

Innholdsfortegnelse

Anbefalt konstruksjonsprinsipp for jernbanetunneler	1
1. Innledning	1
2. Tunnelkonsept	2
2.1 Sikkerhet	2
2.2 Geologiske forutsetninger	3
2.3 Anleggsteknikk	3
2.4 Drift og vedlikehold	4
2.5 Kostnader	4
2.6 Erfaringer fra andre land	4
3. Konstruksjonsprinsipp	9
3.1 Geometrisk utforming	9
3.2 Sporkonstruksjon	9
3.3 Stabilitetssikring	10
3.4 Drivemetode	11
4. Vann- og frostproblematikk	12
4.1 Vanntrykk	12
4.2 Frost	13
5. Vurdering av ulike vannsikringsløsninger	14
5.1 Frittstående konstruksjoner	15
5.2 Konstruksjoner i direktekontakt med bergsikringen	18
5.3 Vurdering av metodene	21
6. Konklusjon	23
7. Referanser	24

Anbefalt konstruksjonsprinsipp for jernbanetunneler

1. Innledning

Jernbanetunneler er omfattende konstruksjoner som dimensjoneres for en brukstid på mer enn 100 år. Dette tilsier behov for lang levetid for stabilitets- og sikringskonstruksjonene i tunnelen. Med bakgrunn i erfaringene med en del av dagens jernbanetunneler som har vært trafikkert i godt over 100 år, anses ikke dette å være en utfordring som prinsipielt krever nye tiltak og metoder ut over det som benyttes i dag. Det er likevel alltid viktig å ta i bruk nye og effektive løsninger og teknikker som kan forenkle ettersyn og vedlikehold i tunnelene og redusere levetidskostnadene. Jernbanetunneler er ikke vedlikeholdsfrie hverken med hensyn på utstyr eller selve konstruksjonen, men prinsippet må være at tunnelkonstruksjonen med utstyr skal være oversiktlig og enkel å kontrollere med hensyn på tilstand og vedlikeholdsbehov. Videre er det viktig at vannsikringsløsningene er fleksible i bruk og enkle å vedlikeholde selv med korte driftspauser.

Det er viktig å være klar over forskjellene mellom vei- og jernbanetunneler både når det gjelder dimensjoneringskriterier og utfordringer i driftsfasen. En av de grunnleggende forskjellene er at jernbanetunneler ikke trenger å ta visuelle hensyn ved utforming av tunnelen. Av driftsmessige forskjeller er det for de fleste veitunneler mulighet til å lede trafikken over på alternative ruter for slik å skaffe seg tid til vedlikehold. Denne muligheten har man bare for et fåtall jernbanetunneler. En veitunnel har også et hyppigere behov for vedlikehold på grunn av eksosgasser og veisalt. Sikkerhetsmessig er det betydelig forskjell, og det er ikke relevant å overføre ulykkesscenarier fra vei til jernbane, noe som gir seg uttrykk i ulik tilnærming hva gjelder beredskap og utstyr i tunneler.

For global stabilitet, bergsikring og levetid/brukstid på selve bergkonstruksjonen er ikke forskjellene mellom vei- og jernbanetunneler store. Størrelser på kjøretøyer, krav til hastighet (kurvatur) og kapasitet har imidlertid økt betydelig mer for vei enn for jernbane de siste årene. Dette har ført til at veitunneler raskere blir umoderne eller har behov for tverrsnittsutvidelser.

Denne veilederen gir anbefalinger for planlegging, bygging, drift og vedlikehold av nye jernbanetunneler. Veilederen beskriver anbefalt konstruksjonsprinsipp, herunder kriterier for valg av tunnelkonsept, prinsipper om drenert/udrenert tunnelløsning, geometrisk utforming, sporkonstruksjon, stabilitetssikring, kriterier for valg av drivemetode og vannsikringsløsninger for nye jernbanetunneler. Føringerne er generelle, da jernbanetunneler uansett må ses på individuelt i forhold til topografi, geologi, trafikk osv. da disse forholdene kan variere mye. Jernbanetunneler kan gå under tett bebyggelse, gjennom fjell med stor overdekning, i høyfjellsområder med hardt vinterklima, langs kyststrekninger med liten fjelloverdekning osv.

Målgruppen er de som planlegger og prosjekterer tunnelprosjekter, i tillegg til beslutningstagere og utbyggere.

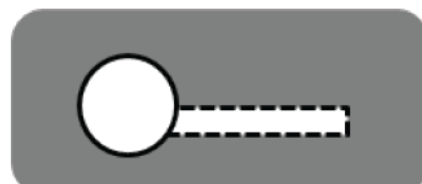
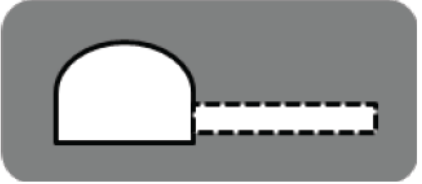
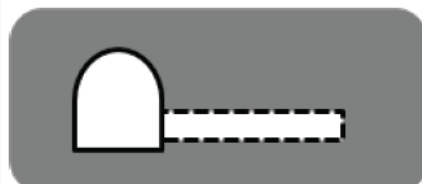
2. Tunnelkonsept

Følgende prinsipielle tunnelkonsept benyttes for dobbeltsporede jernbanestrekninger:

- Ett dobbeltsporet løp med rømningsveier til det fri eller annet sikkert sted for minimum hver 1000 m
- Ett dobbeltsporet løp med parallell service-/rømningstunnel med tverrforbindelse for rømning for minimum hver 1000 m
- To separate enkeltsporede løp med tverrforbindelse mellom disse for hver 500 m
- To separate enkeltsporede løp med servicetunnel forbundet med rømningsveier mellom tunnelene

Dette er de samme løsningene som omfattes av TSI SRT, og gjelder jernbanetunneler med lengde på mer enn 1 km.

Prinsippet er vist i figur 1.

TBM	Konvensjonell driving	Konvensjonell driving
		
To løp – enkeltsporet	Ett løp – dobbeltsporet tunnel m/service-/rømningstunnel	To løp – enkeltsporet tunneler
		
Ett løp – enkeltsporet m/rømning til det fri	Ett løp – dobbeltsporet tunnel m/rømning til det fri	Ett løp – enkeltsporet tunnel m/rømning til det fri

Figur 1 Tunnelkonsept

Valg av tunnelkonsept må gjøres basert på en RAM-vurdering der prosjektet skal finne vedlikeholdsoptimale løsninger, vurdere tekniske løsninger og utstyr, og definere arbeidsprosesser slik at man får mest mulig hensiktsmessig drift og vedlikehold av tunnelen. Valget gjøres basert på en helhetsvurdering av følgende forhold:

1. Sikkerhet
2. Geologiske forutsetninger
3. Anleggsteknikk
4. Drift og vedlikehold
5. Kostnader

2.1 Sikkerhet

Sikkerhetsmessig vil både dobbeltsporstunneler og to parallelle enkeltsporstunneler tilfredsstill

dagens krav til sikkerhet [1]. Teknisk spesifikasjon for sikkerhet i jernbanetunneler (TSI SRT) [2] godtar løsningene på lik linje, hvilket innebærer at begge løsningene kan velges ut fra et sikkerhetsperspektiv. For dobbeltsporstunneler kreves en avstand til utgang til sikkert sted minst én gang hver 1000. m. En kan også velge å bygge en parallell rømnings-/servicetunnel. I parallelle enkeltsporstunneler skal det etableres tverrpassasjer mellom løpene, og disse skal finnes minst én gang hver 500. m [2]. Grunnlaget for forskjellen i avstand til sikkert sted er at det tar lenger tid for en kritisk tilstand oppstår ved brann i en dobbeltsporstunnel enn i en enkeltsporstunnel på grunn av større volum for røyken i dobbeltsporstverrsnittet.

For tunneler kortere enn 1000 m er det ikke krav til rømningsveier.

2.2 Geologiske forutsetninger

For bergtunneler i Norge med tilstrekkelig overdekning (i gode bergforhold ofte definert som overdekning > tunneldiameter) vil de geologiske forholdene normalt ikke være av betydning for valg av tunnelkonsept. I svært dårlig berg, for tunneler i løsmasser og ved andre spesielle forhold, kan dette imidlertid styre valg av tunnelkonsept.

Der topografiske eller andre forhold gjør det vanskelig å etablere rømning til det fri eller annet sikkert sted med rømningsveier for minst hver 1000. meter, må det vurderes service-/rømningstunnel eller to parallelle løp.

2.3 Anleggsteknikk

Topografiske forhold og mulige angrepspunkter for driving av tunnelen vil ha betydning for valg av konsept. Valg av drivemetode (konvensjonell driving eller TBM) vil også være viktig. Fjellkvaliteten er avgjørende for hvor god framdriften er ved bruk av TBM. Boring av dobbeltsporstverrsnitt med TBM er ikke særlig aktuelt i de harde bergartene som er dominerende i Norge. Det vil ta lengre tid å bore og slite mer på kutterne, og dette vil gjøre drivingen mer kostbar. Maskiner med svært store tverrsnitt som brukes i utlandet borer i løsmasser eller svakere bergarter. Boring av enkeltsporet tunnel med mindre diameter går bra med TBM selv i harde bergarter (ref. Jernbaneverkets tunnelprosjekter Arna – Bergen 2015-2020, Follobanen 2015-2021 og mange prosjekter utenlands).

Valg av to parallelle enkeltsporstunneler genererer mer overskuddsmasse enn én dobbeltsporet tunnel. For Follobanen er to løp beregnet til å gi 30 % mer masse enn ved én dobbeltsporet tunnel.

En fordel med dobbeltsporstunneler er at separasjon av sporene inn mot tunnelportalen ikke er nødvendig. For enkeltsporstunneler bygges tunnelportalene normalt med ca. 25 m sporavstand, noe som medfører at det legges beslag på et betydelig større areal enn for en dobbeltsporet portal. Ved store hastigheter vil sporgeometrien medføre at utgreining fra normal til stor sporavstand vil starte langt fra portalen.

Dersom det er behov for overkjøringssløyfer er det en fordel med dobbeltsporet tverrsnitt.

2.4 Drift og vedlikehold

Dimensjonerende trafikk danner grunnlaget for tunnelens tilgjengelighetskrav. Vedlikehold av tunneler må utføres i hvite tider for å sikre at trafikken ikke blir berørt (kapasiteten opprettholdes).

Ved to parallelle tunneler stenger man ett løp og avvikler trafikken begge veier i det andre løpet. I dobbeltsporet tverrsnitt kan det være vanskelig å få til vedlikehold på det ene sporet mens driften opprettholdes med full hastighet på det andre. Vedlikeholdstoget gjør imidlertid at svært mye sporarbeid kan utføres godt beskyttet ved en dobbeltsporstunnel med full hastighet i nabospor. De fleste vedlikeholdsoppgaver på kl-anlegg er også fullt gjennomførbart med trafikk på nabospor i dobbeltsporet tunnel, riktignok med nedsatt hastighet. Ved større sporarbeider kan man vurdere å installere et fast skille mellom sporene, enten gjennomgående eller strekningsvis. Ved dette tiltaket kan de fleste arbeidsoppgaver utføres på ett av sporene med uhindret trafikk på nabosporet [3].

Ved to løp vil det være mer utstyr som skal vedlikeholdes. I tillegg vil utstyret utsettes for større belastning i en toløpstunnel enn i en ettløpstunnel pga. mindre tverrsnitt. En ettløpstunnel gir muligheter for å plassere teknisk utstyr i tilknytning til rømnings-/servicetunnelene slik at adkomst til disse er uavhengig av skinnegående kjøretøy og sportilgang.

2.5 Kostnader

Generelt er ettløpstunneler rimeligere enn toløpstunneler. Dobbelsportunneler har en kostnad på i størrelsesorden halvparten av to ganger enkeltspor basert på regneeksempel med kontaktstøpt betonghvelv med membran som vannsikringsløsning. For rimeligere vannsikringsløsning blir forskjellen noe mindre. Omfang og behov for forinjeksjon vil også ha betydning [4].

Et annet forhold som har betydning i forhold til kostnader er hvordan kravet til rømningstunneler oppfylles. Beregninger som Trafikverket har utført viser at når kostnaden for rømningstunnelene legges til på dobbeltsporstunnelen innebærer det at rømningstunnelene maksimalt får utgjøre 45 % av dobbeltsporstunnelens lengde før dobbeltsporstunnelen blir dyrere [5].

2.6 Erfaringer fra andre land

Tabellene nedenfor viser for hvert land jernbanetunneler over 10 km både i drift og under bygging. Tunnelløsning for tunneler < 10 km er ikke listet opp, men likevel gjennomgått. Andel ettløpstunneler øker med avtagende lengde. For Sverige og Finland er det tatt med alle tunneler over 5 km.

Tabellforklaring:

* E = enkeltspor, 2E = 2 parallelle enkeltsporede tunneler, D = dobbelspor i ett tunnellop, +s = separat service- og redningstunnel * TBM = tunnelen er bygget vha. tunnelboremaskin, konv. = tunnelen er drevet med konvesjonell metode (sprenging)

2.6.1 Sveits

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Gotthard baseline	57	2E	2017	TBM
2	Lotschberg base tunnel	34,6	E/2E	2007	TBM/Konv.
3	Vereina	19	E/D	1999	Enkeltspor
4	Furka base tunnel	15,4	E	1982	Enkeltspor
5	Ceneri basistunnel	15,4	2E	2019	TBM
6	St.Gotthard	15	D	1882	
7	Lötschberg	14,6	D	1913	

Sveits har ingen klar strategi for valg av tunnelløsning, og valg av løsning gjøres for hvert enkelt prosjekt avhengig av trafikk tetthet, lengde og bergforhold. De nye lange alpetunnelene Gotthard og Lotschberg bygges imidlertid som toløpstunneler med hyppige tverrslag i avstand 300-350 m. Ettløpstunneler er det vanlige konseptet i Sveits for mange nyere tunneler på ca. 5-10 km.

I Sveits er det også eksempler på dobbeltspor i ett løp utført med TBM, Zimmerberg fase 1 fra Zürich til Thalwil (10 km) og Weinbergtunneler i Zürich (4,8 km). Diameter ca. 12 m.

2.6.2 Frankrike

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Mont Cenis	54	2E	2022	TBM/Konv.
2	Frejus (Mont Cenis)	13,7	D	1871	Grensetunnel mot Italia

Til tross for stor satsing på bygging av nye høyhastighetsbaner er det bygget lite nye konvensjonelle jernbanetunneler i Frankrike bortsett fra Kanaltunnelen som er omtalt under Storbritannia. De nye høyhastighetsbanene er bygget med større stigninger og fall enn i de fleste andre land. Dermed har man i stor grad unngått bruk av tunneler.

På den nye LGV Méditerranée som ble tatt i bruk i 2001 er det totalt 12,5 km med tunneler. Disse er alle ettløpstunneler. Holdningen har imidlertid endret seg, og på linjen Perpignan-Figuerras-Gerona bygges en 8,2 km lange Perthustunnelen som toløpstunneler.

2.6.3 Østerrike

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Koralmtunnel	32,8	2E	2023	TBM
2	Wienerwald	13,4	2E/D	2008	TBM (11 km)
3	Inntal	12,7	D	1994	
4	Lainzer	12,3	D/2E	2008	Cut&Cover/TBM
5	Radfeld-Wiesing	11,4	D	2010	Delvis TBM
6	Arlberg	10,6	D	1884	
7	Stans-Terfens	10,6	D	2008	
8	Brenner basis	55	2E	2020	TBM

De fleste jernbanetunneler i Østerrike er bygget som dobbeltspor i ett løp. Toløpstunneler er kun

aktuelt ved tunneler > 20 km. For middels lange tunneler vurderes ett eller to løp for hvert enkelt prosjekt. Østerrike har mer enn 70 tunneler lenger enn 1000 m.

Koralmtunnelen med en samlet lengde på ca. 33 km og overdekning opp til 1200 m utgjør kjernestrekningen for en ny høyhastighetslinje fra Graz til Klagenfurt. Tunnelen utføres med to parallelle enkeltsporstunneler med tverrpassasjer hver 500 m. Dimensjonerende hastighet er 250 km/h. Tunnelen drives hovedsakelig med TBM. Tunnelen er planlagt ferdig i 2023.

2.6.4 Tyskland

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Landrucken	10,8	D	1988	
2	Mundener	10,5	D	1991	

På høyhastighetsbanen Neubaustrecken er det flere tunneler opp mot 10 km. Disse tunnelene er ettløpstunneler. Her er både gods- og persontrafikk. På den nye strekningen Leipzig-Erfurt-Nürnberg og andre høyhastighetsbaner som bygges for 300 km/h velges det i stor grad ettløpstunneler.

2.6.5 Italia

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Simplon I&II	19,8	2E	1906/22	Konv.
2	Appennino base tunnel	18,5	D	1934	Konv.
3	Vaglia	16,8	D+delvis s	2009	Konv.
4	Valico	16,6			
5	Firenzuola	15,3	D	2009	
6	Monte Santomarco	15	E	1987	Enkeltsporbane
7	Sciliar	13,2	D	1993	
8	Caponero-Capoverde	13,1	D	2001	
9	Peloritana	12,8	E	2001	Dobling av eksisterende linje
10	Bussoloeno	12,5	2E	2012	
11	Monterotondo	11,1			
12	San Donato	11	D	1986	
13	Pianoro	10,9	D	2009	
14	Raticosa	10,5	D	2009	
15	Sant Lucia basis	10,3	D	1977	

Italia er det landet i Europa med høyest tunnelandel - hele 10 %. Mer enn 140 tunneler er lenger enn 2 km. Alle tunneler er i henhold til referanse 2) dobbeltsporet i ett løp. Dette konseptet er også det foretrukne for nye tunneler.

2.6.6 Sverige

I rapport fra Trafikverket i Sverige, referanse 1), anbefales det å utforme tunneler på linjer med to

spor med ett tunnellop som førstevalg opp til 8 km. Tunneler lengre enn 14 km anbefales utført med to parallelle løp. Mellom 8 og 14 km kan det benyttes enten dobbeltspor eller to parallelle enkeltsporstunneler, avhengig av eksterne forhold i det aktuelle området.

Sverige har 38 jernbanetunneler lengre enn 1000 m. Mange nyere tunneler er bygget i forbindelse med den enkeltsporede Botniabanen (25 km) som stod ferdig i 2010.

Tunnelen gjennom Hallandsåsen (8,7 km) har to parallelle løp.

I referanse 1) er det angitt at i tunneler med stor trafikk og mange passasjerer i storbyområder i Sverige, har avstanden mellom rømningsveiene tendert å bli ned til ca. 300 m basert på de rømningsanalyser og sikkerhetsvurderinger som må gjennomføres.

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Hallandsåstunneln	8,7	2E	2015	63 % TBM, 37 % sprengt
2	Citytunneln	6,0	2E	2010	TBM + cut and cover
3	Citybanan (Stockholm)	6,0		2017	
4	Namntalltunneln	6,0	E	2009	Konv.
5	Björnböletunneln	5,2	E	2009	Konv., tas i bruk 2012
6	Arlanda	5,1	D	2000	Konv.

2.6.7 Finland

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Savio	13,5	E	2008	Konv., kun godstrafikk

Ringbanen som forbinder Helsinki med den internasjonale flyplassen ved Vantaa utføres med to parallelle tunnellop. Tunnelstrekningen er 8 km lang, og har stasjoner i fjell med mellomplattform. Banen er dimensjonert for commuter-tog med dimensjonerende hastighet 120 km/h. Tunnelen er drevet med konvensjonell sprengning. Avstand mellom rømningsveier mellom de to tunnellopene er 230 m.

2.6.8 Japan

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Seikan	53,9	D+s	1988	Konv.
2	Hakkoda	26,5	D	2010	TBM
3	Iwate-Ichinohe	25,8	D	2002	
4	Iiyama	22,2	D	2013	
5	DaiShimizu	22,2	D	1982	
6	Shin-Kanmon	18,7	D	1975	
7	Rokko	16,2	D	1972	
8	Haruna	15,4	D	1982	
9	Gorigamine	15,2	D	1997	
10	Nakayama	14,9	D	1982	
11	Hokuriku	13,9	D	1962	
12	SinShimizu	13,5	E	1967	Dobling av eksisterende linje

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
13	Aki	13	D	1975	
14	Chikushi	11,9	D	2013	
15	KitaKyushu	11,8	D	1975	
16	Fukushima	11,7	D	1982	
17	Kubiki	11,4	D	1969	
18	Shiozawa	11,2	D	1982	
19	Akakura	10,5	E	1997	
20	Ikuta	10,4	D	1976	
21	Daisan-shibisan	10	D	2004	

Japan har totalt 21 jernbanetunneler over 10 km. De fleste tilhører det japanske høyhastighetsnettet. De bygger alle sine tunneler som ettløpstunneler.

2.6.9 Kina

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Taihang	27,9	2E	2008	
2	Wushaoling	21,1	2E	2006	NATM
3	Qinling	18,5	2E	2002	
4	Dayaoshan	14,3	D	1987	
5	Changliashang	12,8	D		

Vi har identifisert 5 lange driftssatte jernbanetunneler i Kina over 10 km. De 3 lengste er ettløpstunneler. De to andre er toløpstunneler.

2.6.10 Spania

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Guadarrama	28,4	2E	2007	TBM
2	Pajares	24,7	2E	2011-2013	TBM

Spania gjennomfører en meget ambisiøs utbygging av et omfattende høyhastighetsnett. Tunnelene bygges som ettløpstunneler.

2.6.11 Storbritannia

No.	Navn	Lengde (km)	Konsept	Åpningsår	Kommentar
1	Kanaltunnelen	50,5	2E+s	1994	TBM
2	Stratford west	10,1	2E	2007	TBM

Kanaltunnelen mellom Storbritannia og Frankrike er vel 50 km lang og er bygget som to ettløpstunneler med en separat rømnings-/servicetunnel. For Channel tunnel rail link som forbinder Kanaltunnelen med høyhastighetsbane til St. Pancras stasjon i London, er konseptet basert på borede

ettløpstunneler. Faktorene for bestemmelse av konseptet var grunnforholdene og tilgjengelighet for rømningssjakter.

3. Konstruksjonsprinsipp

Bane NORs tunneler skal normalt bygges som drenerte konstruksjoner. Det betyr at man tillater innlekkasje av grunnvann i mengder som er akseptable for ikke å påføre overliggende natur og bebyggelse uttørring eller setninger av betydning.

Tillatt mengde innlekkasje angis som liter pr. minutt pr. 100 meter tunnel, og bestemmes gjennom prosjektering og avtaler med øvrige myndigheter. Innlekkasjekrav på mindre enn 10 l/minutt/100 m vil være kostnadsdrivende og tidkrevende for alle prosjekter.

Kontroll og reduksjon av innlekkasje skal primært skje gjennom bruk av forinjeksjon tilpasset stedlige lekkasjeforhold, geologi og krav til innlekkasje. Dette kan utføres på bakgrunn av målinger fra fortløpende sonderboring, eller som et systematisk tiltak over lengre eller kortere strekninger på bakgrunn av forundersøkelser og prosjektering.

For konvensjonelt drevne tunneler vil forinjeksjon i de aller fleste tilfeller opprettholde grunnvannsnivå eller gi akseptable mengder innlekkasje. Noen områder vil imidlertid kunne være ekstremt sensitive for endringer av grunnvannsnivå eller poretrykk, og ikke tillate noen innlekkasje i driftsfasen, og tunnelen må da bygges som en vanntett/udrenert konstruksjon.

For konvensjonelt drevne tunneler medfører dette at sålen må støpes ut, og dette er kostnadsdrivende. Det vil også kunne gi utfordringer i driftsfasen da tunnelkledningen må være dimensjonert for fullt statisk vanntrykk.

3.1 Geometrisk utforming

I Teknisk regelverk ligger eksempler på normalprofiler for enkelt- og dobbeltsporstunneler for toghastigheter fra 200-250 km/h. Disse gjelder under gitte forutsetninger til hastighet, tunnellengde og trykkutjevningstiltak. Normalprofilet må derfor tilpasses det enkelte prosjekt slik at lastvirkning og trykkendring ikke overstiger kravene i regelverket.

For tunneler med vannsikringsløsning basert på kontaktstøp eller betongelementer, bør tverrsnittet og installert utstyr tilpasses slik at hyppige forekommende mindre utvidelser av tverrsnittet (nisjer) unngås da dette vil være et fordyrende element.

3.2 Sporkonstruksjon

Valg av sporkonstruksjon i tunneler baseres på livsløpskostnad der investeringskostnader, levetider og vedlikeholdskostnader for sporet, samt evt. kostnadsbesparelse for redusert tunnelprofil tas med. Ballastfritt spor medfører betydelig høyere investeringskostnader og lengre byggeperiode enn ballastspor. Vedlikeholdskostnader for ballastfritt spor vil være noe lavere, da det ikke vil være behov

for sporjustering og ballastrensing. De lavere vedlikeholdskostnadene vil imidlertid ikke være tilstrekkelig alene for å oppnå lavere livsløpskostnader for ballastfrie sporkonstruksjoner.

På steder med svært høy trafikkmengde/togtetthet kan krav til tilgjengelighet for tunnelen ligge til grunn for valg av ballastfritt spor.

På steder med spesielt høye krav til demping av strukturstøy og vibrasjoner kan dette oppnås gjennom bruk av ballastfrie sporkonstruksjoner med spesielle designløsninger.

Ballastfritt spor har generelt noe lavere byggehøyde og bredde enn ballastspor. Dette kan i noen tilfeller redusere nødvendig tverrsnitt i tunnelen. De reduserte kostnader dette medfører må tas med i beregning som ligger til grunn for valg av sporkonstruksjon.

Ved hastigheter over 250 km/h kan det oppstå fare for at ballastpukk settes i bevegelse av de aerodynamiske krefter fra toget. Ballastpukk kan da treffe og skade vitale deler under toget. Av denne grunn velges ballastfri sporkonstruksjon ved hastigheter over 250 km/h.

3.3 Stabilitetssikring

Som konstruksjonsprinsipp benyttes bergmassens selvbærende evne ved fastlegging av sikringsbehov. Dette er hensyntatt i utformingen av normalprofiler slik at man får en god buevirkning. Da bergmassen selv er det primære bygningsmaterialet er det viktig at denne behandles med omtanke når tunnelen sprenges ut slik at konturen blir mest mulig jevn og gir minst mulig skade på gjenstående berg. Dette oppnås ved nøyaktig boring og godt tilpasset bruk av sprengstoff ved kontursprengning. Forsiktig kontursprengning er viktig for kvaliteten på gjenstående berg og vil redusere omfanget av stabilitetssikring. Det vil gi mindre overberg, og gi bedre arbeidsmiljø på stuff. Det er viktig at det i kontrakter og oppfølging vektlegges kvalitet på utførelsen av kontursprengning.

På grunn av store spenn og varierende bergkvalitet er det nødvendig å forsterke primærkonstruksjonen i store deler av tunnelene. Dette skjer hovedsakelig gjennom nedrensking av løst berg, bruk av boltesikring og fiberarmert sprøytebetong. Bolter skal være korrosjonsbeskyttet og innstøpt med mørtel.

Som grunnlag for bestemmelse av permanent stabilitetssikring skal Bane NOR gjennomføre kontinuerlig oppfølging av sprengningsarbeidet med fagkyndig personale som løpende kartlegger og klassifiserer berget etter Q-systemet i hele tunnelens lengde.

Tradisjonelt har tunneler blitt bygget med en bergsikring som utføres som en permanent funksjon, uavhengig av hvilken endelig innvendig kledning som installeres. Innvendige kledninger som tradisjonelt har vært benyttet er hvelvløsninger som er frittstående eller oppheng i bolter, og som gir et betydelig luftrom mellom kledning og stabilitetssikret tunnel. Godkjente løsninger i teknisk regelverk per i dag er i direktekontakt med bergsikringen, og begge disse løsningene medfører behov for ekstra sprøytebetong for utjevningsformål til membraner. Det har ikke vært vanlig å ta denne sprøytebetong med i betraktningen ved beslutning om bergsikring fortløpende under driving. Bergsikring definert av det reelle behovet ved bruk av kontaktstøpt betonghvelv med membran eller sprøytebetong som endelig kledning, vil kunne tilsi at sikringen vil kunne reduseres. Dette er spesielt tilfellet der sprøytebetong i vegger kan elimineres fra bergtekniske og stabilitetsmessige hensyn. Hensyn til detaljstabilitet som i praksis kun krever noen få cm sprøytebetong kan løses med utjevningsbetong som sprøytes senere. Som utjevningsbetong vil en betydelig rimeligere

betongresept kunne benyttes, der krav til høy tidligfasthet og høy energiabsorpsjon ikke er nødvendig. Utjevningssprøytebetongen må imidlertid tilfredsstille krav til bestandighet og langtidsholdbarhet. NGI gir følgende anbefalinger om bergsikring: Merk at en bør bruke denne anbefalingen som en veiledning om et sikringsnivå. Det vil forekomme situasjoner der det lokalt vil være detaljtilpasset sikring [11].

Bergklasse / Q-verdi	Vegger		Heng og vederlag	
	k	ESR	k	ESR
$Q > 10$	5	1,5	1	1,5
$1 < Q < 10$	2,5	1,5	1	1,5
$Q < 1$	1	1	1	1

For å oppnå ønsket sikkerhet og levetid på primærkonstruksjonen skal utførelse av stabilitetssikringen følges opp og dokumenteres på en hensiktsmessig måte.

[For NGI-rapport, se](#)

Rapport NGI: Bergsikring etter q-systemet i jernbanetunneler

3.4 Drivemetode

Konvensjonell driving er en fleksibel metode som gjør den svært egnet ved varierende bergforhold, innlekkasje og tunnelgeometri. Fullprofilboring med TBM er godt egnet for lange tunneler, og er skånsom mot omgivelsene. TBM vil også redusere behovet for mellomlagring, tverrtunneler, møteplasser og anleggsveier som vanligvis kreves ved lengre tunneler ved konvensjonell driving.

Valg av drivemetode gjøres basert på en helhetsvurdering av følgende forhold:

Geologi og topografi

Det må gjøres en vurdering av bergets beskaffenhet og tunnelens innlekkasjekrav. TBM har fordeler ved lange tunneler, sensitive miljøer og ved bergarter som ikke gir for høy kutterslitasje. TBM-drift er imidlertid mindre fleksibel enn konvensjonell driving ved uforutsette utfordringer som ras, mektige svakhetssoner og store uventede vanninnlekkasjer. Det vil være nødvendig med mer omfattende og grundigere forundersøkelser dersom TBM er aktuell drivemetode.

Byggetid

Total byggetid, herunder risiko for forsinkelser, må vurderes. TBM krever et forholdsvis stort område for etablering, og lang tid for mobilisering og montering. Konvensjonell driving gir fleksibilitet og mulighet til å drive fra mange påhugg, noe som kan gi reduksjon i byggetid.

Hensyn til omgivelsene

Hensynet til omgivelsene må vurderes i forhold til massetransport/håndtering av masser. Konvensjonell driving gir god fragmentering av steinmateriale som i større grad kan gjenbrukes enn steinmaterialer fra TBM-drift. Konvensjonell driving kan medføre miljøulempen i tilknytning til tverrslag, veier og anleggsområder. TBM-drift gir strukturoverført støy og vibrasjoner, mens konvensjonell driving gir andre typer støy og vibrasjoner. Ved driving under bebygde områder

minimerer TBM-drift risikoen for setningsskader pga. senkning av grunnvannsnivå i driveperioden.

Økonomi

Det må gjøres vurderinger av kostnader knyttet til bygging, riggområder og logistikk. Sammenlignet med konvensjonell driving medfører TBM større investeringsbehov i maskiner. Metoden innebærer lengre mobiliseringstid, men kan gi betydelig raskere fremdrift for lange tunneler. Konsekvensene av eventuelle maskintekniske problemer eller vanskelige geologiske forhold kan bli større ved bruk av TBM.

4. Vann- og frostproblematikk

Direkte drypp og rennende vann som treffer konstruksjonselementer av betong eller stål medfører fort skader, og er ikke ønskelig i jernbanetunneler. Generelle fuktutslag i vegger og vann som kommer inn i tunnelen i sålen anses imidlertid ikke å være av betydning for driften av tunnelen. I tunneler med svært lite fukt og lekkasje bør det enkelte tunnelprosjekt selv vurdere, ut fra sine forutsetninger, om det er tilstrekkelig med vannsikringskledning kun over spor og tekniske installasjoner, eller om det er nødvendig å ha gjennomgående vannsikring i hele tunnelens lengde og tverrprofil over sålen. Behovet vil kunne variere fra prosjekt til prosjekt, og det vil her være mulighet for kostnadsbesparelser.

Foruten rene drypp på utstyr, er det kombinasjonen fritt vann og frost som skaper de store driftsutfordringene. Oppbygging av is som innsnevrer profilet, danner istapper eller vokser inn i sporet, kan forårsake avsporing og representerer en betydelig sikkerhetsrisiko. Dette krever mye manuelt og mekanisk arbeid i den kalde årstiden.

Det har vært prøvd og testet ulike løsninger for å håndtere vann- og frostproblematikk i tunneler. Det er i dag ikke realistisk, hverken økonomisk eller teknisk, å se for seg at man skal injisere (tette) berget så mye at man ikke får noen utfordringer som følge av vann i tunnelen. Det jobbes internasjonalt med metoder, materialer og teknikker som har som mål at man skal kunne injisere tunneler så tette at man unngår spørsmålet om kledning for vannets del. På Nordlandsbanen er det gjort noen vellykkede forsøk med tetting av gamle tunneler (etterinjeksjon) som bør følges opp nærmere.

De vanligste metodene for vannsikring kan deles i to hovedgrupper:

1. Frittstående konstruksjoner
2. Konstruksjoner i direktekontakt med bergsikringen

For konvensjonelt drevne tunneler er det fire ulike konstruksjonstyper som per i dag er brukt i Bane NOR [6]. Hvelv av betongelementer og hvelv av PE-skum er frittstående konstruksjoner, mens kontaktstøpt betonghvelv med membran og permanent sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran, er konstruksjoner i direktekontakt med bergsikringen.

4.1 Vanntrykk

Det blir ofte påpekt og advart mot konsekvensene av oppbygging av høyt vanntrykk inn mot

vannsikringsløsninger i direktekontakt med bergsikringen. Teoretisk høyeste vanntrykk baseres på avstanden fra grunnvannsspeilet til tunnelheng, og gjennom naturlige og sprengningsinduserte sprekker i bergoverflaten finner vannet nye veier fra en membrantett tunneloverflate til den åpne sålen med installert drenering. Det er gjennom feltforsøk [7] målt en svak til moderat trykkoppbygging bak membraner, men ikke trykk nær teoretisk høyeste vanntrykk, eller trykk som kan ventes å skade konstruksjonen. Alt tyder på at vannet tar «minste motstands vei» gjennom bergets sprekkesystem fram til den drenerte sålen. Bergets oppsprekking i sprengningsskadesonen, de første ca. 20-40 cm fra den sprengte konturoverflaten, har vist seg å ha en betydelig drenerende (vanntrykksavlastende) effekt [7].

I helt tette (udrenerte) tunneler er det i Europa lang erfaring og praksis med at den indre kledningen dimensjoneres for å kunne ta opp maksimalt teoretisk vanntrykk. Dette gjøres på Follobanen som bygges som en udrenert konstruksjon med vanntette betongsegmenter i hele tunnelverrsnittet.

Det er ikke funnet eksempler på at det har oppstått skader som følge av vanntrykk i drenerte tunneler med membraner. Over tid vil det sannsynligvis felles ut mineraler og avsettes leirpartikler i sprekken inn mot tunnelen slik at drenasjekapasiteten mot sålen reduseres [8]. Dette vil kunne medføre noe høyere vanntrykk inn mot membranen over tid.

For løsningen med permanent sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran er det avdekket at endringen i permeabilitet inn mot membranen, og det faktum at hele kledningskonstruksjonen har en betydelig vanddamppermeabilitet, gjør det svært usannsynlig med en trykkoppbygging som kan skade bergsikring eller membranen [7]. Skulle det likevel skje at trykket blir så stort at det begynner å deformere den fiberarmerte sprøytebetongen, forventer man at konsekvensen vil være at det åpner seg et riss og det dannes en fuktflekk. Det vil ikke være betydelige vannmengder da disse er håndtert under tunneldrivingen ved hjelp av forinjeksjon. Det vil derfor være liten sannsynlighet for at det skal løsne og falle ned fragmenter av sprøytebetong som vil ha betydning for sikkerheten i tunnelen.

4.2 Frost

Selv om det tradisjonelt har vært vanlig å integrere vannavskjerming og frostisolasjon i samme løsning som én felles installasjon, er det viktig å være bevisst på de ulike funksjonskravene. De aller fleste norske bergarter tåler frost på en god måte, og kjente problemer i jernbanetunneler er knyttet til fritt vann i tunnelrommet (oppbygging av is), og ikke frostsprengning. Dersom vannet ikke trenger gjennom en kombinert bergsikring og vannavskjerming, er det i Norge ikke funnet eksempler på problemer som følge av at vann eventuelt fryser inne i berget eller i bergsikringen.

Frittstående konstruksjoner må enten isoleres slik at vannet ikke fryser i hulrommet mellom bergsikringen og hvelvet, eller så må hvelvet dimensjoneres for å kunne ta opp de maksimale islaster som vil kunne bygges opp mellom bergsikring og hvelv. I praksis er det det første man tradisjonelt har gjort, med tillegg av kapasitet for å kunne ta blokknedfall som følge av mulig sviktende bergsikring. Dette som en kompensasjon for manglende og uønskede visitasjonsmuligheter, og som et resultat av ulykken i veitunnelen Hanekleiva i Vestfold. Teknisk regelverk stiller krav til at konstruksjonen skal tåle nedfall av en blokklast på inntil 60 kN [6].

Problemstillingen rundt frost må også knyttes opp mot varmevekslingen mellom berget og vannsikringsløsning/bergsikring. Det er etablert gode regnemodeller for å vise nullisotermens (frysepunktets) bevegelse innover i konstruksjonen ved temperatursvingninger på konstruksjonens

overflate. Målinger i felt og laboratorier [7] har vist at sprøytebetong og betong i denne sammenheng har en betydelig isolasjonsevne. Denne kan også forbedres betydelig ved å benytte spesielle mørtler med god isolasjonsevne.

Gjennom et doktorgradsarbeid på sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran ved NTNU støttet av både Bane NOR og Statens vegvesen [7], har man kommet langt i arbeidet med å lage en beregningsmodell for frostpåvirkning av konstruksjoner i tunnel basert på tidsserier av meteorologiske observasjoner. Det forventes at dette arbeidet ferdigstilles i 2016. Dagens svært enkle metode basert på timegrader og tabellariske verdier for 100-års frost per kommune gir sannsynligvis for konservative verdier, med den følge at man isolerer betydelig større områder av tunnelen enn nødvendig. Betydningen av dette for de fire løsningene som per i dag er i bruk av Bane NOR er ulik. For hvelv av PE-skum betyr dette mest sannsynlig at man kunne ha erstattet PE-skumplatene med en dukmembran påsprøytet armert betong over lange strekninger. Denne metoden har ikke noen stor utbredelse i Norge, men benyttes i mange veitunneler i Sverige. For betongelementhvelv betyr dette at man kan redusere omfang med isolasjon på baksiden av elementene. I mange tilfeller kan isolasjon unngås helt.

For løsningen med kontaktstøpt betonghvelv med membran foreligger det lite vitenskapelig materiale rundt problemstillingen med frost. Det er ikke kjent at det har forekommet skader i slike konstruksjoner på grunn av frost ved betongtykkelser på minimum 30 cm. Selve membranen vil ikke få varig skade av frysing, men den vil bli mindre elastisk når temperaturen er under null grader. Det forutsettes at ekspandert volum av frosset vann finner minste motstands vei inn i berget og langs med drens sjiktet, og at det derfor vil være et begrenset trykk som bygger seg opp ved evt. frysing av drens sjiktet og bakenforliggende vannmettet sprøytebetong [8]. I forbindelse med byggingen av Ulvintunnelen (2012-2015) i Eidsvoll er det montert termiske sensorer i konstruksjonen for å skaffe mer kunnskap om frostinntrenging i denne type konstruksjon, og eventuell virkning av dette. Teknologistaben i Bane NOR har ansvaret for oppfølging av loggere og dataregistrering.

Gjennom doktorgradsarbeidet på sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran [7], er løsningen vitenskapelig og teknisk dokumentert med hensyn på membranmaterialet, samvirket med bergsikring og forholdet til det tilbakeholdte vannet i berget og frost. Membranens egenskaper ved frostpåvirkning er en av faktorene som har vært undersøkt. Det er påvist at membranens elastisitetsegenskaper svekkes vesentlig hvis den utsettes for temperaturer lavere enn $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Syklisk frysing/tining ved minimumstemperatur $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ gir ingen vesentlig svekkelse av membranens in-situ strekkfasthet til grenseflatene mot sprøytebetongen. Membranen er ikke damptett, og det gjør at bergsikringen (sprøytebetongen) får en meget god in-situ frostbestandighet pga. den lave vannmetningsgraden av både betong- og membranmaterialet. Det er likevel grunn til å være oppmerksom på problemstillingen og gjøre beregninger for å anslå hvor nært tunnelmunningen løsningen bør benyttes i enkleste utførelse med standard 6 cm sprøytebetongoverdekning. For å bedre isolasjonsevnen kan man gå over til en dekkbetong med bedre isolasjonsevne (lavere varmeledningstall), eller øke tykkelsen på sprøytebetong.

5. Vurdering av ulike vannsikringsløsninger

For konvensjonelt drevne tunneler er det fire ulike konstruksjonstyper for vannsikring som per i dag er brukt av Bane NOR [6]. Disse kan også benyttes i TBM-drevne tunneler.

1. Hvelv av betongelementer

2. Hvelv av PE-skum brannbeskyttet med nettarmert sprøytebetong
3. Kontaktstøpt betonghvelv med membran
4. Permanent sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran

Det er gjennomført en RAM- og risikovurdering [9] av disse fire alternative løsningene, der hensikten var å dokumentere løsningenes forskjeller i egenskaper knyttet opp mot pålitelighet, tilgjengelighet, behov for og tilgang på vedlikehold, samt sikkerhet knyttet til risiko for nedfall av objekter.

5.1 Frittstående konstruksjoner

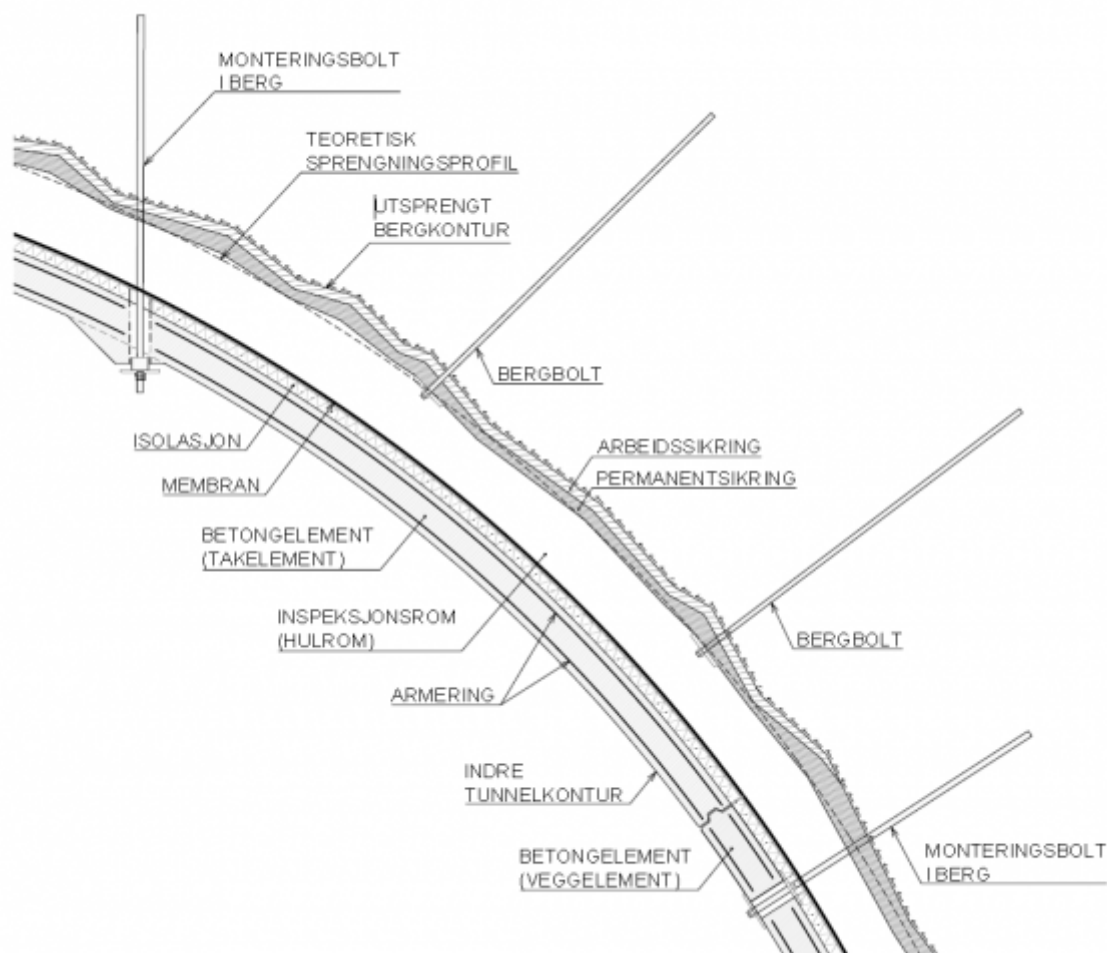
Frittstående konstruksjoner er hvelvkonstruksjoner uten direktekontakt med bergsikringen (primærkonstruksjonen). Disse konstruksjonene inngår ikke dimensjoneringsmessig i bergsikringen.

5.1.1 Hvelv av betongelementer

Løsningen er en frittstående konstruksjon der festeboltene til veggelementene inngår i det statiske systemet. Vannsikringen oppnås ved at det før montering av hvelvene monteres en kontinuerlig dukmembran på baksiden av elementene. Montasjebolter for hvelv og installasjoner sikres med vanntette gjennomføringer. I områder hvor det er behov for frostisolering monteres isolasjon på baksiden av hvelvene. Løsningen er således fleksibel mht. valg av ren vannsikring eller kombinert vannsikring og frostisolering.

Løsningen har geometriske utfordringer ved bruk i nisjer. Den kan tilpasses, men det vil i mange tilfeller være enklere og kostnadsbesparende å velge andre løsninger i nisjer.

Løsningen tilfredsstiller krav i Teknisk regelverk om ekstrem blokklast (60 kN), og det vil derfor ikke være behov for visitasjon bak konstruksjonen i driftsfasen.



Figur 2 Betongelementhvelv

Det er viktig med god kontur for å unngå stort omfang av bakstøp bak elementfundamenter [10].

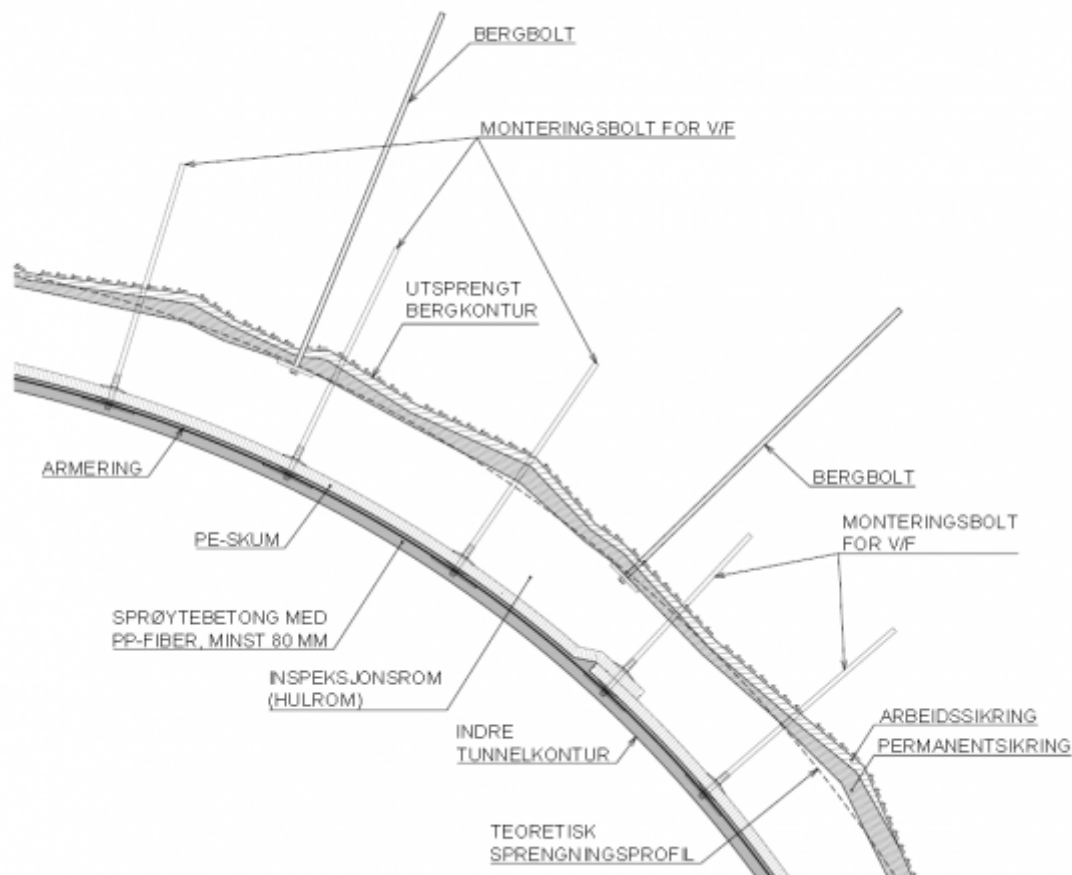
Eventuelle feil i løsningen bør primært avdekkes under montasje. Ved skader kan elementene tas ned og erstattes med nye, noe som er en stor og tidkrevende operasjon.

Løsningen fremstår som en robust løsning for vann- og frostsikring, men den innehar en rekke objekter som kan feile, og det må påregnes et visst behov for tilsyn og utskifting i løpet av levetiden til systemet [9].

Elementene er store og tunge, og krever spesialkonstruert løfteutstyr og stor nøyaktighet for montering. Dette er krevende i et sikkerhet, helse og arbeidsmiljø (SHA) perspektiv, og det har vært relativt mange hendelser ved montering av betongelementhvelv ved Bane NORs tunnelprosjekter i Vestfold [10]. Løsningen medfører også transport av til dels store volum fra fabrikk til tunnel.

5.1.2 Hvelv av PE-skum brannbeskyttet med nettarmert sprøytebetong

Løsningen er en frittstående konstruksjon bestående av PE-skumplater festet til berget med et tett mønster av avstandsbolter. Utenpå PE-skumplatene monteres armeringsnett som i samvirke med boltene og 8 cm sprøytebetong utgjør brannbeskyttelsen og det statiske systemet.



Figur 3 PE-skum brannbeskyttet med nettarmert sprøytebetong

Løsningen fungerer som en frostisoleret vannsikring, og det er begrenset mulighet for å differensiere løsningen med hensyn på grad av isolasjonsbehov.

PE-skum brannbeskyttet med nettarmert sprøytebetong tilfredsstiller ikke krav i Teknisk regelverk om ekstrem blokklast (60 kN), og vil dermed kreve ekstra ettersyn og visitasjon bak konstruksjonen. Bane NOR ønsker å unngå behov for visuell inspeksjon bak konstruksjoner og i stedet tilrettelegge for fjerninspeksjon, men det finnes per i dag ikke en god løsning på dette. En manuell inspeksjonsmulighet krever større sprengningsprofil, og stans i togtrafikken mens inspeksjon utføres.

Løsningen er fleksibel under oppføring, noe som betyr at den enkelt kan benyttes i nisjer og ved endringer i profilet.

Løsningen medfører at vi tilfører tunnelen et svært brennbart materiale. Dette stiller strenge krav til montering av sprøytebetong slik at PE-skumplatene ikke blir eksponert for flammer ved en eventuell brann i tunnel.

PE-skum brannbeskyttet med nettarmert sprøytebetong har gode egenskaper som vann- og frostsikring. Løsningen består imidlertid av en rekke elementer som skal virke sammen på en bestemt måte, og det er en kompleks lastoverføring pga. samspillet mellom boltene, PE-skummet og berget. Det er flere delelementer som kan feile, og det må påregnes at det oppstår noe vann gjennomtrengning i enkelte punkter (overlapp og gjennomføringer) og utmatting av bolter over tid. Dette krever oppfølging, vedlikehold og utbedring av lekkasjer for at konstruksjonen skal oppfylle sin tiltenkte funksjon i den tekniske levetiden [9].

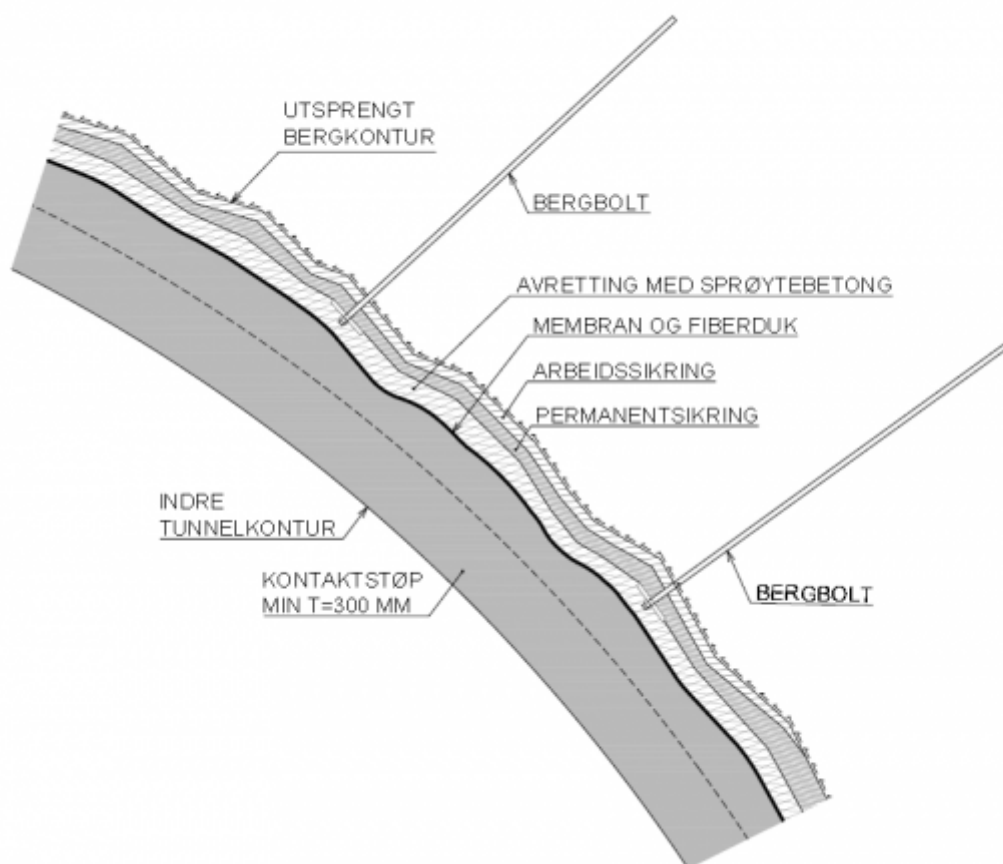
Montering av PE-skum krever mange operasjoner med relativt mange medarbeidere involvert. Det må benyttes spesialutstyr til merking og boring av festebolter, og det brukes store bilmonterte lifter for montering av selve platene, armeringsnett m.m.

Bane NOR ønsker ikke å videreføre denne metoden, primært på grunn av at vi bygger inn betydelige mengder brennbart materiale. I tillegg er levetiden usikker, det er teknisk krevende å montere systemet optimalt, og større reparasjoner og utskifting er utfordrende. Løsningen krever dessuten et utvidet tverrsnitt for å få plass til inspeksjon. Systemet tar heller ikke hensyn til om frost er et problem. Det betyr at vi i områder med lite frost kunne brukt andre løsninger, men det er det ingen praksis for i Norge i dag.

5.2 Konstruksjoner i direktekontakt med bergsikringen

5.2.1 Kontaktstøpt betonghvelv med membran

Løsningen er i direkte kontakt med berget via en membran med bakenforliggende filtduk montert på avrettet bergsikring. Deretter etableres en kontinuerlig kontaktstøp.



Figur 4 Kontaktstøpt betonghvelv med membran

Løsningen er ikke isolert. Frostsprengning anses ikke å være noe problem da betongutstøpingen vil være tørr og uten mating av vann, se beskrivelse om frost i kap.4 Vann- og frostproblematikk.

Løsningen har sine geometriske utfordringer i områder med nisjer og ved evt. behov for breddeutvidelser.

Løsningen involverer forholdsvis store utstyrsressurser og mye mannskap ved montering. Konstruksjonen fremstår imidlertid som en robust løsning hvor det inngår få komponenter som kan feile. Eventuelle feil og svakheter i konstruksjonen må imidlertid avdekkes under montasje, da det ikke vil være mulig å utføre vedlikehold på membran eller drensnett i ferdig konstruksjon.

For å redusere faren for skader og utettheter i membranen må bergsikringen med sprøytebetong utføres med stor nøyaktighet og høy kvalitet. Det er viktig med god kontur blant annet for å minske utjevningssprut og betongforbruket, i tillegg til å redusere faren for skader og utettheter i membranen. For denne løsningen bør man se på om grøften bør flyttes inn mot midten av tunnelen. Sidestilt grøft fører ofte til at berget blir «sprengt i stykker» noe som medfører et stort overforbruk av betong og armering for underfundamenter.

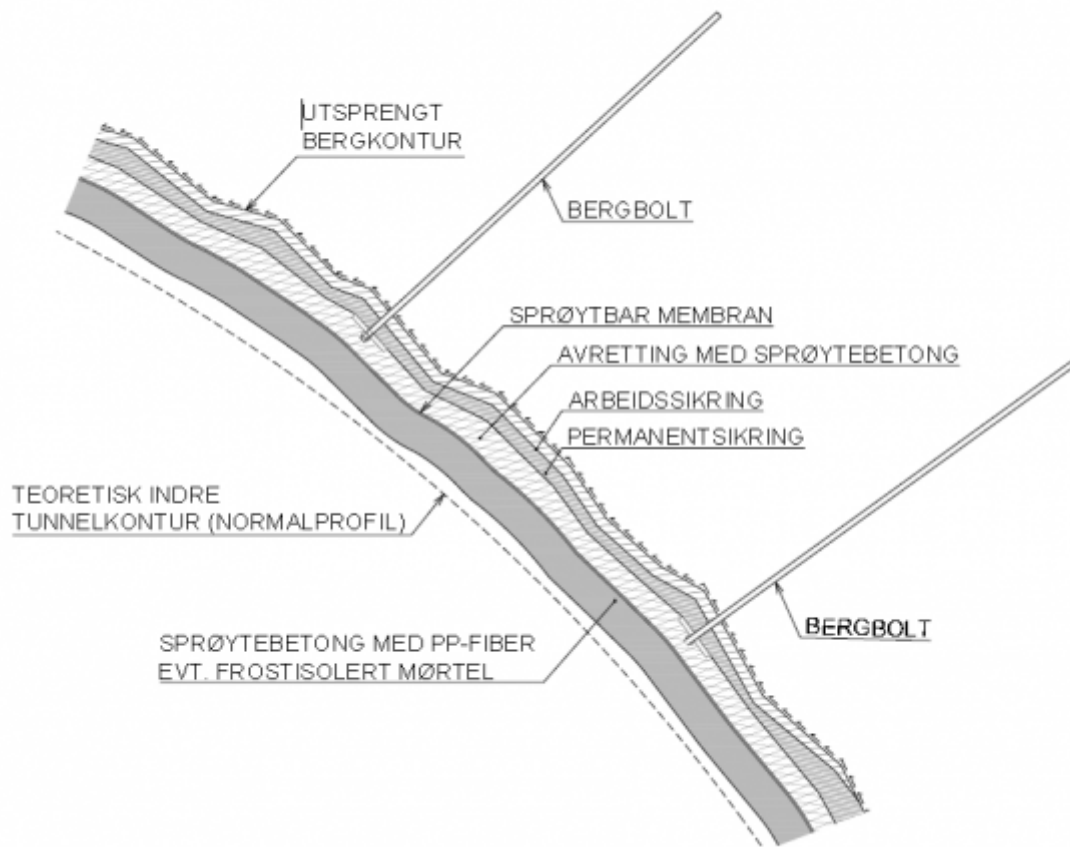
Løsningen krever minimal/ingen vedlikehold i systemets levetid.

Kontaktstøpen kan inngå som en del av permanentsikringen og sterkt redusere volumet av denne. Dette vil bedre økonomien i løsningen. I Norge har man tradisjonelt tatt hensyn til bergmassens selv bærende evne ved fastlegging av sikringsbehov (se kap.3), og vurdert vannsikringsløsningen uavhengig av bergsikringskonstruksjonen.

5.2.2 Permanent sprøytebetongkledning vanntett med sprøytbar membran

Tunnelkledning med sprøytbar membran i kombinasjon med fiberarmert sprøytebetong er en relativ ny og innovativ teknisk løsning, og har vært benyttet i enkelte land de siste 10 årene. Her i Norge er den benyttet i et parti i Gevingåsen tunnel (2009-2011) og i Holmestrandtunnelen (2010-2016).

Løsningen er en kontinuerlig komposittkonstruksjon fra berg til tunneloverflate der en kopolymerbasert membran sprøytes på en avjevnet sprøytebetongoverflate, og deretter dekkes med sprøytebetong. Membranmaterialet basert på EVA-kopolymerer er en vannbasert pastøs masse under påsprøyting som herder ved uttørring og hydratasjon.



Figur 5 Permanent sprøytebetong og vanntetting med sprøybar membran

Nyere forskning [7] viser at løsningen og de vannmettingsgradene den gir i den bakenforliggende sprøytebetongen, gjør den svært motstandsdyktig mot å bli skadet av frost, men selve membranen kan bli svekket av gjentagende frostsykluser, se kap.4 Vann- og frostproblematikk. Dette gjør at metoden i enkleste utførelse ikke uten videre bør brukes ved minimumstemperatur lavere enn $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ved membranens posisjon. Dette kan håndteres ved å dimensjonere deksjiktet tykkere, eller ved å benytte en mørtel som har en betydelig lavere varmeledningsevne enn standard sprøytebetong.

Gjennom et nylig avsluttet PhD-arbeid [7] er det etablert testmetoder med tilhørende akseptkriterier for godkjenning av nye membraner. Tilleggskunnskap knyttet til sprøytebetong og dens egenskaper med hensyn på frostbestandighet er også generell og viktig kunnskap vi har fått fra dette arbeidet. Alt dette underbygger sannsynligheten for at løsningen er velegnet i mange tunneler i Norge.

Løsningen er fleksibel under påføring og kan enkelt benyttes i områder med nisjer og ved endringer i profil. Løsningen kan imidlertid ikke påføres direkte på rennende lekkasjer da membranen er vannløselig. Lekkasjer og drypp må derfor samles opp med drensplugger før membranen påføres. Drenasjen injiseres etter at membranen er herdet. Metoden har derfor sine begrensninger i tunneler med mange og store innlekkasjer.

Dagens teknologi for utførelse av denne kledningstypen innebærer et behov for nøye kvalitetskontroll av flere deler av byggeprosessen. Dette gjelder spesielt ruheten til sprøytebetongoverflaten som membranen påføres på, og håndtering av dryppunkter ved midlertidig drenering og injeksjon. En ytterligere forbedring av både membranprodukter og utførelsesmetodikk vil gjøre denne

kledningsmetoden godt egnet for bruk i hardt berg. En tilrettelagt anbudsbeskrivelse av sprengningskvalitet (kontur) og sprøytebetong for membranunderlag, samt evt. justering av krav for resultatet av forinjeksjon, vil være hensiktsmessige tiltak for å øke teknisk gjennomførbarhet og redusere kostnader ved denne løsningen.

Partiene med sprøytebetong og sprøytbar membran i Gevingåsen tunnel og Holmestrandtunnelen overvåkes og følges opp for å bygge og dokumentere erfaring og kvalitet.

Vedlikehold på punktlekkasjer i driftsfase må påregnes, men på grunn av konstruksjonens begrensede tykkelse kan dette gjøres ved reetablering direkte på eksisterende flate.

5.2.3 Andre metoder

Det finnes også andre metoder på markedet som er integrert i bergsikringen. En metode som er velprøvd er bl.a. brukt i den nye jernbanetunnelen Ring Rail Line under flyplassen i Helsinki. Løsningen består av innsprøyting av mer eller mindre systematisk monterte drenasjestriper mot berget der det er observert fukt og drypp. I enkleste form benyttes det da ingen membran. Drenasjesystemet kan også benyttes sammen med en «selvtettende» mørtel som dekskjikt. Løsningen er også benyttet i kombinasjon med sprøytbar membran i områder med store lekkasjer. Erfaringer fra mange år i Sverige viser at drenasjestriper uten membran er en usikker løsning som over tid har vist seg å gi nye lekkasjer.

Den selvtettende mørtelen fra en svensk leverandør har foreløpig for lite systematisk dokumentasjon og vitenskapelig testing med hensyn på virkemåte, tetthet og levetid til at dette nå kan være en anbefalt løsning. Metoden synes å kunne ha et stort potensiale, og bør derfor følges opp med instrumenterte prøvestrekninger og omfattende laboratorietester på samme måte som det nå er gjort med sprøytbare membraner.

5.3 Vurdering av metodene

RAMS-analysen [9] fastslår at ingen av de fire alternative løsningene i utgangspunktet vil være noen stor kilde til redusert nivå på sikkerhet og tilgjengelighet av jernbaneinfrastrukturen. De analyserte løsningene er robuste, og det forventes et begrenset omfang av feil sett i et livsløpsperspektiv. Det meste av planlagt vedlikehold kan utføres i hvite tider og planlagte togfrie perioder. Hvelv av betongelementer og PE-skum har imidlertid flere komponenter som kan feile, og for disse løsningene må det påregnes et visst behov for tilsyn og utskifting i løpet av levetiden til systemet. Kontaktstøpt betonghvelv med membran og sprøytebetongkledning vanntett med sprøytbar membran har få komponenter som kan feile, og gir dermed god kontroll på både sikkerhet og korrektivt vedlikehold. Det forventes minimalt/inget behov for vedlikehold for kontaktstøpt betonghvelv med membran i angitt teknisk levetid på minimum 80 år. For sprøytebetongkledning vanntett med sprøytbar membran må det påregnes vedlikehold på punktlekkasjer.

Et usikkerhetsmoment som råder i fagmiljøet er imidlertid at det er svært vanskelig med 100 % sikkerhet å kunne forutsi hva som skjer av utvikling i berget over tid. Muligheten for å inispisere sikret bergoverflate gir derfor en ekstra trygghet i form av at det er mulig å avdekke utvikling av oppsprekking i god tid før det utvikler seg til nedfall. For løsninger hvor vannsikringen bidrar til å dekke til sikret bergoverflate gjennom frittstående konstruksjoner, er det stilt krav til at løsningene

skal være dimensjonert for å tåle nedfall av blokklast inntil 60 kN [6]. Dette som en tilleggsbarriere der vi ikke ønsker eller har mulighet for å inspisere utviklingen i berget fra tunnelsiden. Løsningen med PE-skum tilfredsstiller ikke dette kravet, og vil dermed kreve revisjon bak konstruksjonen. Konstruksjoner som monteres i direktekontakt eller integrert med bergsikringen har en stor fordel ved at de enkelt gir god oversikt over tilstanden på primærkonstruksjonen og global stabilitet fra tunnelrommet.

Hvelvløsninger av PE-skum og betongelement er tatt bort som valgbare løsninger i Teknisk regelverk.

5.3.1 Kostnader og levetidsbetraktninger

RAM- og risikovurderingen [9] angir levetidsbetraktninger og kostnader for de fire ulike løsningene. Kostnadsestimatene er hentet fra ulike prosjekter i Bane NOR. Prissammenligning mellom prosjekter er generelt krevende da vannsikringsløsningen bare utgjør én av mange elementer som inngår i kontrakten. Det betyr at vi som byggherre ikke eksakt vet hvor kostnadene ligger selv om prosessene er priset i anbudet. Det man imidlertid kan mene noe om er materialforbruk, monteringskompleksitet, arbeidsinnsats og SHA for de ulike løsningene. Dette er oppsummert i tabell 1.

Tabell 1 Vurdering av metodene

	KONSTRUKSJONSTYPE			
PARAMETER	Hvelv av betongelementer	Hvelv av PE-skum	Kontaktstøp	Spr.betong og spr.membran
Transport	Logistikk-utfordringer, transport av store volum fra fabrikk	Krever noe logistikk av ulike komponenter	Transport av store volum betong	Lite transport av materialer/utstyr
Materialer	Løsningen har mange komponenter	Løsningen har mange komponenter	Stort betong-forbruk	Lite material-forbruk
Monterings-kompleksitet	Krevende operasjon med spesialutstyr	Mange ulike arbeids-operasjoner med spesialutstyr	Krever mye rigging og forarbeid	Enkel montering med enkelt utstyr
Arbeidsinnsats	Krever store ressurser og personell med spesial-kompetanse	Krever store ressurser og personell med spesial-kompetanse	Krever store ressurser og personell med spesial-kompetanse	Krever optimalisering av eksisterende prosesser, og tilrettelagt og nøye kontroll
SHA	Mange utfordringer ved montasje	Krever inspeksjon bak hvelv	Utfordringer ved montasje	Sprøyteteknikk og arbeids-organisasjon må tilrettelegges for å begrense støvproblematikk under utførelse

I RAMS-analysen [9] er det forsøkt gitt et kostnadsbilde over tid på grunnlag av estimater for kostnader knyttet til de ulike løsningene ved innkjøp og kostnader forbundet med vedlikehold i driftsfasen. PE-skum og sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran ligger i utgangspunktet ganske likt i pris ved investering. For begge løsningene må det påregnes noe utskifting og vedlikehold i løpet av levetiden, hvorav sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran innehar færre komponenter, og fremstår derfor som rimeligere og enklere å utføre

vedlikehold på dersom punktlekkasjer skulle oppstå i driftsperioden. Sammenlignet med investeringskostnaden for kontaktstøpt betonghvelv med membran og hvelv av betongelementer kan det gjøres betydelige utskiftinger på PE-skum-løsningen og sprøytebetongkledning vanntett med sprøytbar membran før man er oppe på samme prisnivå som disse.

Tabell 2 gir en oppsummering av RAMS-parameterne, kostnader og levetidsbetraktninger. For detaljer henvises det til rapporten [9].

«Høy, middels og lav» angir grad av måloppnåelse for de ulike parameterne.

Tabell 2 Vurdering av RAMS-parametere og kostnader

	KONSTRUKSJONSTYPE			
PARAMETER	Hvelv av betongelementer	Hvelv av PE-skum	Kontaktstøp	Spr.betong og spr.membran
Pålitelighet	Middels/Høy	Lav	Høy	Middels/Høy
Vedlikeholdbarhet	Middels	Lav	Høy	Middels
Tilgjengelighet	Høy	Middels	Høy	Høy
Sikkerhet	Middels	Middels	Høy	Høy
Kostnader	Lav	Høy	Lav	Høy
Levetid	Høy	Middels	Høy	Høy

5.3.2 Kostnadsbetraktninger for de ulike løsningene

Tabellen under er hentet fra RAMS-analysen [9], og viser investeringskostnader for de ulike løsningene hentet fra både gjennomførte prosjekter i Bane NOR og priser fra anbudsfase. Kostnadene er ekskl. rigg.

Tabell 3 Kostnadsbetraktninger for de ulike løsningene

ALTERNATIV	INVESTERINGSKOSTNADER [kr/m²]
Hvelv av betongelementer	1400 - 1600
Hvelv av PE-skum	900 - 1000
Kontaktstøp	1400 - 1700
Sprøytebetong og sprøytbar membran	700 - 1100

6. Konklusjon

- ✓ Valg av tunnelkonsept gjøres basert på en helhetsvurdering av følgende forhold; sikkerhet, geologiske forutsetninger, anleggsteknikk, drift og vedlikehold og kostnader.
- ✓ Bane NORs tunneler skal normalt bygges som drenerte konstruksjoner der man tillater innlekkasje av grunnvann i mengder som er akseptable for ikke å påføre overliggende natur og bebyggelse uttørking eller setninger av betydning.
- ✓ Som konstruksjonsprinsipp benyttes bergmassens selvbærende evne ved fastlegging av sikringsbehov. Dette er hensyntatt i utformingen av normalprofiler. Q-systemet skal benyttes som grunnlag for bestemmelse av permanent stabilitetssikring.

✓ For nye tunneler bør sikring mot innlekkasje av vann basere seg på følgende prinsipper:

1. Det velges en vannsikringsløsning som kan monteres i direktekontakt med bergsikringen
2. Behov og omfang av vannsikring vurderes i det enkelte prosjekt

Hovedbegrunnelsen for valget er at løsningene enkelt gir god oversikt over tilstanden på primærkonstruksjonen og global stabilitet, og ved at oppsprekking lett vil kunne oppdages. Installert har løsningene ingen mekaniske komponenter som kan feile og gir med det god kontroll både på sikkerhet og korrektivt vedlikehold.

Gitt dagens godkjente løsninger, kan en praktisk løsning ved frost og oppsprukket dagberg med store lekkasjer, være å trekke portalstøpen et stykke inn i tunnelen for deretter å fortsette med sprøytebetongkledning vanntett med sprøytbar membran. I tunneler med svært lite fukt og lekkasje bør det vurderes om det er tilstrekkelig med membran kun over spor og tekniske installasjoner.

✓ Tverrslag/servicetunneler/rømningstunneler bygges som hovedregel med redusert vannsikring basert på lokal avskjerming og bortledning av lekkasjer over installasjoner på enkleste måte. Frostinntrengning vil kunne være et problem ved utgang mot dagen. Her må tiltak vurderes slik at is ikke kan bygge seg opp og hindre åpning av dører.

7. Referanser

[1] Andersen, T. og Paaske, J.J., Det Norske Veritas (2001): "Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept"

[2] TSI SRT, Kommisjonsforordning (EU) nr. 1303/2014 av 18.november 2014.

[3] Jernbaneverket (2010): «RAM-vurdering av tunnelkonsept Holm-Holmestrand-Nykirke». Rapport nr. 32010-0276

[4] Norconsult (10.3.15): «Tunnelkonsept»

[5] Trafikverket (28.2.14): «Val av tunnelkonsept for järnvägstunnlar»

[6] Bane NORs [Teknisk regelverk](#): Tunneler/Prosjektering og bygging/Vann- og frostsikring og Tunneler/Prosjektering og bygging/Laster

[7] Holter, K.G (2015): «Permanent vanntett tunnelkledning med sprøytebetong og sprøytbar membran til moderne veg- og jernbanetunneler», PhD-avhandling, NTNU, Inst. for geologi og bergteknikk.

[8] Fellesprosjektet E6-Dovrebanen (11.2.11): «Vann- og frostsikringsløsning. Rapport fra evalueringsprosess vann- og frostsikring av tunneler»

[9] Jernbaneverket, RAM- og Risikovurdering av Vann- og frostsikringsløsninger versjon av 19.8.2015. Saksref. 201505316

[10] Hansen, T.F., Norconsult (2015): Presentasjon ved Statens vegvesens Teknologidager. «Sammenligning mellom vann- og frostsikring ved kontaktstøp med membran vs. betongelementer».

[11] NGI, rapport «Bergsikring etter Q-systemet i jernbanetunneler. Optimal bruk av Q-systemet i jernbanetunneler med moderne funksjonskrav til endelig innvendig kledning.» Dok. nr. 20180273-01-R

From:

<https://proing.banenor.no/wiki/> - **Prosjekteringsveileder**

Permanent link:

<https://proing.banenor.no/wiki/veiledere/konstruksjonsprinsipp?rev=1647441071>

Last update: **2022/03/16 14:31**