



Kort innføring i bruk av TBM



NFFs tekniske rapporter er utarbeidet av fagpersoner oppnevnt av utviklingskomiteen i NFF. Innholdet er i samsvar med kjent viten på det tidspunkt redigering ble avsluttet. Feil eller mangler kan likevel forekomme. NFF, forfattere eller fagkomiteen har intet ansvar for eventuelle feil eller mangler i rapporten og mulige konsekvenser av disse.

Det forutsettes at rapporten benyttes av kompetente, fagkyndige personer med forståelse for de begrensninger og forutsetninger som legges til grunn.

Forsidebilde: Kristian Repstad, LNS AS

© Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk - NFF

ISBN 978-82-92641-34-7

Forord

Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk – NFF er en åpen forening for personer og virksomheter knyttet til eller interessert i aktiviteter som angår norsk bergteknologi. En sentral del i foreningens arbeid gjelder utviklingsprosjekter til nytte for bransjen. Dette skjer i nært samarbeid med relevante aktører. De oppnådde resultater gjøres kjent gjennom NFF sine publikasjoner, håndbøker og tekniske rapporter.

Teknisk rapport nr. 17 gir en innføring i bruk av tunnelboremaskiner for fullprofilboring av tunneler.

Rapporten er utarbeidet av Pål Drevland Jakobsen, Vegdirektoratet og NTNU; Sindre Log, The Robbins Company; Thor Skjeggedal, NFF, Arnulf M. Hansen, AMH Consult og Anders Palm, Sweco.

Deler av innholdet i rapporten er basert på Statens vegvesen rapport nr. 324 *Bruk av TBM til driving av vegtunneler i Norge*.

Vi takker forfattere og andre bidragsytere for vel utført arbeid.

Januar 2015

NFF – Utviklingskomiteen

Innhold

Forord.....	1
Introduksjon	4
Spesielle TBM-begreper	8
TBMer for berg	12
Brytningsteori	12
TBMer for hardt berg.....	15
Åpen TBM	15
Enkel- og dobbeltskjold TBMer	16
Bergsikring.....	19
Produksjon og kostander.....	22
Fullprofilboring på stigning	25
TBM med tilpasset gripper og bakriggssystem	25
Stigortsboring (Raise boring).....	26
Blindhullsboring (Box hole drilling)	26
Massetransport	27
TBMer for løsmasser	28
Generell teori	28
EPB-TBM (Earth Pressure Balance TBM).....	28
Slurry shield TBM	31
Kombinasjonsmaskiner (Multimode TBM).....	33
Mikrotunneldrift.....	35
Løsmasse-maskiner.....	35
Slurryshield-MicroTBM	35
Earth Pressure Balance shield (EPB-MicroTBM)	35
Auger-bormaskiner	35
Maskiner for hardt berg	36
Rørpressing	37
Valg av drivemetode, boring og sprenging versus TBM.....	39

Beslutningsfaktorer	39
Fordeler og ulemper	40
Oppsummering.....	43
Referanser	44

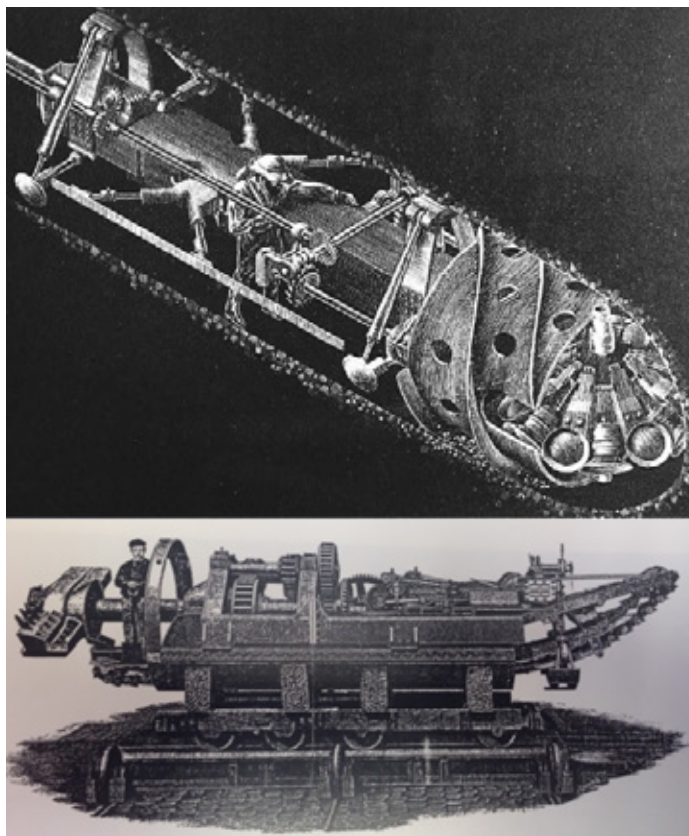
Introduksjon

Det er hittil bygget omkring 258 km fullprofilboret tunnel i Norge. Mesteparten av dette er vannkrafttunneler som ble boret på 70- og 80-tallet. Etter lang stillstand er TBM igjen aktuell metode. For Røssåga vannkraftprosjekt pågår boring med TBM. For prosjekt ny Ulriken jernbanetunnel er anleggsarbeidene påbegynt. Tunnelen skal bores, og utstyr er bestilt. Anleggsarbeidene for Follobanprosjektet er påbegynt. Store deler av prosjektet skal gjennomføres med TBM. Anbuds og kontraktsarbeid pågår.

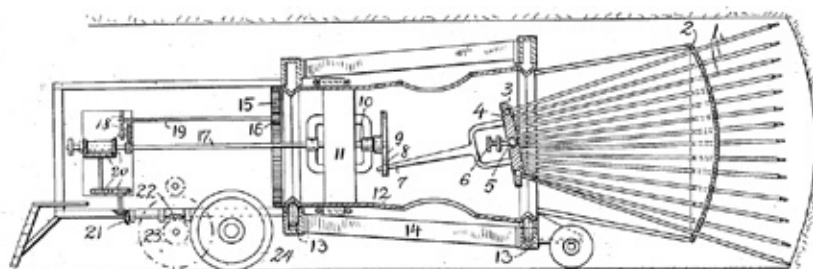
Utvikling av fullprofilboringsteknologi startet tidlig på 1800 tallet. Det har siden vært en stor utvikling av TBM-teknologien. Det gjelder alle sider ved metoden, bl.a. forbedringer i materialteknologi, maskinteknikk, datateknologi, automatisering og navigasjon.

Figur 1 viser skisser av to ”tidlige” TBM-design som ble forsøkt brukt på jernbanetunnel i USA 1853, henholdsvis et forsøk på kryssing av kanalen mellom England og Frankrike i 1882.

I Norge var det første forsøket på fullprofilboring et patent av Ingebrigt Bøhn (1920). Bøhns design baserte seg på flere stenger som ble banket i tunnelstufen mens de ble rotert i lav hastighet. Dette gav konsentriske spor i bergmassen, som ble brutt ut som chips. Bøhns patent ble aldri prøvd i bergmasse, men forsøk i betongblokker indikerte at teknologien kunne benyttes.



Figur 1 Skisse av Wilsons TBM forsøkt benyttet i Hoosac jernbanetunnel i USA i 1853 (øvre), og skisse av Beaumonts TBM som boret omkring 2 km i Frankrike og England i 1882 – 1884 (nedre) (Varley 1992).



Figur 2 Ingebrigt Bøhns patenterte tunnelboremaskin utviklet fra ca. 1917, og patentert i 1920.

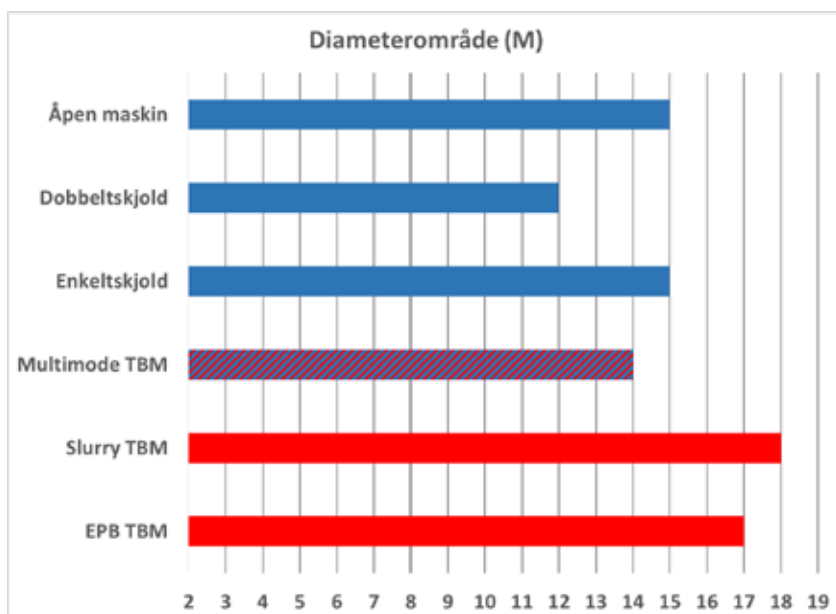
Mye har skjedd siden Bøhns og Wilsons patenterte maskiner i det forrige århundre. I Norge ble den første tunnelen fullprofilboret i Trondheim, mellom Sluppen og Høvringen. Tunnelen hadde en diameter på 2,3 meter og ble boret med en Demag Rock Borer i grønnstein og grønnskifer. Maskinen hadde en lav matekraft på omkring 60 kN per kutter, og følgelig ble begynnelsen av prosjektet en relativt dyr og langdryg erfaring grunnet lav inndrift og høyt kutterforbruk. Etter hvert økte entreprenøren matekraften, noe som resulterte i bedre inndrift. Utover 1970-80 tallet manifesterte fullprofilboring av tunneler seg som en konkurrerende metode til boring og sprengning av vanntunneler. Kombinasjonen av kortere byggetid, lavt falltap, redusert bergsikring og erfarne tunnelborere ble utnyttet av kraftbransjen.

På 1980-tallet ble det også boret tre vegtunneler i Norge. Tunnelene ble strosset ut med sprenging langs veggene for å få plass til kjørebane, se Figur 3. Utstrossingen var en kostbar og langdryg affære, til tross for suksess med selve boringen av tunnelen. Dette gjorde at TBM boring fikk et ufortjent dårlig rykte til etablering av vegtunneler.



Figur 3 Boret heng og sprengte vegger i Fløyfjelltunnelen (Foto Pål Drevland Jakobsen).

Denne NFF-rapporten er utarbeid for å presentere ulike TBM-konsepter for ulik geologi, og samtidig vise til den utvikling som har skjedd innen TBM-drift siden tidligere erfaringer i Norge på 70- til 90-tallet. Rapporten viser også noen konsepter for å drive fullprofilboring i små tverrsnitt. TBM-teknologiene som blir beskrevet i rapporten er vist i Figur 4.



Figur 4 Aktuelle diametere for ulike maskin typer. (Rødt = Løsmasser, Blått = Berg)

I tillegg til diameterne gitt over finnes de fleste maskintypene i mindre diametere enn 2 meter. Disse vil bli omtalt senere i rapporten.

Spesielle TBM-begreper

Tunneldriving med tunnelboremaskin (TBM) innbefatter mange begreper. I dette kapitlet presenteres det noen relevante begreper og definisjoner. Noen av disse er basert på Maidl et al. (2012).

Abrasivitet beskriver geologiens kapasitet til å slite TBM-verktøy. Det finnes flere tester som kan benyttes til å måle abrasiviteten til berg og løsmasser, og predikere verktøylevetid med en viss usikkerhet.

Aktiv stoffstabilisering oppnås ved å tilføre et stabiliserende trykk mot tunnelstuffen under driving i løsmasser ved hjelp av bentonitt og/eller luft.

Annular gap er et begrep som beskriver åpning mellom utdrevet tunneldiameter og diameter på betongelement. Annular gap er vanligvis en avstand på 10 – 15 cm mellom berg og betongelement. Åpningen bak betongelementene fylles med ensgradert grus (pea-gravel) og/eller sementmørtel.

Bakrigg (Backupsystem) trekkes av tunnelboremaskinen enten suksessivt eller stegvis og inneholder bl. a. transformatorer, hydraulikk-pakke, støvrenseanlegg, sikringsutstyr, redningskontainer og annet utstyr nødvendig for boringen. Bakriggen sørger for at bormassen kan transporteres ved hjelp av transportbånd over på skinnegående vagger, lastebiler eller føres videre gjennom tunnelen på transportbelte helt ut til deponi i dagen (Continuous Conveyor System)

Bentonitt er et naturlig mineral som består i all hovedsak av montmorillonitt. Bentonitt benyttes i slurry shield TBMer for uttransport av bormasse, for å redusere friksjon mellom skjold og tunneloverflaten og for å redusere friksjon mellom betonglining og geologisk materiale ved rørpresing.

Berg i denne rapporten er brukt om geologisk materiale med enaksial trykkfasthet høyere enn 25 MPa. **Svakt berg** er geologisk materiale mellom 5 og 25 MPa enaksial trykkfasthet. Ved trykkfasthet lavere enn 5 MPa omtales det geologiske materialet som **løsmasse**.

Borbarhet er en generell betegnelse på hvor enkelt eller vanskelig en gitt geologisk masse er å bore ut. Ofte baseres begrepet på en kombinasjon av det geologiske materiales styrke, oppsprekking i bergmassen og retning på disse i forhold til tunnelaksen.

Diskkuttere er et TBM-kutterverktøy som benyttes i berg (typisk i bergmasse med enaksiell trykkfasthet over 25 MPa).

Drivekostnad brukes som tunnelkostnad for boring, uttransport av berg, sikring, forbruk av materiell (spesielt kuttere og elektrisk kraft), maskiner og utstyr samt lønn til tunnel drivere.

EPB TBM er en forkortelse for Earth Pressure Balance TBM. Denne TBM-typen baserer seg på å kontrollere uttak av masser gjennom en skrue, og for å holde tunnelstuffen stabil under driving. EPB TBMer benyttes som regel i kohesive løsmasser, men kan også benyttes i grovere løsmasser og svakt berg.

Frekvensomformer - VFD (Variable Frequency Drive)
Elektronikken omformer vekselstrøm til likestrøm og tilbake til vekselstrøm for å skaffe trinnløs variabel rotasjonshastighet på en vekselstrømsmotor (eks. hovedmotorene for borhodet).

Grippers er montert på siden av TBMen (åpne TBMer og dobbeltskjold TBMer) for fastspenning av maskinen mot tunnelveggen som skal skaffe reaksjonskraft for frem-mating, og samtidig motvirke rotasjonskreftene/vrimomentet fra borhodet under boring.

Gripper TBMer er en TBM som benytter grippers for å skaffe fastspenning mot tunnelveggen slik at man får tilstrekkelig reaksjonskraft til å skyve maskinens borhode fram under boring.

Hovedbjelke (Main beam) TBM. Dette er en åpen TBM designet for boring i harde bergarter hvor bergkvaliteten er av en slik karakter at skjoldmaskin-design ikke er påkrevd. Hovedbjelken er forbundet til borhodestøtten og glir gjennom fastspenningsseksjonen under fremmating. Hovedbjelken påføres vrilmoment under boring og dette tas opp av gripperne i fastspenningsseksjonen som omslutter hovedbjelken.

Kutterhode/borhode er en roterende og sirkulær stålkonstruksjon som er påmontert kutterverktøy som bryter bergmassen og skoper som transporterer boremasse ut av borhodet.

Kutterhode for bakmonterte kuttere (back-loading) Kutterne kan inspiseres og skiftes fra innsiden/baksiden av borhodet og er et sikrere alternativ enn kutterhode for frontmonterte kuttere (front-loading).

Kutterhode for frontmonterte kuttere (front-loading) Kutterne må inspiseres og skiftes fra utsiden/fremsiden av borhodet. Dette benyttes i dag stort sett kun på TBMer med mindre diametere.

Kutterverktøy er et samlebegrep som omfatter utskiftbare verktøy montert på TBMs kutterhode. I hardt berg benyttes disk-kuttere, mens i løsmasser og i svakt berg benyttes rippere, skrapere og hardmetallsverktøy.

Lukket modus omtales som «closed mode» på engelsk, og angir at TBMs kutterhodekammer er under trykk. Trykket tilføres enten gjennom trykksatt bentonittslurry, av og til i kombinasjon med trykkluft, eller gjennom kontroll på mengde masse med naturlig jordtrykk som drives ut gjennom skrutransportør.

Mikrotunneldrift omfatter opprinnelig fullprofil-drift av tunneler med diameter mindre enn 1000 mm. I dag legger noen leverandører maskiner opp til 4000 mm i dette begrepet. Ved mikrotunneldrift er det ikke personell i tunnelen under driving, og TBMen opereres fra en styringsenhet over jord.

Mixed face er et begrep som benyttes dersom det er materialer med ulike egenskaper i tunnelstufen. Eksempelvis av berg og løsmasse eller hardt og svakt berg.

Segmentkran er en vakuumheisekran som benyttes for å løfte betong elementer på plass under montering i TBM skjold.

Skoper (omtales som buckets på engelsk) er åpninger i kutterhodet som løfter opp utdrevet bergmasse og transporterer det gjennom kutterhodet.

Slurry TBM er en TBM som stabiliserer tunnelstuff med trykksatt bentonittslurry under driving. Slurry TBMer benyttes som regel i løsmasser og svakt berg.

Skum og tilsetningsstoff benyttes som oftest ved TBM-driving i løsmasser for å redusere adhesjon av leire på kutterverktøy, kutterhode og i skruetransportøren. Benyttes også for å redusere dreiemoment og slitasje på kutterhode og/eller for å endre reologien (transportbarheten) av den utdrevne massen. I de senere år har det også vært benyttet skum til å redusere støv og slitasje i TBMer som borer i berg.

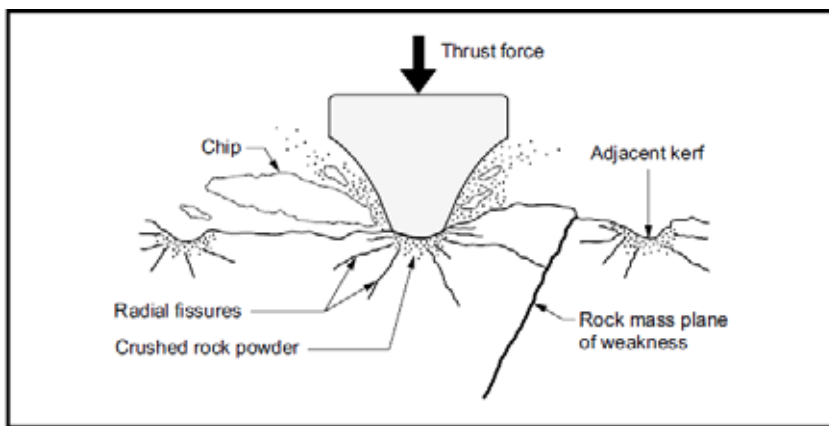
TBM er en forkortelse for «Tunnel Boring Machine» på engelsk eller **tunnelboremaskin** på norsk. I denne rapporten avgrenses «TBM» til fullprofilboremaskiner som borer sirkulære profil. I en del litteratur inkluderer TBM også delsnittsboremaskiner (eksempel Roadheader) og ulike konsepter som etablerer rektangulære tunneler med mekanisk brytning.

Åpen modus omtales som «open mode» på engelsk. Åpen modus angir at TBMs kutterhodekammer ikke er under trykk. Det vil si at stuff er i atmosfærisk trykk under boring, uten noen form for stuffstabilisering fra TBMen.

TBM for berg

Brytningsteori

En TBM for berg baserer seg på å bryte berg gjennom å presse diskuttere mot tunnelstuffen. Diskkutterne er montert fast på et roterende kutterhode, slik at det dannes konsentrisk sirkulære spor i tunnelstuffen. Det oppstår da en knusningssone under diskkutterene, samt radiell rissdannelse ut i fra knusningssonen. Borkaks brytes da enten mellom radielle riss generert av kutteren som ruller i sidesporet eller mot naturlig svakhetsflater i bergmassen, se Figur 5.



Figur 5 Prinsipp for brytning av berg med diskutter (NTNU Prosjektrapport 1B-98)

Ved økende kutterlaster vil de genererte rissdannelsene øke i omfang og føre til høyere inndrift. Ifølge NTNU følger denne en eksponentiell utvikling. Dette forklarer videre utviklingen man så i Norge hvor man i starten av TBM perioden opererte med 12", 14" og 15 ½" kuttere med maksimal matekraft på 180 kN for 15½" kuttere, mens man på enden av perioden benyttet 19" kuttere med en maksimal matekraft på 312 kN. 19" og 20" kuttere er i dag tilgjengelig på TBMer med stor nok diameter til å benytte disse.

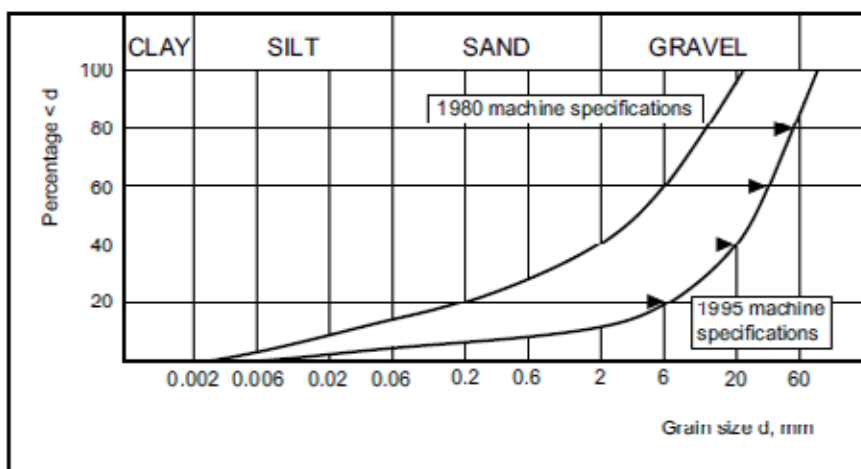
Høyere grad av rissdannelser fører videre til større borkaks og lavere spesifikk boreenergi. Dette er illustrert i Figur 6, hvor man har samlet borkaks på ulike matekrafter fra en nettoinndriftsprøve.



Figur 6 Borkaks fra samme bergmasse ved høy matekraft (venstre) og avtagende matekraft (midten og høyre). (Foto; Sindre Log)

Den knuste og utdrevne bergmassen løftes opp i skoper i borhodet, og transporteres videre ut fra borhodet og over på maskinens transportbelte, se Figur 8. Videre transport ut til dagen skjer enten ved bruk av kontinuerlig transportbelte, sporbunden transport eller hjulgående kjøretøy.

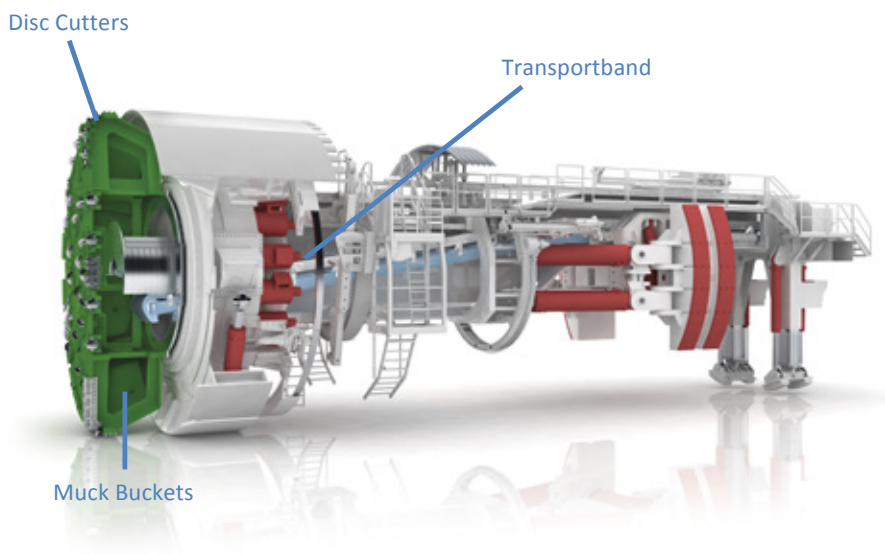
Typisk siktekurver for TBM-drevet masser, er avhengig av bergmassen, men er generelt velgradert med 15-20% finstoff.



Figur 7 Typiske siktekurver fra NTNU (Bruland 1998).



Figur 8 a) Kutterhode som viser diskcuttere som bryter berget, og skoper som transporterer berget gjennom kutterhodet og over på transportband (Foto: The Robbins Company)



Figur 8 b) Foto: Herrenknecht AG

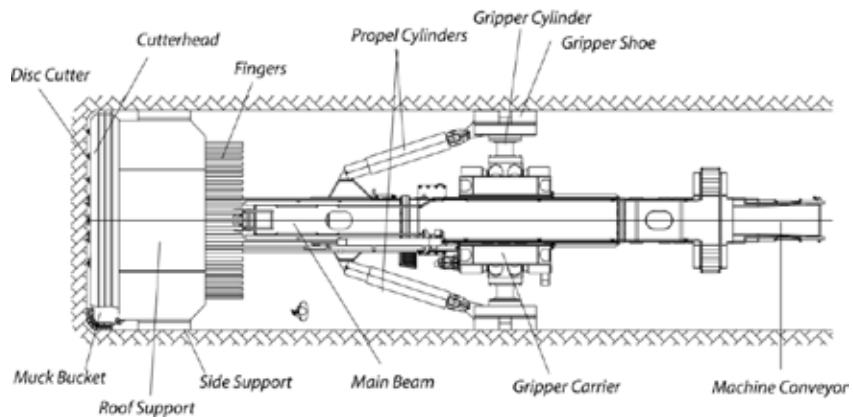
TBMer for hardt berg

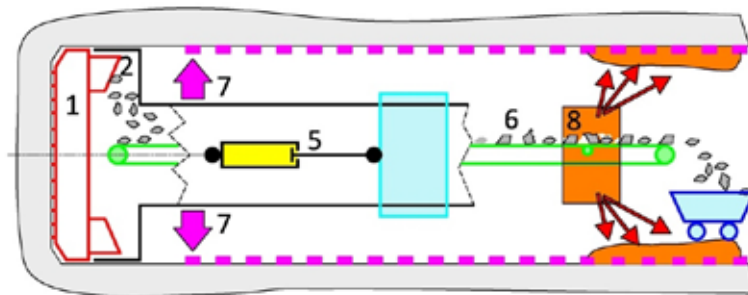
Åpen TBM

Alle tunnelene som er fullprofilboret i Norge frem til i dag er drevet med åpne TBMer. Disse TBMene kjennetegnes ved at maskinen ligger åpen i bergmassen, uten et omsluttende skjold. Åpne TBMer har ingen kontinuerlig stabilisering av stuff, annet enn mulig forinjeksjon. Driften begrenses således til relativt gode bergforhold hvor berget har en tilstrekkelig stabilitet til at konvensjonell bergsikring (bolter, stålbuer, sprøytebetong) kan installeres.

Den åpne TBMens virkemåte består av følgende trinn:

1. Gripperskoene i fastspenningsseksjonen trykkes mot tunnelveggen
2. Maskinens matesylindre som er montert mellom hovedbjelken og gripperskoene skyver borehode og borehodetstøtten mot stuff
3. Maskinen borer til matesylindrene er helt utspent
4. Maskinens hovedbjelke understøttes av støttebein
5. Gripperskoene trekkes inn og matesylindrene trekkes sammen og man starter en ny syklus





Figur 9: Enkel prinsippskisse som viser oppbygging av hovedkomponenter på en åpen TBM for hardt berg (etter NFM-Technologies). Øvre skisse viser TBMen ved takskifte (re-grip), sett ovenfra. Nedre skisse viser TBMen fra siden under boring:

- 1) Roterende kutterhode med diskcuttere
- 2) Skoper for bormasse
- 5) Hydrauliske sylindere mellom fastspenningsskoene og hovedbjelken som skyver borhødet fremover under boring.
- 6) Transportbelte
- 7) Indikerer område på TBMen som er egnet for å installere bergsikring (bolter, sprøytebetong og nett)
- 8) Indikerer området for å installere evt. permanent bergsikring

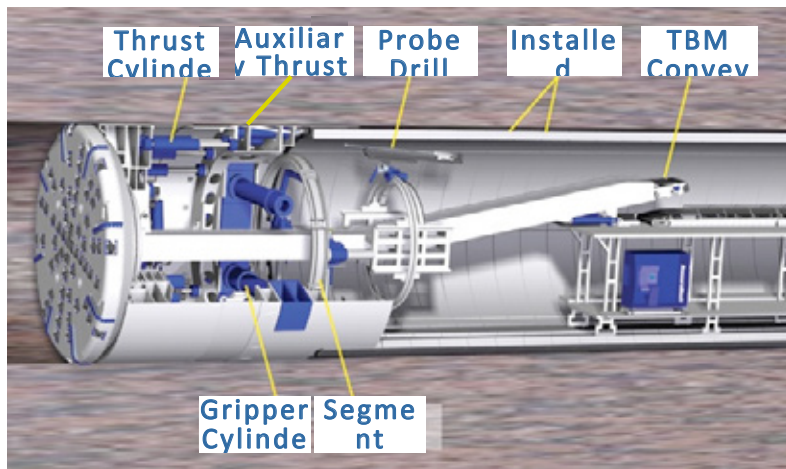
Dersom lange strekk av dårlig berg eller svakhetssoner skal forseres, kan dette medføre redusert framdrift. Årsaken til dette kan være:

- Gripperskoene har ikke stiv nok bergmasse til å skaffe tilstrekkelig fastspenning slik at matesylindrene kan skyve TBMen fremover.
- En usikret, ustabil tunnelstuff kan resultere i overmasse, setninger og kollaps av omliggende bergmasse. I tillegg kan det føre til store skader på kutterhode og kutterverktøy.
- Bergmassen bak kutterhode kollapser før nødvendig bergsikring er installert.
- Gripperne induserer spenninger i bergmasse, som kan føre til utglidninger av blokker.

Enkel- og dobbeltskjold TBMer

Dobbelskjold-TBMer har et roterende kutterhode med diskcuttere tilsvarende åpne TBMer for hardt berg. Som det ligger i ordet «dobbelskjold» ligger TBMen beskyttet i stålskjold. For å beskytte maskin og mannskap har selve maskinen et omliggende stålskjold. Dette er teleskopisk og delt i to.

I normal operasjon trykkes gripperne i det bakre skjoldet mot bergoverflaten. Matesylindrene (Thrust Cylinders) mellom bakre og fremre skjold overfører kraften til kutterhodet.



Figur 10: Skisse som viser oppbygging av dobbeltskjold TBM (The Robbins Company)

I svakt berg som deformeres eller går til brudd grunnet trykket fra gripperene, opereres maskinen i enkeltskjoldmodus (single shield mode).

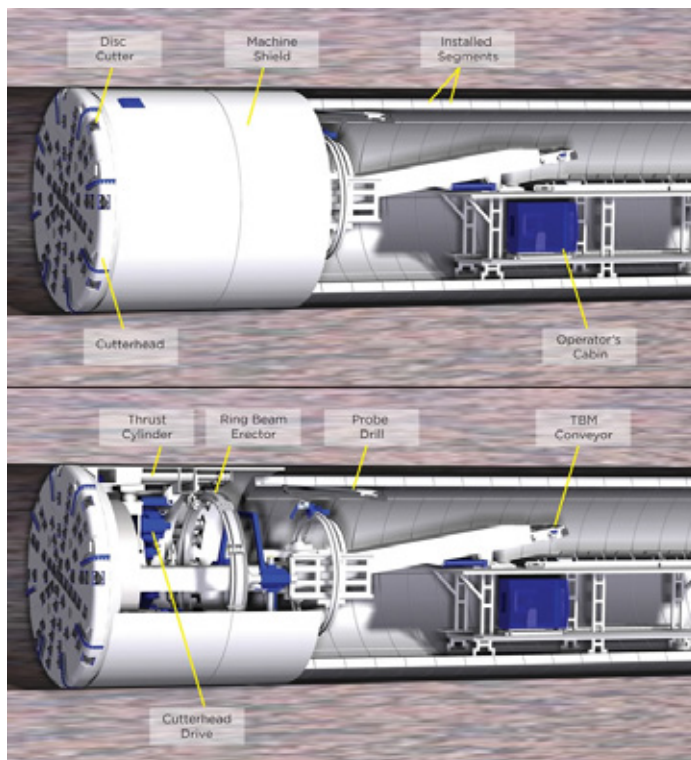
Reaksjonskraft for fremmating skaffes da ved hjelp av hydrauliske sylindre (Auxiliary cylinders) som trykker mot betongelementene, og matekraften føres videre gjennom matesylindrene (Thrust cylinders) til kutterhodet.

Denne formen for driving muliggjør ikke kontinuerlig sikring av tunnelen med betongelementer samtidig med boring, slik at operasjonen blir sekvensiell; 1) boring, 2) tilbaketrekking av matesylindre, 3) montering av betongelementer 4) boring.

Riggområdet ved drift med dobbeltskjold-TBM forventes større enn ved åpne TBMer. Dette skyldes i all hovedsak et større behov for mellomlagring av betongelementer nær tunnelåpningen.

Dobbeltskjold TBMer kan benyttes i hardt og kompetent berg til oppsprukket svakt berg. Normal drift med kontinuerlig montering av betongelementer og samtidig boring benyttes i berg med lav til moderat oppsprekking. Enkeltskjoldmodus benyttes i bergmasse med

lavere Q-verdier grunnet tett oppsprekking, eller i svake bergarter. Ved god bergmassekvalitet og harde bergarter uten krav til betonglining kan dobbeltskjold TBMer bore uten å bygge betongringer av elementer.



Figur 11: Skisse som viser oppbygging av enkskskjold TBM (The Robbins Company).

Ved bruk av enkskskjold-TBMer benyttes kontinuerlig betongelementer som bergsikring. Reaksjonskraft for fremmating skaffes ved hjelp av hydrauliske sylindre (Auxiliary cylinders) som trykker mot betongelementene og overfører matekraften til kutterhodet.

Enkeltskjold TBMer benyttes som regel i oppsprukket bergmasse hvor det benyttes betongelementer langs hele tunneltraseen.

Enkeltskjold-TBMer har lavere utnyttelsesgrad enn åpne og dobbeltskjold-TBMer. Dette skyldes at TBMen må vente med å bore inntil installasjon av en full betongelementring er ferdig.

Bergsikring

Generelt bør det nevnes at sikringsomfang er kraftig redusert i en boret berg-tunnel i forhold til en sprengt tunnel. Erfaringstall fra norske utbygginger viser en reduksjon av sikringsmidler på 40-90 % (vannkrafttunneler) i forhold til konvensjonell driving.

I TBM-drift omtales ofte bergsikring etter utstyrets plassering på TBM og bakrigg. Dette refereres gjerne til som L1-, L2- eller L3-området.

- Området like bak kutterhodet (L1)
- Området bak på TBM (L2)
- Området på bakrigg og/eller bakenfor (L3)

Sikringsmetoder tilgjengelig for de ulike TBM-typene er gitt under

Åpen TBM

- Bolting (L1, L2 eller L3)
- Forbolting (L1)
- Sprøytebetong (L1, L2 eller L3)
- Stålprofiler/ Stålbuer (L1 eller L2)
- Stålplater (Liner Plates) (L1)
- Armeringsnett (L1, L2 eller L3)
- Sonderboring og forinjeksjon (L1) (Eget kapittel)
- Etterinjisering (L2, L3)

På en åpen TBM foregår bolting med dedikerte boltehammere installert like bak maskinens takskjold og sidestøtter (L1). I dette området kan også ulike stålprofiler og/eller armeringsnett installeres.

Ved større TMB-diametre (>8m) vil det være mulig å installere en mindre sprøytebetongrobot i L1-området. Ved mindre diametre har man som oftest en sprøytebetongrobot i L2 og et noe enklere manuelt system i L1. Her finnes det spesialutviklede manuelle systemer og materialer med høy tidligfasthet og minimalt prelltap for bruk til lett arbeidssikring.

Enkelt og dobbelskjoldet TBMer

- Betongelementer (med eller uten pakninger) (L2)
- Forbolting (L1)
- Sonderboring og forinjeksjon (L1, L2)

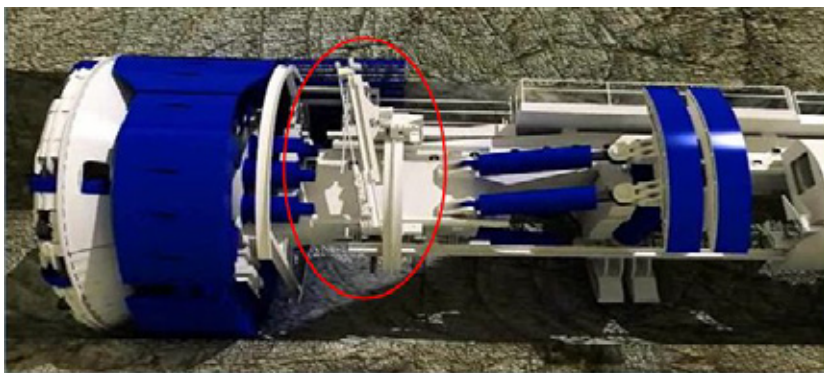
På en skjoldet TBM vil man ha en meget begrenset tilgang til berget og man benytter i prinsippet skjoldet som arbeidssikring og betongelementene som permanentsikring.

Utover dette kan man forbolte, sonderbore og forinjisere dersom forholdene tilsier det.

Sonderboring og forinjeksjon

Sonderboring og forbehandling av berget er på TBMer gjort med borhammere montert så nært borhodet som praktisk mulig. Avstanden mellom punktet hvor borstrengen går inn i bergveggen og frem til stuff er avhengig av hvilken TBM-type og diameter som benyttes. Boringen blir gjort gjennom utsparinger i skjoldet eller unntaksvis i kutterhodet.

Gode forundersøkelser, sonderboring og forbehandling (spiling/injeksjon) er den åpne TBMs metode for å håndtere innlekkasje og svakt berg. Generelt kan åpne TBMer tilpasses godt for forbehandling av berget, med borehammerene lokalisert like bak kutterhodet.



Figur 12 Plassering av borhammere på en åpen TBM. (The Robbins Company)

På en dobbelskjoldet maskin er borehammerene montert på en 360 graders ring plassert bak elementkranen. Dette fører til en ekstra hullengde på alle borhull på opptil 6-8 meter.



Figur 13 Plassering av borhammerne på en dobbeltskjold TBM (The Robins Company)

Det er ønskelig å unngå sonderboring gjennom kutterhodet. Dette skyldes problemer i forbindelse med tap av borestrengen og konsekvenser dette vil ha når TBMen skal bore i det samme området.

Generelt er metodikken ved sonderboring og forinjisering tilnærmet lik konvensjonell driving. Sonderboringshull kan bores med lengder på 25-40 meter. Ved systematisk sonderboring bør sonderhullene bores med en overlapp på 5-10m.

Basert på resultatene fra sonderhullene og en geologisk vurdering bestemmer man behov/størrelse på injiseringsskjermen. Injiseringhullene er gjerne boret med lengder på 20-30 meter med en overlapp mellom skjermene på 4-8m. Injiseringen foregår fra stasjonære plattformer i L1/L2-området.

Det finnes spesialtilpassede system for Measure While Drilling (MWD) for TBM, hvor man i tillegg til å ha vanlige MWD-analyser også ser på forhold mellom MWD-dataene og TBM-boringen for å kunne optimaliser driften.

Avstanden fra borkronenes påskråmingspunkt i bergveggen til kutterhodet fører til at man trenger lengre pakkerstenger enn i

konvensjonell drift. Dette for å hindre injeksjonsmassen i å trenge inn i tunnelen. Som en generell regel bør pakkeren være installert 1-2m foran stuff.

Produksjon og kostander

Generelt er produksjon og kostnader i mekanisert tunneldrift mer avhengige av geologi enn konvensjonell tunneldrift. Det betyr at kostander og byggetid kan øke betraktelig dersom geologien er mer utfordrende enn forventet. Det er derfor anbefalt å gjøre noe mer omfattende geologiske forundersøkelser enn ved konvensjonell drift.

Generelt vil produksjonen være avhengig av:

- Netto inndrift
- Boretid på maskinen

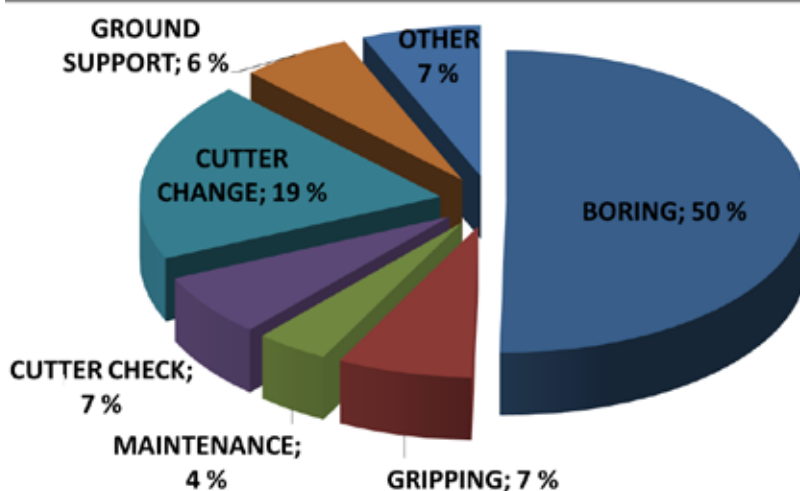
I dag finnes det forskjellige beregningsmodeller for vurdering av netto inndrift og kutterslitasje. En av de internasjonalt mest benyttede modellene er utviklet av NTNU/NTH. Den foreløpige siste versjonen av den empiriske modellen ble publisert av Prof. Amund Bruland i 1998.

Netto inndrift varierer mye i ulike bergarter, meget forenklet kan man forvente følgende inndrifter i ulike bergarter for ulike diametere ved moderat oppsprukket bergmasse:

Tabell 1 Oversikt over nettoinndrift i ulike bergarter

	Netto inndrift D= 3,5m	Netto inndrift D = 8m
Granitt	2-4 m/t	1-3 m/t
Fyllitt	2-6 m/t	2-4 m/t
Kalkstein	3-8 m/h	3- 7m/h

Boretiden på TBM vil variere noe med geologien, men generelt vil boretiden ligge på 30-50 % over hele prosjektet med en åpen maskin. Under er det gitt et eksempel på maskinutnyttelse i en vilkårlig uke (ikke snitt for hele tunnelen) på en åpen TBM i hardt berg.



Figur 14 Eksempel på utnyttelsesgrad for en åpen TBM ved en uke (The Robbins Company)

TBMene har generelt et stort potensial for høy produksjon med en effektiv drift og gunstige geologiske forhold. Dette er tydelig illustrert i verdensrekordene for produksjon gitt i Tabell 2.

Tabell 2 Produksjonsrekorder for åpne TBMer

Diameter	Beste dag (m)	Beste uke (m)	Beste måned (m)	Beste gjennomsnittelig månedsproduksjon (m/måned)
3-4 m	172	703	2066	1189
7-8m	116	428	1482	770
10-11m	49	235	892	715

Det er vanskelig å gå i detalj på kostander på TBM drift, da den vil være særdeles avhengig av prosjektspesifikke parametere som geologi, logistikk, entreprenør etc.

De kostandsdrivene parameterene må ses i sammenheng med byggetid (avskrivning, arbeidskraft), og er:

- Avskrivning på maskiner og utstyr
- Kuttere
- Reservedeler
- Logistikk
- Strømforbruk

- Arbeidskraft
- Rigg og drift

I tillegg kan bergsikring være en kostnadsdriver.

Siden avskrivning av maskinen er en av de viktigste kostnadsbærerne vil lengden på tunnelen ha stor betydning i kostnadsbildet.

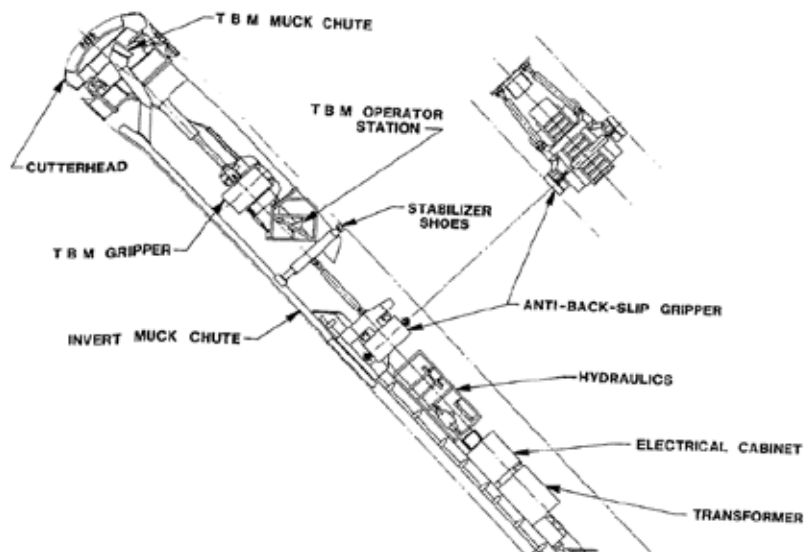
Fullprofilboring på stigning

I Norge har tunnelboremaskiner blitt anvendt for boring av trykksjakter for vannkraftverk. De mest vanlige løsningene for driving på stor stigning er:

- TBMer spesielt tilpasset for boring på stigning
- Stigortsboring (Raise boring)/pilothullsboring og opprømming
- Blindhullsboring

TBM med tilpasset grippere og bakriggssystem

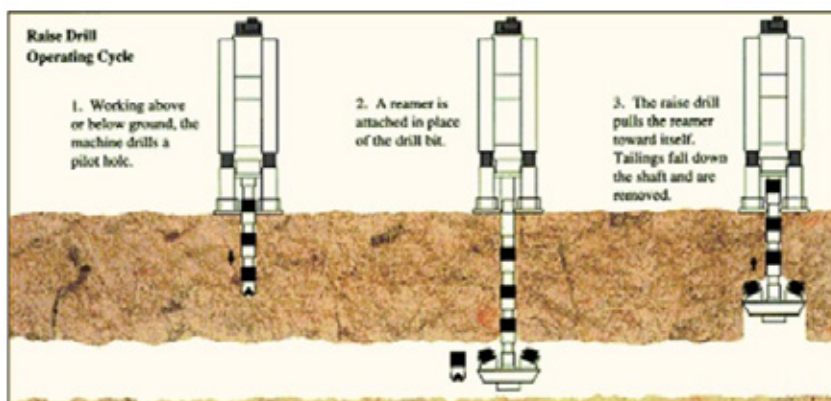
En standard åpen TBM kan uten større modifikasjoner bore på en stigning som ikke overstiger friksjonsvinkelen mellom maskin og berg. Dersom stigningen er større enn dette må det installeres en såkalt tilbakefallssikring og det må gjøres spesielle modifikasjoner på bakriggen. Det har blitt drevet sjakter opp til 45° stigning på denne måten. Figur 15 viser boring med TBM på stigning. Boring på stigning med TBM blir vanligvis benyttet ved trykksjakter og trykktunneler for vannkraft.



Figur 15. Boring på stigning med åpen TBM

Stigortsboring (Raise boring)

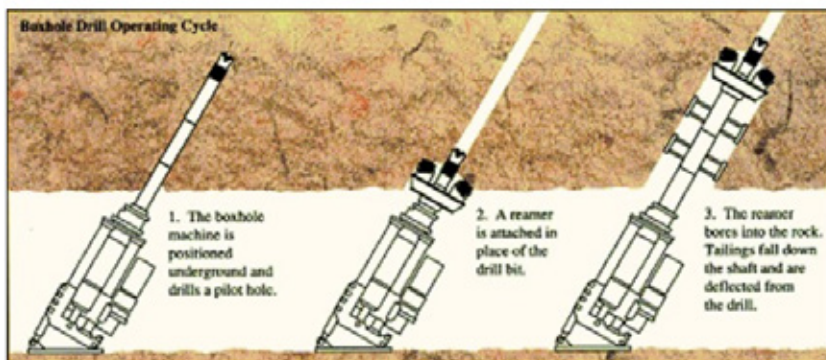
Ved denne metoden blir først et pilothull boret nedover. Deretter «opprømmes» pilothullet til ønsket diameter (0,6–7 m diameter) av et borhode som dras opp. Raise boring har en nøyaktighet på $\pm 1\%$ av lengden for vertikale hull og uten spesielt retningstyring. Metoden blir ofte benyttet til sjakter for generell infrastruktur, bekkeinntak og rørgater for vannkraft og sjakter i gruveindustrien.



Figur 16. Raise boring

Blindhullsboring (Box hole drilling)

Med denne metoden bores først et pilothull for så å skyve et borhode oppover den valgte linjen. Metoden blir ofte benyttet til de samme formålene som stigortsboring dersom man har begrenset adkomst på toppen av sjakten.



Figur 17. Boxhole boring

Massetransport

Massetransport i TBM-tunneler foregår i all hovedsak med transportbånd. Disse kan som regel håndtere stigninger på opp til 1:8 og kurver ned til 350m uten store modifikasjoner.

I tillegg til vanlige horisontale bånd (tunnelbånd) finnes det også:

- Vertikale transportbånd
- Bånd for spredning av boremasser på tipp
- Transportbånd fra tunnelportal til endelig deponi

Globalt ser man en trend til at transportbånd benyttes helt frem til endelig deponi.

For enkelte typer prosjekter må andre transportløsninger vurderes. Dette gjelder særlig prosjekter med:

- Små tverrsnitt
- Bratte stigninger (under massens friksjonsvinkel)
- Små kurveradiuser

Systemer som er tilgjengelige i markedet kan være skinnegang med tannhjuløsninger, gummihjulstransport eller spesialtilpassede transportbåndsystem.

TBMer for løsmasser

Det benyttes hovedsakelig to typer TBMer for driving av tunnel i løsmasser og svakt berg. Dette er:

- Earth Pressure Balance (EPB) TBM
- Slurry shield TBM

Disse maskinene benyttes også til å drive tunnel hvor en har berg og løsmasser i kombinasjon

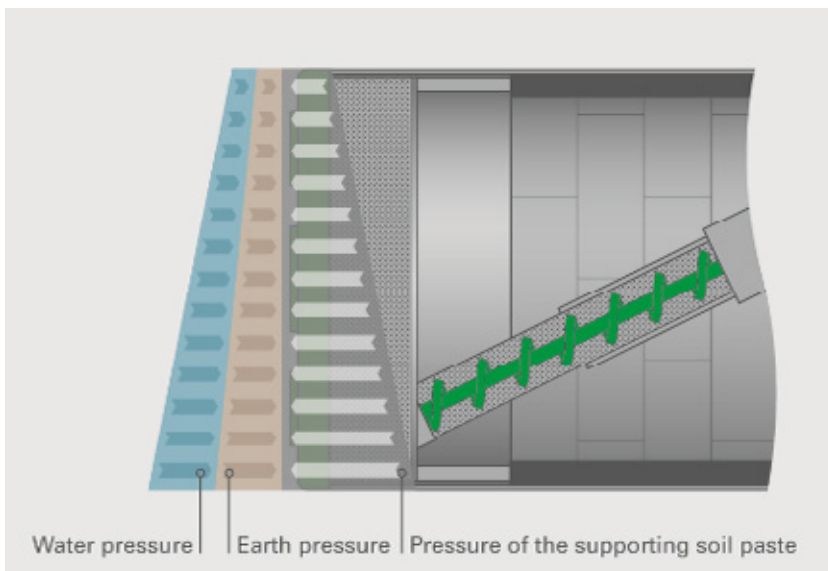
Generell teori

I motsetning til en TBM for hardt berg, hvor fokuset er å bryte berg, er fokuset for en løsmasse-TBM å stabilisere stuff og ta ut masse kontrollert for å unngå setninger på overflaten og kollaps av masser rundt tunnelen. Dette gjøres med å generere et mottrykk som tilsvarer jordtrykket for så å ta ut massen kontrollert. Dette krever at man skaper en mottrykks-propp som kan oppnås ved å:

- Regulere uttak av massen ved hjelp av en skruetransportør (EPB TBM)
- Opprette mottrykk ved hjelp av bentonitt (Slurry TBM)
- Lufttrykk

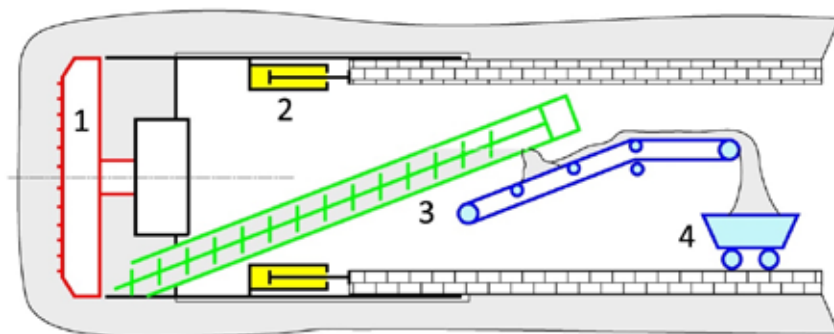
EPB-TBM (Earth Pressure Balance TBM)

I utgangspunktet egner TBM-drift med EPB-maskiner seg i løsmasser med lav permeabilitet som for eksempel siltholdig løsmasse, mens Slurry shield-TBMer egner seg bedre i permeable løsmasser. Bruk av additiver for å endre permeabilitet og reologi av løsmasser under driving har de siste årene ført til at EPB-maskiner kan bore i fleste typer løsmasser. Dette har ført til en markant økning i antall EPB-TBMer de siste 20 årene.



Figur 18 Prinsippskisse av balanse balansering av jordtrykk med skruetransportør (Herrenknecht)

EPB-konseptet baserer seg på at stoffen har samme jord- og vanntrykk som in-situ massen under driving. Dette sikres med å kontrollere mengden av materiale som transporteres gjennom skruetransportøren (se Figur 18). Balanseringen av trykket gjøres i et lukket kammer i kutterhodet. Tunnelen sikres med kontinuerlig montasje av betongelementer for å unngå kollaps av løsmasser eller svakt berg bak TBM-skjoldet. Fra skruetransportøren lastes massen over på maskinens transportbånd før det lastes videre på tunneltransportbåndet eller skinnegående vagger. Figur 19 viser hovedkomponentene til en EPB-TBM.



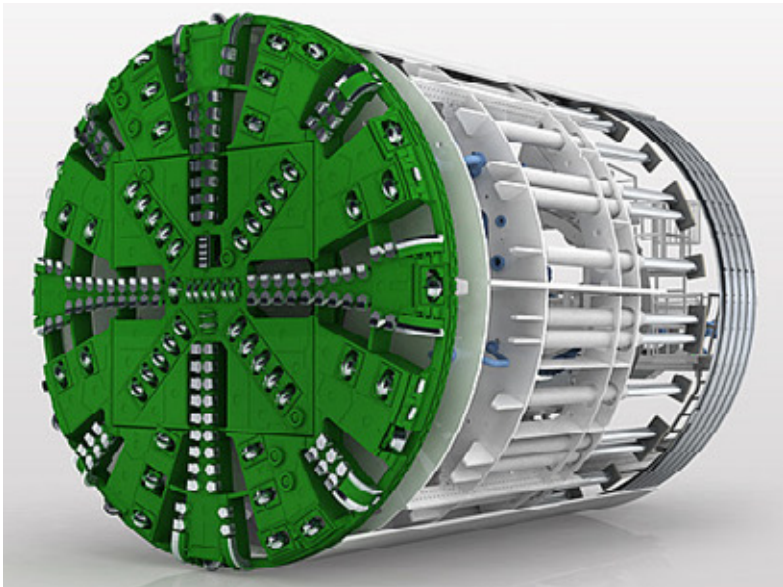
Figur 19: Skjematisk oversikt over EPB TBM (etter NFM-Technologies).

- 1) Roterende kutterhodet med verktøy
- 2) Hydrauliske jekker som skyver TBMen framover med mottrykk fra betongelementene.
- 3) Skruer som reduserer in-situ vann- og jordtrykk i fra EPB-kammer bak kutterhodet til atmosfærisk trykk
- 4) Transportbånd eller vogntransport av masser ut av tunnelen.

Utvikling av EPB-konseptet de siste 15 årene har gjort at teknologien kan benyttes i nærmest alle typer løsmasser. Dette oppnås ved riktig tilsetning av additiver som fillermaterialer for å endre permeabilitet, og/eller polymerskum og andre tilsetningsstoffer for reduksjon av adhesjon og pakking av bormasse under driving.

Ved god drift og logistikk kan det forventes utnyttelsesgrader på 30-40 % ved tunneldrift med EPB TBM. Nettoinndriften kan være meget høy (20-30 mm/kutterhodeomdreining) og begrenses da som regel av skruens kapasitet til å transportere material og samtidig holde trykket.

Slurry shield TBM

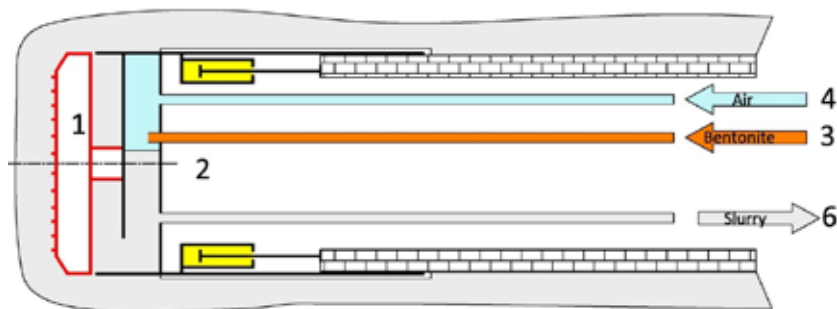


Figur 20 Slurry TBM (Herrenknecht)

Denne maskintypen ble utviklet for driving i utfordrende geologiske forhold under grunnvannstand. Slurry TBMer opprettholder trykket mot stoff ved hjelp av tilførsel av bentonitt. Innførselen av bentonitt og massetransport foregår gjennom et lukket rørsystem mellom overflaten og TBM.

Etter utviklingen som startet på 60-tallet, har mange av dagens slurry-TBM-er en luftboble bak kutterhodet i tillegg til trykksatt bentonitt for å stabiliserer stoffen. TBMene som bruker denne teknikken omtales med ulike benevnninger fra ulike leverandører.

Tunnelen sikres kontinuerlig med betongelementer, tilsvarende som ved bruk av EPB- og enkeltskjold-TBM. Massetransport foregår med hjelp av pumping av massen gjennom rør hele veien ut av tunnelen. Skjematisk oppbygging av slurry-TBMer med trykkluft er vist i Figur 21.



Figur 21: Skjematisk oversikt over slurry shield TBM (etter NFM-Technologies).

- 1) Roterende kutterhode med verktøy
- 2) hydrauliske thrust jacks som skyver TBMen i framover med mottrykk i fra betongringer
- 3) Trykksatt bentonitt som benyttes til stoffstabilisering
- 4) Trykkluft som føres inn i trykksatt kammer bak kutterhodet for å stabilisere stoff
- 5) Luftboble (ved bruk av luftboble omtales TBMen som Mixshield eller Bentonair® TBM)
- 6) Rør som transporterer ut utdrevet masse, vann og bentonitt.

I tillegg til hovedkomponentene som er vist, har slurry shield-TBMer et slurryseparasjonsanlegg (SSP = Slurry separation plant) i dagen. SSP består av sentrifuger og finsikter som skiller og resirkulerer bentonitt fra den utdrevne massen. Resirkulering av bentonitt blir vanskelig gjort av høyt finstoffinnhold og det kan være nødvendig med tilsetning av fersk bentonitt. Dette kan i noen tilfeller utgjøre så mye som 25% av drivekostnaden for en tunnel.

Ved god drift og logistikk kan det forventes utnyttelsesgrader på 30-40 % ved tunneldrift med slurry shield-TBMer. Netto inndrift kan være meget høy (20-30 mm/kutterhodeomdreining) og begrenses da av slurrysystemets kapasitet på rensing og retur av bentonitt. Driving av tunneler med slurry shield-TBM er mulig i diametere fra omkring 0,5 m (pipe-jacking) til 18 m.

Slurry shield-TBM var tidligere den meste brukte teknologien for driving av tunneler med TBM i løsmaser. Generelt er EPB-tunneldrift billigere enn tunneldrift med slurry-TBM. Dette skyldes høye kostnader ved bruk og resirkulering av bentonittslurry.

Kombinasjonsmaskiner (Multimode TBM)

De siste årene har de blitt en stadig større press for å gjennomføre prosjekter som ikke har vært mulig å drive tidligere grunnet dårlige geologiske forhold. Dette har spesielt vist seg på tunneler som dels går i hardt fjell og dels i løsmasser. Dette har ført til en utvikling av kombinasjonsmaskiner som kan bore både i hardt berg og løsmasser med relativt små tilpasninger.

De mest vanlige versjonene av disse er;

- Slurry/ Hard rock TBM (eks. Hallandsås)
- EPB/ Hard Rock TBM

Begge disse versjonen består av et kutterhode hvor man kan bytte ut løsmasseverktøyene med diskkuttere i de ulike posisjonene. Generelt kan man operere med løsmasseverktøy i masser med en trykkfasthet opp til ca. 20 MPa. Om deler av tverrsnittet består av materiell hardere enn dette må man installere diskkuttere på deler eller hele kutterhodet.

Som nevnt over benytter en slurry-TBM et lukket rørsystem for uttransport av masse. Et slikt rørsystem vil bli påført høy slitasje i moderat til harde bergarter og man må derfor gå over i berg-modus, som inkluderer transportbånd under slike forhold.

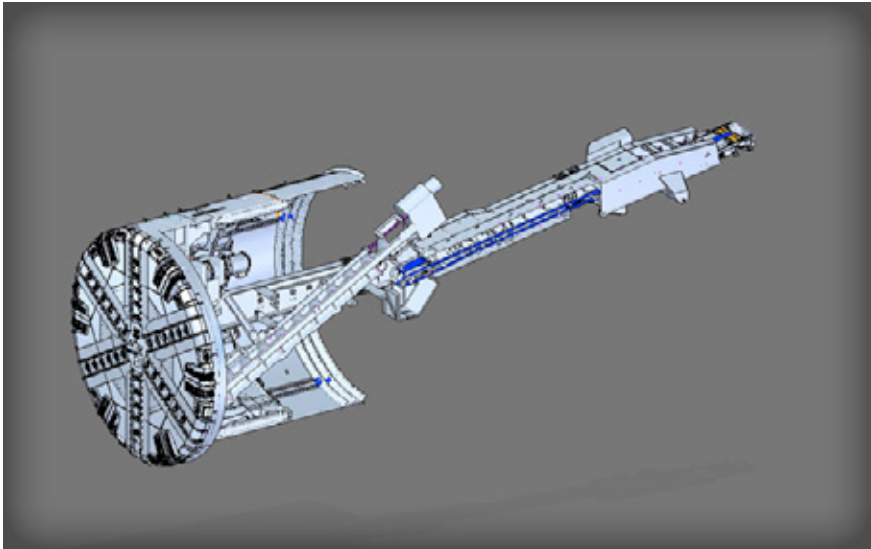
Dette fordrer at man må ha to separate systemer for massetransport.



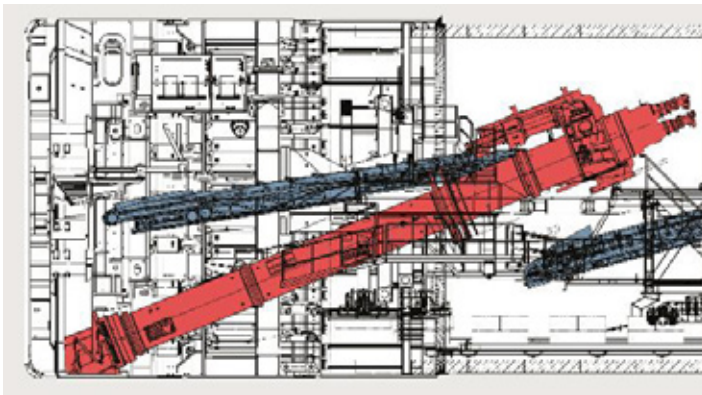
Figur 22 TBM som boret Hallandsås i Sverige er en kombinasjonsmaskin (Slurry/Enkeltskjold)

En EPB/Hard rock TBM har en skrue installert og kan operere som en standard EPB-maskin, hvor skruen laster over på et transportbånd.

For å skifte til hard rock-modus bytter man ut skruen til et transportbånd. Siden man benytter den samme massetransporten i tunnelen vil dette være en mindre og billigere operasjon enn på en Slurry/Hard rock-TBM.



Figur 23 Eksempel på kombinasjons TBM (Enkeltskjold / EPB) fra Robbins



Figur 24; Kombinasjonsmaskin (EPB/Singel shield) fra Herrenknecht

Mikrotunneldrift

Mikrotunneldrift omfatter opprinnelig fullprofilboring av tunneler med mindre diameter enn 1000 mm. På grunn av utvikling i mikrotunneldrift, er det nå mulig med større diameter enn 1000 mm, og derfor er også begrepet utvidet. Noen maskinleverandører benytter begrepet microtunneldrift opp til 4000 mm diameter.

Fullprofilboring ved mikrotunneldriving blir i hovedtrekk gjort med mindre versjoner av de tidligere beskrevne TBMen for løsmasser og berg. Valg av mikrotunnelboremaskin skjer ut fra grunnforholdene på det enkelte prosjekt.

Løsmasse-maskiner

Slurryshield-MicroTBM (mikrotunnelboremaskin) benyttes mest i grove/granulære løsmasser, men kan også benyttes i kohesive løsmasser og til og med i berg. Maskinen har en diameter mellom 400 og 4000 mm. Maskinen kan benyttes ved høyt grunnvannstrykk og har blitt drevet med en lengde opp til 2,5 km. Maskinene kan designes med kutterhode som har både verktøy for løsmassedriving og bergbryting med diskcuttere. For diametere mindre enn ca. 2 m skyves MTBMen fremover ved hjelp av rørpressing.

Earth Pressure Balance shield (EPB-MicroTBM) benyttes mest i kohesive løsmasser, og har en diameter mellom 1400 og 4000 mm. EPB-MTBM tunneler har blitt drevet med en lengde opp til 2,5 km. For diametere mindre enn ca. 2 m skyves MTBMen fremover med hjelp av rørpressing.

Auger-bormaskiner

Auger boring er en metode for å drive tunneler med en diameter mindre enn 1400 mm. Diameteren på en Auger-MTBM kan komme helt ned til 250 mm. Metoden kan benyttes ved tunneldriving gjennom kohesive løsmasser, som er mindre enn 3 meter under grunnvannsstand, og ved tunnellengder opp til 150 meter, som kan være aktuelt i stedet for å grave grøfter. Ved en Auger-MTBM transporteres massene ved en innmatingskrue, som i en EPB-maskin. En Auger-MTBM kan imidlertid ikke regulere trykket ved stuff med

innmatingsskruen, slik en EPB-maskin kan. Matekraften for drivingen gjøres ved rørpressing, som er en metode som vil bli beskrevet i et eget avsnitt som omhandler metoden.

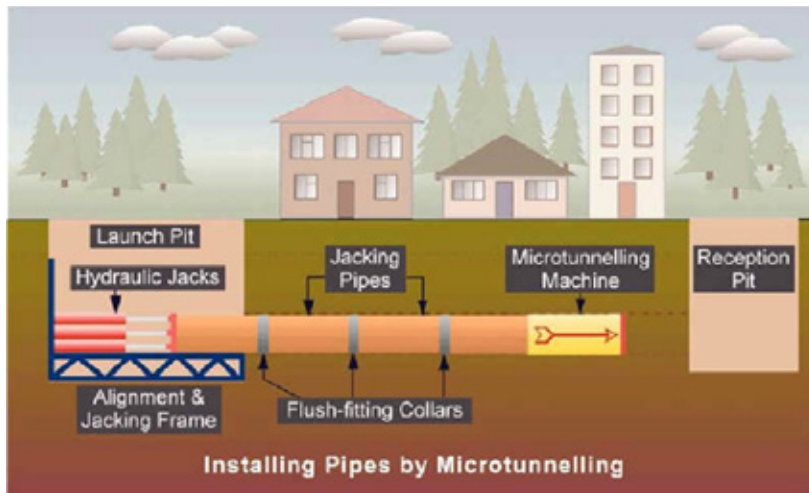
Maskiner for hardt berg

I de senere årene har det kommet TBMer med diameter ned til 600 mm som kan drive gjennom hardt berg. Maskinene består av et kutterhode med diskkuttere, som monteres på en Auger-boremaskin, slik at massene kan bli uttransportert av Augerskruen. Matekraften og dreiemomentet kommer fra Auger-boremaskinen. Ved denne metoden kan man bore opp til 150 meter lange tunneler i berg. I harde og abrasive bergarter begrenses metoden ved kutterlevetid, da kutterbytter ikke er mulig under jord grunnet liten tunneldiameter.

Ved diametere over 1200 mm kan det benyttes en TBM med motorisert borhode, så dreiemomentet kommer fra TBMen. Matekraften for drivingen kommer fra en jekkeramme som ved hydrauliske jekker presser rørsegmenter inn bak borhodet. Metoden kalles rørpressing og vil bli forklart i et eget avsnitt. Ved denne metoden kan man bore opp til 300 meter lange tunneler (dersom kutterbytter er mulig underjord) i berg med trykkfasthet (UCS) mellom 25-175 MPa.

Ved diametere større enn 1350 mm er det mulig å benytte enkel- og dobbeltskjold TBMer. Enkeltskjold TBMer i denne størrelsen får matekraften ved å presse mot betongelementer som er montert bak skjoldet, eller ved rørpressing. Dobbeltskjold TBMer i denne størrelsen får matekraften fra grippere på TBMen, og det er derfor ikke nødvendig med betongelementer for matekraften. Både enkel- og dobbeltskjold TBMer i denne størrelsen kan bruke transportbånd massetransport. Denne metoden brukes ofte for tunnellengder over 300 meter.

Rørpressing



Figur 25. Illustrasjon over rørpressingsprosessen

Uavhengig av mikro-TBM-valg beskrevet over, er rørpressing den mest vanlige metoden for fremdrift i forbindelse med mikrotunneldriving

Prosessen ved rørpressing gjøres på følgende måte:

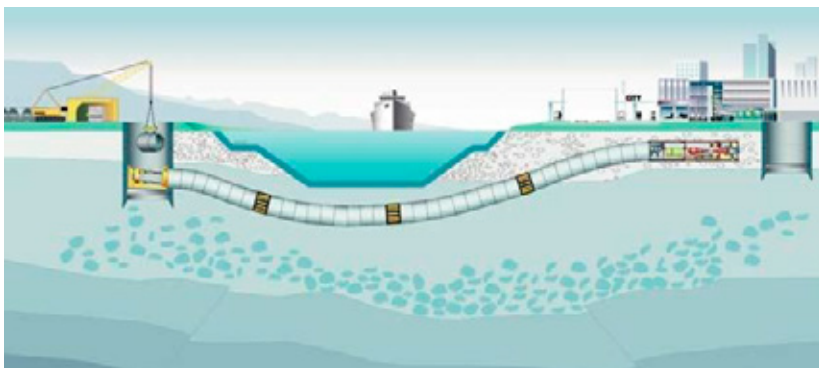
1. En sjakt etableres, med solid støtte for jekke-rammen.
2. Når jekke-rammen er på plass, senkes rørsegmenter ned i rammen. Rørsegmentet blir en del av borstrengen som skyver tunnelskjoldet fremover.
3. En mottakssjakt etableres der tunnelen ønskes avsluttet, eller eventuelt hvor man har etablert enda en stoff. I mottakssjakten heises tunnelskjoldet opp.

Fordi rørsegmentene brukes som borstreng, øker krefter grunnet friksjon etter hvert som element-strengen blir lengre. En utfordring som da oppstår, er jekkerammens trykkraft, og rørsegmentenes kapasitet for å ta opp dette trykket. For å håndtere dette pumpes bentonitt ut gjennom element-strengen. Bentonitten sikrer jevn belastning fra jordtrykk, reduserer potensiale for setninger og reduserer friksjonskrefter mellom jord og betongelementer. For lange tunneler benyttes det jekkestasjoner for hver 200-300 m langs

tunnelen. Rørpressingen baserer seg da på å drive 200-300 m av tunnelen i seksjoner, slik at trykkrefter fordeles over kortere strekk.

Rørpressing som metode blir ofte brukt ved:

- Vann- og avløpsledninger
- Olje- og gassledninger
- Føringer av elektriske- og telekommunikasjonskabler
- Fjernvarmerør



Figur 26 Illustrasjon over rørpressingsprosessen med jekkestasjoner (intermediate jacking station)

Rørpressing og mikrotunneldrift er ofte i en konkurranse med å etablere åpne grøfter. Følgende argumenter taler i noen prosjekter for bruk av rørpressing:

- Mindre forstyrrelse for naboer, infrastruktur og næringsaktivitet på overflaten
- Sikrere metode med tanke på SHA, både fordi færre folk jobber nede i byggegropen (mye av arbeidet kan gjøres automatisk utenfor gropen)
- Mindre masser som må kjøres bort, som fører til en økonomisk og miljømessig gevinst
- Kortere byggetid
- Mindre risiko for setningsskader på omkringliggende bygninger ved tunneldriving under grunnvannsstand.

Valg av drivemetode, boring og sprenging versus TBM

Beslutningsfaktorer

Macias og Bruland (2014) har studert omkring 40 artikler og rapporter som omhandler valg av drivemetode for tunnel. Resultatene som presenteres av Macias og Bruland (2014) identifiserer 12 grupper med parametere som er med på å bestemme tunneldrivingsvalg:

1. Prosjektdesignkriterier
 - 1.1. Geometri og kurvatur
 - 1.2. Tverrsnitt/tunnelstørrelse
 - 1.3. Tunnellengde
 - 1.4. Mobilisering og riggtid
2. Bruk av tunnelen
 - 2.1. Kan sirkulært tverrsnitt benyttes
3. Helse, miljø og sikkerhet
 - 3.1. Lagring og håndtering av eksplosiver
 - 3.2. Bergsikring og sikkerhet under installering av dette
 - 3.3. Arbeidsmiljø (luft, støv)
4. Inndrift
5. Fleksibilitet
 - 5.1. Fleksibilitet ved driving gjennom svakt berg
 - 5.2. Fleksibilitet med endring av kurvatur og geometri
6. Geologisk risiko og endring i bergmasse
7. Stabilitet
 - 7.1. Massestabilitet under driving
 - 7.2. Vannlekkasjehåndtering
 - 7.3. Bergspenninger og stabilitet
 - 7.4. Omfang av nødvendig bergsikring
8. «Arbeidskraft» og tilgjengelighet
9. Kostnader
 - 9.1. Design og prosjekteringskostnad
 - 9.2. Investering i utstyr
 - 9.3. Atkomstkostnader
 - 9.4. Drivekostnader
10. Overmasse og støping med betong
 - 10.1. Konturkvalitet

- 10.2. Betongmengder for liningstøp eller tykkelse på elementer
- 11. Miljøpåkjenninger
 - 11.1. Støy og vibrasjoner
 - 11.2. Miljøpåkjenning (CO₂ ekvivalenter eller tilsvarende)
 - 11.3. Sprenggasser
- 12. Adkomst til anlegg (vegløst, anleggsveg o.l.)

Slike lister kan benyttes i en prosess ved valg av drivemetode, men bak punktene ligger det subjektive betraktninger som er vanskelig å tallfeste/kvantifisere. Mange av parameterne i de ulike gruppene er også avhengig av hverandre, noe som gjør kvantifisering mer komplisert.

Fordeler og ulemper

Det vil alltid være en vurdering av fordeler og ulemper ved vurdering av bruk av TBMer og man finner det hensiktsmessig å antyde typiske fordeler og ulemper med metoden:

Generelt

- TBM-metoden forutsetter mer omfattende, grundigere og delvis andre typer geologiske forundersøkelser og kartlegging enn for konvensjonell drift.
- Planlegging/vurdering av TBM som metode må inn i en tidlig fase av prosjektet bl.a. mht. trasevalg og tverrslagsreduksjoner.
- Bergmassen har annen anvendelsesområde pga. nedknusing og høyere finstoffinnhold. Avhengig av bergartens kvalitet, kan boremassen ved sortering og kubisering brukes til en rekke industrielle formål, som f.eks. betong bl.a. i betongelementer i forb. med skjoldmaskindrift

Fordeler

- TBM-boringen påvirker og skader berget i mindre grad enn konvensjonell drift, dette fører normalt til lavere sikringsomfang.
- Tverrsnittet på vannoverføringstunneler boret med TBM kan reduseres til ca. 2/3-deler av sprengt tverrsnitt grunnet redusert falltap.
- Bergsikringen utføres fra beskyttet område i maskinen og man arbeider sjeldent under usikret berg.
- Man kan normalt drive lengere tunneler uten tverrslag pga. redusert ventilasjonsbehov og høyere produksjon. Dette kan redusere antall tverrslag/arbeidssteder.
- Mindre støy og rystelser fører til mindre innvirkning på det ytre miljø.
- Forbedret arbeidsmiljøet i tunnelen, med kraftig reduksjon av gasser fra sprengning i tunnelen, reduksjon av dieselvagasser og økt SHA (Redusert trafikk i tunnel og mindre sprengning).
- Komplementerende arbeid kan foregå i tunnelen under alle sykluser av tunneldrivingen. Dette muliggjør f.eks. legging av veibane i L3-området.
- TBMer drives med elektrisk kraft, som kan gi et gunstig miljøregnskap.

Ulemper

- Større investeringsbehov i utstyr.
- En mer omfattende mobilisering enn for konvensjonell driving.

- Normalt lengre leveringstid på utstyr.
- Mindre fleksibilitet rundt tunnelprofil og –diameter.
Vanskeligere å justere og tilpasse tverrsnitt og linjeføring underveis i prosjektet. (Bl.a. Nisjer, grentunneler, etc.)
- Sirkulært profil kan i utgangspunktet være mindre hensiktsmessig for noen formål.
- Det kreves kraftigere strømforsyning til TBM-drift enn ved konvensjonell drift.

Oppsummering

Teknisk rapport Nr. 17 gir en innføring i ulike TBM-konsepter som kan benyttes for å bore tunneler i varierende grunnforhold.

Norsk TBM-historie går over en 40-års periode som startet på midten av 1960 tallet. Frem til 1992 ble det boret en rekke tunneler i Norge. Deretter utførte norske entreprenører flere prosjekter med TBM i utlandet før denne aktiviteten stoppet helt opp i 2005. Med TBM som drivemetode på Røssåga kraftverk borer vi atter tunnel i Norge.

Mekanisert tunneldrift har i mellomtiden hatt en rivende teknisk og kommersiell utvikling. Produsenter leverer maskiner for stort sett alle behov. Så langt og målt mot diameter varierer størrelsen fra mindre enn 1 meter til ca. 17 meter. Markedsmessig er utviklingen bemerkelsesverdig med utstrakt bruk av TBM over hele verden.

Det blir en betydelig TBM-virksomhet i Norge de nærmeste årene.

Referanser

ASFINAG.Bilder og informasjon om Pfänder tunnel i Østerrike.
<http://www.asfinag.at/en/unterwegs/verkehrssicherheit/sicherheitsmassnahmen/tunnelsicherheit>

Bruland (1998), "Hard Rock Tunnel Boring vol 3 of 10. Advance Rate and Cutter Wear". NTNU project report 1B-98.

Burger, W. (2010). "TBM Development And Application Over The Last 20 Years." NFF TBM seminar Bergen.

Bøhn, I. (1920). Tunneling Machine. U. S. P. Office. USA. 1,328,118.

Bruland (1998), "Hard Rock Tunnel Boring vol 3 of 10. Advance Rate and Cutter Wear". NTNU project report 1B-98.

Burger, W. (2010). "TBM Development And Application Over The Last 20 Years." NFF TBM seminar Bergen.

Bøhn, I. (1920). Tunneling Machine. U. S. P. Office. USA. 1,328,118.

«Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln, 2003».

Hansen, A., (2010) «TBM vs D&B – Pros and Cons – Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk». Lastet ned i fra www.nff.no 4.3.2014.

Home, L. (2010). "Trends in the use of TBMs worldwide." Presented at NFF TBM seminar Bergen.

John, M., Pilser, G. (2011). "Criteria for selecting a tunnelling method using the first and the second tube of the Pfänder tunnel as example. –Geomechanics and Tunnelling. DOI: 10.1002/geot.201100030

Macias, F. J. and A. Bruland (2014). "D&B versus TBM: Review of the parameters for a right choice of the excavation method." EUROROCK Conference, Vigo Spain.

Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M. and Sturge, D. (2008). Hardrock Tunnel Boring Machines, John Wiley & Sons

Maidl, B., Herrenknecht, M. and Anheuser, L. (1996). Mechanised Shield Tunnelling, Wiley.

NFF. "Norwegian TBM Tunnelling

NFF, Ed. (1998). TBM Tunnelling. NFF publication 11. http://nff.no/wp-content/uploads/2014/01/Publication_11.pdf

Herrenknecht. Misc figures downloaded from <http://www.herrenknecht.com>

Kovari, K., Descoedres, F., Tunnelling Switzerland. Swiss Tunnelling Society 2001.

NFM Technologies Misc figures downloaded from <http://www.nfm-technologies.com/-Underground-work-.html>

Robbins, D. (2013). "A Tradition of Innovation - The Next Push for Machine Tunnelling." Muir Wood Lecture ITA-Aites
The Robbins Company

The Robbins Company. Misc figures downloaded from <http://www.therobbinscompany.com/>

Varley, P. (1992). From Charing Cross to Baghdad - A History of the Whitaker Tunnel Boring Machine and the Channel Tunnel.





Håndbøker fra NFF

- Nr. 1: Fjellinjeksjon. Praktisk veiledning i valg av tettestrategi og injeksjonsopplegg. (kr 200,-)
- Nr. 2: Engineering Geology and Rock Engineering. NBG (kr. 500,-)
- Nr. 3: Arbeidsmiljø under jord. (kr. 200,-)
- Nr. 4: Håndbok for skytebas. (kr. 200,-)
- Nr. 5: Tung bergsikring i underjordsanlegg (kr. 200,-)
- Nr. 6: Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg (kr. 200,-)
- Nr. 7: Håndbok for bestiller av bergsprengningsarbeid (kr. 200,-)
- Nr. 8: Håndbok for utfører av bergsprengningsarbeid (kr. 200,-)

Tekniske rapporter fra NFF (kr. 100,- pr. stk)

- Nr.01: Redningskammer for underjordsdrift
- Nr.02: Diesel under jord. Sluttrapport fra forprosjektet.
- Nr.02E: Diesel Underground – a project report.
- Nr.03: Sikker sprengning i dagen.
- Nr.04: Plastmaterialer i tunneler og bergrom – sikker håndtering i anleggsfasen.
- Nr.05: - Informasjon, takk! Råd og tips om kommunikasjon i en anleggshverdag.
- Nr.06: Sikker boring gjennom sylte.
- Nr.07: Diesel under jord
- Nr.08: Sikkerhet ved berginjeksjon
- Nr.09: Behandling og utslipp av driftsvann fra tunnelanlegg
- Nr.10: Rescue chamber for underground work. Translation of technical report 1
- Nr.11: Nøyaktig boring
- Nr.12: Konturkvalitet i sprengte tunneler
- Nr.13: Ventilasjon ved tunneldrift
- Nr. 14: Gruvedrift under jord
- Nr. 15: Støy fra bygge- og anleggsvirksomhet
- Nr. 16: Anbefalte retningslinjer for utarbeidelse av miljøbudsjett og miljøregnskap for tunneller
- Nr. 17: Kort innføring i bruk av TBM

Norwegian Tunneling Technology

- No. 1: Hard Rock Tunnelling
- No. 2: Tunnelling Technology
- No. 3: Hydropower Tunnelling
- No. 4: Road Tunnelling
- No. 5: Tunnelling Today
- No. 6: Geology of Norway (a map)
- No. 7: Tunnelling Reviewed in the International Press
- No. 8: Subsea Tunnelling
- No. 9: Underground Storage
- No. 10: Urban Tunnelling
- No. 11: Hard Rock TBM Tunnelling
- No. 12: Water Control Tunnelling
- No. 13: Health and Safety in Norwegian Tunnelling
- No. 14: Norwegian Tunnelling
- No. 15: Sustainable Underground Concepts
- No. 16: Underground Constr. for the Norwegian Oil and Gas Industry
- No. 17: Underground Openings - Operations, Maintenance and Repair
- No. 18: Subsea Tunnels
- No. 19: Rock Support in Norwegian Tunnelling
- No. 20: Rock Mass Grouting
- No. 21: Contracts in Norwegian Tunnelling
- No.22: Norwegian Hydropower Tunnelling II
- No.23: Norwegian Tunnelling Technology

Fjellsprengningsdagen (Høstkonferansen)

En årlig konferansebok som er kommet fortløpende ut siden 1963.(Flere årganger er utsolgt).

Publikasjoner kan bestilles hos: NFF, Postboks 626, NO-1303 Sandvika. E-post: nff@nff.no



REPRESENTERER FAGKUNNSKAP INNEN

- Bergsprengning og masseflytting
- Tunnel teknologi
- Bergmekanikk og Ingeniørgeologi

FJELLSPRENGNINGSFORENINGEN

AVGJØRENDE FOR FORUNDERSØKELSER, PLANLEGGING OG GJENNOMFØRING AV

- Fjellarbeid generelt, produksjon av knust berg og mineraluttak
- Vegbygging
 - I dagen
 - Under jord
- Vannkraftutvikling med
 - Stasjonshaller
 - Overføringstunneler
 - Trykksjakter
 - Damanlegg
- Oljeprosjekter
 - Planering for landanlegg
 - Landfall av rørledninger
 - Produktlager for olje og gass
- Grunnarbeid for hus og industri
- Idrettsanlegg, lager, parkeringsanlegg i fjell, og mye mer.....

www.nff.no



**NORSK FORENING FOR
FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK**

e-post: nff@nff.no

ISBN 978-82-92641-34-7