

# Bruk av TBM til driving av vegtunneler i Norge

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 324



**Tittel**

Bruk av TBM til driving av vegtunneler i Norge

**Undertittel****Forfatter**

Pål Drevland Jakobsen og Mari Lie Arntsen

**Avdeling**

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

**Seksjon**

Tunnel og betong

**Prosjektnummer****Rapportnummer**

Nr. 324

**Prosjektleder**

Arild Neby

**Godkjent av**

Arild Neby

**Emneord**

Tunnelboremaskin, TBM, tunnel, vegtunnel,

**Sammendrag**

Denne rapporten er utarbeidet for å se på mulighetene for å bruke fullprofil tunnelboremaskin (TBM) for driving av vegtunneler i Norge. Rapporten belyser mulig bruk av TBM og kriterier for valg av TBM kontra konvensjonell tunneldrift, inkludert en grov sammenligning av kostnader mellom de to metodene. Rapporten ser også på muligheter for å etablere veg i det sirkulære tunnelprofilen som TBM-er etablerer.

**Title**

Excavation of road tunnels with TBMs in Norway

**Subtitle****Author**

Pål Drevland Jakobsen and Mari Lie Arntsen

**Department**

Traffic Safety, Environment and Technology Department

**Section**

Tunnel and Materials Technology

**Project number****Report number**

No. 324

**Project manager**

Arild Neby

**Approved by**

Arild Neby

**Key words**

Tunnel Boring Machines, TBM, tunnels, road tunnels,

**Summary**

This report is prepared to evaluate the possibilities of utilising full face tunnel boring machines (TBMs) for excavation of road tunnels in Norway. The aim of the report is to present TBM technologies, criteria for choosing TBM or drill and blast as the excavation method and how to establish a road inside a circular tunnel cross-section. A rough cost comparison between tunnelling with TBM and drill and blast is included in the report.

# Bruk av TBM til driving av vegtunneler i Norge

---

Pål Drevland Jakobsen og Mari Lie Arntsen

## Forord

Denne rapporten er utarbeidet for å se på mulighetene for å bruke fullprofil tunnelboremaskin (TBM) for driving av vegtunneler i Norge. Rapporten belyser mulig bruk av TBM og kriterier for valg av TBM kontra konvensjonell tunneldrift, inkludert en grov sammenligning av kostnader mellom de to metodene. Rapporten ser også på muligheter for å etablere veg i det sirkulære tunnelprofilen som TBM-er etablerer.

Det er hentet en del erfaringer om bruk av TBM til vegtunneler fra andre land: Mange erfaringer er hentet i fra publiserte kilder og referert til. I tillegg har erfaringer blitt høstet fra Johannes Gollegger (Jernbaneverket og Amberg) om Follo-banen og tunneler i Østerrike og Sveits, fra Bjørnar Gammelsæter, Rune Rake og Thor Stenersen (Jernbaneverket) om prosessen om å velge TBM versus boring og sprengning for Follobanen. Hans-Egil Larsen (Jernbaneverket) har vært behjelpelig med å dele informasjon om Ulriken jernbanetunnel i Bergen. TBM-leverandørene the Robbins Company (Sindre Log og Lok Home) og Herrenknecht (Lutz Zur Linde og Coni Scheifele) har vært behjelpelig med å finne informasjon om TBM-teknologi og gitt tillatelse til å bruke figurer.

I tillegg til de overnevnte, rettes en stor takk til Jan-Eirik Henning og Kjartan Hove (Statens Vegvesen) og Arnulf Hansen for kommentarer til rapporten.

## Innhold

Forord.....	i
1 Introduksjon.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Begreper og definisjoner .....	3
2 Kriterier for valg av tunneldrivemetode .....	6
2.1 Valg av drivemetode i aktuelle norske tunneler .....	7
3 Grunnforhold og valg av TBM .....	9
3.1 Forundersøkelser ved bruk av TBM.....	9
3.1.1 Q-verdi og $Q_{TBM}$ .....	10
3.1.2 NTNUs prognosemodell for TBM drift.....	12
3.2 TBM-teknologi for berg .....	13
3.2.1 Gripper TBM-er for hardt berg .....	13
3.2.2 Dobbelt skjold-TBM .....	16
3.2.3 Enkelt skjold-TBM.....	18
3.3 TBM-teknologi for løsmasser, svakt berg og kombinasjoner av berg og løsmasser.....	19
3.3.1 Earth Pressure Balance (EPB) TBM .....	20
3.3.2 Slurry shield TBM .....	22
3.4 Valg av vanntetting for boret tunnel .....	24
4 Utnyttelse av boret tverrsnitt til vegformål .....	26
5 Driving av nisjer og alternativer .....	32
6 Kostnader for driving av tunneler med TBM .....	35
6.1 Total tunnelbyggekostnad med TBM.....	35
6.2 Erfaring fra kostnadsestimering Follobanen .....	38
6.3 Erfaring anbudsprosess og kostnader for Ulriken jernbanetunnel .....	40
7 Vurderinger og videre arbeid.....	41
Referanser .....	43
Vedlegg .....	45
Vedlegg 1: Sirkulære tunneltverrsnitt med kjøreboks .....	45
Vedlegg 2: Drivekostnader med TBM og forenklet oversikt over anleggsperiode.....	49

## 1 Introduksjon

Denne rapporten er utarbeidet for å se på mulighetene for å bruke TBM for driving av vegtunneler i Norge. Rapporten tar sikte på å belyse mulig bruk av fullprofilboring, kriterier for valg av TBM kontra konvensjonell tunneldrift, og hvordan etablere veg i det sirkulære tunnelprofilen som TBM-er etablerer.

Videre presenterer rapporten ulike TBM-teknologier for ulike grunnforhold. I rapporten drøftes også aktuelle endringer og tilpasninger i Vegvesenets normaler for eventuell bruk av TBM. Rapporten viser også til grove kostnadsoverslag gjennom erfaringstall for tunneler drevet med TBM. Rapporten omfatter tunneldrift både hardt berg og løsmasser.

Innholdet i rapporten er begrenset til å presentere erfaringer som er publisert gjennom litteratur. I tillegg er det blitt avholdt noen samarbeidsmøter med Jernbaneverket og deres konsulenter omkring bruk og valg av TBM til norske jernbaneprosjekter.

### 1.1 Bakgrunn

Det er i dag (2014) omkring 250 km fullprofilboret tunnel i Norge. Mesteparten av dette er vannkrafttunneler som ble boret på 80-tallet. Fra 2013 ses en liten renessanse for bruk av tunnelboremaskiner (TBM) i Norge. Røssåga vannkraftprosjekt bores delvis med TBM og Follobanen er prosjektert boret med TBM. Ulriken jernbanetunnel ble beskrevet som TBM eller boring og sprengning i anbudet, hvor en kombinasjon av kostnad og kvalitet førte at TBM ble valgt av byggherre som drivemetode. I tillegg har Statens vegvesen region Vest utarbeidet en rapport om bruk av TBM til fremtidige norske tunneler (Gjæringen 2008) Når disse prosjektene er ferdig boret vil Norge ha økt sin totale mengde fullprofil boret tunnel i fra 250 km til ca. 300 km.

Utvikling av fullprofilboringsteknologi startet tidlig på 1800-tallet. Det har siden da vært en signifikant utvikling av TBM-teknologi grunnet materialteknologi, maskinteknikk samt data-, automatisering- og navigasjonssystemer.

I Norge har TBM stort sett blitt brukt i forbindelse med vannkraft. Den første fullprofiltunnelen ble boret i 1972-1974 i Trondheim, mellom Sluppen og Høvringen. Kloakk-tunnelen hadde en diameter på 2,3 meter og ble boret med en Demag Rock Borer i grønnstein og grønnskifer. Deler av tunnelen gikk også i granitt, men dette ble drevet konvensjonelt med boring og sprengning. Maskinen hadde en lav matekraft på omkring 60 kN per kutterverktøy, og følgelig ble dette en relativt dyr og langdryg erfaring grunnet lav inndrift og høyt kutterforbruk. Etter omkring 600 m ble matekraften økt til ca. 10 kN per kutterverktøy, og netto inndrift økte 100 %.

Utover 80-tallet manifesterte fullprofilboring av tunneler seg som en konkurrerende metode til boring og sprengning i vanntunneler. Kombinasjonen lav byggetid, lavt falltap og erfarne tunnelborere ble utnyttet av kraftbransjen.

I samme tiår ble også tre vegtunneler i Norge drevet med TBM; Fløyfjelltunnelen, Eidsvågtunnelen og Svartistunnelen (NFF, 1998). Fløyfjelltunnelen ble boret med en 7,8 m diameter TBM, som resulterte i for lite tverrsnitt til å oppfylle det daværende T8-tverrsnittskravet. Tunnelene ble følgelig strosset ut med boring og sprengning (se Figur 1). Under driving med TBM ble det benyttet totalt 200 bolter i begge tunnelene. Etter utstrossing ble overgang mellom (boret) heng og sprengte vegger systematisk boltet. Det er ikke senere drevet vegtunnel med TBM i Norge.

Ellers i verden er derimot sirkulære TBM-vegtunneler mer vanlig å se. Siden erfaringene i Norge fra 80-tallet, har utviklingen av TBM-er gjort det mulig å bore tunneler med langt større tverrsnitt enn 8 m. SMART Tunnel i Kuala Lumpur er et eksempel på dette: Tunnelen ble drevet med en TBM med diameter på ca. 13 m. Det er etablert kjørebane i to etasjer i tunnelen og transport av vann i nederste del av tverrsnittet. I skrivende stund bores det dessuten en 17,4 m diameter tunnel i Seattle, USA for å flytte vegtrafikk fra en jordskjelvskadet viadukt under jord.

Fra 1990 frem til i dag har den tyske TBM-leverandøren Herrenknecht levert totalt 31 TBM-er til vegtunnelformål, i grunnforhold som dekker alt fra løsmasser til kombinasjoner av løsmasser og berg og i sammenhengende berg i eksempelvis land som Polen, Sveits, Tyskland, Østerrike, Italia og USA ([www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)). Andre TBM-produsenter som Robbins, NFM, Hitachi, og Mitsubishi har også levert TBM-er til vegformål, men noen total oversikt over antall leveranser er ikke funnet.



Figur 1: Boret og usikret heng og sprengte vegger i Fløyfjelltunnelen (Foto Pål Drevland Jakobsen).

## 1.2 Begreper og definisjoner

Tunneldriving med Tunnel Boring Machine eller **tunnelboremaskin** (TBM) innbefatter mange begreper. I dette kapitlet presenteres det noen relevante begreper og definisjoner basert på Maidl et al. (2012). For mer detaljert informasjon om oppbygging og komponenter på ulike TBM-er, se kapittel 3.

**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 tunnelstuff under driving med bentonitt og/eller luft.

**Annular gap** er et begrep som beskriver åpning mellom utdrevet tunneldiameter og diameter på betongelement. Et norsk begrep for annular gap kan være overmasse eller overbrytning. Annular gap er noen få cm, og åpningen bak betongelementer gyses og fylles med fin grus (pea-gravel) eller bentonitt.

**Bentonitt** er et naturlig mineral som består i all hovedsak av montmorillonitt. Bentonitt benyttes i slurry shield TBM-er for å redusere friksjon mellom kutterhodet og stuff, og for å redusere friksjon mellom betonglining og geologisk materiale i pipe jacking.

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

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

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

**Drivekostnad** brukes som tunnelkostnad for boring, uttransport av berg, forbruk av materiell (spesielt kuttere og elektrisk kraft) og lønn til tunneldrivere.

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

**Grippere** er montert på siden av TBM-en (åpne hard rock TBM-er og dobbelt skjold TBM-er) for å skyve, stabilere og presse TBM-en mot bergmassen.

**Gripper TBM** er en TBM som benytter grippere for å skyve seg fram under boring. Gripper TBM omtales også som **main beam TBM** og **open hard rock TBM**.

**Kuttbarhet/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 og oppsprekking.

**Kutterhode** er en roterende og sirkulær stålkonstruksjon som holder kutterverktøy. Ved TBM-driving i løsmasser benyttes også begrepet **Cutting wheel**.

**Kutterverktøy** er et samlebegrep som omfatter utskiftbare verktøy montert på TBM-ens kutterhode. I hardt berg benyttes disk-kuttere, mens i løsmasser i mykt berg benyttes rippere, skrapere og små punktverktøy.

**Lukket modus** omtales som «closed mode» på engelsk, og angir at TBM-ens 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 skrew-conveyor.

**Mikrotunneldrift** omfattet opprinnelig fullprofiltunneldrift av tunneler med diameter mindre enn 1000 mm. Etter at tidligere mikrotunneldriftmetoder (eksempel rørpressing og pipe jacking) er mulig å utføre med tunneldiameterer større enn 1000 mm benytter noen maskinleverandører tunneldrift opp til 4000 mm diameter i mikrotunneldriftbegrepet. Ved

mikrotunneldrift er det ikke personell i tunnelen under driving, og TBM-en opereres fra en styringsenhet over jord.

**Mixshield og BentonAir® TBM** er varemerker for henholdsvis Herrenknecht og NFM for slurry shield TBM-er som også kan benytte trykkluft for å regulere stoffstabiliseringstrykket.

**Mixed face** er et begrep som benyttes dersom det er ulike materialer i tunnelstuppen. Eksempelvis av berg og løsmasse eller hard og svakt berg.

**Primær slitasje** er slitasje på TBM-verktøy som bryter ut geologisk materiale (diskkuttere for berg, og scraper og ripper tools brukt i løsmasser). Det geologiske materialets abrasivitet, styrke og oppsprekking påvirker primær slitasje i tillegg til hvordan TBM-en kontrolleres.

**Sekundær slitasje** er slitasje på feks. TBM-ens kutterhode og systemer for uttransport av utdrevet materiale.

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

**Slurry TBM** er en TBM som stabiliserer tunnelstuf med trykksatt bentonittslurry under driving. Slurry TBM-er benyttes som regel i kohesive løsmasser.

**Skum og tilsetningsstoff** benyttes som oftest ved TBM-driving i løsmasser. Skum og tilsetningsstoff benyttes for å redusere adhesjon av leire på kutterverktøy, kutterhode og i skruekonveyoren, 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 TBM-er 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 TBM-ens kutterhodekammer ikke er under trykk. Det vil si at stoff er i atmosfærisk trykk under boring, uten noen form for direkte stoffstabilisering fra TBM-en. TBM-er som borer i åpen modus kan utstyres med forinjeksjonsutstyr for å konsolidere masser og tette innlekkasjer.

## 2 Kriterier for valg av tunneldrivemetode

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. Miljøpåkjennning (CO<sub>2</sub> 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.

## 2.1 Valg av drivemetode i aktuelle norske tunneler

Nylig er det gjort vurderinger for å velge mellom konvensjonell driving eller driving med TBM i tre norske veg- og jernbanetunneler; Follobanen, Ulriken jernbanetunnel og Rogfast. Valg av drivemetode på Follobanen ble gjort av byggherre Jernbaneverket og konsulenter basert på:

- Detaljerte kostnadsestimat basert på 3 nivå Work Breakdown Structure (WBS), basert på kostnader til:
  - a) installasjon (delvis tidsavhengig)
  - b) lønn og forbruksmateriell (tidsavhengig)
  - c) materialer (avhengig av enhetspriser).
- Fordeler med TBM når det gjelder reduksjon av antall tverrslag. Redusert behov for tverrslag fører med seg mindre håndtering av kommuner, reguleringsplaner, naboer etc. og er besparende for byggherre.
- Miljøhensyn.

For Ulriken jernbanetunnel, ble prosjektet prosjektert og gitt ut på anbud som både TBM og boring og sprengning. Her var ideen til byggherren å velge det mest gunstige tilbudet uavhengig av drivemetode, og derav la markedskrefter være med å bestemme. Gunstighet av tilbud ble bestemt etter følgende fordelingsnøkkel:

- Tilbudspris teller 90% i evaluering
- Oppdragsorganisasjon teller 4% i evaluering
- Oppdragsgjennomføring teller 4% i evaluering
- Kvalitet, SHA og miljø teller 2% i evaluering.

For Ulriken ble det billigste tilbudet valgt, som var et tilbud hvor tunneldriften skal utføres med TBM, se kapittel 0.

Rogfastprosjektet i regi av Statens vegvesen gjennomførte mulighetsstudier for å evaluere bruk av TBM til boring av lange undersjøiske tunneler. Bruk av TBM som drivemetode ble forkastet av prosjektets ekspertgruppe grunnet følgende momenter:

- TBM har ikke tidligere vært benyttet i høye vanntrykk/vanndyp, slik at manglende erfaring omkring førte til en høyere risiko ved bruk av TBM
- TBM krever flere grunnundersøkelser enn konvensjonell boring og sprengning. Dette er komplisert og kostnadskrevende for en lang undersjøisk tunnel.
- Fleksibilitet for å takle uforutsette forhold og raske endringer i geologi (eksempel svakt berg med store vannlekkasjer med høyt trykk) er mindre kjent med TBM kontra konvensjonell boring og sprengning.

Også for Ryfast-prosjektet (Solbakktunnelene/Ryfylketunnelene på om lag 14 km) evaluerte vegvesenet bruk av TBM for å drive tunneler. Her ble kostnadsestimatet fra 2010 for komplett tunnel drevet med TBM ca 3 200 MNOK, kontra 2 300 MNOK for boring og sprengning utslagsgivende for å velge konvensjonell driving med boring og sprengning.

For E39 Sveгатjørn – Rådal (veg og tunneler mellom Os og Bergen) ble det også evaluert bruk av TBM. Her ble TBM funnet uaktuelt av følgende grunner:

- Tunneler som ligger i bebygd område har varierende tverrsnitt på grunn av ramper, siktutvidelser og havarilommer.
- I den lengste tunnelen i prosjektet var det mulighet til å gå inn i fra tverrslag og etablere vekseldrift med boring og sprengning.
- Det ble konkludert at omfattende tilpassinger i Statens Vegvesen HB021 (nå N500) måtte gjøres for å tilpasse tunnelutforming i forhold til optimal boret diameter.

### 3 Grunnforhold og valg av TBM

En viktig faktor ved valg av drivemetode og ikke minst valg av type TBM er geologien i området. I dette kapitlet presenteres ulike TBM-konsepter relatert til grunnforhold. Aktuelle grunnforhold er berg, løsmasser og kombinasjoner av berg og løsmasser. TBM-teknologi for boring av tunnel i løsmasser er tatt med, da det i noen tilfeller kan gi kortere og grunnere tunneler på grunn av endret linjeføring. EFNARC (2005) og DAUB (2010) gir oversikt over ulike TBM-typer og valg av maskin i forhold til grunnforhold.

#### 3.1 Forundersøkelser ved bruk av TBM

Ved fullprofilboring av tunneler påvirker bergmassens borbarehet byggetid og kostnader langt mer enn ved boring og sprenging. Bruland (1998) mener derfor at geologiske forundersøkelser må velges etter tunneldrivemetode.

Den tyske standarden DWA-A\_125A lister også hva som bør være beskrevet i ved driving av tunneler. For løsmasser og berg nevnes:

- Maksimum og minimum grunnvannsdypde og hydrografkurver
- Forurensninger i massen, evt. tilstedeværelse av gass
- Egnethet av utdrevet masse til fylling, tilslag o.l.
- Deformasjons modul / E-modul
- Aggressivitet i masse og grunnvann
- Svellepotensiale
- Forvittringsmotstand til massen
- Potensiale for adhesjon under tunneldriving
- Borhullslogger
- In-situ densitet av massen
- Knusningssoner og kaviteter.

For løsmasser nevnes:

- Siktekurver
- Permeabilitet
- Kompakthet
- Plastisitetsgrenser, vanninnhold og vanntrykk
- Skjærparametere, friksjonsvinkel og kohesjon
- Grunntrykk
- Størrelse på evt. stein og harde fragmenter inkludert hardhet som enaksial trykkfasthet
- Organiske komponenter i massen
- Tendens til å flyte (Potensiale for omdannelse til flytende konsistens).

For berg nevnes:

- Forvittringsgrad
- Bergmassekart som viser bergartsgrenser, bergmassekvalitet (e.g. RQD)
- Hardhet

- Berg- og bergmassestyrke relatert til borbarhet
- Klyvstyrke
- Abrasivitet
- Vannlekkasjepotensiale
- Sprekker og åpninger i berget
- Potensiale til karstdannelse.

Bruland (1998) beskriver at forundersøkelser bør gi en basis til estimering av følgende parametere til fullprofilboring i berg:

- Netto inndrift (meter per time)
- Kutterlevetid (timer per kutter)
- Ukentlig produksjon/gross advance rate (meter per uke)
- Tunneldrivekostnader
- Kostnads- og byggetidsrisiko og sensitivitet på grunn av endringer og variasjon i geologi.

I tillegg bør forundersøkelsen inneholde oversikt over store sprekker, sprekkesoner, svake bergarter, bergspenningssituasjon og vann og lekkasjer i berget.

Nedenfor presenteres to kvantitative modeller for estimering av netto inndrift, ukentlig produksjon og kutterlevetid for hardt berg. Tilsvarende modeller for TBM-drift i løsmasse er ikke funnet.

### 3.1.1 Q-verdi og $Q_{TBM}$

Bergartens styrke, seighet, mineralsammensetning og porøsitet, oppsprekking, spekkefyllinger og spenninger i bergmassen, vannforhold og eventuelle svakhetssoner vil alle påvirke drivinga av tunnelen.

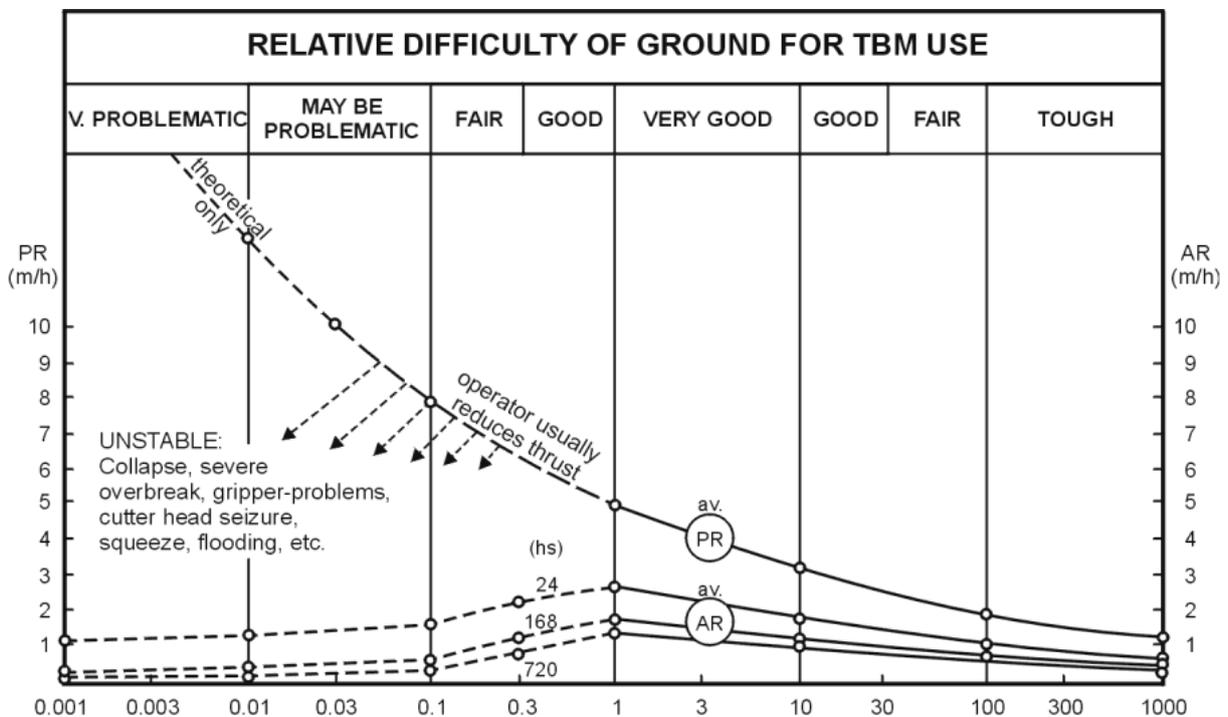
En metode for å få «tallfestet» bergmassens egenskaper er gjennom Q-systemet. Systemet er nøye forklart i NGIs håndbok «Bruk av Q-systemet» (NGI, 2013). Kort forklart går Q-systemet ut på å klassifisere bergmassen med hensyn på stabilitet og bergrom. Dette gjøres ved å fastsette seks verdier som beskriver hver sin bergmasseeigenskap for så å regne ut en samlet Q-verdi for bergmassen. De seks parameterne beskriver bergmassens oppsprekingsgrad, friksjonsforhold og spenningsforhold og kombinert gir de en samlet Q-verdi i intervallet 0,001-1000, hvor høyere verdi angir mer stabil bergmasse.

En ulempe med Q-verdien er at den ikke tar hensyn til en del geologiske parametere som påvirker inndriften til en TBM, som bergartens styrke, kvartsinnhold, mineralenes hardhet og sprekkenes orientering – som kommer til uttrykk gjennom bergartens borbarhet (penetrasjonshastighet) og sliteevne (kutterlevetid). Dette tas inn i Bartons TBM-spesifikke Q-verdi -  $Q_{TBM}$ , beskrevet i blant annet Barton (1999). I  $Q_{TBM}$  tas det dessuten også i større grad hensyn til oppsprekkingens orientering, som påvirker TBM-ens framdrift i større grad enn for konvensjonell drift.

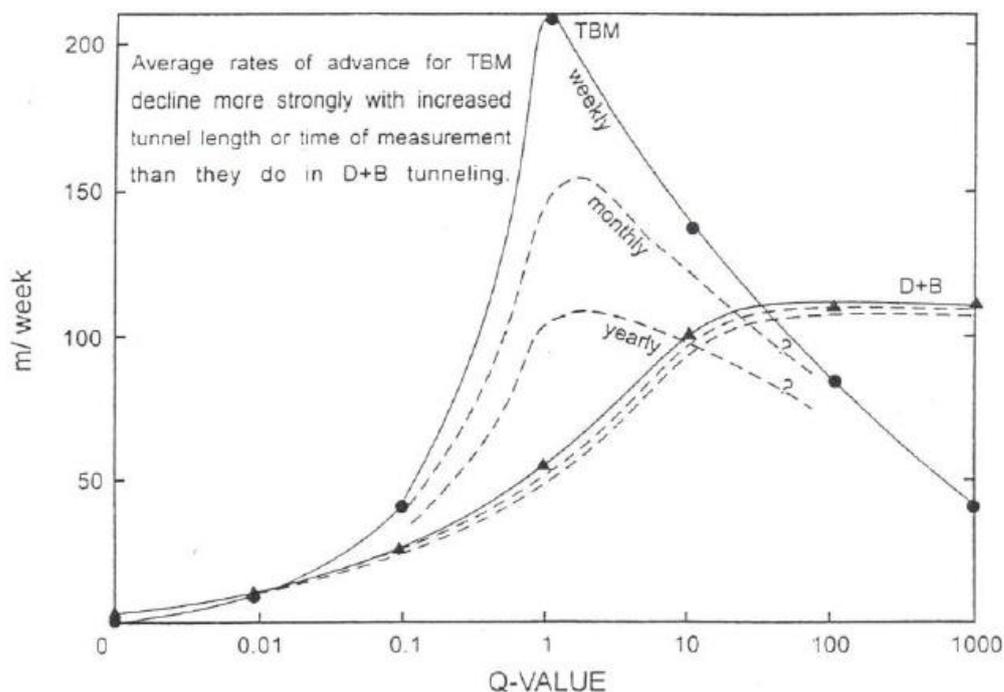
$Q_{TBM}$  indikerer at TBM-er vil prestere dårlig i begge ender av Q-verdi skalaen. I svært ustabil bergmasse forventes det lav produksjon som følge av omfattende og kanskje vanskelig

bergsikring, vann, overmasse osv. I hard og abrasiv bergmasse med høye Q-verdier vil penetrasjonshastigheten og boretiden til TBM-en igjen gå ned på grunn av lav borbarhet, dårlige brytningsforhold (lite eksisterende sprekker i bergmassen) og høy materialslitasje på kutterhode og TBM.

I Figur 2 er dette vist med en inndeling i relativ vanskelighet av grunnforhold mot  $Q_{TBM}$ -verdi. I samme figur er linjer for penetrasjonsrate og inndrift inntegnet. I Figur 3 er gjennomsnittlig ukeproduksjon (ukentlig, månedlig, årlig) for TBM vist sammen med boring og sprengning (D+B). Som en ser av figuren, vil inndriften være høyere ved TBM ved middels høye Q-verdier. D+B har derimot en mer stabil inndrift gjennom byggeperioden, hvor TBM-drift i større grad vil være påvirket av nedetid og være mer sensitiv for evt. vanskelige driveforhold enn D+B. Trenden som vises i Figur 3 med lavere inndrifter for TBM ved lengre tunneler, kan reduseres betraktelig ved bruk av transportband som utlastingsmetode.



Figur 2: Relativ vanskelighetsgrad for TBM-drift ved ulike  $Q_{TBM}$ -verdier. Inntegnet penetrasjonsrate (PR) og inndrift (advance rate, AR) (Barton, 1999).



Figur 3: Gjennomsnittlig ukeproduksjon for TBM/boring og sprengning ved ulike Q-verdier (Barton, 2000).

### 3.1.2 NTNUs prognosemodell for TBM drift

NTNU har utviklet en empirisk modell for estimering av drivetid, kutterverktøylevetid og drivekostnader for tunneldriving med TBM i berg. Modellen baserer seg på erfaringsdata fra omkring 250 km tunnel (hovedsakelig i hardt berg med TBM-diameter mellom 3,5 – 8 m). Modellen ble sist oppdatert i 1998 (Bruland, 1998), men er under validering og revisjon i 2013 – 2015 (Macias og Bruland, 2014).

Modellen for netto inndrift baserer seg på bergartsstyrke målt gjennom Drilling Rate Index<sup>TM</sup>, bergmassekvalitet (oppsprekkingsklasse og porøsitet), TBM-parametere (diameter, kutterstørrelse, matekraft). Drilling Rate Index<sup>TM</sup> er en indeks som fremkommer av bergartens sprøhetstall ( $S_{20}$ ), justert med bergartens overflatehardhet målt med Sievers' J bortest. Bergmassekvalitet som kvantifiseres med NTNUs oppsprekkingsklasse baserer seg på gjennomsnittlig sprekke- og/eller stikkavstand i bergmassen etter Tabell 1. Ved tett oppsprekking øker netto inndrift, og med lav oppsprekking reduseres netto inndrift.

**Tabell 1: Oversikt over oppsprekkingsklasser og avstand mellom svakhetsflater i NTNUs prognosemodell for TBM-drift (Bruland, 1998)**

Oppsprekkingsklasse (Sprekker = SP / Stikk = St)	Midlere avstand mellom svakhetsflater [cm]
0	-
0 – I	160
I-	80
I	40
II	20
III	10
III	5

Modellen for kutterverktøylevetid baserer seg på Cutter Life Index™ og innhold av kvarts i bergarten. Kutterlevetidsmodellen tar ikke hensyn til bergmassekvalitet, og baserer seg kun på bergartsprøver. Det jobbes med å inkludere bergmassekvalitet inn i kutterverktøyestimatet. Cutter Life Index™ baserer seg på to laboratorietester; bergartens abrasive egenskaper målt med Abrasion Value Cutter Steel (AVS) og overflatehardhet målt med Sievers' J.

Modellen for drivekostnadsestimering baserer seg på estimat for netto inndrift, kutterlevetid (nedetid for kutterbytter og kostnader for nye kuttere), TBM-utnyttelsesgrad (basert på erfaringstall), innkjøpskostnad for TBM, pris for strøm, diesel og arbeidskraft og rentenivå.

## 3.2 TBM-teknologi for berg

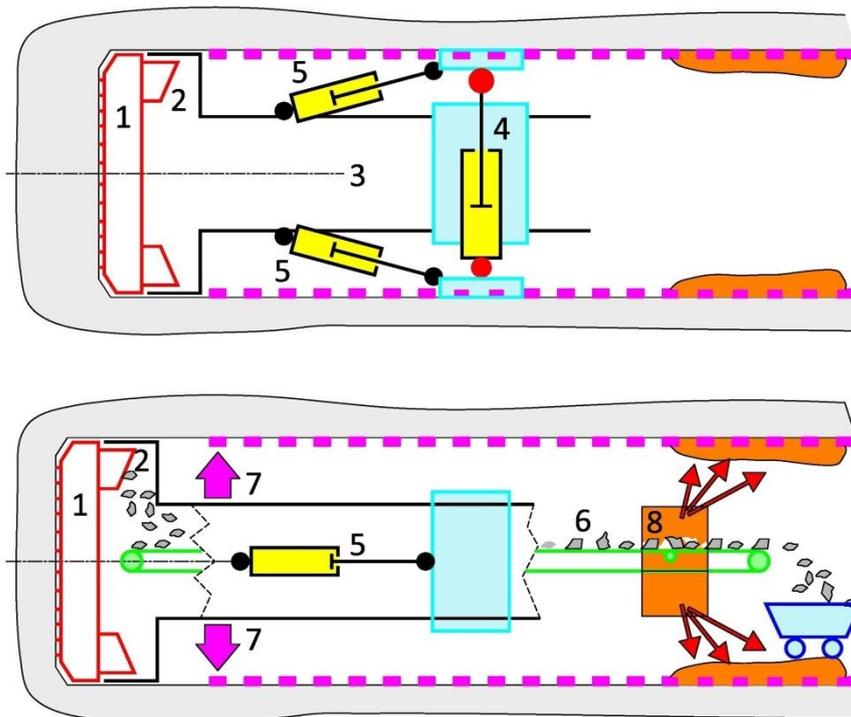
Dagens TBM-teknologi gjør det mulig å bore seg gjennom de fleste grunnforhold, selv om ikke alle grunnforhold egner seg like bra til TBM-drift. Under presenteres ulike typer TBM-er som egner seg til ulike typer bergmassekvaliteter: Åpne TBM-er til hard, lite oppsprukket bergmasse, enkeltskjoldmaskiner til dårligere bergmasse og dobbeltskjoldmaskiner ved bergmasse av varierende kvalitet.

### 3.2.1 Gripper-TBM

Alle tunnelene som er fullprofilboret i Norge frem til i dag er drevet med gripper TBM-er, også omtalt som *åpne* TBM-er. Disse TBM-ene kjennetegnes ved at maskinen ligger åpen i bergmassen, uten et omsluttende skjold. Åpne TBM-er har ingen kontinuerlig stabilisering av stoff, annet enn mulig forinjeksjon. Driften begrenses således til relativt gode bergforhold hvor berget har en tilstrekkelig stabilitet til at konvensjonell bergsikring (bolter, sprøytebetong og evt. betongutstøping) kan installeres.

En åpen TBM baserer seg på å bryte berg gjennom å trykke diskettere mot tunnelstuppen. Det oppstår da en knusningssone under disketterene, samt radiell rissdannelse ut i fra knusningssonen. Disketterne er montert fast på et roterende kutterhode, slik at det dannes konsentrisk sirkulære spor i tunnelstuppen.

Den knuste og utdrevne bergmassen løftes opp i *skoper* i kutterhodet, og transporteres videre ut i fra fronten av TBM-en på et transportbelte. Videre transport ut til dagen skjer enten ved bruk av kontinuerlig transportbelte, sporbunden transport eller hjulgående kjøretøy.



Figur 4: Enkel prinsippskisse som viser oppbygging av hovedkomponenter på en åpen hard rock TBM (etter NFM-Technologies). Øvre skisse viser TBM-en ved takskifte (re-grip), sett ovenfra. Nedre skisse viser TBM-en fra siden under boring:

- 1) Roterende kutterhode med diskcuttere
- 2) Bøtter som løfter opp det utdrevne materialet
- 4) viser fastspenningsgripper sylinder
- 5) Hydrauliske jekker som understøtter hovedbjelken (main-beam) og sørger for framdrift av TBM-en
- 6) Transportbelte
- 7) indikerer område på TBM-en som er egnet for å installere bergsikring (bolter, sprøytebetong og nett)
- 8) indikerer området for å installere evt. permanent bergsikring



Figur 5: Diskkutter som har vært benyttet i hardt berg (venstre) og ny diskkutter (høyre). (Foto Pål Drevland Jakobsen)



**Figur 6:** Åpen hard rock TBM (Ø3.35 m) brukt på Færøyene til vannkraft. Blå sirkel viser kutterhode og diskkuttere, og rød sirkel viser område egnet for installasjon av bergsikring. (Foto, Jacob Clemmensen MTHøgaard).

Åpne hard rock TBM-er er begrenset til bruk i relativt kompetent bergmasse med tilstrekkelig stabilitet til å få sikret bergmasse. Slike TBM-er kan forsere svakhetssoner dersom sonene er kjent på forhånd. Sikringsmetoder som forbolting og forinjeksjon kan benyttes for å konsolidere svakhetssoner før gjennom boring. For å utføre sikring foran stoff må TBM-en være utstyrt med borhammere som kan bore gjennom kutterhode og radielt ut gjennom området bak kutterhodet. Per i dag må TBM-en stå stille ved slik boring foran stoff, men det jobbes med løsninger for å kunne utføre sonderboring og injeksjonsboring samtidig som TBM-en borer. Figur 7 viser sonder- og injeksjonsboreutrustning på TBM-en som borer Røssåga kraftverk.

Dersom lange strekk av dårlig berg, løsmasser eller svakhetssoner skal forseres, kan imidlertid problemer oppstå som reduserer framdrift og HMS:

- Gripperne har ikke stiv nok bergmasse til å skyve TBM-en fremover og gripperene «graver» seg inn i tunnelveggene.
- En usikret, ustabil tunnelstøff 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 i heng. Dette har vært observert i Niagara falls hvor deler av tunnelen gikk i oppsprukket skifer og gripperne førte til overbrytning i heng.



Figur 7: Åpen hard rock TBM utrustet med utstyr for sonderboring og MWD. Samme utstyr kan monteres på skjold-TBM-er (Foto: Pål Drevland Jakobsen).

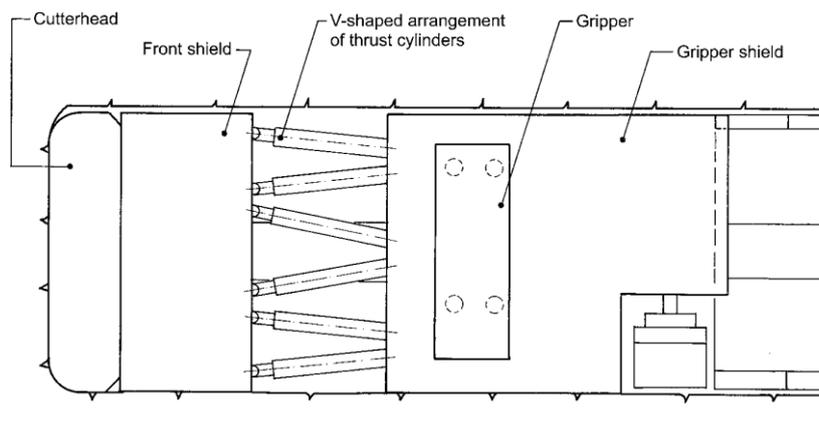
I hardt berg med lite oppsprekking eller lav stikktetthet vil TBM-en fortsatt fungere, men med redusert fremdrift. Den reduserte fremdriften skyldes lavere netto inndrift (m/h). I abrasive bergarter kan også utnyttelsesgraden reduseres grunnet høyere kutterforbruk og tilhørende kutterskifter.

For åpne hard rock TBM-er forventes det fremdrift i størrelsesorden 1 – 3 m/h avhengig av bergmassens styrke, entreprenørens kompetanse og TBM-ens størrelse (diameter). I hard rock TBM-drift er utnyttelsesgraden (andel tid til boring) av TBM-en i størrelsesorden 30 – 50 %. Dette resulterer i normal tunnelproduksjon på mellom 6 og 30 meter per 20 timer.

### 3.2.2 Dobbelt skjold-TBM

Dobbelt skjold-TBM-er har et roterende kutterhode med diskcuttere tilsvarende åpne TBM-er for hardt berg. Som det ligger i ordet «dobbelt skjold» ligger TBM-en beskyttet i stålskjold. Det roterende kutterhodet er montert på det fremste skjoldet. Dette skjoldet er et teleskop bestående av to ledd. Teleskopledet gjør det mulig å bore samtidig med betongelementmontering, som forgår i det bakre skjoldet eller *gripperskjoldet*, se Figur 8.

I normal operasjon trykkes gripperne i det bakre skjoldet mot bergoverflaten. Teleskopskjoldet trykker fra gripperskjoldet, som resulterer i matekraft til kutterhodet.



Figur 8: Skisse som viser oppbygging av dobbeltskjold TBM (fra Maidl et al., 2008)

I svakt berg som deformeres eller går til brudd grunnet trykket i fra gripperne, opereres maskinen i enkeltskjoldmodus (single shield mode). Matekraft til kutterhode og fremdrift av TBM-en skjer gjennom jekker som dytter i fra mot betongelementene. Denne formen for driving muliggjør ikke kontinuerlig sikring av tunnelen med betongelementer, slik at operasjonen blir sekvensiell; 1) boring, 2) tilbaketreking av jekker, 3) montering av betongelementer 4) boring.

Utdrevet berg transporteres ut av tunnelen enten med kontinuerlig transportbånd, eller transportbånd gjennom TBM-en og omlasting til tog eller hjulgående kjøretøy.

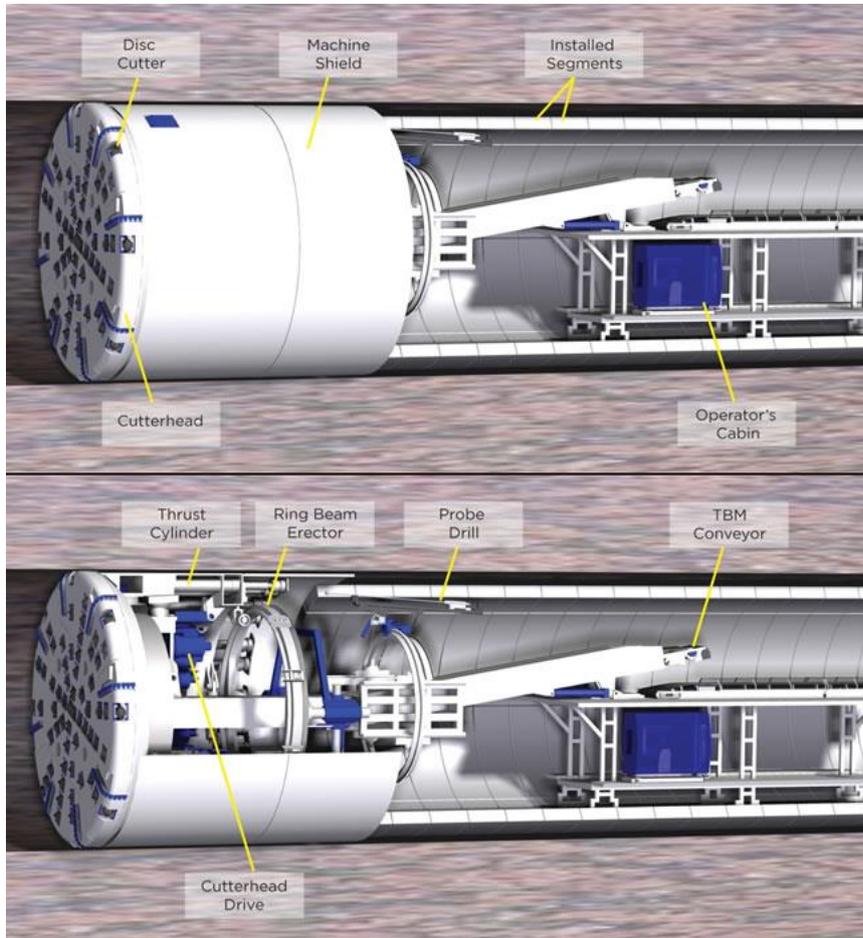
Riggområdet ved drift med dobbeltskjold-TBM forventes større enn ved åpne TBM-er. Dette skyldes i all hovedsak et større behov for mellomlagring av betongelementer nært tunnelåpningen.

Dobbeltskjoldede TBM-er 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 dobbeltskjoldede TBM-er bore uten å bygge betongringer av elementer.

Netto inndrift ved driving med dobbeltskjold-TBM er i størrelsesorden det samme som kan forventes for en åpen TBM: 1-3 m/h kan forventes som ordinær netto inndrift. Bergmassens borbarehet påvirkes av TBM-ens størrelse og matekraftkapasitet samt erfaringen til operatører. Ved godt organisert drift, og ved samtidig montering av betongelementer og boring, kan utnyttelsesgraden (tid til boring) være 40-50%. Dette tilsvarer forventet utnyttelsesgrad for åpne gripper-TBM-er.

### 3.2.3 Enkeltskjold-TBM

En enkeltskjold-TBM består av et roterende kutterhode med kutterverktøy som bryter berg. TBM-en ligger beskyttet i et stålskjold, som forhindrer at ustabil berg faller ned i tunnelen under driving før bergsikring er installert. Figur 9 viser oppbygningen av en enkeltskjold-TBM.



Figur 9: Skisse som viser oppbygging av enkeltskjold TBM (The Robbins Company).

Ved bruk av enkeltskjold-TBM-er benyttes kontinuerlig betongelementer som bergsikring. Maskinens fremdrift er avhengig av betongelementene, da fremdriften av maskinen baseres på at jekker skyver TBM-en fremover fra disse.

Enkeltskjold TBM-er benyttes som regel i oppsprukket bergmasse hvor det benyttes betongelementer langs hele tunneltraseen. Massetransport skjer på tilsvarende måte som en åpen TBM med transportbånd ut i dagen eller med transportbånd i kombinasjon med tog eller hjulgående kjøretøy.

Enkeltskjold-TBM-er har lavere utnyttelsesgrad enn åpne og dobbeltskjold-TBM-er. Dette skyldes at TBM-en må vente ved installasjon av betonglining. Typisk utnyttelsesgrad er på 25 – 35%. Ved god planlegging kan utnyttelsesgraden bedres dersom vedlikeholdsaktiviteter (eks. kutterbytter) gjøres samtidig som ringbygging. Vedlikehold av hydraulikk- og

elektrosystem kan ikke gjøres under ringbygging. I og med at TBM-en står stille under ringbygging, forbindes denne aktiviteten med mye stress som kan gå utover kvalitet og sikkerhet.

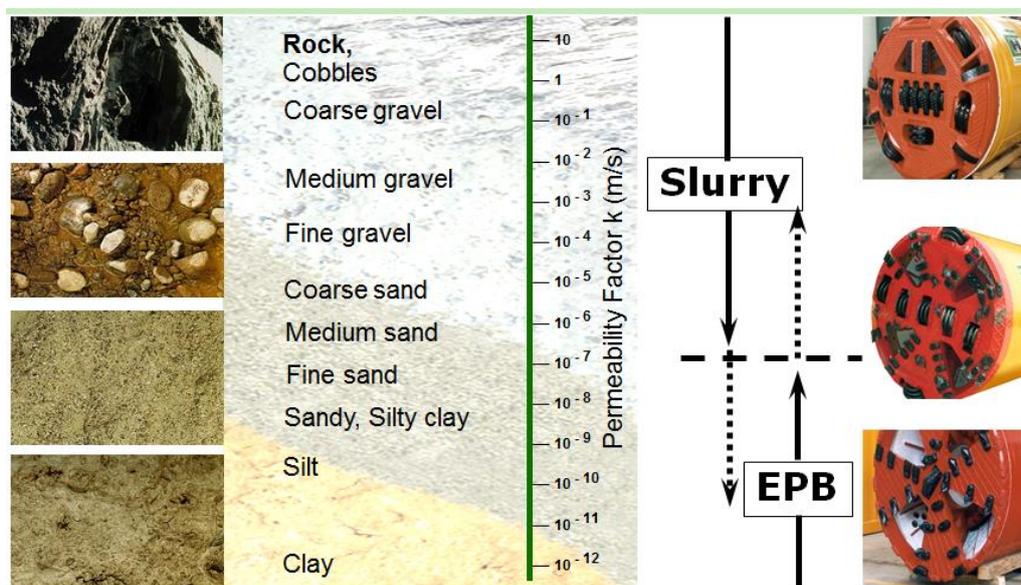
### 3.3 TBM-teknologi for løsmasser, svakt berg og kombinasjoner av berg og løsmasser

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

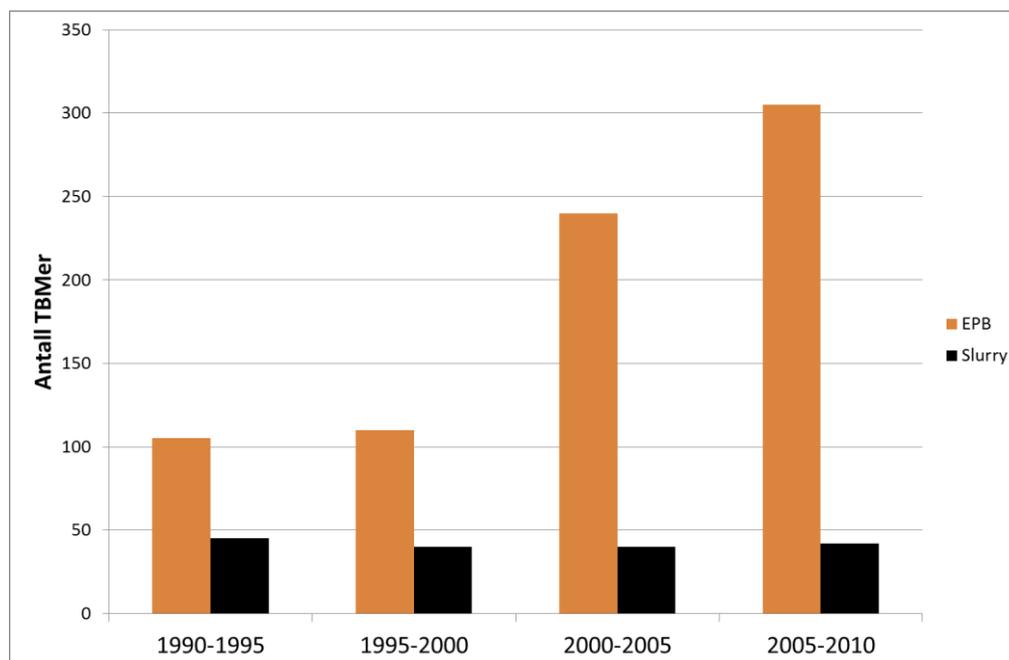
- Earth Pressure Balance (EPB) TBM
- Slurry shield TBM (inkluderer også BentonAir® og Mixshield TBM som er en «avart» og varemerker for Slurry shield TBM-er fra to TBM-leverandører).

Disse maskinene benyttes også i stor grad til å drive tunnel hvor en har berg og løsmasser i kombinasjon, kalt *mixed face conditions*.

I utgangspunktet egner TBM-drift med EPB-maskiner seg i løsmasser med lav permeabilitet som for eksempel siltholdig løsmasse, mens Slurry shield-TBM-er egner seg bedre i permeable løsmasser, se Figur 10. 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 lavere permeabilitet. Dette har ført til en markant økning i antall EPB-TBM-er de siste 20 årene (Figur 11).



Figur 10: Oversikt over løsmasse (grunnforhold) og egnet stuffstabiliseringsteknikk (Herrenknecht).



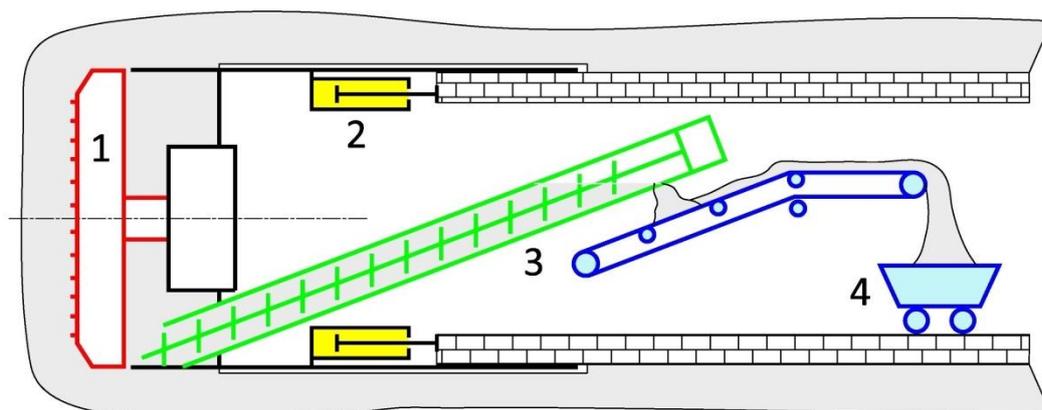
Figur 11: Antall EPB- og Slurry-TBM-er de siste 20 årene (Home, 2010).

### 3.3.1 Earth Pressure Balance (EPB) TBM

EPB-TBM-er ble utviklet i Japan for driving i silt og siltig sand pga. materialenes gunstige permeabilitetsegenskaper. Utviklingen startet på 60-tallet, og baserte seg på japanske erfaringer med tunneldriving med såkalte blind shields<sup>1</sup>.

EPB-konseptet baserer seg på at stoffen har samme jord- og vanntrykk som in-situ-masse under driving. Dette sikres med å kontrollere mengden av materiale som drives ut gjennom en skrue, se Figur 12 og Figur 13. Balanseringen av stoff gjøres i et lukket kammer bak kutterhodet. Tunnelen sikres med kontinuerlig lining for å unngå kollaps av løsmasser eller svakt berg bak TBM-skjoldet. Massen transporteres ut med transportbånd eller vogner etter at trykket til utdrevet masse er blitt atmosfærisk. Figur 12 viser hovedkomponentene til en EPB-TBM.

<sup>1</sup> Blind shield er et stålskjold som presses fram i myke kohesive materialer. Stabilisering av stoff baseres på å kontrollere åpning i front av skjoldet og hastigheten på pressing av skjoldet.



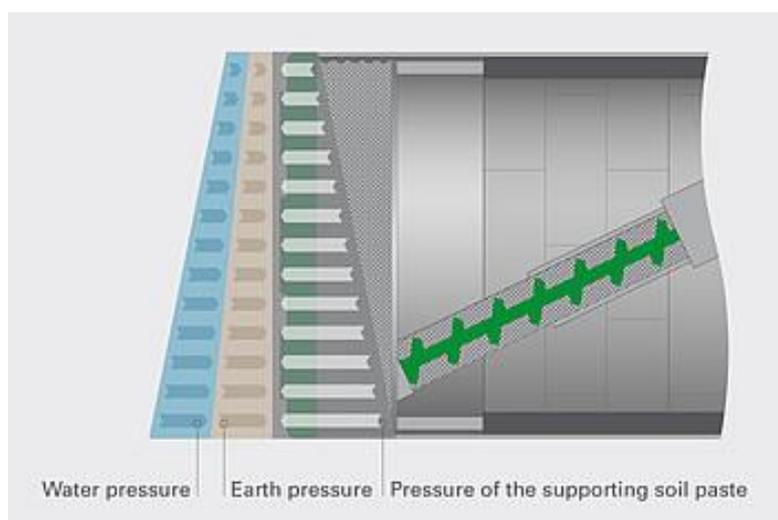
Figur 12: Skjematisk oversikt over EPB TBM (etter NFM-Technologies).

- 1) Roterende kutterhodet med verktøy
- 2) Hydrauliske jekker som skyver TBM-en framover med mottrykk fra betongelementene.
- 3) Skrue 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 drive nærmest alle typer løsmasser ved riktig tilsetning av additiver som fillermaterialer for å endre permeabilitet, og/eller polymerskum og «anti-leir»-additiv for å redusere adhesjon og pakking av leire under driving.

Eksempel på EPB-tunneler er City-tunnelen i Malmø, deler av Kanal-tunnelen mellom Frankrike og England og flere metrosystemer (eksempel Singapore, Roma, København). Mulig tunneldiameter med EPB-TBM-er og kontinuerlig betonglining er i fra ca 2,5 – 17,5 m.

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/kutterhode/omdreining) og begrenses da som regel av skruens kapasitet til å transportere material og samtidig holde trykket.



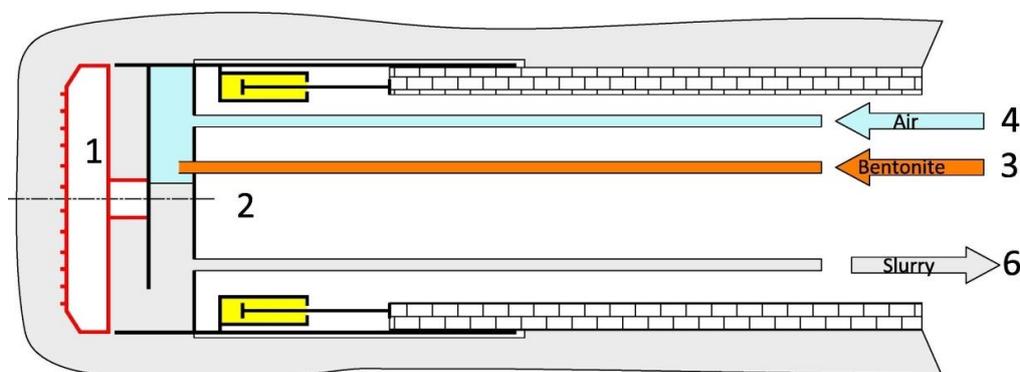
Figur 13: Likevektsprinsipp for å stabilisere stoff med EPB TBM (fra Herrenknecht).

### 3.3.2 Slurry shield<sup>2</sup> TBM

Utviklingen av slurry shield-tunneldrift begynte på 60-tallet. Utviklingen skjedde mer eller mindre parallelt i Japan (Mitsubishi), Tyskland (Wayss & Freytag) og England (Bentonite Tunnelling Process). Utviklingen av denne boreteknologien skjedde som et resultat av at det var ønskelig å redusere bruk av trykkluft som stabiliseringsmetode grunnet HMS samt begrensninger på hvor høye vanntrykk som kunne håndteres.

Etter utviklingen som startet på 60-tallet, har mange av dagens slurry-TBM-er en luftboble bak kutterhodet i tillegg til trykksatt bentonitt som stabiliserer stoffen. Luftboblen brukes til å regulere trykket mot stoffen, og TBM-ene som bruker denne teknikken omtales ofte som Mixshield TBM eller BentonAir® TBM.

Tunnelen sikres kontinuerlig med betongelementer, tilsvarende som ved bruk av EPB- og enkeltskjold-TBM. Tunneldriving med slurry shield-TBM-er krever ingen transportbånd eller bruk av vogner til uttransport av masser, da dette pumpes ut gjennom rør. Skjematisk oppbygging av slurry-TBM-er med trykkluft er vist i Figur 14.



Figur 14: Skjematisk oversikt over slurry shield TBM (etter NFM-Technologies).

- 1) Roterende kutterhode med verktøy
- 2) hydrauliske trykksatt jacks som skyver TBM-en 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 TBM-en som Mixshield eller Bentonair® TBM)
- 6) Rør som transporterer ut utdrevet masse, vann og bentonitt.

I tillegg til hovedkomponentene som er vist, behøver slurry shield-TBM-er en «slurry separation plant» (SSP) som står ute i dagen. SSP består av sentrifuger og finsikter som skiller og resirkulerer bentonitt fra den utdrevne massen, se Figur 15. Resirkulering av bentonitt blir vanskeligjort av innhold av finstoff i løsmasserne, og strømforbruket til SSP og tilsetning av fersk bentonitt kan i noen tilfeller være så høyt som 25 % av drivekostnaden av tunnel.

Figur 10 viser en oversikt over løsmasser (permeabilitet) og egnet stoffstabiliseringsteknikk (slurry eller earth pressure). I løsmasser med høy permeabilitet kan EPB-teknologi fortsatt benyttes ved tilsetning av fillermaterialer på stoff. Fillermaterialer reduserer da

<sup>2</sup> Slurry shield TBM omtales som Mixshield TBM og Benton' Air ® hos henholdsvis Herrenknecht og NFM-Technologies.

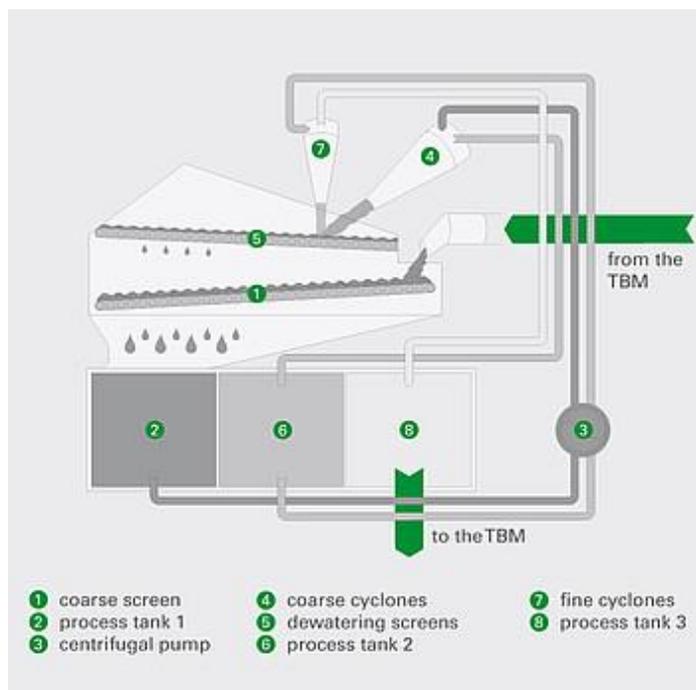
permeabiliteten slik at maskinen kan bore mot en tett stuff. Motsatt kan slurry shield-teknologi benyttes i løsmasser med lav permeabilitet (silt) ved ekstra tilsetning av bentonitt og additiver.

Ved god drift og logistikk kan det forventes utnyttelsesgrader på 30-40 % ved tunneldrift med slurry shield-TBM-er. Netto inndrift kan være meget høy (20-30 mm/kutterhodeomdreining) og begrenses da av slurrsystemets 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, gitt at materialet inneholder leir og/eller silt. Dette skyldes at man slipper å resirkulere bentonittslurry ved EPB-drift. Figur 11 viser denne utviklingen siden 90-tallet fram til 2010.

Kanskje den meste kjente tunnelen som er boret med en slurry shield-TBM, er vegtunnelene under Yangtze elven i Shanghai. Diameteren på tunnelene er ca. 15,5 m, og det ble benyttet 2 TBM-er under driving. Den store diameteren i dette prosjektet tillater 3-felts veg i en etasje, med kabler, vann og evakuering i betongkulverter under kjørebanelen. I Polen bores det to parallelle vegtunneler med denne typen TBM. Her er kostnad for tunneldrift, betongelementer (permanentsikring), vegkonstruksjon og belysning estimert til å være 460 000 kr per meter. Diameteren er 12,5 m og utnyttes ved 2-felts veg i en etasje med kabler og evakuering i underetasje.

En annen kjent tunnel som er boret med slurry shield TBM (Mixshield) er Hallandsås i Sverige. Under boring var som regel stoffen åpen (ikke trykksatt) og massene ble fraktet ut med transportband. Ved stillstand lukket TBM-en kutterhodet med bentonitt og trykkluft, for å unngå innlekkasjer.



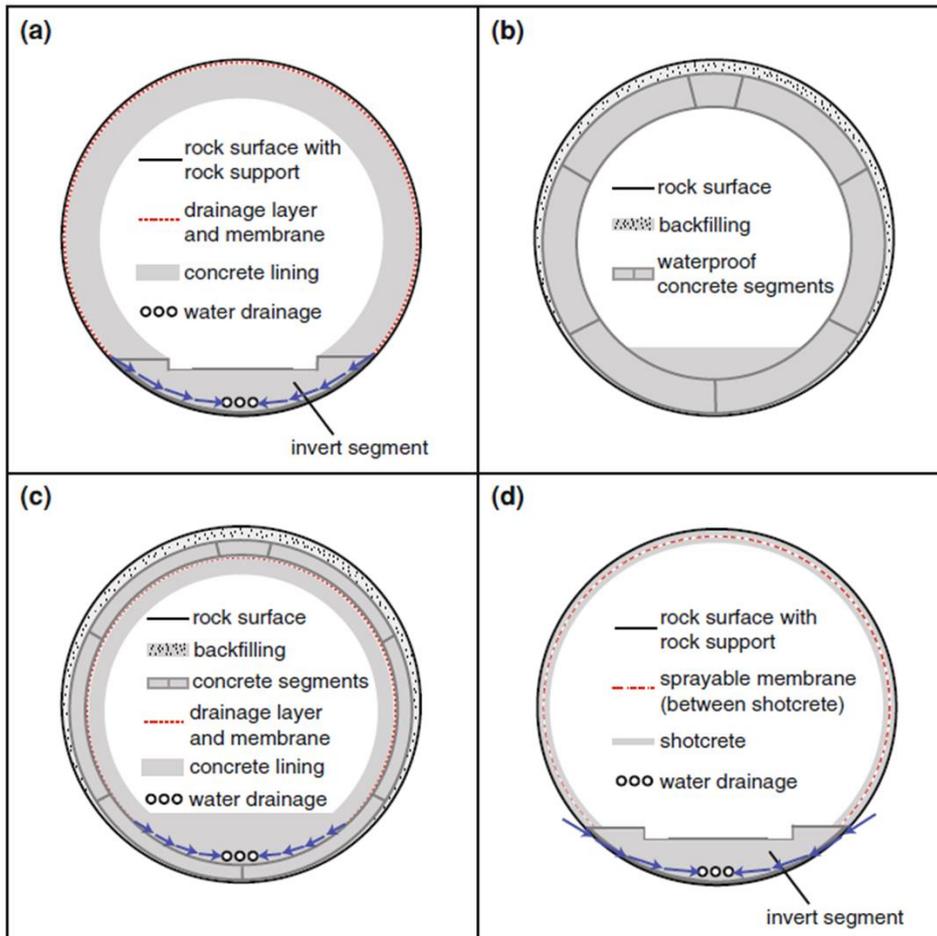
Figur 15: Skisse som viser oppbygging av slurry separation plant (Herrenknecht).

### 3.4 Valg av vanntetting for boret tunnel

Dammyr et al. (2013) har vurdert ulike vanntettingskonsepter til bruk for norske jernbanetunneler. Figur 16 viser fire ulike konsepter som er velegnet for sirkulært boret tunnelprofil:

- viser dobbelskall-løsning som er drenert med membran og støpt betong, tilsvarende løsning som på Ulvintunnelen ved Fellesprosjektet. Løsningen er velegnet for driving av tunneler med åpen gripper-TBM.
- Viser en udrenert løsning med enkelt skall bestående av vanntette betongelementer. Løsningen er egnet for driving med skjold-TBM som baserer fremdrift på å skyve i fra betongelementer. Denne vann- og frostsikringsløsningen er valgt for Follobanen hvor tunnelene skal bores med dobbelskjold-TBM-er.
- Viser en dobbelskall-løsning med membran mellom ytre betongelementlining og indre støpt betonglining. Løsningen er drenert.
- Viser en enkeltskall-løsning som er drenert, med sprøytet membran og to lag med sprøytebetong. Denne løsningen er vurdert brukt i Ulriken av Jernbaneverket og kan gi besparelser på tunneldiameter. Denne løsningen er også drenert.

I tillegg til disse fire løsningene vil løsning med plater av PE-skum være aktuelt i boret tunnel. Denne løsningen er valgt for Ulriken jernbanetunnel grunnet relativt lav byggekostnad. I tillegg bør det forventes lave lekkasjer i nye Ulriken tunnel, da den gamle tunnelen er relativt tørr og berget rundt har vært drenert i lang tid. Et boret tverrsnitt med jevn kontur vil være en gunstig flate å feste plater av PE-skum i, og få tilpassinger under bygging kreves.



Figur 16: Illustrasjon som viser mulige enkle og doble vanntetningsløsninger for sirkulært borede jernbanetunneler (Dammyr et al., 2013).

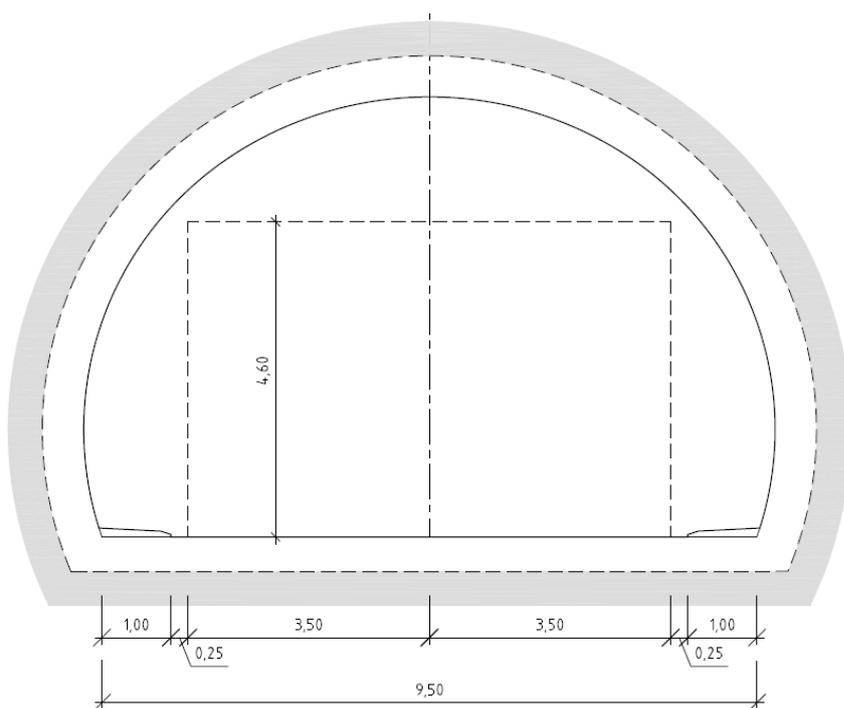
## 4 Utnyttelse av boret tverrsnitt til vegformål

I dette kapitlet belyses det norske krav til tunnelstørrelse og kjørebanebredde opp i mot andre lands løsninger. Per i dag er bruk av TBM til vegtunnelformål i Norge begrenset til Fløyfjelltunnelene og Eidsvågtunnelen i Bergen og Svartistunnelen i Nordland. Fløyfjelltunnelene og Svartistunnelen ble drevet med TBM som «stor pilotunnel» fulgt av utstrossing av vegger for å oppnå de krevde tverrsnittene på henholdsvis T8,5 og T8.

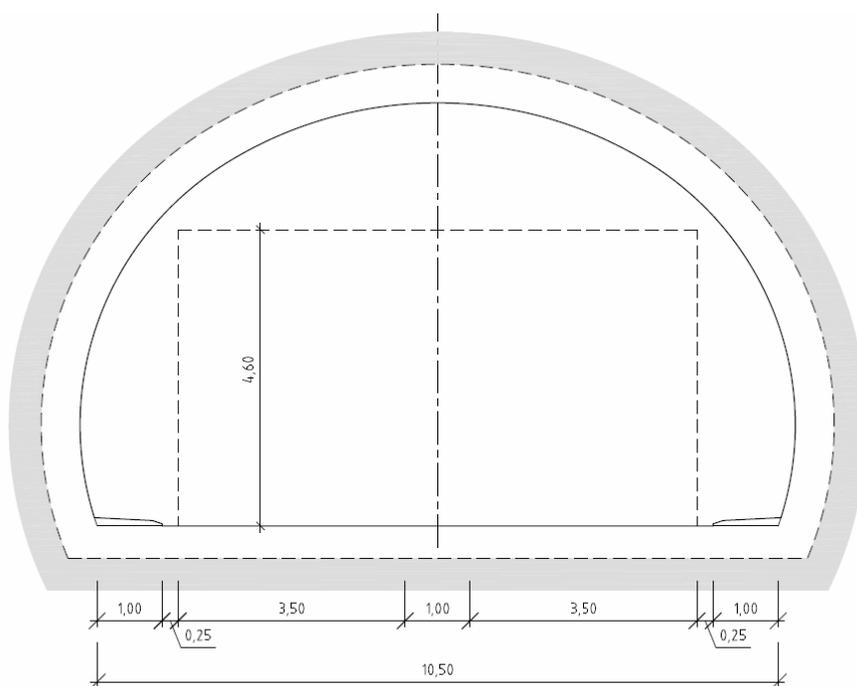
Siden 80-tallet er det ikke drevet vegtunneler med TBM i Norge. I hovedsak skyldes nok dette det sirkulære profilet TBM-en gir, kostnader og risiko, samt kunnskap og tradisjon om å bruke boring og sprengning til etablering av tunneler.

Dagens krav til tunnelstørrelse og derav kjørebanebredde i vegtunneler er gitt i Statens vegvesen Håndbok N500. Kravene baseres på årsgjennsnittstrafikk og tunnellengde. Tunnelprofil T9,5 og T10,5 er de mest aktuelle profilene for nye vegtunneler.

Figur 17 og 18 viser at det er krav om fri høyde på 4,60 m og kjørebanebredde på 3,5 m, i tillegg til 1.0 m bredde på hver side av veg. For T10,5 profilet er det i tillegg satt krav om 1,0 m område mellom kjørebanene til trafikksikring (midtdeler).



Figur 17: Tunnelgeometri for T9,5 profil.

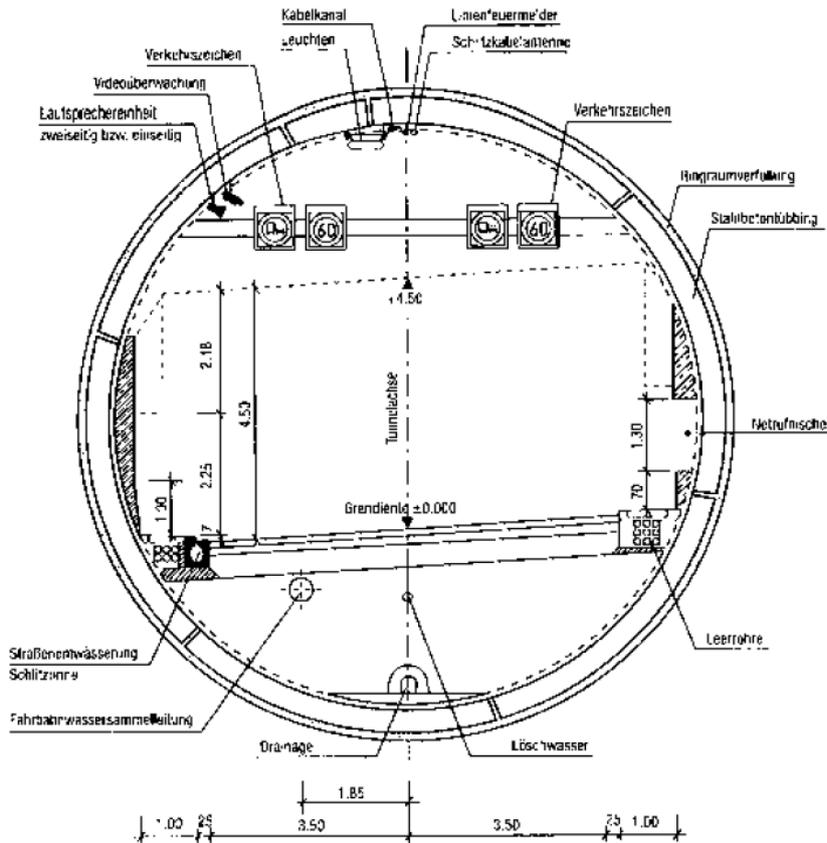


Figur 18: Tunnelgeometri for T10,5 profil.

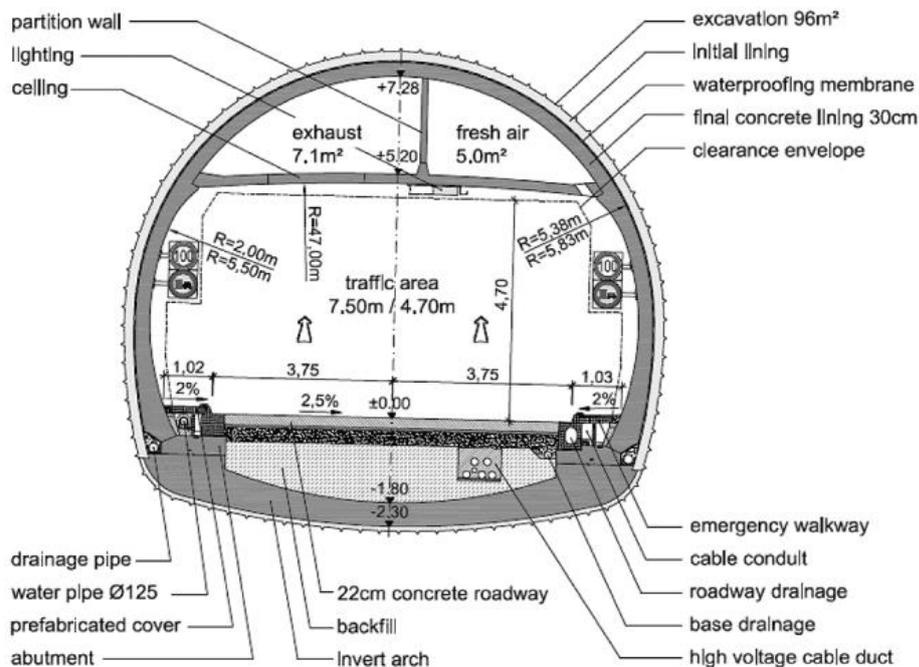
I Tyskland er det stilt de samme funksjonskrav for bredde og høyde for kjørebaneler som i Norge gjennom «Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln, 2003». For å oppnå 2 felt à 3,5 m bredde og en høyde på 4,60 m baseres designkodene på ytre TBM diameter til å være minimum 9,5 m (usikret tunnelvegg). Ved varierende behov og tykkelse for bergsikring økes denne TBM-diameteren tilsvarende tykkelsen på den totale sikringen. Ved en tenkt betongtykkelse på 0,5 m vil TBM-diameter være 10,5 m, og om lag  $\frac{1}{4}$  av tunnelen må fylles opp til vegbyggingsformål.

I Østerrike ble den 6700 m lange Pfändertunnelen åpnet for trafikk i 2013. Tunnelen ble anbudsbeskrevet både som boring og sprengning ( $96 \text{ m}^2$ ) (NATM) og TBM ( $112 \text{ m}^2 / 11,92 \text{ m}$  diameter), se Figur 20 og 21. Etter anbudsrunderen ble TBM valgt som drivemetode på grunn av lavere pris (John og Pilsner, 2011). Tunnelen ble drevet gjennom svellende bergmasse, og bergsikringen ble utført med 27 cm tykke betongelementer, membran og 26 cm støp. Tunnelen hadde tverrforbindelse til en parallell tunnel (drevet på 70-tallet) og nisjer. Disse ble drevet konvensjonelt med boring og sprengning gjennom betongelementer, men før membran og støp. Det er ikke funnet kostnader for denne løsningen kontra TBM drift uten nisjer og tverrforbindelser, men prosjektet ble drevet ferdig på byggherres tidsplan og på budsjett.

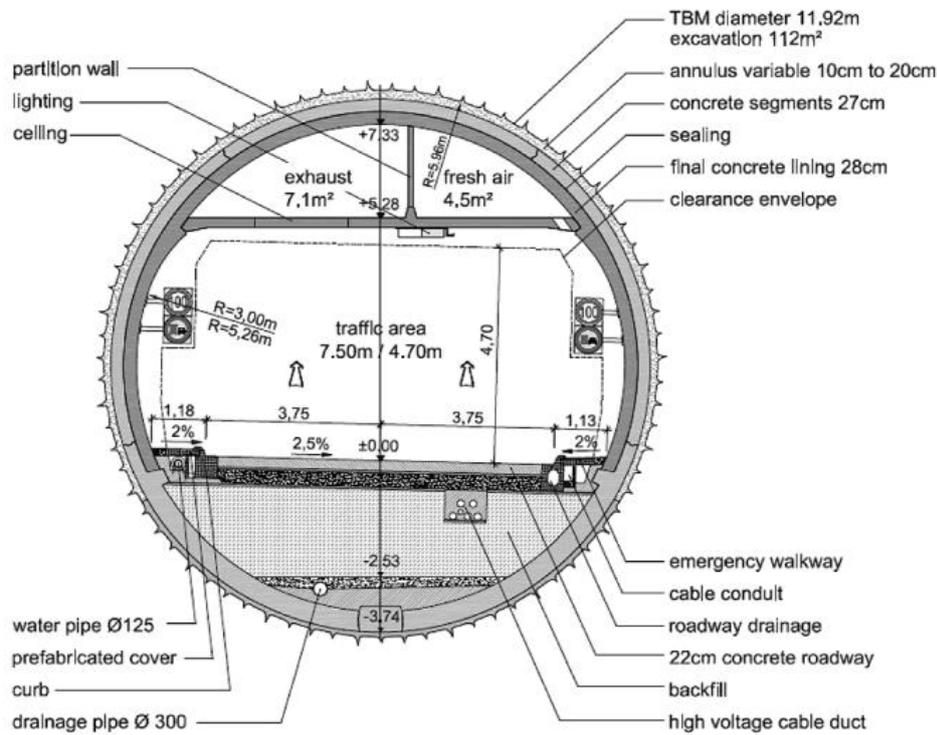
I 2013 og 2014 drives det også en toløps vegtunnel under elva Wistula i Gdansk Polen. Her er TBM diameteren 12,5 m og kjørebanebredde på 3,5 m og høyde på 4,6 m. I tunnelen utnyttes deler av «overskuddstversnittet» i sålen til kabler og rør, samt en servicetunnel i betongkulvert, se Figur 22 og 23. Det kan tenkes at «overskuddstversnittet» i sålen kunne ha vært benyttet til rømning ved å etablere trapper ned under kjørebanelen. Tunnelene etableres uten tverrforbindelser, og eventuelle krav til universell utforming og rømning er ikke kjent.



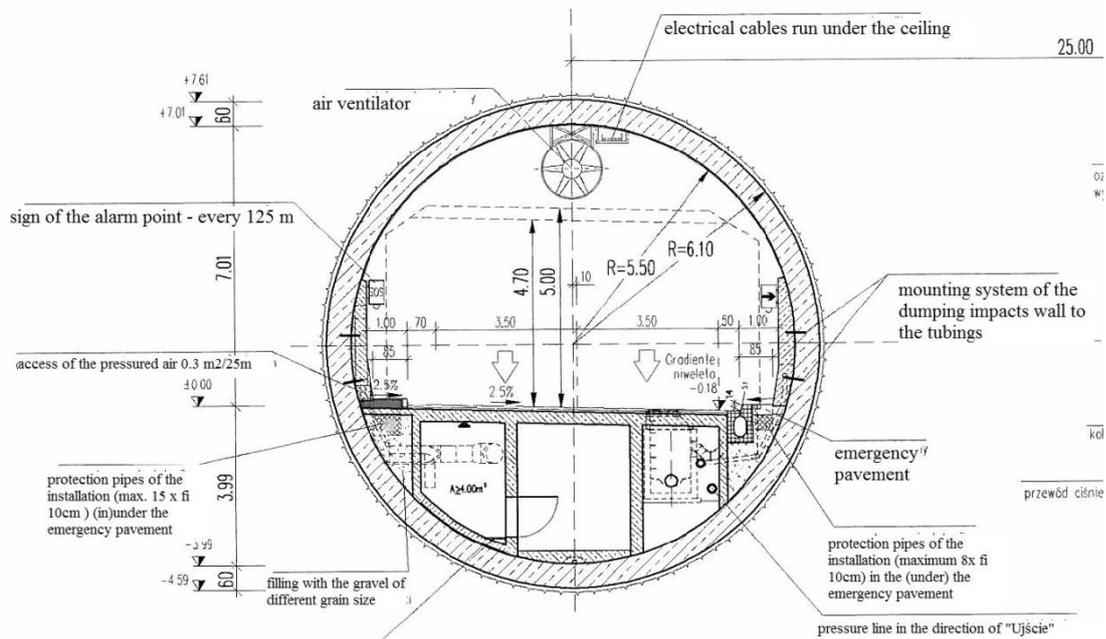
Figur 19: Skisse som viser TBM tunnelprofil for veg i fra den Tyske retningslinjen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln, utgitt av Forchergesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, 2003.



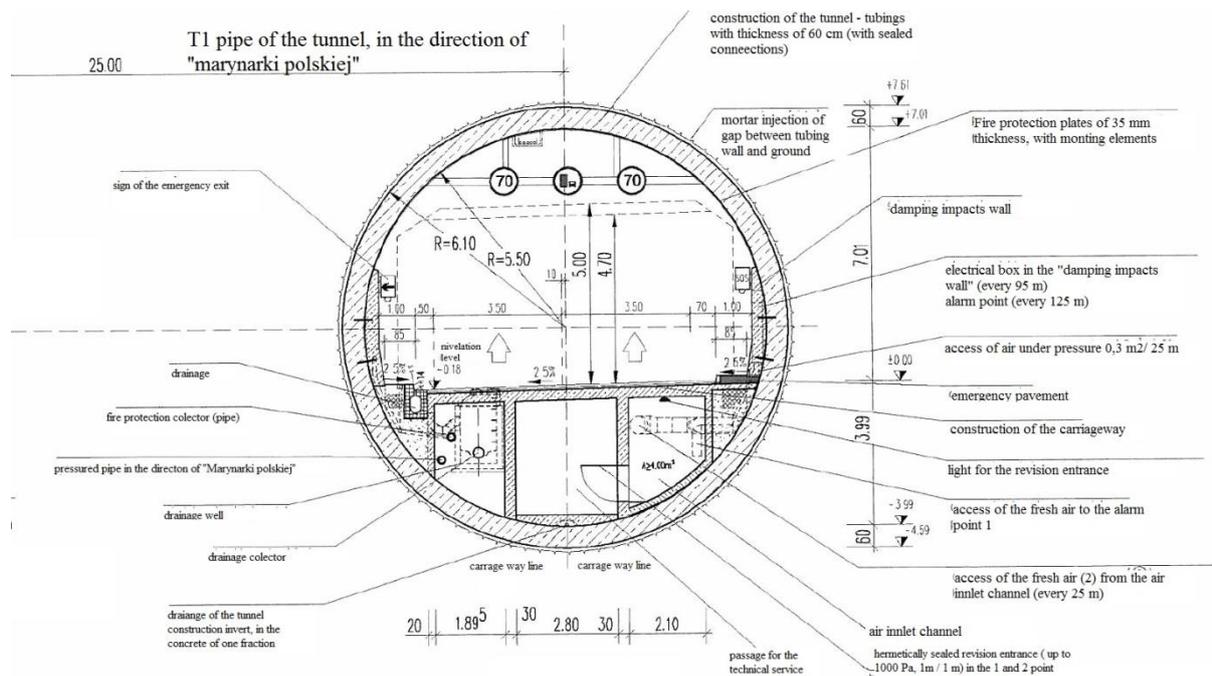
Figur 20: NATM tverrsnitt for Pfandertunnelen (John og Pilser, 2011).



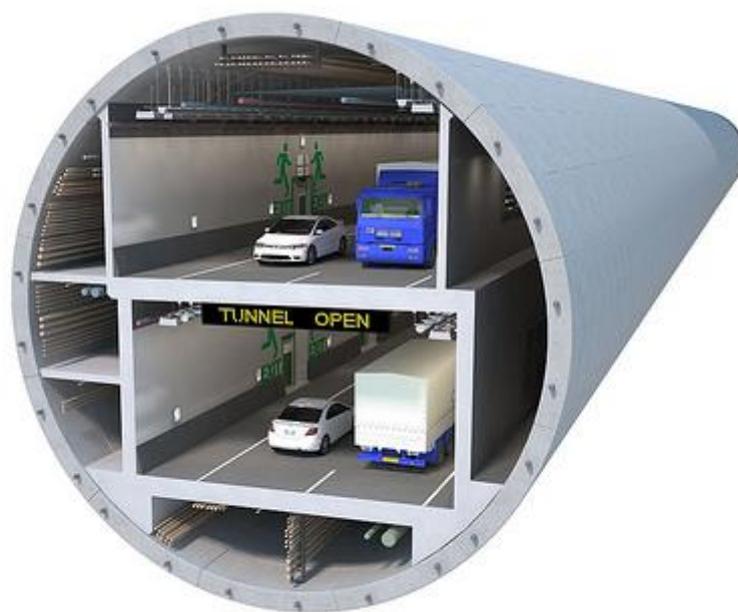
Figur 21: TBM tverrsnitt for Pfänder tunnelen (John og Pilsner, 2011).



Figur 22: Skisse som viser kjørebane og tunneloppbygging for Death Wistula (Wisla) River Crossing, Gdansk Polen (Oversatt av Wojtek Smolen).



Figur 23: Skisse som viser kjørebane og tunneloppbygging for Death Wistula (Wisla) River Crossing, Gdansk Polen (Oversatt av Wojtek Smolen).



Figur 24: Skisse som viser oppbygging av Alaskan Way Viaduct tunnel i Seattle, USA. (Fra [www.tunneltalk.com](http://www.tunneltalk.com)). TBM-diameter er 17,4 m.

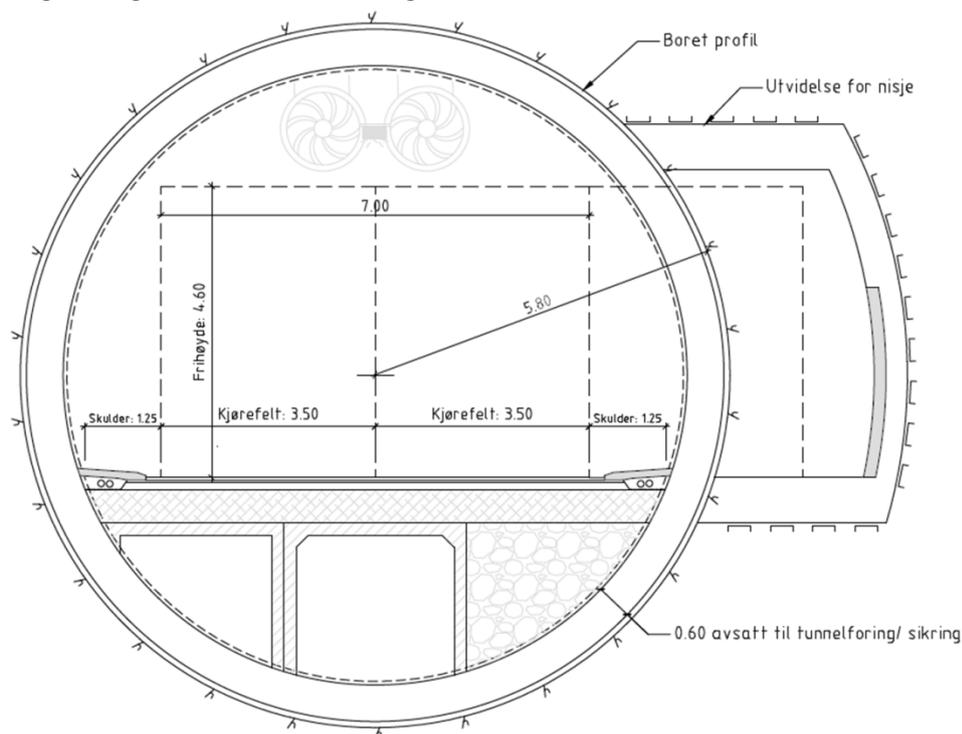
I Seattle, USA drives det i 2014 en vegtunnel i løsmasser med 17,4 m diameters tverrsnitt for å etablere trafikk under jord og rive en eksisterende og jordskjelvskaadet viadukt (Alaskan Way). Tunnelen etableres med 3,65 m bred kjørebane og 4,87 m høyde og drives gjennom varierende grunnforhold som leir, silt og sand. Figur 24 viser planlagt oppbygging av kjørebane og utnyttelse av tunneltverrsnitt. Det er to kjørebaner i hver etasje, med relativt

brede veiskuldre for motorstopp. Tverrsnitt utenfor kjørebaneer utnyttes til rømning, kabler og evt. annen infrastruktur som kan legges underjord.

I Sveits er det bygd mellom 5 og 10 vegtunneler med TBM, hovedsakelig i grunnforhold bestående av kalkstein, molasse, marmor og sandstein. Sveits' retningslinjer krever to kjørebanebredder med bredde 3,75 m og høyde 4,5 m. Det benyttes også en kulvert i nedre del av tunneltverrsnittet på omtrent 2 x 2 m hvor rør, drenering og brannhydrantvann legges. Rundt kulverten ligger det underbyggingsmateriale for vegkonstruksjonen. Over kjørebaneboksen på 3,75 x 4,5 m er det krav om en fri høyde på 1,8 m til skilt, ventilasjon og øvrige installasjoner. Med disse geometriske kravene og utstøpning/lining er tunneldiameteren for vegformål i Sveits på 11,5 m utdrevet diameter og 10,5 m indre diameter (Kovari & Descoedres, 2001).

## 5 Driving av nisjer og alternativer

Kjørebanebredde og fri høyde opp til tunnelheng og installasjoner er funnet løsbart gjennom resultater fra andre land som har etablert vegtunneler med bruk av TBM. I tillegg til de geometriske kravene stiller Håndbok N500 - *Vegtunneler* (tidligere Håndbok 021) krav til havarinisjer og snunisjer. For tunnelklasse D, E og F er det krav om havarinisjer hver 250 eller 500 m, mens det i tunnelklasse D er krav om snunisjer hver 1000 meter. Etablering av nisjer er mulig i en TBM-tunnel, men disse må enten sprenges eller sages ut. I svakt berg kan nisjer tas ut mekanisk med roadheader. Driving av nisjer i en fullprofilboret tunnel kan gjøres fortløpende under tunneldriving, men dette vil sannsynligvis resultere i noe økt nedetid for TBM grunnet påvirkning av uttransport av masser og ventilasjon. Bruk av transportbånd for transport av TBM-masser vil også måtte stoppes og tildekkes ved salvesprengning langs tunnelen. Figur 25 viser en boret løsning med utsprengte nisjer presentert av Grøv et al. (2013). Figuren viser en tykk betongsikring med 60 cm tykkelse. Tykkelsen skyldes at figuren ble laget i forbindelse med et konseptstudie for TBM til Rogfastprosjektet, hvor lingen ble dimensjonert for vanntrykk. I injisert og/eller tett bergmasse kan avsatt tykkelse til betong og bergsikring reduseres betraktelig.



Figur 25: Foreslått TBM tverrsnitt for fullprofil boret tunnel med T9,5 krav og nisjer (Grøv et al., 2013).

Nisjer og tverrforbindelser er etablert i St. Gotthard-tunnelen for jernbane i Sveits. Drivemetodikken for tunnelen baserte seg på at en gripper-TBM driver tunnel omkring 1 km fremfor nisjer og tverrforbindelser. Fra TBM-en ble det installert bergsikring i form av bolter, sprøytebetong og armeringsnett. Nisjene og tverrforbindelsene ble drevet med konvensjonell boring og sprengning og ble sikret med sprøytebetong, membran og sprøytebetong. Omkring

2 km bak TBM-en og 1 km bak der det drives nisje og tverrforbindelser ble det installert membran og støp av betong. Denne metodikken ble funnet relativt effektiv for ferdigstilling av tunnel, da sprengning av nisjer og tverrforbindelser ble gjort i trygg avstand fra TBM og permanentsikringsrigg. Framme ved TBM-en ble det planlagt vedlikehold, kutterbytter etc. utført under sprengning, slik at tidstapet ble redusert. En anleggsteknisk ulempe med denne metoden er at betongstøpeskjold ikke gjør det mulig å transportere ut boremasse med transportbånd. Følgelig må boremasse transporteres ut på vagger (tog).

Som nevnt i kapittel 4 er Pfänder-tunnelen i Østerrike drevet med TBM og sprengte nisjer, se Figur 26. Nisjene har også tverrforbindelser for evakuering i parallelløp. Anbudssummen for tunnelen var omkring 146 000 kr per meter, inkludert nisjer og tverrforbindelser. Sluttkostnad ble noen få prosent høyere enn dette for byggherren, uten at nisjer og tverrforbindelser ser ut til å resultere i veldig høye merkostnader.



Figur 26: Pfänder tunnel med nisje (bilde i fra Østeriske vegvesen, ASFINAG)

Sveits tillater å drive tunneler uten nisjer, noe som kan virke positivt under driving av tunneler med lavere nedetid på TBM, mindre forringing av tunnelkontur grunnet nisjesprengning og redusert arbeidsomfang. I sveitsiske vegtunneler benyttes styringssystemet i tunnelen ved ulykker, slik at berørte felt blir stengt. Ved større ulykker og nedetider styres all trafikk gjennom det ene løpet som toveis trafikk, mens det andre løpet er stengt (Skjeggedal og Hansen, 2010). Skjeggedal og Hansen (2010) estimerte byggetidbesparelse ved sløyfing av havarinisjer til å være 1 – 1,5 år for Ryfasttunnelen ved bruk av TBM. For konvensjonell løsning med boring og sprengning, vil en nok også se en besparelse som følge av mindre boring, sprengning og utlasting dersom en unngår nisjer, samt forenkle montasje av vann- og

frostsikring. Det anbefales derfor en kost-nytte-estimering av nisjer, kontra å benytte styringssystem i tunneler til å styre trafikk rundt evt. motorstopp eller ulykke.

## 6 Kostnader for driving av tunneler med TBM

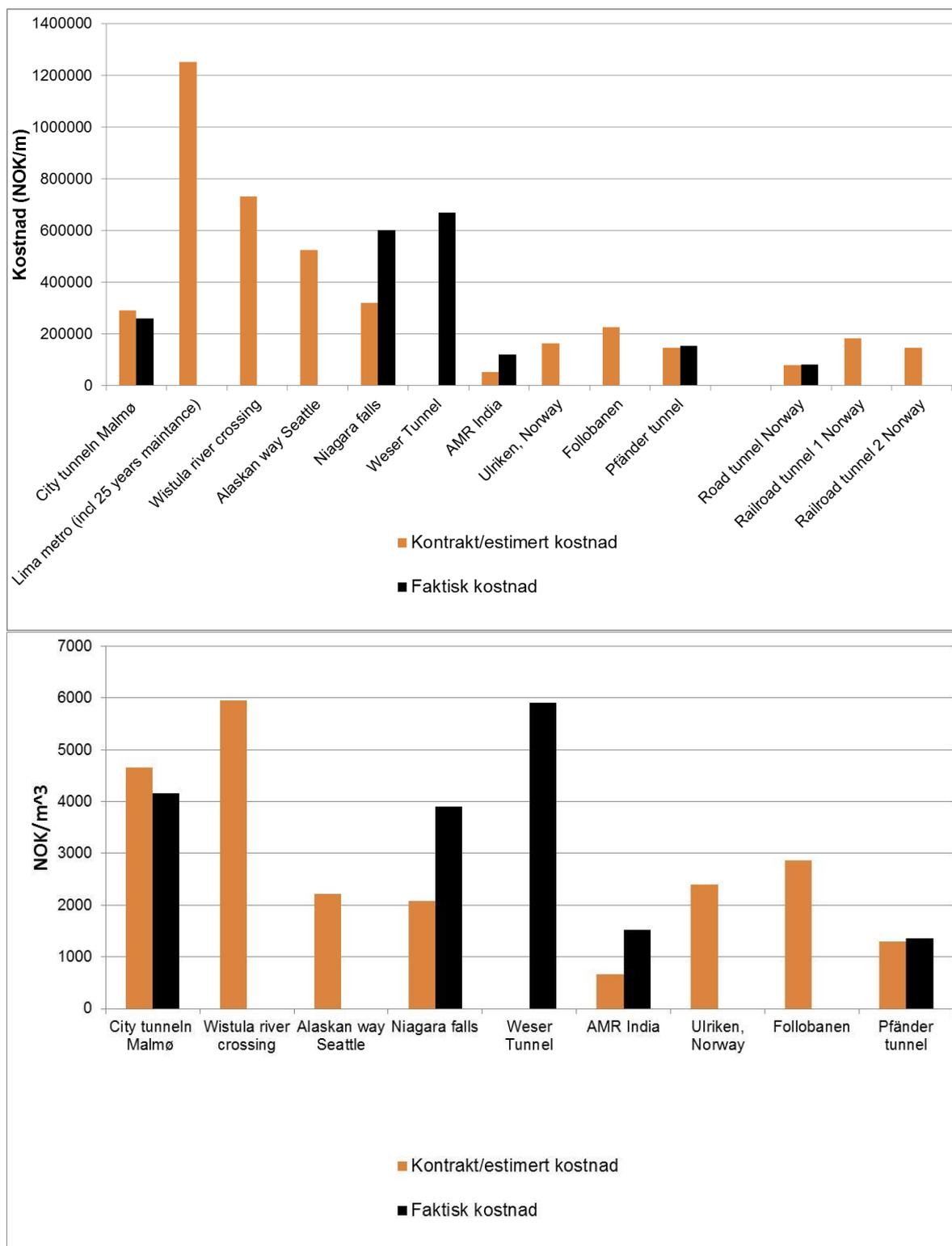
Som nevnt i introduksjonen er det mange parametere som er med på å bestemme drivemetode for tunneler, men kostnad er vanligvis en vesentlig hindring for prosjektspesifikke valg. Generelt kan mye av tunneldrivekostnaden relateres til varighet av anleggsperioden, da driving av tunneler binder opp mye kapital (maskiner og personell). Det kan antas at bestilling av TBM tar 10-12 måneder, rigging og montering av maskin og etablering av portaler tar 2-3 måneder, oppstart og innkjøring av TBM er antatt og ta 1-2 måneder før ordinær tunneldrift starter. Vedlegg 2 viser et forenklet oversikt over varighet av et tunnelprosjekt drevet med TBM. I eksempelet er det antatt 10 km tunnel med 80 meter produksjon per uke. Nedrigging av TBM er antatt å ta en måned, dersom TBM-en borer gjennomslag. Ved demontering av TBM og uttransport gjennom boret tunnel, vil dette ta lengre tid (2-3 måneder).

Videre i kapitlet blir det presentert kostnadsestimat, anbudspriser og faktiske kostnader for noen nylige gjennomførte tunnelprosjekt drevet med TBM. Det blir også presentert Jernbaneverkets kostnadsestimat erfaringer i fra Follobanen og Ulriken (Arna – Bergen). Se også Vedlegg 2 for et tunneldriveestimat gjort med NTNUs prognosemodell.

### 6.1 Total tunnelbyggkostnad med TBM

Det er samlet inn kontraktskostnader og totalkostnader for noen nylig fullførte TBM-prosjekt. Erfaringene og kostnadene er hentet i fra ulike tunnelmagasin (Tunnellingjournal, Tunnels and Tunnelling International og tunneltalk.com). Det er også hentet inn noen kostnadserfaringer gjennom Lok Home i Robbins TBM.

Kostnadene som er presentert i Figur 27 inneholder ulike kontraktsformer (Offentlig Privat Samarbeid (OPS/PPP), design/build og enhetspriskontrakter) i ulike geologi og i ulike verdensdeler. Direkte sammenligning mellom de ulike prosjektene bør derfor gjøres med forsiktighet.



Figur 27: Oversikt over estimerte (kontrakt) og faktiske kostnader for tunneler drevet med TBM. Den høye kostnaden for Lima Metro (over) skyldes at dette inkluderer 25 års vedlikehold av tunnel og stasjoner. Nedre del av figur viser noen av de samme tunnelene med kostnad per kubikk masse. Se under for videre forklaring til figuren.

### **Forklaring til Figur 27:**

*City Tunneln* i Malmö ble boret med EPB-TBM gjennom kalkstein med flintsprekker. Tunnelen er bygd for Trafikverket og skal benyttes til jernbane. Diameter var 8,9 m.

*Lima Metro* skal bores gjennom løsmasser og svake sedimentære bergarter, og som allerede nevnt er dette en OPS-lignende kontrakt som inkluderer drift og vedlikehold i 25 år. Diameter varierer i fra 8 – 10 m.

*Wistula River Crossing* er boret med en Mixshield TBM i sand, leire og grus under en Wisla elven i Gdansk. Det bores to paralelle tunneler på ca 12,5 m diameter og 1200 m lengde. Den relativt lave tunnallengden bidrar nok til den relativt høye meterkostnaden grunnet tilrigging og mobilisering.

*Alaskan Way* er den største tunnelen i utvalget med 17,4 m diameter som bores med en EPB TBM i løsmasser. Tunnelen skal benyttes til vegformål, og får kjørebane i to etasjer.

*Niagara falls* er 14 m diameter og ble boret i skifer med en gripper-TBM. Under driving var det store stabilitetsutfordringer grunnet ras i heng og overbrytning på 4-5 meter.

*Weser tunnel* ble boret under en kanal i Tyskland med sand og siltholdige grunnforhold til vegformål.

*AMR i India* bores gjennom granitter, granittiske gneiser og sandsteiner med diameter på 10 m. AMR er den tunnelen som bores i bergmasse som kan relateres til typisk norske forhold. I dette aktuelle prosjektet varierer netto inndrift på 1,5 – 2,5 m/h med utnyttelsesgrad mellom 25 og 45 %. Tunnelen bores med en dobbeltskjold-TBM og betonglining blir installert i hele tunnelens lengde (43 km). Den lave kostnaden skyldes nok dels lokaliteten i India at tunnelen ikke har noe installasjoner (elektro, lys, ventilasjon, veg eller jernbane) da tunnelen skal transportere vann.

*Ulriken og Follobanen* viser henholdsvis anbudssum og estimat for disse kommende jernbanetunnelene i Norge.

*Pfänder vegtunnel* i Østerrike ble drevet gjennom svellende bergarter med en enkelskjold-TBM. Diameteren er omkring 12 m. Prosjektet er nylig ferdigstilt og tunnelen ble åpnet i 2013.

I tillegg er det presentert kostnader i fra *en lavtrafikkert vegtunnel (T9,5)* i Norge drevet med boring og spregning, og *to jernbanetunneler* (ca 120 m<sup>2</sup>) tverrsnitt.

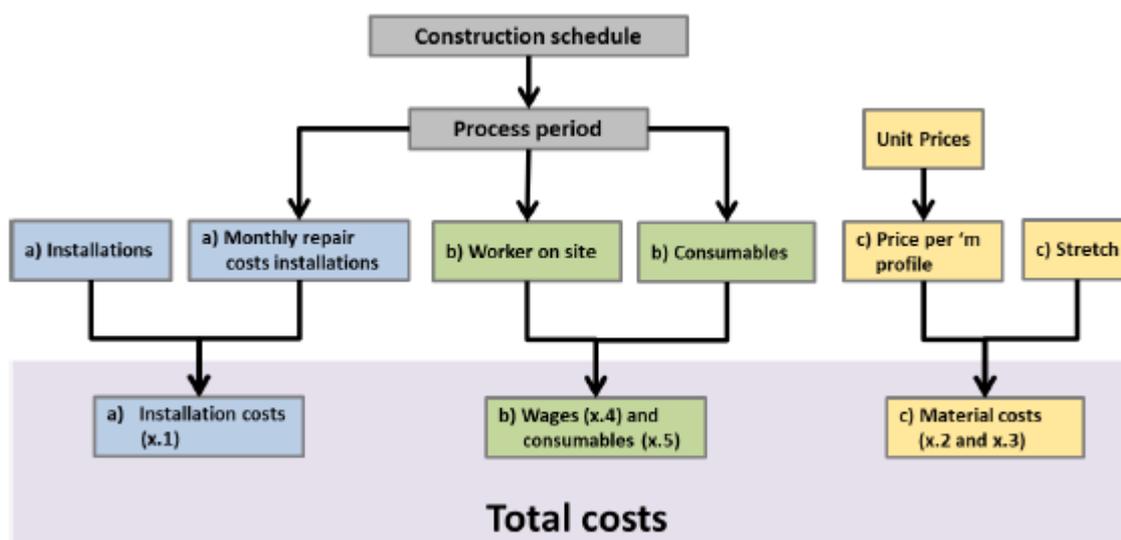
## 6.2 Erfaring fra kostnadsestimering Follobanen

Konseptet for kostnadsestimering for Follobanen baserer seg på 3 steg (Gollegger, 2014):

- Kalkulering av installasjonskostnader som er delvis tidsavhengig og inkluderer byggetid
- Kalkulering av lønnskostnader og forbruksmateriellkostnader som er tidsavhengig og inkluderer byggetid
- Kalkulering av materialkostnader som er avhengig av enhetspriser.

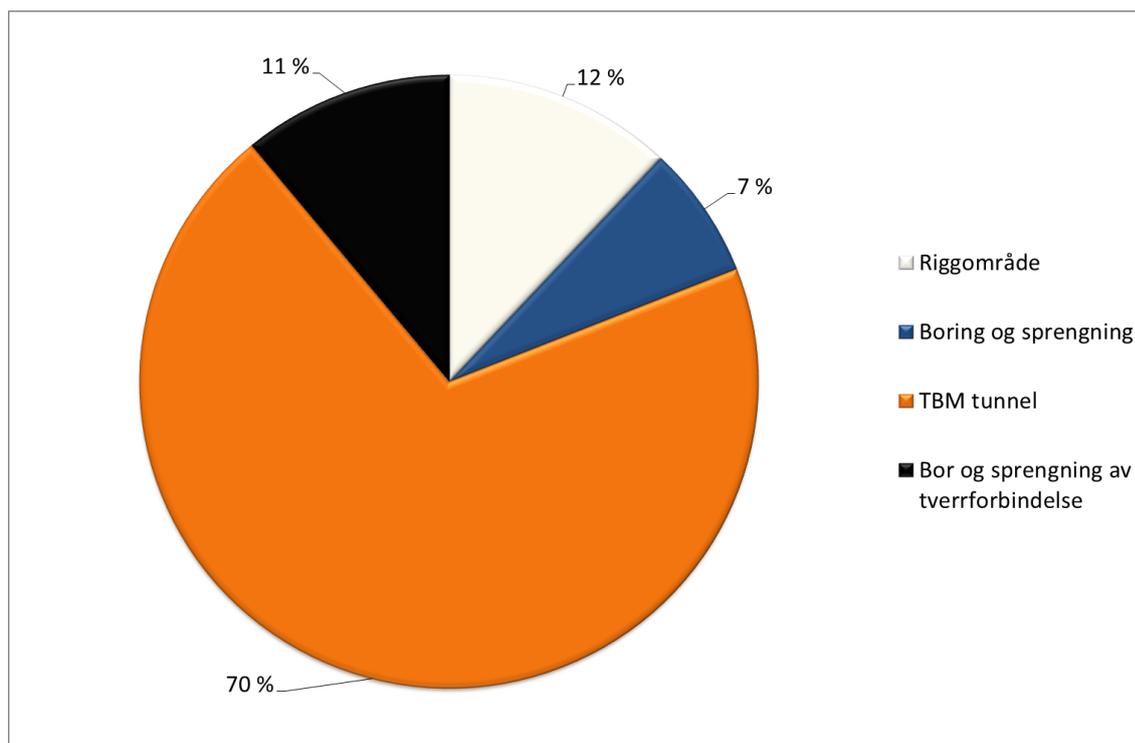
Estimatet inkluderer drivekostnader, sikring, installasjonskostnader og logistikk-kostnader for TBM-drift. Estimatet inkluderer ikke bor og spreng og bor og splitt ved adkomst ved Oslo eller driving av adkomsttunneler ved Åsland (hovedangrepspunktet for tunneldriften). TBM-kostnadsestimatet inkluderer heller ikke korrigeringer for:

- Skatt og avgifter
- Inflasjon under byggetid
- Tollkostnader ved import
- Kostnader for etablering av anleggsveier
- Kostnader for bank- og finansgarantier
- Byggherrekostnader som eksempelvis prosjektering, anleggsledelse og kontroll under bygging.

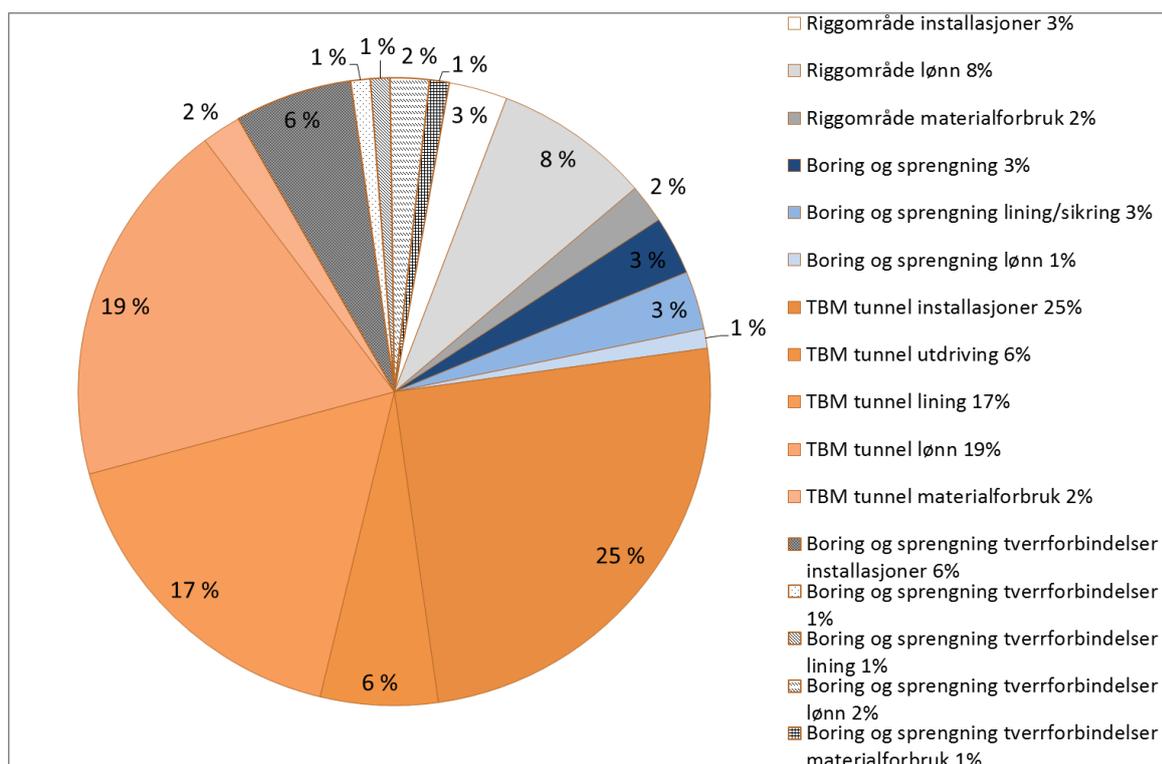


Figur 28: Kostnadsestimering konsept for Follo banen (Gollegger, 2014).

Follobanen er ute på anbud (juni – oktober 2014) og faktiske kostnader fra estimatet er derfor ikke publiserbare. Det presenteres grove prosentvise kostnadsestimat. Figur 29 viser prosentvis fordeling av estimerte kostnader for Follobanen, hvor TBM-tunnel (inkludert betonglining, avskrivning og renter for TBM, forbruksmateriell og lønn) utgjør ca. 70 %. Figur 30 viser prosentvis fordeling av estimerte kostnader for Follobanen på undergruppe 1. Estimatet har totalt 3 undergrupper og anses som meget detaljert.



Figur 29: Prosentvis fordeling av estimerte kostnader for Follobanen inndelt i hovedgrupper (etter Gollegger, 2014).



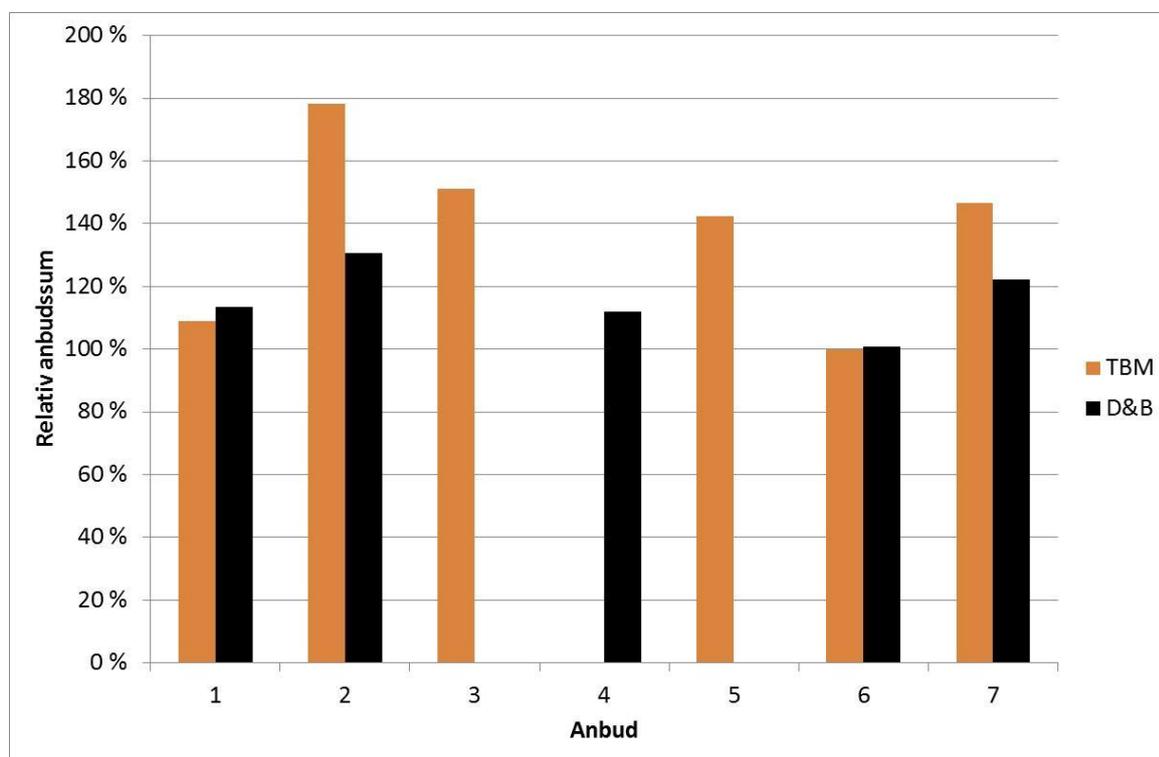
Figur 30: Prosentvis fordeling av estimerte kostnader for Follobanen inndelt i undergruppe nivå 1 (etter Gollegger, 2014).

### 6.3 Erfaring anbudsprosess og kostnader for Ulriken jernbanetunnel

Kostnadsestimatet for Ulriken jernbanetunnel ble utført av konsulentfirma i 2012/2013. Estimaten traff meget godt med de billigste anbudene som ble levert til Jernbaneverket. Relative tilbudspriser er vist i Figur 31.

I tillegg til pris ble følgende årsaker lagt til grunn for valg av TBM ved Ulriken:

- Byggherren ser fordeler med hensyn på reduserte vibrasjoner under tunneldriving med bruk av TBM kontra boring og sprengning. Dette er viktig for prosjektet, da det ønskes å minimere påvirkning på eksisterende jernbanetunnel som ligger 15-30 m fra planlagt ny Ulriken tunnel.
- Enklere vann- og frostsikringsmetodikk grunnet sirkulært profil med jevn kontur



Figur 31: Fordeling av relative anbudssummer i fra Ulriken jernbanetunnel i Bergen.

## 7 Vurderinger og videre arbeid

Funnene i denne rapporten viser at TBM kan benyttes til bygging av vegtunneler. Utnyttelse av sirkulært tunnelvernsnitt er mulig basert på erfaringer fra prosjekter i Sveits, Østerrike, Tyskland, Polen og USA.

En svakhet i data- og erfaringsgrunnlaget som er benyttet i denne rapporten er manglende prosjekter med TBM diameter > 11 og i bergmasse tilsvarende norske forhold. Det foreligger derfor ikke byggetid- og kostnadserfaringer for TBM-drift i bergmasse som kan være aktuelle for forhold i Norge.

Fordeler ved bruk av TBM-er er følgende:

- Gunstigere tunnelkontur, som kan øke levetid og redusere sikringsomfang og vedlikehold av tunnelen
- Reduserte forstyrrelser (vibrasjoner) i område rundt tunneldriving. Dette kan være en særlig fordel ved etablering av ny tunnel langs eksisterende tunnel, gjennom reduksjon av behov for stengning av trafikk i eksisterende tunnel (eksempel Eidsvåg i Bergen og nye tunneler mellom Trondheim og Stjørdal).
- Det er mulig å drive lange tunneler uten tverrslag, som kan redusere inngrep i dagen og skåne natur.
- Ved god ventilasjon kan arbeidsforhold under driving inne i tunnelen være bedre enn ved ordinær boring og sprengning, grunnet fravær av skytegasser fra spengstoff, og avgasser fra dieselmotorer.
- Avrenningsproblematikk fra uomsatt spengstoff reduseres/er ikke tilstedeværende ved TBM-drift.
- Ved urbane og relativt grunne tunneler har man god setningskontroll ved bruk av skjold-TBM med aktiv stoffstabilisering.
- For vegtunneler kan systemer for vann- og frostsikring inkluderes i betongelement som legges kontinuerlig under tunneldriving. Dette betyr at tunnelen kan «ferdigstilles» under driving i større grad enn ved boring og sprengning (Hansen, 2010)
- Ved bruk av TBM-er med mulighet for å drive i både løsmasser og berg, kan linjeføring av tunnel velges noe friere og i noen tilfeller gi redusert lengde på tunnel.

Grunnene til at TBM ikke er benyttet i noen særlig grad til vegtunneler i Norge er identifisert til å være:

- Norge har lang tradisjon og meget høy kompetanse innen boring og sprengning av tunneler og denne kompetansen gjelder alle ledd i tunnelproduksjon (fra leverandører, entreprenører, konsulenter og byggherrer). Det er derfor en lang og god tradisjon som underbygger boring og sprengning fra erfaring på eksempelvis bygging, prosjektering, forundersøkelser og anbudsbeskrivelser.

- Det sirkulære profilet som en TBM etablerer, er vanskeligere å utnytte effektivt til vegformål enn fleksible tverrsnittsløsninger som er mulig med boring og sprengning.
- Erfaringer fra for eksempel Fløyfjelltunnelene har gitt TBM et ufortjent dårlig rykte grunnet byggetid og kostnader. Selve driving av «pilot-tunnel» med TBM var en suksess mht. tid og kostnader og omfang av bergsikring.
- Det kreves endringer i Statens vegvesens håndbøker og prosesskode, dersom disse skal dekke bruk av TBM. Dette vil kreve ressurser hos Statens vegvesen og konsulenter.
- Usikkerhet og risiko som skyldes en høy bundet kapital ved bruk av TBM og omfattende mobilisering.
- Usikkerhet og risiko som skyldes TBM-ens manglende mulighet til å håndtere varierende grunnforhold (dette henger sammen med erfaring, omfang og type av grunnundersøkelser).

I videre arbeid innen bruk av TBM-er til vegtunneler i Norge, foreslås det å utføre en risikovurdering som sammenligner dagens prosjekteringsregler i Håndbok N500 (021) opp mot eventuelle prosjekteringsregler som fjerner nisjer og kompenserer med andre sikkerhetstiltak. De tenkte sikkerhetstiltakene ved fjerning av nisjer kan være:

- To tunnellop med tofeltsveg i samme kjøreretning per tunnellop
- Automatisk trafikklysstyring av kjørebane. Ved eventuell stopp i en kjørebane, stenges kjørebane, og trafikken ledes over i åpen kjørebane. En annen mulighet er å lede all trafikk over i et løp (ved lengre stenging).
- Tverrforbindelser til annet løp ved eventuell evakuering, og hvordan etablere eventuelle tverrforbindelser uten å skade kontur i boret tunnel og hindre tunneldrift under bygging.
- Ved stort tunneltverrsnitt (> 12 m diameter) kan det etableres mulighet for evakuering i rommet under kjørebane.

## Referanser

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

Barton, N. (1999). "TBM performance estimation in rock using  $Q_{TBM}$ ". Tunnelling International, September 1999, p. 30-34

Barton, N. (2000). "Rock mass classification for choosing between TBM and drill-and-blast or a hybrid solution.", [www.nickbarton.com/](http://www.nickbarton.com/)

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.

Dammyr, Ø., Nilsen, B., Thuro, K., Grøndal, J., "Possible concepts for Waterproofing of Norwegian TBM Railway Tunnels. 2013. Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering. DOI 10.1007/s00603-013-0388-5.

DAUB (2010), "Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen", Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. German Tunnelling Comitee (ITA-AITES).

EFNARC (2005), "Specifications and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock". Experts for Specialised Construction and Concrete Systems.

Efron, N., Read, M., (2012) "Analysing International Tunnel Costs, Worcester Polytechnic Institute / AECOM". 2012.

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

Gjæringen, G., (2008). TBM – Muligheter i Norge. Upublisert.

Grøv, E., Boye, C., Holmøy, K., (2013) "Tunnelling Rogfast with TBM at 390 m below sea level". Strait Crossings 2013 Proceedings (231) s 453 – 466.

Hansen, A., (2010) «TBM vs D&B – Pros and Cons – Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk». Lastet ned i fra [www.nff.no](http://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](http://nff.no/wp-content/uploads/2014/01/Publication_11.pdf)

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

Gollegger 2014. "Personal communication and meeting in Oslo May 23, 2014.

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.

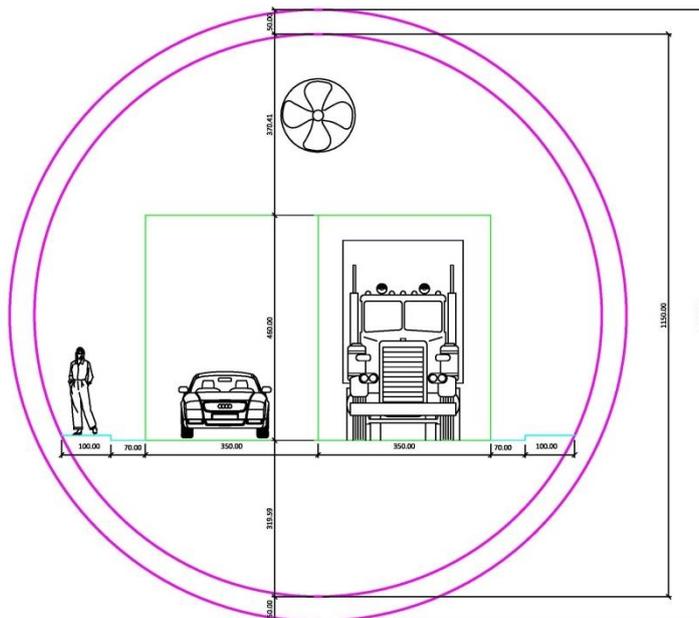
Zare, S., (2007) Drill and Blast Tunnelling .- Advance Rate and Costs" NTNU Project Report 2B-05 og 2C-05.

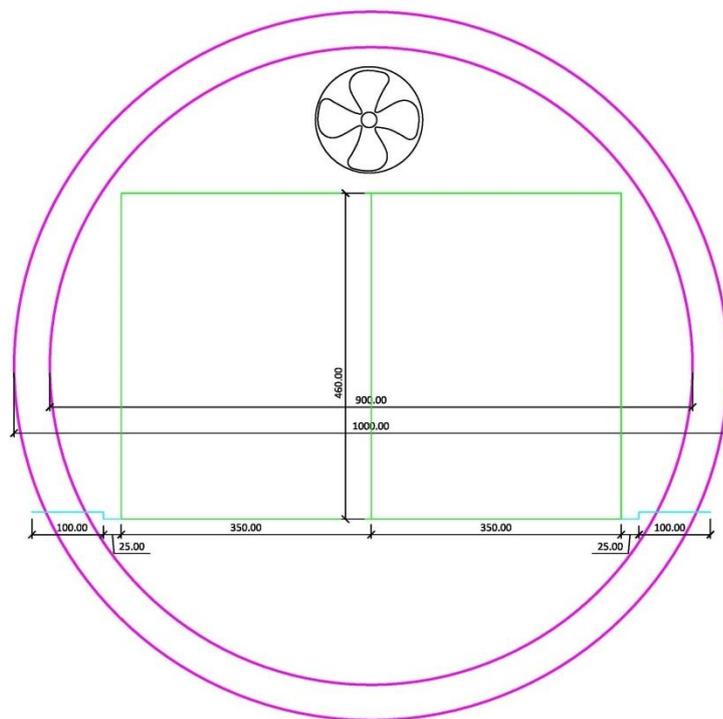
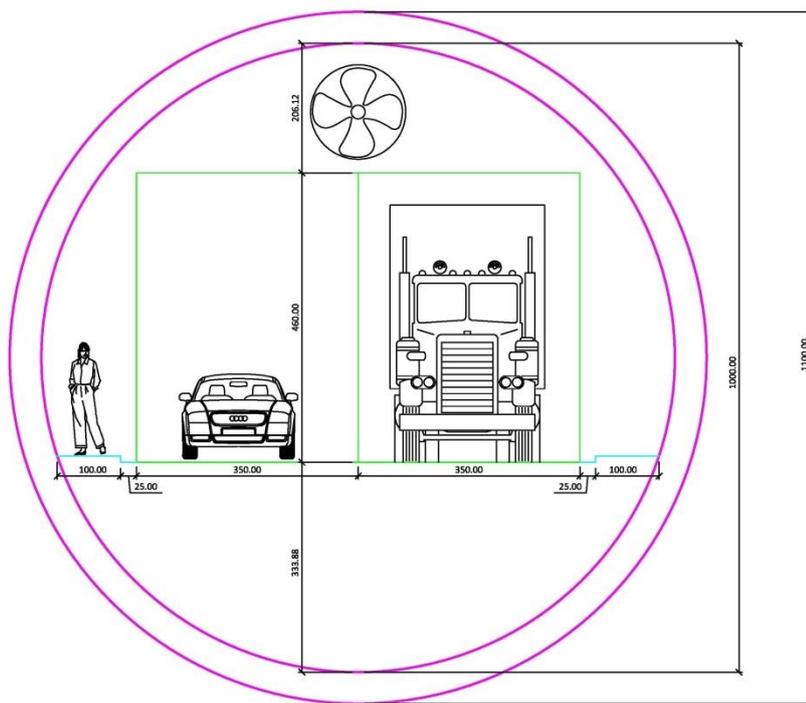
## Vedlegg

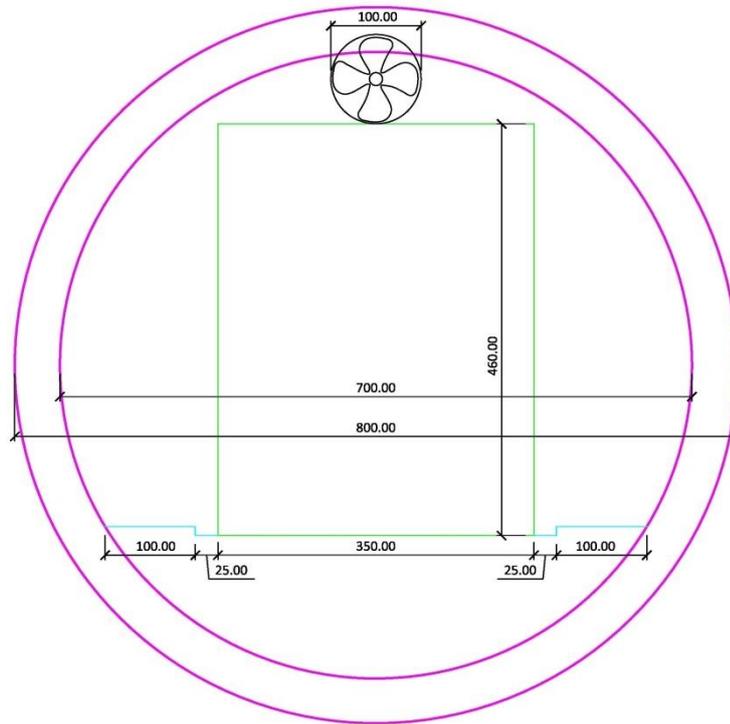
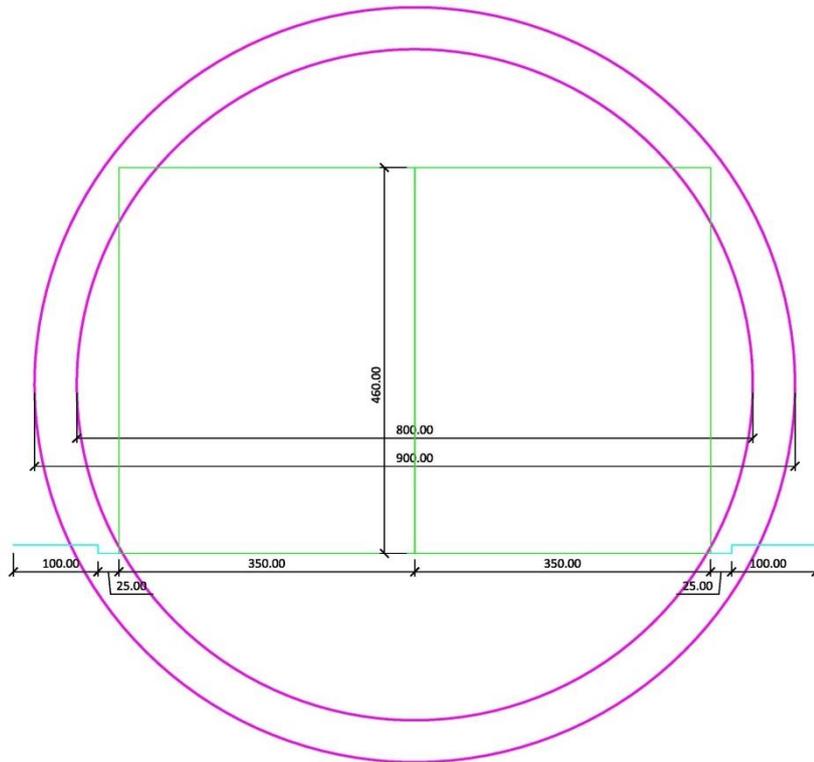
### Vedlegg 1: Sirkulære tunnelverrsnitt med kjøreboks.

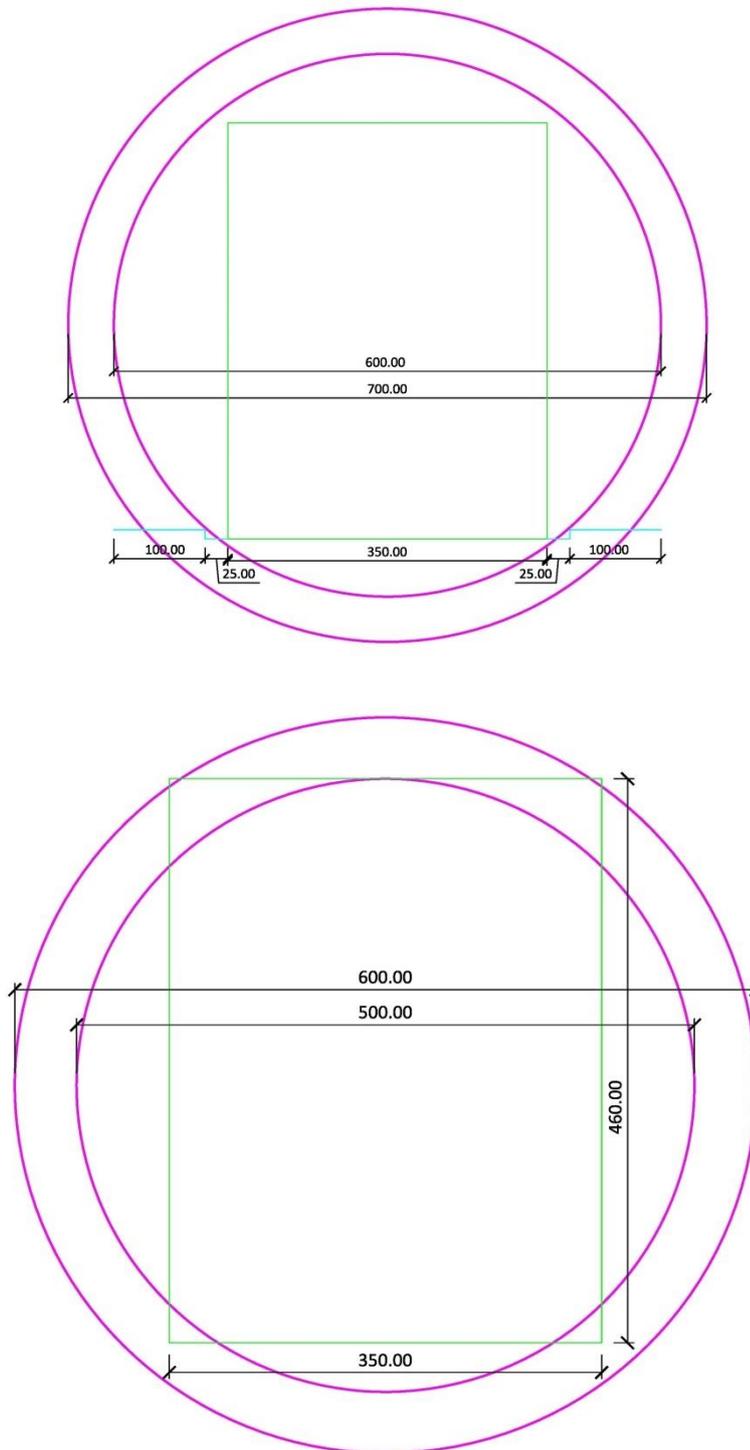
Vedlagt er boret tunnelverrsnitt med kjøreboks i fra SVVs håndbok N500. Tverrsnittene er markert med 500 mm område for bergsikring. Tegningene er vedlagt for å gi en indikasjon på hvor stort område av tunnelen som kan benyttes til vegformål. Tegningene er i følgende rekkefølge:

- 12,5 m diameter
- 11 m diameter
- 10 m diameter
- 9 m diameter
- 8 m diameter
- 7 m diameter
- 6 m diameter









## Vedlegg 2: Drivekostnader med TBM og forenklet oversikt over anleggsperiode

Det eksisterer erfaringsmodeller for å estimere drivekostnad med TBM for hardt berg. NTNUs estimeringsmodell for drivetid og kostnader inkluderer følgende parametere:

- Geologi (Drilling Rate Index™, Cutter Life Index™, kvartsinnhold i bergmassen, porøsitet og oppsprekkingsklasse)
- TBM-parametere (diameter på kutterhode, matekraft per kutter, dreiemoment, omdreiningstall på kutterhode)
- Kostnader (TBM, kutterverktøy, pris på elektrisitet, diesel, arbeidskraft og renter og kostnadsutvikling)

Basert på disse inputparameterne eksisterer det empiriske forhold opp i mot drivetid (netto inndrift på TBM, utnyttelsesgrad av TBM, og derav byggetid) som kan benyttes til å kalkulere drivekostnad for TBM. Modellen estimerer drivekostnad eksklusiv kostnader og evt. ekstra tid for bergsikring, installasjoner som lys og kjørebane, markedsforhold og taktisk prising, atkomster og rigg og drift.

I det følgende er det estimert relative drivekostnader for diameter 6, 10, 11 og 12,5 m i en homogen bergmasse med følgende parametere:

- Drilling Rate Index™ 50
- Cutter Life Index™ 10
- Kvartsinnhold 25%
- Oppsprekkingsklasse<sup>3</sup> II
- Kostnadsøkning siden 1998<sup>4</sup> 60%
- Tunnellengde 10 km

Tabell 2 viser estimert tunnelproduksjon og relativ kostnad for TBM-drift av 10 km tunnel. Tabellen indikerer en eksponentiell økning av drivekostnad med økende tunneldiameter.

Tabell 3 viser tilsvarende estimert drivetid og relativ drivekostnad for boret og sprengt tunnel for samme tunnelstørrelser. I dette estimatet er det antatt tunneldrift i fra to stuffer, slik at stufflengdene blir 5 km.

---

<sup>3</sup> Oppsprekkingsklasse angir gjennomsnittlig avstand og orientering av sprekker og stikk i bergmasse (Bruland, 1998) og (Macias og Bruland, 2014).

<sup>4</sup> NTNU modellen ble sist revidert i 1998.

**Tabell 2: Estimert tunnelproduksjon og relative kostnader for ulike TBM diametere i lik geologi. Effektivt tverrsnitt er illustrert i vedlegg.**

<b>Tverrsnitt</b>	<b>Netto inndrift</b>	<b>Andel boring</b>	<b>Ukeinndrift</b>	<b>Drivetid (10 km)</b>	<b>Relativ kost.</b>
6 m	3,09 m/h	43 %	158 m	63 uker	100 %
10 m	1,58 m/h	49 %	91 m	110 uker	239 %
11 m	1,33 m/h	50 %	80 m	125 uker	288 %
12,5 m	0,97 m/h	55 %	63 m	158 uker	386 %

Tilsvarende har NTNU etablert en prognosemodell for borede og sprengte tunneler (Zare, 2007). Tabell 3 viser estimert tunnelproduksjon og relativ kostnad sammenlignet med 6 m diameter TBM i Tabell 2.

**Tabell 3: Estimert tunnelproduksjon og relative kostnader for boret og spreng tunnel i lik geologi.**

<b>Tverrsnitt</b>	<b>Uke produksjon</b>	<b>Drivetid</b>	<b>Relativ kost</b>
28 m <sup>2</sup>	96,2	52 uker	108 %
67,5 m <sup>2</sup>	65,9	66 uker	155 %
80 m <sup>2</sup>	62,5	80 uker	168 %
90 m <sup>2</sup>	55,1	91 uker	189 %

ID	Activitetsnavn	Varighet	Start	Slutt	Navn på ressurser
1	Bestilling av TBM	320 dager	ti 17.11.15		
2	Riggning	60 dager	fr 20.03.15		
3	Sprengning/rens/etabl. av portaler	130 dager	fr 26.06.15		
4	Oppstart TBM	45 dager	ti 19.01.16		
5	Driving tunnel	125 uker	ti 03.07.18		
6	Nedrigging	30 dager	ti 14.08.18		

Figur 32 Forenklet Gant-diagram som viser varighet av tunneldriving med TBM.



Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO  
Tlf: (+47 915) 02030  
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

**Trygt fram sammen**