tunnelprosjekt drevet med TBM hvor det benyttes on-line analyser på transportbåndet (Haas, Galler, Luigi, S., & Benedikt, 2020). Hensikten med konseptet var å oppnå en ressurseffektiv utnyttelse av tunnelmassene gjennom god material- og informasjonsflyt slik at man raskest mulig kan ta en avgjørelse på om TBM-massen er gjenvinnbar eller ikke.

Konseptet er skissert i Figur 4-1. En viktig del av analysekonseptet og karakteriseringsprosessen er å ha en *online database*, vist til venstre i Figur 4-1. En slik database beskriver prosjektspesifikke krav og grenseverdier for ulike bruksområder av TBM-massen. Den baserer seg på forundersøkelser av grunn og bergmasse (*geological data from analyses*), samt nasjonale lover og forskrifter om deponering og gjenbruk/gjenvinning (*disposal regulations, re-use guidelines*).



Figur 4-1: Konseptuelt flytdiagram for material- og informasjonsflyt av TBM-masser ved implementering av on-line analyser på TBM-maskinen. Piler med stiptet linje illustrerer informasjonsflyt i prosjektet, mens fylte piler illustrerer materialflyt. Figur hentet fra (Haas, Galler, Luigi, S., & Benedikt, 2020).

Fra boksen *On-line sorting* i flytdiagrammet, kan man se at TBM-massen klassifiseres i tre klasser, analogt med klasse 1a, 3 og 4 presentert i kapittel 2.1. Materialflyten og hvorvidt TBM-massen klassifiseres som enten gjenbrukbar/gjenvinnbar (klasse A og klasse B), eller ubrukbar (klasse C), bestemmes altså av to faktorer:

- Sanntidsdataene fra on-line analyser av TBM-massen
- De gitte grenseverdiene fra databasen

Noe som ikke er inkludert i Figur 4-1 mht. materialflyt er planlegging av masselagring og logistiske utfordringer knyttet til masseutnyttelse. For at man skal oppnå en mest mulig høyverdig utnyttelse av tunnelmasser, krever det at man har en plan for masseforflytning, mellomagring og transport av massene. Ved on-line analyse på en TBM, hvor man kontinuerlig karakteriserer TBM-massene og fordeler den i for eksempel to gjenvinningsklasser, kreves det en mer omfattende planlegging av masselagring og forflytning, sammenlignet med om man kun opererte med en gjenvinningsklasse. Dette aspektet innenfor gjenvinning av TBM-masser faller utenfor hovedformålet i denne rapporten, men det nevnes da det er avgjørende for å oppnå en strømlinjeformet materialflyt fra uttak av masser til gjenvinnings- og/eller deponeringsstadium

4.1 Implementering av on-line analyser på TBM

Figur 4-2 – Figur 4-4 fremstiller tre eksempler på hvordan on-line analyse kan implementeres på en TBM. Alle figurene er publisert i artikler som kan knyttes til DRAGON-prosjektet.

Figur 4-2 viser en faktisk prototype av en testrigg for on-line analyse. Her går massen først gjennom en knusemaskin slik at elementanalysen som kommer i neste steg blir lettere. Det er benyttet en

OXEA XRF-maskin for å analysere elementinnhold. Utenom selve beskrivelsen av testriggen, er det i artikkelen ikke presentert noen videre resultater av on-line analysen gjort med prototypen.

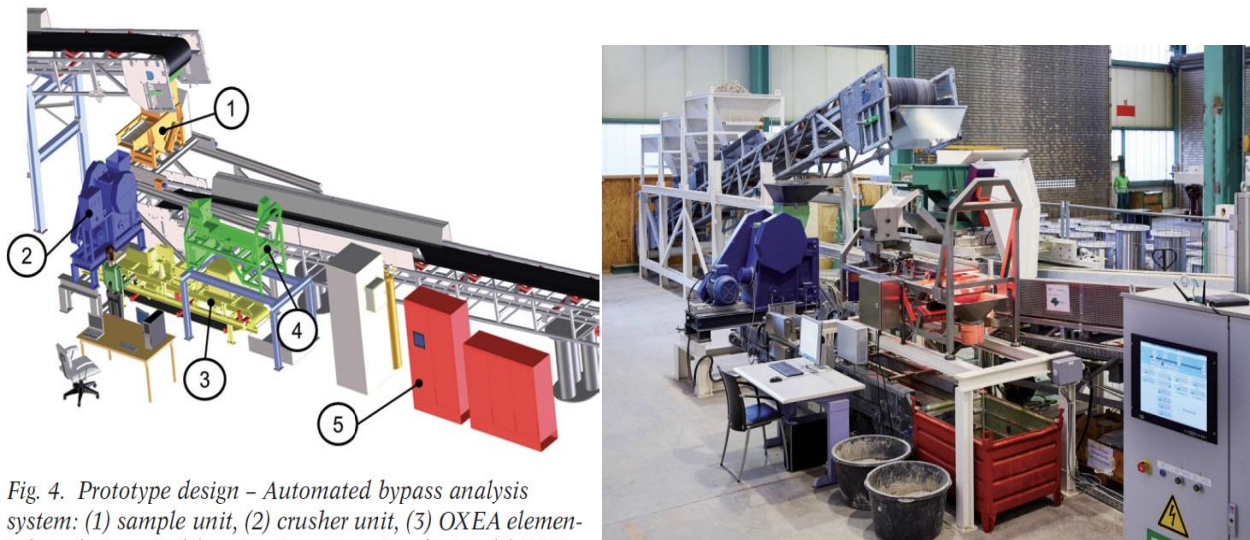
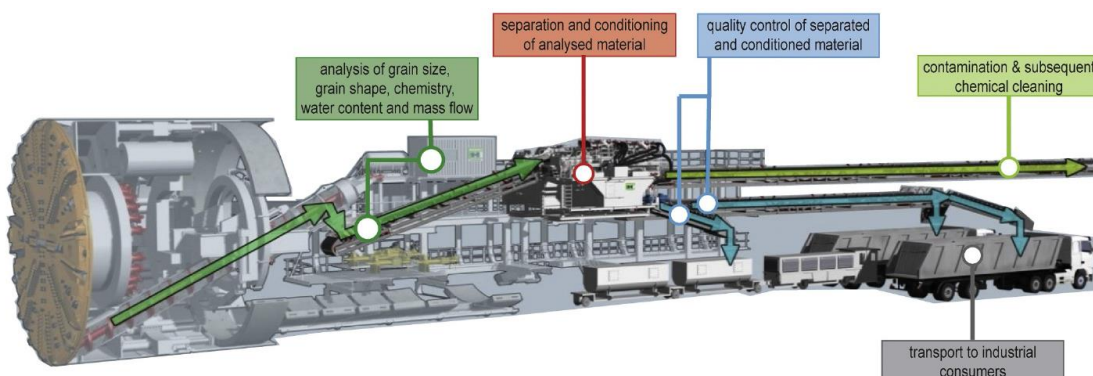


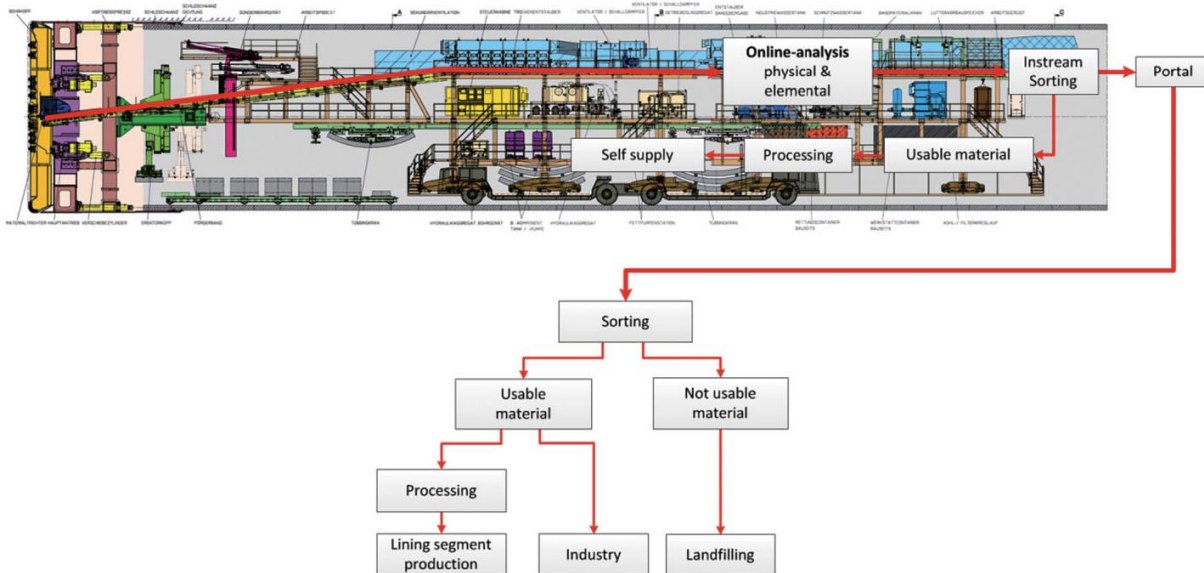
Fig. 4. Prototype design – Automated bypass analysis system: (1) sample unit, (2) crusher unit, (3) OXEA elemental analysis unit, (4) grain size measuring device, (5) PLC unit

Figur 4-2 Skjematisk illustrasjon og foto av prototype som ble benyttet til å teste on-line analyse av TBM-masse i artikkelen til Edelmann, et al. (2015).

Figur 4-3 (også vist i kapittel 1.1) og Figur 4-4 viser to skisser av on-line analyse av TBM-masse hvor enheten inkluderer både analyseinstrument for karakterisering av massen, samt et prosesseringsanlegg for videre behandling av TBM-massene, for eksempel som sementtilslag til bakfyll eller betongtilslag. En foredling av TBM-massen på selve TBMen krever en viss dimensjon på tunnelen for at det skal være praktisk gjennomførbart. Petitat et al. (2015) har konkludert med at en TBM må ha et tverrsnitt på minst 5 m for at det skal være aktuelt med et prosesseringsanlegg på transportbåndet. Selve on-line karakteriseringsinstrumentet som skanner massen på transportbåndet er imidlertid ikke like plasskrevende, noe som muliggjør for implementering av slike instrumenter også for mindre tunneler.



Figur 4-3 Skjematisk on-line analyse og behandling av TBM-masse (Haas, Galler, Luigi, S., & Benedikt, 2020).



Figur 4-4 Skjematisk on-line analyse og behandling av TBM-masse (Edelmann, Himmelsbach, & Barwart, 2015).

De inkluderte skissene trenger ikke å være veiledende for hvordan man designer on-line karakteriseringsenhet på en TBM. Et analyseinstrument kan også plasseres lenger nede på transportbåndet, ved lagringshallen, slik at man unngår å bli begrenset av tunnelens dimensjon. Et alternativ er å konstruere en sidestrøm på transportbåndet hvor det tas ut en mindre mengde masse som scannes og analyseres, liknende som vist i Figur 3-6. Med et slikt system vil man i større grad kunne tilpasse bredde og hastighet på transportbåndet til den gitte analysemetoden, uten å påvirke massehåndteringen nedstrøms i for stor grad. Et slikt system vil kreve vurderinger på hvor ofte (per tidsenhet eller per volumenhet) slike analyser skal gjøres for at massen som analyseres kan anses som representativ.

På generell basis kan man si at det som er mest hensiktsmessig for ett prosjekt, er kanskje ikke gjennomførbart for et annet. Planlegging av endelig design er derfor å anse som prosjektspesifikt.

Det er også verdt å påpeke at et prosjekt som inkluderer en ny teknologi som on-line analyse for bestemmelse av petrografisk innhold, vil behøve vurderinger og analyser om hvordan petrografiske krav og grenseverdier kan knyttes til resultatene fra on-line analysen. Et eksempel på en slik vurdering er gitt i kapittel 5.2.

5 Eksempelprosjekter

For å vise hvordan on-line analyse kan være kostnadsbesparende i et prosjekt, er det i dette kapittelet presentert to eksempelprosjekter hvor on-line karakterisering av TBM-masse kunne ført til en bedre utnyttelse av TBM-massene. Begge prosjektene er eksempler hvor TBM-massen overlapper to gjenvinningsklasser:

- Follobanen: Mellom gjenvinningsklasse 1a og 3 (evt. 1b)
- Nytt RKV: Mellom gjenvinningsklasse 4b og 4c

5.1 Follobanen

I forbindelse med Follobaneprosjektet ble 18,5 km drevet med tunnelboremaskiner med diameter på 10 m mellom Oslo og Ski. I prosjektet var 10-15 % av TBM-massen i utgangspunktet tiltenkt som tilslagsmaterialet til betongen til TBMs betongsegmenter (Ytterdal, 2018). Da det ble gjort prøver av TBM-massen, viste det seg at deler av TBM-massen inneholdt magnetkis. Magnetkis som inneholder svovel (sulfider) kan føre til svelling av betongen over tid, noe som medfører strengere krav for svovelinnholdet i tilslaget ved tilstedeværelse av magnetkis (se kapittel 2.1.1). Laboratorietester viste at 60 % av prøvene inneholdt magnetkis. Til sammen var det 30 % av de testede tilslagsprøvene som var marginalt over grenseverdien på 0,1 vektprosent svovel, og dermed ikke oppfylte Norsk Standard for betongtilslag sine krav (Ytterdal, 2018). Dette ble ansett som for stor andel til at materialet kunne aksepteres som tilslag til betongen til TBMs segmenter.

Som følge av at TBM-massen ikke kunne brukes som tilslag, måtte det kjøpes tilslag eksternt, noe som kostet prosjektet "noen hundre millioner kroner" (Teknisk Ukeblad, 2019). Massene ble istedenfor brukt til utfylling av et kupert området ved Åsland, for å etablere byggegrunn for nye bydelen Gjersrud-Stensrud. Med en on-line analyse av TBM-massen som kontinuerlig gir informasjon om svovelinnholdet, kan det tenkes at TBM-massen kunne blitt klassifisert ut fra om resultatene fra on-line analysen oppfyller de satte tilslagskravene. Massene kunne da blitt separert i en lagringshall etter om de oppfylte kravene til å kunne brukes som tilslag eller ikke. Av de nevnte analysemetodene i kapittel 3 kunne XRF, PGNAA og LIBS fungert til dette formålet.

5.2 Nytt RKV

I forbindelse med bygging av nytt regjeringskvartal har det blitt utgravd store mengder av bergartene svart leirskifer og syenitt, som opptrer lagvis i området. Den svarte leirskiferen er deponipliktig på grunn av dens syredannende potensial, og er derfor å anse som farlig avfall (klasse 4c). Syenitt ble vurdert til å ikke ha et syredannende potensial. Ved TBM-driving vil det ikke være mulig å skille ut tynne lag med svart leirskifer fra omkringliggende syenitt, og en TBM-masse må behandles som en blanding av de to bergartene. Det ble derfor relevant å finne ut av hvor stor andel svart leirskifer som måtte til for at den totale massen måtte behandles som farlig avfall. Ved lave nok skifermengder kunne massen kategoriseres som forurenset masse (klasse 4b) og sendes til deponi for inerte masser istedenfor deponi for farlig avfall. Å sende massene til deponi for inerte masser istedenfor farlig avfall er billigere, samt at massene har et større gjenvinningspotensiale.

I utarbeidelsen av grenseverdier for hvor stor andel svart leirskifer som skulle til for at massen ble kategorisert som farlig avfall, ble det tatt utgangspunkt i Miljødirektoratets veileder M-385 (Miljødirektoratet, 2015). Fra utførte analyser ble det vurdert til at TBM-masser med opptil 10% svart leirskifer i 90% syenitt kunne betraktes som inert avfall, klasse 4b.

For å anslå andel skifer og syenitt opp mot den satte grensen, ble det etablert et kontrollopplegg. Siktetesting ble vurdert som den raskeste og mest oversiktlige metoden for å få et anslag av skiferinnholdet i den totale massen. Den ble utført med to siktesatser (19 mm og 32 mm), hvor massene ble spylt og gjenkjent på farge, analogt med prinsippskissen vist i Figur 5-1.

Andelen skiferbiter ble talt opp og veid, slik at vektprosent svart leirskifer for fraksjoner > 19 mm kunne beregnes. Det er verdt å merke seg at ved siktetesting blir det kun tatt stikkprøver av massehaugen, noe som gjør at det er knyttet en del usikkerhet til om anslått skiferandel fra siktingen er representativ for den totale massen som deponeres. Det ble også kun gjort en grovsikting, for fraksjoner > 19mm. Ettersom andelen skifer er større i de finere fraksjonene, måtte man operere med en sikkerhetsfaktor som tok hensyn til dette. Dette tilfører også større usikkerheter i målingene.



Figur 5-1 Prinsippskisse for siktetesting. Figur hentet fra www.shutterstock.com.

Ved bruk av on-line analyse av TBM-massen som kontinuerlig gir informasjon om massenes sammensetning, ville usikkerhetene om skiferinnhold vært betraktelig mindre. Ettersom det er stor forskjell i syredannende potensiale for syenitt og svart leirskifer, kunne en elementinnholdsanalyse av utvalgte grunnstoffer blitt brukt til å bestemme når massene var å betrakte som inert og farlig avfall, hhv. gjenvinningsklasse 4b og 4c.

Tabell 5-1 viser et eksempel på hvilke grunnstoffer som har stor forskjell i elementinnhold for syenitt og svart leirskifer. XRF, PGNAA og LIBS kunne fungert til dette formålet. Med tanke på fargeforskjellen mellom svart leirskifer og syenitt kunne også hyperspektral/multispektral avbildning vært en relevant analysemetode, se Figur 5-2. Teknologien kunne også vært relevant gitt at det er mineral(er) som er lett å detektere, som kun er til stede i den ene bergarten.

Tabell 5-1: Eksempel på elementinnhold for svart leirskifer og syenitt. Analyse gjort ifm. nytt RKV. Enhet for mengde er gitt i mg/kg TS (tørrstoff).

Bergart	Cr (Krom)	Cu (Kopper)	Ni (Nikkel)	S (Svovel)	V (Vanadium)	U (Uran)
Svart leirskifer	93,5	158	76,6	29400	450	43,2
Syenitt (mænaitt)	<9	1,54	1,93	2600	10,3	2,88



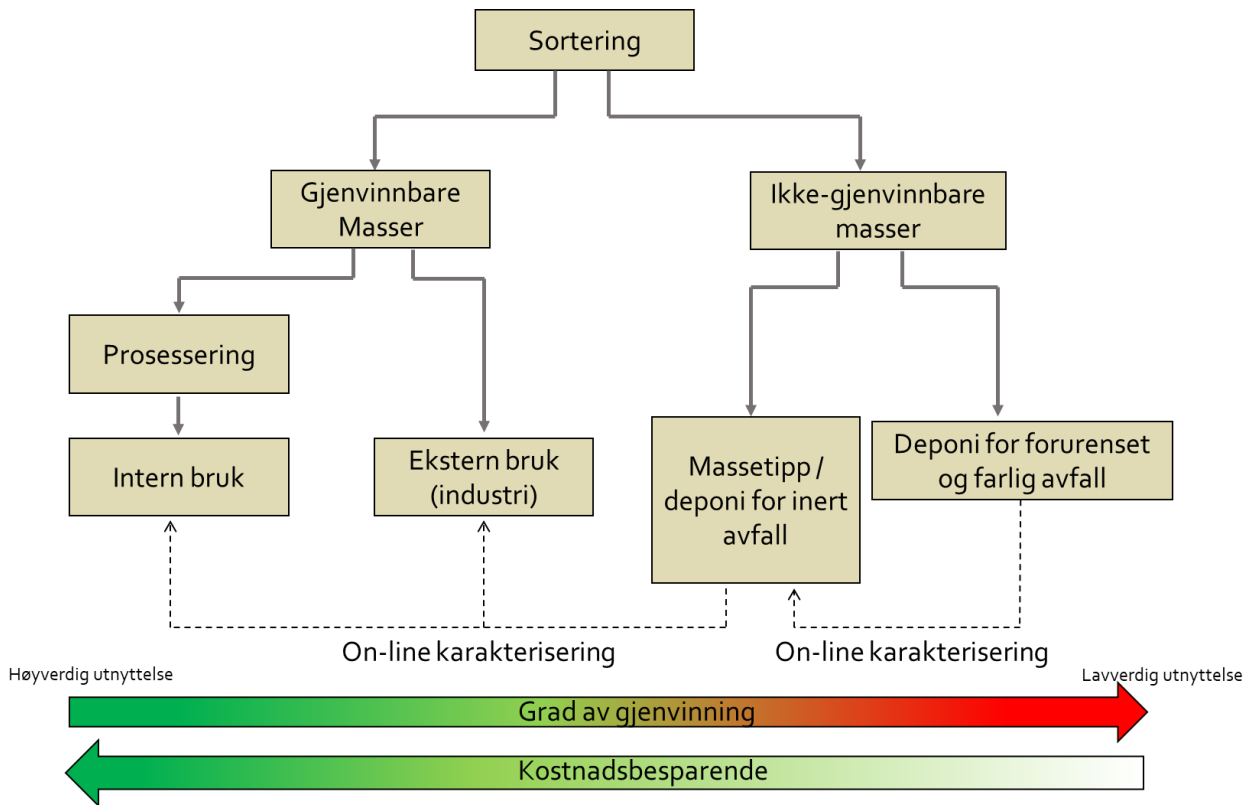
Figur 5-2 Svart leirskifer til venstre, syenitt til høyre.

6 Oppsummering

Denne rapporten presenterer forskning og relevante analysemetoder for on-line karakterisering av TBM-masser. Hensikten med dette arbeidet er først og fremst å gjengi kunnskap om hvilke muligheter som finnes innenfor on-line analyse. Slik kunnskap danner grunnlaget for at man i et TBM-prosjekt har en verktøykasse å ta utgangspunkt i med tanke på karakterisering og gjenvinning av massene.

Oppsummert viser studien følgende:

- Det er en økt oppmerksomhet på behandling og gjenvinning av tunnelmasser.
- Det er allerede gjennomført forskningsprosjekter om gjenvinning av TBM-masser, og on-line analyse for TBM. Det europeiske forskningsprosjektet DRAGON er et eksempel på dette.
- Teknologien og analysemetoder er allerede i bruk innenfor kull- og malminindustrien. Det er i utforskningsstadiet for tunnelbransjen.
- On-line analyse kan være kostnadsbesparende hvis det implementeres riktig og planlegges for (se Figur 6-1). Prosjektene Follobanen og nytt RKV er eksempler på dette.
- On-line analyse vil kunne føre til en bedre utnyttelse av TBM-masser (se Figur 6-1).



Figur 6-1 Skjema som viser hvordan on-line karakterisering kan føre til en mer bedre utnyttelse av TBM-massene, som igjen vil være kostnadsbesparende. Figur inspirert og modifisert etter (Edelmann, Himmelsbach, & Barwart, 2015).

7 Referanser

1. Bakker, M., & Xia, H. (2015). Laser-induced breakdown spectroscopy for identification of solid recycled materials. *SPIE Newsroom*.
2. BSI. (2021). *CON-X*. Hentet November 2021 fra <http://bsi.lv/en/products/hpge-detectors-spectrometers/-line-xrf-conveyor-analyzer-con-x/>
3. Edelmann, T., Himmelsbach, C., & Barwart, S. (2015). Direct use of excavated material in mechanised tunnelling - development of the prototype. *Geomechanics and Tunnelling* 8.
4. Edmund Optics. (u.d.). *Hyperspectral and Multispectral Imaging*. Hentet Mai 2022 fra <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/hyperspectral-and-multispectral-imaging/>
5. Eijkelkamp. (u.d.). *LIBS In-line Grade Scanner for Ore Sorting*. Hentet Februar 2022 fra <https://www.sonicsampdrill.com/scanning/libs-in-line-grade-scanner-for-ore-sorting.htm>
6. Erben, H., & Galler, R. (2014, Oktober). Tunnel spoil – New technologies on the way from waste to raw material. *Geomechanics and Tunnelling*, ss. 402-410.
7. Galdames, F. J., Perez, C. A., Estévez, P. A., & Adams, M. (2022, Mars). Rock lithological instance classification by hyperspectral images using dimensionality reduction and deep learning. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems Volume 24*.
8. Himmelsbach, C., Thalmann, C., Petitat, M., Galler, R., Barwart, S., Erben, H., . . . Zein, A. (2014). *D3.2 Online Analysis Technologies*. DRAGON Project.
9. Hugot, E., Burdin, J., Brino, L., Schriqui, P., & Parisi, M. (2019). Use and management of sulphated excavation material from the Montcenis Base Tunnel. I *Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress, Naples* (ss. 386-395). Napoli: ITA.
10. HySpex. (2022). *Hyperspectral Imaging for Ore Distinction*. Hentet Mai 2022 fra <https://www.hyspex.com/use-cases-application-notes/ore-distinction/>
11. Haas, M., Galler, R., Luigi, S., & Benedikt, M. (2020, July 17). Waste or valuable resource – a critical European review on re-using and managing tunnel excavation material. *Resources, Conservation & recycling* 162.
12. Indutech. (2021). *OXE Online Series*. Hentet November 2021 fra <https://indutech.com/online-xrf-analyzer-series/>
13. Khajehzadeh, N., Haavisto, O., & Koresaar, L. (2016). On-stream and quantitative mineral identification of tailing slurries using LIBS technique. *Minerals Engineering*(98), 101-109.
14. Klima- og Miljødepartementet . (2022). *Prop. 72 LS*. Klima- og Miljødepartementet .
15. Klima- og Miljødepartementet. (2022). *Lov om vern mot forurensninger og om avfall (forurensningsloven)*. Klima- og Miljødepartementet.
16. Klima- og Miljøverndepartementet. (2022, August). *Forurensningsforskriften*. Hentet fra Forskrift om begrensning av forurensning (forurensningsforskriften): https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931/*#*
17. Kondratjevs, V., Landmans, K., & Sokolovs, A. (2020). Performance Improvement of On-Line XRF Analysis of Minerals on a Conveyor Belt. *Journal of Mining Science*, 6(56), 1061-1066.
18. Kortreist stein. (2019). *Local use of rock materials - production and utilisation*. Kortreist stein.
19. Kurth, H. (2013). Real time on-belt elemental analysis for advanced process control in iron ore. I *43° Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e o 14° Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro* (ss. 364-373). Sao Paulo: ABM.
20. Langford, J., Baardvik, G., Eek, E., Dahl, M., Syversen, F., Mørck, I., & Eide, L. (2020). TBM-kaks – Karakterisering og potensiale for nyttiggjøring, på land og i sjø. I *Fjellsprenningskonferansen 2020* (ss. 116-136). Oslo: NFF.
21. Madias, J. (2014). Electric Furnace Steelmaking. I *Treatise on Process Metallurgy* (ss. 271-300). Elsevier Ltd.
22. Miljødirektoratet. (2015). *Deponering av syredannende bergarter*. Miljødirektoratet.
23. Miljødirektoratet. (2018). *Faktaark M-1234 Mellomlagring og slutt disponering av jord- og steinmasser som ikke er forurenset*. Miljødirektoratet.
24. Miljødirektoratet. (2019). *Veileder M-1234 Disponering av jord og stein som ikke er forurenset*. Miljødirektoratet.
25. NGI. (2019). *GEORECIRC - Tunnelborkaks (TBM) – Karakterisering og nyttiggjøring*.
26. NOAH. (u.d.). *Inert avfall*. Hentet Mai 2022 fra <https://www.noah.no/inert-avfall/>
27. Norsk betongforening. (2017). *Bestendig betong med alkalireaktivt tilslag*. Norsk betongforening.
28. Pedarnig, J., Trautner, S., Grünberger, S., Giannakaris, N., Eschlböck-Fuchs, S., & Hofstadler, J. (2021). Review of Element Analysis of Industrial Materials by In-Line Laser—Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). *Applied Sciences* , 11(19).
29. Petitat, M., von Allmen, K., & Burdin, J. (2015). Automation of rock selection and aggregate quality for reuse in tunnelling and industry. *Geomechanics and Tunnelling* 8, ss. 315-320.
30. PhysicsOpenLab. (2016). *DIY X-Ray Fluorescence Spectrometry*. Hentet Februar 2022 fra <https://physicsopenlab.org/2016/02/24/diy-xrf-spectrometry/>
31. Qiuming, G., Xiaoxiong, Z., Yongqiang, L., Bei, H., & Lijun, Y. (2021). Development of a real-time muck analysis system for assistant intelligence TBM tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*(107).
32. Rise, T., Alnæs, L., & Rambæk, I. (2019). *Oppnådde resultater i prosjektet Kortreist stein (2016-2019)*. SINTEF.

33. Rohde, J. (2016). Håndtering og bruk av tunnelstein. I *Fjellsprengningskonferansen 2016* (ss. 63-85). Oslo: NFF.
34. SFT. (2009). *Tilstandsklasser for forurenset grunn (TA-2553)*. Statens forurensningstilsyn.
35. Standard Norge. (2008). *NS-EN 13043:2002+NA:2008 Tilslag for bituminøse masser og overflatebehandlinger for veger, flyplasser og andre trafikkarealer*. Standard Norge.
36. Standard Norge. (2014). *NS-EN 206:2013+NA:2014 Betong — Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar*. Standard Norge.
37. Standard Norge. (2016). *NS-EN 12620:2002+AI:2008+NA:2016 - Tilslag for betong* (1. utg.). Standard Norge.
38. Statens vegvesen. (2014). *R210 - Laboratorieundersøkelser*. Vegdirektoratet.
39. Statens vegvesen. (2015). *R762 - Prosesskode 2. Standard beskrivelse for bruer og kaier*. Vegdirektoratet.
40. Statens vegvesen. (2021). *N200 Vegbygging*. Vegdirektoratet.
41. Teknisk Ukeblad. (2019). *TBM Tunnelboremaskin på Follobanen*. Hentet Februar 2022 fra <https://www.tu.no/artikler/i-morgen-har-tunnelboremaskinene-gjennomslag-i-follobane-tunellen/458614>
42. Xiao-Ping, Z., Wei-Qiang, X., Kang-Yi, C., Quan-Sheng, L., Jian, W., & Wei-Wei, L. (2021, Juli). Evaluation of rock muck using image analysis and its application in the TBM tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*(113).
43. Ytterdal, S. G. (2018). Lessons learned from the Follo Line Project – Pyrrhotite: a showstopper for reuse of TBM material as concrete aggregate . I *Workshop proceedings No. 14* (ss. 1-8). The Nordic Concrete Federation.
44. Zhang, Y., Zhang, X., WenBao, J., Shan, Q., Yongsheng, L., Hei, D., & Da, C. (2016, Januar). Online X-ray Fluorescence (XRF) Analysis of Heavy Metals in Pulverized Coal on a Conveyor Belt. *Applied spectroscopy* 70.
45. Aasly, K., Erichsen, A., & Rise, T. A. (2019). *Forundersøkelser og bruk av kortreist stein - En geologisk veileder*. SINTEF.

FORSKNING



PRIVAT SEKTOR



OFFENTLIG SEKTOR



The earthresQue centre is a Centre for Research-based Innovation (SFI) funded by the Research Council of Norway. The centre will develop technologies and systems for sustainable handling and treatment of waste and surplus masses.

sfi = Senter for
forskningsdrevet
innovasjon

Norges forskningsråd

earthresQue