

Förstudie till FoU-ramprojekt

Tätning och frostsäkring av tunnlar

Förord

Föreliggande förstudie ”Tätning och frostsäkring av tunnlar” har identifierat och sammanställt existerande kunskap inom området tätning och frostsäkring av tunnlar i jord och berg, företrädesvis från projekt i Sverige och Norge.

Inom förstudien ingår en litteraturstudie/kunskapsinventering genomförd av SwedPower AB.

Borlänge 2001-12-21

Per Andersson

Samråd med:

Bernt Freiholtz

Innehåll

Förord.....	2
Innehåll	3
Sammanfattning	5
1 Introduktion	9
1.1 Bakgrund.....	9
1.2 Syfte	9
1.3 Mål och omfattning.....	10
2 Krav på en vägtunnel	12
3 Metoder för tätning och frostsäkring	15
4 Frost och is.....	19
4.1 Istillväxt och frostsprängning i berg	19
4.2 Svallis.....	20
4.3 Frostinträngning.....	20
5 Metoder för vatten och frostsäkring i Sverige	22
5.1 Injektering.....	22
5.2 Sammanfattning av litteratur från Vägverket Stockholm (Ringenprojektet)..	22
5.3 Erfarenheter från Lundbytunneln.....	32
5.4 Erfarenheter från övriga vägtunnlar, region Väst	33
5.5 Erfarenheter från Arlandabanan.....	34
5.6 Banverket - Frostsäkring av tunnlar.....	35
6 Metoder för vattenavledning och frostisolering i Norge	38
6.1 Allmänt	38
6.2 Tunnelinklädnad	38
6.2.1 Betongvalv	39
6.2.2 Lätta konstruktioner.....	43
6.2.3 Kombinerade valv.....	45
6.3 Material	46
6.4 Erfarenheter	48
6.5 Sammanfattning	49
7 Metoder för vatten – och frostsäkring i alperna och Mellaneuropa.....	50
7.1 Allmänt	50
7.2 Historik	50
7.3 Nuvarande metodik.....	51
7.4 Material	51

8	Utveckling och erfarenheter.....	53
8.1	Slutsatser.....	53
8.2	Fortsatt arbete – förslag till inriktning – kunskapsbrister	55
8.3	Förslag till angelägna FoU projekt	55
9	REFERENSER	59

Bilaga 1 Metoder att förhindra frostrelaterade problem

Bilaga 2 Erfarenheter när det gäller underhåll

Bilaga 3 Miljöbelastning vid rengöring och underhåll

Sammanfattning

Föreliggande rapport utgör en sammanställning av problemområdet tätning och frostsäkring av vägtunnlar. Rapporten ger en övergripande beskrivning av olika tätnings- och frostsäkringsmetoder samt tillhörande erfarenheter från Sverige, Norge och Mellaneuropa.

Lämpliga metoder för vatten- och frostsäkring är bland annat beroende av berggrundens egenskaper, grundvattenförhållanden, trafikförhållanden och klimatet. Detta är sannolikt orsaken till att olika koncept blivit vanliga i alperna jämfört med Skandinavien:

- I Sverige utförs vanligen en relativt omfattande förinjektering vid nybyggnation av tunnlar. Återstående läckage, dropp mm åtgärdas med en kombination av efterinjektering och lokala frostisolerings- och dräneringsåtgärder.
- I Norge utförs bergstabilisering och vatten- och frostisolering i två skilda steg. Vatten- och frostisoleringen sker vanligen med någon typ av inklädnad.
- I alperna utförs bergstabilisering och vatten/frostisolering med en integrerad metod i samband med berguttaget. Det är i normalfallet en betonglining med ett integrerat tätmembran.

En viktig skillnad mellan tunnelbestånden i Norge och Sverige, som påverkat utvecklingen av olika metoder för vatten- och frostsäkring, är att en stor mängd tunnlar i Norge huvudsakligen har en liten trafikbelastning, < 1000 ÅDT, till skillnad mot de svenska förhållandena. Detta innebär att de, i Norge anpassade metoderna inte alltid kan tillämpas direkt för vägtrafiktunnlar i Sverige som huvudsakligen byggs i eller nära våra storstäder med en betydligt högre trafikbelastning. Skillnaden gäller även synen på bergsäkring. I lågtrafikerade tunnlar är det inte några helt avgörande trafiktekniska problem att stänga av ena vägshalvan för underhållsåtgärder vilket medger att andra och mer underhållskrävande lösningar kan tillämpas.

I Sverige är det vanligaste tätningsförfarandet en systematisk förinjektering kompletterat med lokala väggdräner. Dräneringen utförs normalt med isolerskivor som förses med sprutbetong som fungerar både som mekaniskt skydd och som brandskydd. De praktiska erfarenheterna både i Norge och Sverige är att den applicerade sprutbetongen kan kräva en del underhåll. Metoden med förinjektering i kombination med lokala väggdräner innebär att konstruktionen uppfyller kravet på inspekterbarhet vilket annars är ett generellt problem med tunnelinklädnad.

Det finns några tätningskoncept med tunnelinklädnad som utvecklats i Norge som kan vara lämpliga för svenska vägtunnlar. Det är främst betongvalv, t ex Ekebergvalvet och tunnelduk (Giertsenduk). För högtrafiktunnlar bör de utföras som kombinerade valv med betong i tunnelväggen och med lättare tak.

Beroende på miljökrav gällande grundvattenförhållanden är det tänkbart att vatten- och frostsäkringsmetoder för svenska vägtunnlar kan utvecklas med två inriktningar:

- höga krav på täthet (miljökrav) i en tunnel, medför att stora resurser satsas på en systematisk förinjektering vilket (förhoppningsvis) leder till en mindre omfattning av kvarvarande läckage som enklast och mest kostnadseffektivt kan hanteras med dräner, (exempelvis Lundbytunneln i Göteborg)
- lägre täthetskrav (miljökrav) kan ge lägre kostnader för för- och efterinjekteringsinsatser vilket kan leda till ökade kostnader för avledning och dränering av inläckande vatten. Någon typ av hel inklädnad kan bli aktuellt i detta fall.

I det senare fallet kan metod och utformning optimeras med hänsyn till bygg- och underhållskostnader, trafikbelastning, estetik m fl krav.

Som ett resultat av föreliggande studie föreslås följande angelägna FoU-insatser att drivas inom följande delområden:

- *Total(ekonomisk) analys över tunnlar/ tunnelsträckor med återkommande vatten och frostproblem.* Erfarenheterna avseende omfattningen av vatten- och frostproblem i Vägverkets tunnlar är i nuläget inte sammanställd och lättillgänglig, dvs. problemets omfattning är inte tydliggjort. Kunskap om var och när vatten- och frostproblem uppstår med avseende på klimatfaktorer, trafikmängder, tunnelns utformning samt vilka konstruktionsdelar som ”drabbas” är inte tillräckligt hög. För att utöka kunskapen på detta område måste en bedömning av sambandet mellan underhållskostnader och klimatvariationer göras för ett antal väg(- och järnvägs)tunnlar. För en sådan analys måste en omfattande datainsamling genomföras med avseende på tunnelns utformning, trafikmängd, köldmängd, antal frostcykler, nederbörd, grundvattennivå, kartering av förekommande is samt platsspecifika geologiska undersökningar. Studien bör helst omfatta ett antal olika metoder för av vatten- och frostsäkring. Även fenomenet svallis, som är ett konstaterat problem vid tunnelportaler och i bergskärningar, bör beaktas.
- *Klimatfaktorer och dimensionering av frostisolering.* Kunskapen avseende frostinträngning för nya tunneltyper, under sjöar och tunnlar med mekanisk ventilation är i nuläget inte tillräcklig. Erfarenheter från Norge visar att det lokala klimatets egenskaper och användandet av mekanisk ventilation har stor betydelse för frostinträngningen i tunnlar. För att öka kunskapen bör mätning av frostinträngning för ett antal olika tunneltyper, med och utan isolering göras. Detta arbete bör då samordnas med ett pågående Banverksprojekt som syftar till att studera teoretiska modeller för köldinträngning i järnvägstunnlar. Denna pågående studie genomförs av Mats Sandberg vid Gävle högskola.

- *LCC-analys* av olika tättnings- och frostsäkringskoncept. För att kunna göra en övergripande ekonomisk sammanvägning av nyttan och kostnaderna för olika tättnings- och frostsäkringskoncept för en tunnel erfordras att befintliga LCC-modeller utvecklas. För en framgångsrik LCC-analys krävs relevanta grund/indata för de konstruktioner och konstruktionsdelar som förekommer i en tunnel. På sikt är det nödvändigt att pågående FoU-insatser på LCC-området utvecklas mot en anpassning mot byggnadsverket tunnel, där generella indata analyseras (exempelvis anläggnings-, drifts- och underhållsdata samt eventuell reinvesteringsskostnad) och modelleras för några vanliga konstruktionselement i tunnlar.
- Vägverket har också, i samverkan med Banverket, Elforsk och SveBeFo planer på att under år 2002 initiera ett arbete som skall resultera i en (kunskaps)handbok avseende cementinjektering. De ökande antalet entreprenörtvister avseende tätning/tättningsresultat och dess påverkan på projekten, de senaste åren är ett uttryck för att de svårigheter som finns vad gäller praktisk injekteringskunskap eller i förväntningar på möjliga resultat. Svårigheter finns i hela ledet från beskrivning av bergets vattenvägar till hur injekteringen bör utföras och vilken tid eller omfattning som erfordras. För att få en bättre grund för branschens behandling av tättningsfrågorna och främja ett mer strukturerat och planerat arbetssätt är det viktigt att få ut de färskaste forskningsresultaten till praktisk applikation..
- *Istryck*. Kunskapen avseende storleken och effekterna av istryck är i nuläget bristfällig. Med ökad kunskap om storleken och spridningen av det tryck som bildas på grund av den adsorptionsstyrda isanrikningen skulle det vara möjligt att analysera betydelsen av olika sprickors orientering relaterat till hur och i vilken omfattning vattentillförseln sker. Koppling bör även göras till bergförstärkning och skydd av dräner med sprutbetong.
- *Brandskydd*. Det är viktigt att de material som används i en tunnel inte bidrar till uppkomst av brand, brandspridning eller rökspridning, allt i syfte att säkerställa att krav avseende brandsäkerhet kan uppfyllas. Krav/ råd i Tunnel 99 på ingående delmaterial behöver förbättras och differentieras mer samt att verifieringsmetoder identifieras, exempelvis rekommendationer avseende vilka provningar som ska utföras och vilken kravnivå som bör väljas. Provningsmetoder som är lämpliga för att verifiera olika konstruktioners brandegenskaper bör tas fram. Inklädnader med PE-skum som är skyddad med sprutbetong är ett exempel på en konstruktion som bör kunna verifieras med en standardiserad provningsmetod. Möjligheten att driva samarbetsprojekt med andra länder, exempelvis Norge, bör noga studeras. Förbättrade krav kan sedan ligga till grund för vidare utveckling av acceptabla tekniska lösningar.
- *Beständighet hos kemiska injekteringsmedel*. Idag har vare sig Vägverket eller Banverket tagit ställning till vilka krav avseende prov-

ningsmetoder för beständighet av injekteringsmaterial som skall ställas, vilket är en klar brist. Det är nödvändigt att rekommendationer avseende vilka provningar som ska utföras och vilken kravnivå som bör väljas, etableras. En detaljerad analys av befintliga metoder på beständighetsområdet (generellt) tillsammans med en analys av testmetoder för injekteringsmedel bör därför genomföras.

Utöver dessa föreslagna FoU-insatser finns det en mer praktiskt inriktning som bör genomföras parallellt med föreslagna FoU-projekt. Det är en systematisk genomgång och värdering av olika, främst norska metoder för vatten- och frostsäkring (kombinerade lösningar med betongvägg och Ekebergvalv/ØS-valv eller Giertsenduk i taket alternativt tunnelduk i tak kombinerat med lokala dräner). Detta bör baseras dels på ett antal norska rapporter och kontakter. Motsvarande kontakter med Tyskland eller Österrike/ Schweiz bör också undersökas. Inte minst skall praktiska erfarenheter både från utförande och löpande underhåll belysas. Vikten av ett fortlöpande och naturligt samarbete med Banverket kan inte nog understrykas.

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Anläggningsarbeten under marknivån är ofta förknippade med grundvattenproblematik. I Sverige gäller som regel alltid täthetskrav för inläckage av vatten för vägtunnlar. Dessa täthetskrav är ställda för att förhindra grundvattensänkningar samt för att skydda installationer och trygga en hög säkerhet i tunneln. Förutom krav ställda för att undvika inläckage och grundvattensänkning gäller även miljörelaterade krav för att undvika grundvattenförorening och annan omgivningspåverkan.

Den senaste tiden har erfarenheter från större tunnelprojekt visat på svårigheter att hantera problem med grundvattensänkningar och förorenings-spridning till omgivningen. Orsaken har varit en komplex problembild med höga täthetskrav, stor vattenföring i berget samt att de konventionella injekteringsmedlen har varit otillräckliga.

Problem med inläckande vatten innebär att ett flertal tunnlar i det svenska väg- och järnvägsnätet varje vinter kräver mer eller mindre omfattande underhållsinsatser orsakade av isbildning och frostsador. Det gäller både gamla tunnlar och tunnlar som nyligen tagits i drift. Framkomligheten och säkerheten kan således minska på grund av olika typer av isbildning i tunnarna. Is, block och betong i tak och väggar kan lossna och falla ner, belysningsarmaturer kan brytas sönder på grund av islast och körbanan kan bli isbelagd på grund av takdropp. Detta leder till att isen måste tas bort, vilket är ett både kostsamt och riskfyllt arbete. Om inläckaget av vatten, på sikt, kan reduceras och/eller vattnet hindras från att frysa skulle stora kostnader och risker kunna minimeras.

Förstudien till ramprojektet Dimensionering av tunnlar, littera SVT:11, ingår i Vägverkets FoU-plan 2000-2002.'

Vägverket uppdrog i november 1999 åt SwedPower AB att söka och sammanställa befintlig kunskap kring området tätning och frostsäkring av tunnlar i jord och berg. SwedPowers arbete utgör en del av föreliggande förstudie.

1.2 Syfte

En vägtunnels drifts- och underhållsaspekter påverkas i stor utsträckning av hur effektiva de installerade vatten- och frostsäkringssystemen är.

Genom att systematiskt söka och sammanställa befintlig kunskap kring området tätning och frostsäkring av tunnlar i jord och berg kan dels befintlig ny kunskap implementeras i de generella kravspecifikationerna, ATB-erna., dels den framtida FoU-inriktningen på detta område fokuseras mot identifierade, vitala områden. Därigenom kan, på sikt, säkerställas att en slutligt optimal lösning avseende vägtunnlars vatten- och frostsäkring, erhålls.

1.3 Mål och omfattning

Målsättningen med föreliggande rapport är att söka och sammanställa befintlig kunskap kring området tätning och frostsäkring av tunnlar i jord och berg.

Tätning och frostsäkring av tunnlar är ett stort och komplext område med ett stort antal förekommande ”typlösningar”. I förstudien har befintlig kunskap/ erfarenhet av förekommande ”typlösningar” i Sverige och Norge i första hand, Europa och övriga världen i andra hand eftersökts och sammanställts. I föreliggande studie har inte avloppsanläggningar samt anläggningar för vägdränering (VA-anläggningar) analyserats. Ej heller har vatten- och frostaspekter avseende vägkonstruktionen i tunneln beaktats.

De ”typlösningar” avseende tätning och frostisolering av tunnlar som studerats är:

- *Injektering* (för- och efterinjektering i kombination med dräner) (cement och keminjektering)
- *Betong-lining* (”Rigida system” (bärande huvudsystem) kontra ”lätt-lining i betong (membranlösning)” som bara har en paraplyverkan) (observera att injektering ofta fordras även för denna lösning för att uppnå erforderliga förhållanden innan motgjutning)
- *Inklädnader* med och utan frostisolering

För- och nackdelar utifrån olika tätningskoncept har i möjligaste mån studerats med avseende på bl.a.:

- tätningsresultat (tätande effekt)
- beständighets- och livslängdsaspekter
- miljöaspekter
- drift- och underhållsaspekter
- möjligheter/ strategier för att inspektera bakomliggande ”bärande huvudsystem”.

Med anledning av det stora antalet pågående FoU-insatser på området cementinjektering kan framtida FoU-insatser inom detta område, i Vägverkets regi, förmodas vara lågprioriterade, åtminstone till dess resultaten från de pågående FoU-projekt har presenterats och implementerats, se Proceedings från 4th Nordic Rock Grouting Symposium, SveBeFo, 2001. Vägverket har också, i samverkan med Banverket, Elforsk och SveBeFo planer på att under år 2002 initiera ett arbete som skall resultera i en (kunskaps)handbok avseende cementinjektering. Syftet med en kunskapsbok om injektering är att få ut erhållna forskningsresultat till praktisk applikation och därmed dels erhålla en bättre grund för branschens behandling av tätningsfrågorna och dels att främja ett mer strukturerat och planerat arbetssätt. Föreliggande studie därför inte fokuserats i detalj kring frågeställningar avseende injektering med cementbaserade medel.

Vissa specifika frågeställningar associerade med täthet för vattentäta betongkonstruktioner (läckage i dilfogar etc.) behandlas i den kommande förstudien "Dimensionering av tunnlar".

I studien har inte heller täthetsaspekter avseende betongtunnlar under vatten studerats.

Sökning i bibliotek och databaser har gjorts med tyngdpunkt på svensk, norsk och europeisk dokumentation. Företrädesvis litteratur som skrivits på 90-talet. Huvuddelen av arbetet omfattar metoder använda i Sverige och Norge. En kortfattad beskrivning av grundläggande skillnader i förutsättningar och av metoder använda i Europa, främst alpländerna ingår.

I arbetet har kontakter tagits med personer som arbetat på nyligen genomförda tunnelprojekt för att dokumentera erfarenheter vunna vid projektgenomförande (byggande) såväl som vid förvaltningen (drift och underhåll). Vidare har kontakter tagits med personer på svenska högskolor och forskningsinstitut för att eftersöka befintlig kompletterande kunskap.

Föreliggande studie har resulterat i förslag till konkreta FoU-projekt som delunderlag för Vägverkets beslut om framtida forskningsinsatser.

2 Krav på en vägtunnel

Vägverkets krav på vattentäthet enligt Tunnel 99, avsnitt 3.2.3 är följande:

”Tunnel skall vara tillräckligt tät mot vatteninläckning. Kravet på täthet utgår från eftersträvad tunnelmiljö och risk för omgivningspåverkan.

Geohydrologisk utredning skall utföras.

Risk för omgivningspåverkan bestäms utifrån geohydrologisk utredning, eventuell stabilitetsutredning och eventuell vattendom.

Krav på mängd inläckande vatten utifrån dessa utredningar skall vara angivet i den tekniska beskrivningen.

Påverkan på omgivningen, såsom grundvattensänkning i anslutning till tunneln kan vara så omfattande att marksättningar och andra skador kan uppstå.

Vägbanor, golvytor och eventuella gång- och cykelbanor skall inte utsättas för dropp och rinnande vatten.”

I avsnitt 3.4.3.2 (Verifiering/ vattentäthet) anges vidare att:

” Utredning skall verifiera eller på annat sätt göra det sannolikt att valt koncept för tätning/vattenavledning uppfyller krav på mängd inläckande vatten.

I de fall där vattentätning inte placeras vid bärande huvudsystems avgränsning mot jord, berg eller vatten skall det speciellt påvisas att krav på beständighet uppfylls.

Inläckage skall minimeras så att rinnande vatten på tunnelvägg undviks.

Skadlig omgivningspåverkan för bergtunnel motverkas i första hand genom injektering och i andra hand genom infiltration eller en vattentät konstruktion. Eftersträvad tunnelmiljö uppnås i första hand genom injektering och i andra hand genom bortledning av vatten med dräner eller innertak/takkonstruktioner. Bortledning av vatten och infiltration är metoder som ökar driftkostnaderna och val av metod bör göras efter analys av livscykelkostnader.”

Vägverkets krav på säkerhet mot frysning enligt Tunnel 99, avsnitt 3.2.4 är följande:

”Tunnel skall utformas så att skador av frysning inte uppstår.

Tunnel utformas normalt så att isbildning inte uppstår vid tätskiktet för dimensionerande köldmängd enligt avsnitt 3.3.3.3.3.

För isolering under vägbana gäller krav enligt avsnitt 3.6.3.3.1.

Konstruktion som säkerställer vattentäthet skall även dimensioneras för islast enligt avsnitt 3.3.3.3.8 i de fall som frostisolering inte dimensionerats för maximiköldmängd.”

I avsnitt 3.4.3.3 (Verifiering/ Säkerhet mot frysning) anges vidare att:

”Utredning skall verifiera eller på annat sätt göra det sannolikt att valt koncept för tätning/vattenavledning uppfyller krav på säkerhet mot frysning samt krav som motverkar isbildning vid vattentätningsskiktet.

Säkerhet mot frysning skall verifieras genom temperaturinträngningsberäkning. Dimensionerande köldmängd i tunnel skall förutsättas vara enligt avsnitt 3.3.3.3.3. Vid beräkning av temperaturinträngning skall hänsyn tas till isoleringsförmågans minskning med tiden och till eventuella köldbryggor.

Inverkan av värmeövergångsmotstånd får medräknas om denna bestäms med beaktande av lufthastigheten vid konstruktionens yta.

Luftspalter som utnyttjas till värmeisolering skall vara uppdelade och begränsade till storlek för att minska inverkan av konvektion.”

I Tunnel 99, avsnitt 4.2.3 Brandskydd/ material anges krav på material enligt:

”Material i bärande huvudsystem, inklädnad och installation får inte bidra till brandspridning eller rökspridning.

Material bör vara obrännbart om inte materialets bidrag till brandspridning kan anses vara försumbart.

I den tekniska beskrivningen kan anges kompletterande krav. Kraven bör utgå från en bedömning av vilka skador som beställaren anser är acceptabla.

Plastmaterial, som ingår i inredning och installation, bör bestå av klorfritt material.”

I Tunnel 99, avsnitt 2.6.4 anges krav på inspektionsmöjlighet som kan påverka utformning av system för vatten- och frostsäkring i vägtunnlar, nämligen;

”Bärande huvudsystem och inredning skall normalt kunna inspekteras på handnära avstånd.

För att möjliggöra inspektion bör minst 0,5 m fritt utrymme finnas.

Om det bärande huvudsystemet utgörs av berg och 0,5 m fritt utrymme inte uppnås eller handnära inspektion av annat skäl inte är möjlig, till exempel ovanför innertak, skall konstruktionen utformas så att fjärrinspektion kan utföras och inklädnaden utformas lätt demonterbar. De vid detta

utförande ökade drifts- och underhållskostnaderna skall utredas och värderas.

Inspektion av mot bergyta motgjuten inklädnad eller tätt anslutande insprutad drän anses ge tillräcklig information om tillstånd hos bakomliggande bärande huvudsystem.

Principer för hur inspektion skall utföras skall vara angivna i den tekniska beskrivningen.

Infästningsanordningars funktion skall kunna kontrolleras.”

3 Metoder för tätning och frostsäkring

Det finns ett flertal strategier för att förhindra problem, relaterade med frysning, i tunnlar. De kan dock delas upp i tre huvudkategorier enligt:

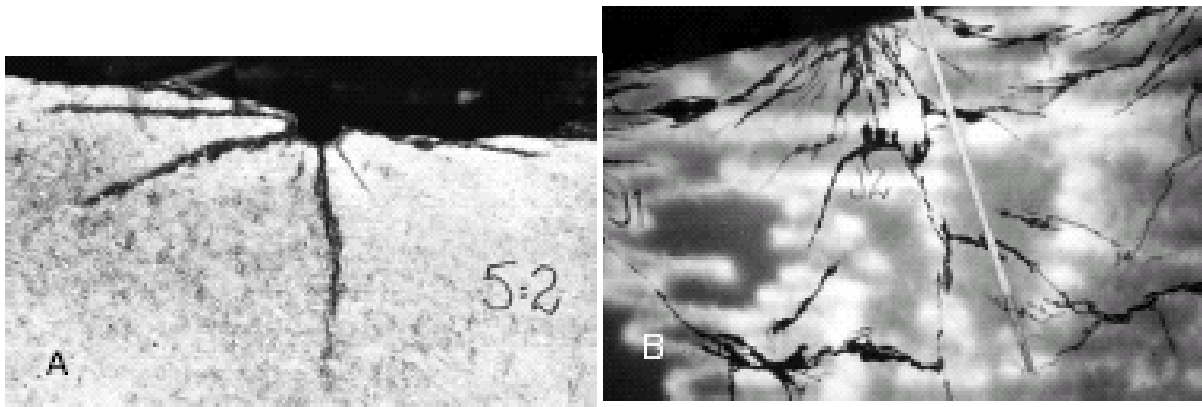
1. Hindra vatten att komma till områden/konstruktionsdelar som utsätts för frysningsfenomen (minusgrader), exempelvis genom injektering, dräner etc.
2. Isolera konstruktionen/konstruktionsdelen så att frysning ej uppträder, exempelvis genom frostisolerade dräner etc.
3. Dimensionera konstruktionen så att effekter orsakade av frysning kan hanteras

Vattnet kan alltså förhindras att tränga in i områden där frysskador kan uppkomma genom att berget görs tätt genom injektering. Vattnet kan förhindras att orsaka frysskador med hjälp av isolerade dräner. Inklädnadskonstruktioner kan också dimensioneras på ett sådant sätt att de tål de eventuella krafter som orsakas av frysfenomen.

En sammanställning av de idag vanligaste metoderna för att förhindra frostrelaterade problem presenteras, se nedan samt i bilaga 1.

Skonsam sprängning

Skonsam sprängning kan i områden med risk för frostsador ses som en relativt billig försäkring mot framtida kostnadskrävande insatser (Linde, 1997). Huvudsakligen medför utförande av tunneln med skonsam sprängning att det ytnära berget i anslutning till tunnelns väggar, tak och sula lämnas så ostört som möjligt. Ett ostört ytberg i tunneln medför i sin tur att utförda förinjekteringar lämnas mera oskadade av sprängningsarbetena samt att mindre kilar och block sitter bättre förankrade än vad som ofta blir fallet vid konventionell sprängning. En tunnel som sprängts med skonsam sprängning är mer homogent med mindre andel sprängningsinducerande sprickor än ett berg där kraftigare sprängning applicerats. I figur 3.1 åskådliggörs skillnaden i sprickutbredning i kvarstående berg, orsakade av olika grad av skonsam sprängning. Det får anses som självklart att ett mer uppsprucket berg närmast tunnelperiferin med sprickor som tränger längre in i bergmassan har en större potential att dränera vatten från omgivande berg in i tunneln.



Figur 3.1 Bilder från sprängförsök i Vånga. Bild A visar en mer skonsam sprängning med en frikopplad laddning medan bild B visar effekterna från en motsvarande sprängning med fulladdade hål. (Ouchterlony och Olsson, 2000)

Injektering

För att förhindra inläckage av vatten och uppnå erforderlig täthet, har tätning av berg genom injektering visat sig vara den mest praktiska och ekonomiska metoden vid svenska förhållanden. Omfattande erfarenheter av injektering i svenskt urberg föreligger och metoden används regelmässigt då krav på täthet finns.

Grundprincipen för injektering är att ett antal borrhål borrar i berget efter ett, i förväg, bestämt mönster och att från borrhålet pressa injekteringsmedel in i öppna porer och sprickor under tryck. Injekteringsmedlet tränger in i och fyller sprickorna och verkar tätande. Tätning genom injektering kan utföras både före och efter uttag av berg.

Förinjektering definieras som injektering i förväg av bergparti som till större eller mindre del skall sprängas ut. Tätningen sker alltså framför tunnelfronten. Detta är fördelaktigt då injekteringen normalt kan göras med högt tryck varvid god inträngning och spridning av injekteringsmedlet normalt uppnås. Vid kontinuerlig förinjektering eftersträvas en injekterad zon, injekteringsskärm, runt det hålrum som tunneln utgör. Vid den efterföljande utsprängningen måste laddningen och laddningsmängderna anpassas till den utförda injekteringsskärmen så att denna inte skadas.

Efterinjektering definieras som injektering utförd efter utsprängning. När tunneln sprängts ut kan visst inläckage av grundvatten återstå som måste åtgärdas, även om berget tätats genom förinjektering. Detta inläckage åtgärdas normalt genom efterinjektering via hål borrhållade in mot den vattenförande sprickan alternativt det läckande bergpartiet.

Normalt genomförs tätningsinsatserna som kontinuerlig förinjektering med kompletterande efterinjektering och/eller dränering. I Norge undersöktes möjligheten att med endast injektering klara vatten- och frostrelaterade problem men man fann att det inte var praktiskt möjligt. Lundbytunneln i Sverige är ett exempel på att även en mycket tät tunnel fortfa-

rande kan ge problem med vattendropp och isbildning som påkallar en utökad underhållsinsats samt komplettering med dränering och frostisoler-ring.

Omfattningen av efterinjektering bör minimeras så långt som möjligt. Bakgrunden till detta ligger i att det är svårare att uppnå bra tätningssre-sultat vid efterinjektering jämfört med förinjektering. Efterinjekteringen har att hantera en tryckgradient mot tunneln vilket ofta medför att injek-teringsmedlet tar närmaste väg till bergytan och att ingen bestående tät-ningseffekt erhålls. Normalt används ett lägre injekteringstryck vid efter-injektering jämfört med en förinjekteringsinsats. Detta sammantaget medför att tätning av berg genom efterinjektering normalt är mer tids-och kostnadskrävande än förinjektering.

Vid såväl för- som efterinjektering används till övervägande del cement-baserade injekteringsmedel (suspensioner). För situationer där injektering med cementbaserade injekteringsmedel ej är tillräckligt tätande kan ke-miska injekteringsmedel (lösningar), helt eller delvis, erfordras för att uppnå ställda täthetskrav.

Inklädnad

I Tunnel 99 definieras inklädnad enligt följande: *"Delar av inredning för beklädnad av väggar och tak, främst för skydd mot frysning och inläck-ande vatten. För en tunnel i berg kan inklädnaden även ingå i förstärk-ningen."*

Tunnelinklädnad kan användas för att avleda inläckande vatten från att droppa på vägbanor, golvytor och eventuella gång- och cykelbanor. Des-sa dräner förhindrar också vatten att droppa på och skada belysning, ven-tilation och andra anordningar. För att säkerställa att skador av frysning inte uppstår utformas frostisolerade dräner.

Syftet med frostisolering är att utrymmet bakom isoleringen ska vara frostfritt så att is inte bildas. Dagens lösningar klarar emellertid inte detta vid måttliga till stora köldmängder. Detta behöver dock inte leda till att isproblem uppkommer i tunneln. Begränsade ismängder återfinns istället på valven (Statens vegvesen, 1997a). Enligt Vägverket Stockholms ut-redningar kan en rätt dimensionerad isolerad drän tillse att de flesta vat-tenflöden till tunneln fryser och avstannar innan själva dränkonstruktio-nen erhåller skador.

Ett vanligt sätt att frostisolera tunnlar är att använda någon form av in-klädnad som är separat från bergförstärkningen. Inklädnadens viktigaste uppgift är då att eliminera förekomst av vatten och is i tunnelrummet. Vid inklädnad av en tunnel måste inläckande grundvatten dräneras ur tunneln. Inklädnaden klarar normalt inte att stora grundvattentryck byggs upp utanför inklädnaden. Det finns en praktisk gräns, som måste avgöras från fall till fall, när en inklädnad kan användas på grund av omgivande grundvattentryck. Skall en helt tät tunnel utföras med stora vattentryck, t.ex. som vid projekt Hallandsås, måste det göras med en omslutande be-tonglining med tätmembran.

Erfarenheter från bl a Norge har visat att det under vissa förutsättningar är rationellt och ekonomiskt att lösa problem med bergsäkring och vatten/frostsäkring åtskilt. Sedan 60-talet har det utvecklats lösningar som kan vara både tekniskt tillfredsställande och väsentligt billigare än de traditionella membraniserade betongvalven.

Tekniska krav som ställs på inklädnaden förutom vattenavledning/frostisolering kan styra valet av metod och utförande. Kraven styrs i stor utsträckning av t ex trafikförhållanden/trafiklast, inspektionsmöjlighet, brandskydd, estetik m m. Tunnelinklädnad kan delas in i tre huvudgrupper,

- *Betongvalv*, som består av isolerade eller oisolerade prefabricerade betongelement eller sprutbetong belagt på valv av PE-skum
- *Lätta konstruktioner*, som består av isolerade eller oisolerade stål- eller aluminiumplattor, alternativt en sandwichkonstruktion bestående av polyuretan belagt på bägge sidor med glasfiberarmerad polyester
- *Kombinerade valv*, som består av betongelement i väggarna och andra konstruktioner i tak, dessa kan vara oisolerade eller isolerade

Till ovanstående metoder för inklädnad av tunneln tillkommer lösningen med en platsgjuten betonglining med tätmembran. Denna lösning är vanligtvis både bärande och tätande och är den vanliga metoden i alperna. Denna lösning med en, i första hand, tätande funktion har även valts för tunneln vid Grind, väg E6 i Bohuslän.

4 Frost och is

4.1 Istillväxt och frostsprängning i berg

Två processer bidrar till istillväxt och frostsprängning i berg,

- Volymökningen, 9%, vid frysning
- Vattenvandring mot isfronten, den adsorptionsstyrda isanrikningen

Den primära orsaken till frostsprängning anses numera vara en kombination av de bägge processerna. Frostsprängningsförloppet kan delas in i två kategorier, stor- eller småskalig. Vid storskalig frostsprängning styrs brottförloppet av bergmassans geologi och då speciellt dess sprickförhållanden. Risken för frostsprängning ökar med graden av skivighet och uppsprickning samt om sprickorna stryker och stupar parallellt eller subparallellt med väggarna i tunneln eller släntfronten på berget.

Småskalig frostsprängning sker när bergmassans ytliga struktur luckras upp p g a frysande vatten i mikrosprickor. Beroende på de, i Sverige förekommande, kristallina bergarterna och dess relativt låga porositet löper dessa, exempelvis granit liten risk för småskalig frostsprängning. Frostsprängning är således i hög grad beroende av bergmassans beskaffenhet, vad det gäller porositet, sprickfrekvens och sprickorientering.

Istillväxten och resulterande istryck i förekommande sprickor beror av flera faktorer,

- Vattentillgång
- Temperatur
- Sprickvidd och tillhörande spricktransmissivitet
- Sprickfyllnad
- Mineralkornstorlek och sprickråhet
- Omgivande bergmassas elastiska egenskaper

Den tryckspänning som isen kan åstadkomma i en spricka är främst beroende av två faktorer,

- Istillväxtens storlek
- Isens plastiska deformation och krypegenskaper

Utmattning av berget p g a upprepade frostcykler reducerar endast till liten del draghållfastheten. Således anses frostcyklernas primära påverkan på hållfastheten vara isbildningsprocessens ökade tillgång på fritt vatten (Linde, 1997).

För vanliga bergarter i Sverige överstiger istrycket ofta med stor marginal bergets draghållfasthet. Vid beräkningar av istryck väljer man vanligtvis att beräkna det maximalt möjliga istrycket, isens krypning sätts till

noll och bergets elasticitet försummas (Knutsson, 1985). Istryck har uppmätts till 12 MPa (Andrén, 1995). Istrycket kan antingen vandra in längs sprickan och lämna ett avlastat parti efter passerande, eller så uppstår ett tryck längs hela sprickan. Vid upprepad tining och frysning och om all is ej hinner smälta undan är det vanligt att tryck uppstår längs hela sprickan. Istryck påverkar block mest. Vid planering för frostsäkring av tunnlar bör således de vattenförande sprickorna granskas. Upprepad tining/frysning är en avgörande faktor för risken för blockutfall i tunneln. Enligt Vägverket, 1997, är det inte troligt att farliga istryck bildas i tunnlar typ Ringen i Stockholm, utförda med förinjektering och sprutbetongförstärkning. Denna slutsats är grundad på dels allmän kunskap och erfarenhet och dels på resultat från en teoretisk beräkningsmodell och praktiska fältförsök.

4.2 Svallis

I Sverige är svallis ett relativt vanligt problem. Istillväxten är beroende av tillgången på vatten och en temperatur som inte minskar vattentillgången men bidrar till isbildningen. Svallis bildas företrädesvis i lågpunkter. Riklig vattentillgång och temperaturer nära 0 °C ökar förutsättningarna för svallisbildning. I en tunnel skyddar bergets värmeinnehåll grundvattnet från att frysa fram till den kalla bergytan. Högt grundvattentryck kan således leda till stora svallisformationer. Bergets värmeinnehåll dämpar effekten av lokala kortvariga temperaturvariationer. Trafiken kan dock via kolvverkan medverka till temperaturvariationer i tunneln som främjar isbildningen.

Vid frysning i inklädnad/dränkonstruktion kan bakomliggande grundvattentryck öka och inläckaget ändra läge. Detta kan leda till att en tunnelvägg efterhand blir helt inklädd med is.

De vattenförande sprick- och krosszonernas strykning i förhållande till bergskärningens/tunnelns strykning är betydelsefull. Om skärningens/tunnelns strykning är parallell med sprickzonen kan problemet med svallisbildning följa bergskärningen/tunneln långa sträckor.

4.3 Frostinträngning

Tillgången på vatten i kombination med kyla är de dominerande faktorerna avseende risk för skador p g a frostinträngning i tunnlar. Dock kan de stora temperaturvariationerna i det torra berget också leda till problem och skador p g a nedfallande stenar. Detta är dock relativt sett av betydligt mindre omfattning än problemen då vatten och is är närvarande. Frostinträngningen styrs av den komplexa energibalansen, eller här benämnd värmebalansen. Värmebalansen påverkas i en tunnel av en rad faktorer,

- Luftströmmar ut och in i tunneln – konvektion

- Omgivande berg – strålning, ledning
- Isbildning
- Fritt vatten
- Vägmaterial, tunnelinklädnader
- Fläktar, belysning
- Fordon

Frosten tränger främst in i tunneln med kallluften. I en horisontell tunnel en stilla vinterdag strömmar kalluft in i bågige tunnelmynningar, nertill längs körbanan, medan varmluft strömmar ut uppe i valvet. I korta tunnlar (<500 m), påverkar dominerande vindriktning frostprofilen starkt (Statens vegvesen, 1980). I tunnlar med stigning strömmar den varma luften ut genom tunnelns övre mynning, medan kalluft dras in genom den nedre öppningen. Så skorstenseffekt erhålls. Temperaturskillnaden mellan tunnelluft och omgivningsluft är den drivande faktorn. I en tunnel med en inre högpunkt kan en varmluftspropp bildas, vilken kan reducera eller stoppa luftströmningen. Tunnlar under sjöar har ofta stark stigning mot öppningarna. Varmluften från tunneln stiger snabbt ut medan kalluft rasar in. Frosten tränger längre in i denna typ av tunnlar jämfört med andra. Lokalklimatet är av stor betydelse.

I tunnlar med stor trafikbelastning monteras mekaniska fläktar in. Ventilationen ökar frostinträngningen.

5 Metoder för vatten och frostsäkring i Sverige

I tunnlar för väg eller järnvägstrafik i Sverige är det idag vanligaste förfarandet förinjektering kompletterat med dränering. Strategi och förfarande för injekterings utförande varierar beroende på vilka krav som ställs på inläckagen, främst av miljöskäl. Dräneringen installeras efter att tunneln tagits ut och anpassas till rådande förhållanden. Underhållsproblem förekommer i trafiktunnlar i hela landet. Omfattande studier av hur frostproblemet kan hanteras har genomförts i samband med Ringenprojektet i Stockholm. Här redogörs kortfattat för resultaten från detta samt erfarenheter från Lundbytunneln i Göteborg, Arlandabanans bergtunnlar samt några av Banverkets tunnlar.

5.1 Injektering

Injektering med cementbaserade injekteringsmedel är den metod som främst använts i Sverige för hantering av vattenproblem i väg- och järnvägstunnlar. Under senare år har både metoder, material och utrustning utvecklats. Forsknings- och utvecklingsprojekt har under senare år genomförts och pågår för närvarande vid flera högskolor.

Förinjektering vid tunnelfronten är den metod som möjliggör injektering vid relativt höga tryck, vilket är en förutsättning för att injekteringsbruket skall tränga ut i bergets spricksystem. Efterinjektering utförs för att täta oönskade kvarvarande läckage.

Erfarenheter från senare års arbeten visar att det går att erhålla mycket goda tätningsresultat med en noggrant utförd förinjektering med kontrollprogram inkluderande vattenförlustmätning och noggrann mätning av inläckande vatten samt kompletterande tätning med efterinjektering.

Det är dock inte troligt att injektering som enda metod kan klara problematiken med vatten- och frostinträngning i vägtunnlar. Även vid ett mycket gott tätningsresultat måste enstaka kvarvarande läckage avledas/dräneras bland annat ur trafiksäkerhetssynpunkt.

5.2 Sammanfattning av litteratur från Vägverket Stockholm (Ringenprojektet)

Konstruktiv utformning av ringentunnlarna med hänsyn till drift och underhåll. Användning av beslutsteori, Rapport 0092.

Rapporten beskriver ett försök att med beslutsteori värdera olika konstruktionslösningar ur kostnadssynpunkt. I kostnaderna ingår underhåll, olyckskostnader och utbyte av felande element. Följande sammanfattar rapportens slutsatser:

Den för bärförmågan bästa lösningen är att förstärka berget enbart för storstabilitet och göra taket så bärkraftigt att det kan ta lasten från nedfallande stenar och enstaka block.

Den marginella kostnadsökningen för att göra taket bärkraftigare än stipulerade minimikrav täcks mer än väl av kostnadsminskningen för en systematisk bergförstärkning.

Att ordna vattenavrinning bakom en skärmvägg gör att problematiken med igensättningsbenägna dräner undviks och därmed en stor underhållskostnad. Frostisolering erfordras ej, eftersom konstruktionen dimensioneras för islast.

Analysen bygger på förväntad livslängdskostnad (LCC), vilket innebär att framtida underhåll diskonteras till nuvärde. Utförd analys visar att det är fördelaktigare att inte investera i en konstruktion med en mycket stor förväntad livslängd utan underhåll, utan att det är lönsamt att välja en konstruktion där ett underhåll och/eller utbyte av komponenter är inplanerat.

Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport Produktionsuppföljning Rapport 0145

Rapporten redovisar produktionsuppföljning från installationer av test-dräner i Hornsberg. Sammanfattningsvis drogs följande slutsatser:

Smidiga infästningsdetaljer viktiga för monterbarheten.
Montagearbetet utgör en stor del av kostnaden.

Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport - En pilotstudie av metoder för mätning av igensättning, Rapport 0146.

Rapporten behandlar igensättning av dräner orsakat av järnbakterier. Sammanfattningsvis föreslås följande:

- Dräner installerade i områden med indikationer på järnbakterier (bruna slemmiga utfällningar) skall förses med rensningsanordningar.
- Det anses inte vara några bekymmer att utveckla en sensor som ger larm när en drän börjar bli igensatt.
- Det är möjligt att problemen kan minskas om det inläckande vattnet koncentreras till kanaler.
- Lämplig rengöringsmetodik bör utvecklas med hänsyn till kostnad, effektivitet, miljökrav och systempåverkan.

Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport 3, Belastningsförsök Rapport 0147.

Följande två typer av dräner testades först dynamiskt och därefter med statisk provning till brott.

- Nätarmerad och isolerad täckt med oarmerad sprutbetong och förankrad i berget med bult
- Fiberarmerad och isolerad förankrad endast med sprutbetongens vidhäftning längs dränens ytterkanter.

Provningsen visade för båda dränerna att dynamisk last inte utgör något problem. Följande rekommendationer finns redovisade i rapporten:

- Smal drän $\leq 1,5$ m bred med vidhäftning $\geq 0,3$ MPa skall förankras med sprutbetongens vidhäftning längs ränderna.
- Vid bredare drän eller lägre vidhäftning skall dränen förankras med bult cc 1,2 m och bricka 0,1x0,1 m.

För båda fallen rekommenderas en täckning av dränen med 40 mm armerad sprutbetong följt av 20 mm oarmerad sprutbetong.

Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport 4, Dränfunktion vid igensättning Rapport 0148.

Nio dräner installerade över en 50-meterssträcka med kraftig utfällningsaktivitet studerades. Följande sammanfattande slutsatser och rekommendationer presenteras i rapporten:

Bedömning av igensättningsrisk:

- Det är mycket svårt att på förhand (innan tunneln är byggd) uttala sig om problem med bakteriell igensättning av dräner kommer att uppstå. Viss vägledning kan fås ur studier av marktyper ovan tunneln. Myr, sjö, havssediment, tippar och föroreningar med organiskt innehåll utgör indikatorer för framtida problem.
- Indikationer på järninnehållet i berggrunden kan erhållas ur geologiska bedömningar.
- Erfarenheter från närliggande tunnlar.
- Analys av vattenprover. Halten av Fe(II) sätter den övre gränsen för hur mycket järn som kan fällas ut. Grundvattnets pH styr också utfällningsmekanismen. Om $\text{pH} < 5$ sker inga utfällningar. Mellan 5,5 och 7 oxiderar bakterierna järnet. Vid $\text{pH} > 7$ dominerar kemisk oxidation vilket bör ge mindre mängd utfällningar.
- Observationer i den utsprängda tunneln utgör den bästa informationen om framtida igensättningsproblem.

Dränutformning med hänsyn till igensättningsproblem:

Om risk för igensättning konstaterats gäller följande:

- Dränen skall vara försedd med minst ett dränagerör.
- På dränageröret skall finnas minst en spolanordning.
- Dränvattnet skall ledas vidare i slutna och spolbara rör.

Underhåll:

Underhållningsprogrammet för dränerna i problemområden bör utformas enligt följande riktlinjer:

- Inspektion skall utföras månadsvis direkt efter dränmontage för att uppskatta igensättningshastigheten.
- Igensättningshastigheten utgör grund för klassning av dränerna.
- Den första mekaniska rensningen utförs innan halva tvärsnittsarean i en dräns dränrör satts igen.
- Underhållsrensning anpassas efter igensättningshastigheten i de olika dränerna (efter klassningen).

*Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport 5, Dränfunktion vid kyla
Rapport 0149.*

Fyra olika dräntyper testades. Följande sammanfattande slutsatser presenteras i rapporten:

- Smala dräner (0,6 m) med värmekabel fungerar sämre än 1.5 m breda dräner med 5 cm isolering utan värmekabel.
- Isbildning uppkommer i samtliga fall i luftspalten mellan drän och berg. Om isoleringen är tillräckligt tjock, ca 50 mm, fryser vattnet i berget innan temperaturen i luftspalten sjunkit till under noll. Detta medför att läckaget fryser innan isbildningen blivit för kraftig i luftspalten.
- Vid ungefär -2 grader C i bergmassan bakom dränen avstannar vattenflödet in i dränen. Kraftig isbildning kan uppkomma om en läckagepunkt bakom dränen på något sätt är extra isolerad eller uppvärmd så att frysning undviks. Dräner skall alltså inte monteras på ett sådant sätt att delar befinner sig i extra isolerade eller uppvärmda område medan andra delar kan frysa.
- Allmänt rekommenderas dräner utformas som isolerade med en minsta tjocklek på isoleringen av 50 mm och en bredd av minst 1,5 meter.

Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Slutrapport, Dräner för bergtunnlar – Funktion och utformning, Rapport 0150.

Rapporten sammanfattar försöksresultat, speciella iakttagelser och resonemang samt gjorda rekommendationer.

Rekommendationerna är som följer:

Vattenavskärmning:

Skapas med en 50 mm vattentät isolermatta av expanderad polyetylen. Längs kanterna förses mattan med längsgående spår för att minska risken för läckage åt sidorna. God anläggning längs kanterna erhålls med en klen armeringsstege. Armeringsstegen och isoleringen pressas mot berget längs kanterna med expanderbult som monteras i lågpunkterna med ett maximalt avstånd av 0,4 m. Vid alla typer av genomföringar (exempelvis bultar) skall speciella åtgärder vidtas för att förhindra vattengenomträngning.

Frostskydd:

Erhålls med 50 mm isolermatta av expanderad polyetylen. För att säkerställa att berget fryser före luftspalten mellan berg och drän skall dränen utföras till en bredd av minst 1,5 m.

Lastupptagning:

Lastupptagning i själva dränen sker med hjälp av ett 60 mm tjockt sprutbetongskikt (40 mm armerad och 20 mm oarmerad). Förankring av dränen sker med vidhäftning längs dräns ränder om dränen har en bredd av som mest 1,5 m och om sprutbetongens vidhäftning minst uppgår till 0,3 MPa. Vid bredare dräner och/eller i fall med lägre vidhäftning förankras dränen med galvaniserad bult med ett inbördes avstånd av 1,2 m.

Inspektionsprogram för underhåll, Med avseende på geologi, bergförstärkningar och upphängningsanordningar samt bergdräners funktion i ringens tunnlar, Rapport 0241.

Rapporten avhandlar grundläggande strategier för bergförstärkning, upphängningsanordningar och bergdräner anpassat till Ringen och Yttre Tvärleder i Stockholmsområdet.

Det kan konstateras att författarna förordar "lätta" lösningar där bergförstärkningen kan inspekteras framför "tunga" lösningar som är dimensionerade till att klara livslängdskraven utan hjälp av bakomliggande bergbultar och sprutbetong.

Rapporten anvisar relativt klart och entydigt vilka kontroller/inspektioner som skall göras för olika konstruktionselement i monterings- och driftskede.

Sammanfattande kommentarer till Vägverkets rapporter

Förenklat kan följande utläsas:

- Bygg lätta underhålls- och utbytbara konstruktioner
- Satsa på regelbundet underhåll/inspektion istället för dyra tunga underhållsoberoende konstruktioner.
- Välj dräntyp efter observationer gjorda efter tunneluttaget.
- Styr underhållsintervall efter inledande observationer och klassning av komponenterna.

De frågor som framkommit hittills är följande:

Drändimensioner: Fördelar/nackdelar med bredare dräner (5-50 m) synes ej diskuterade.

Grövre konstruktioner: Fördelar/nackdelar med installation av bärande gjutna betongkonstruktioner dimensionerade att ensamma klara bergglas-ter, grundvatten och eventuella istryck mycket sporadiskt diskuterat.

Teknisk beskrivning, bergarbeten. Arbetshandling, Revidering B, Årsta Entreprenad SL 01, Södra Länken, 1999-06-01 och Teknisk beskrivning, handling 9.1. Innertak, Entreprenad SL 37, Södra Länken, 1999-07-09.

Avslutningsvis exemplifieras ett antal krav som ställts i Södra Länken avseende tätning och frostsäkring av dränering och takelement i berg-tunnlar, nedan.

Konstruktioner av dränerade skivor /Tak- och väggdränering i tunn-lar

Vid behov av avledning av vatten från bergyta som ej täcks av isolerande innertak monteras dräner.

Dräner monteras enligt ritning, dels mot berg och dels efter utförd be-tongsprutning.

Dräner utförs enligt ritningar som smal eller bred insprutad isolerad drän. Eventuella avsteg från ritningarna skall godkännas av beställaren.

I varma utrymmen där ingen risk för frysning föreligger skall tjockleken på dränens isolering minskas till 30 mm.

I korsning där ledningstunneln går igenom trafiktunnelns tak skall mon-tage av dräner göras mot ledningstunnelns betonginbyggnad enligt rit-ning. Den stålprofil som skall användas för infästning av dränmatta mot betonginbyggnaden skall vara av rostfritt stål, SS 2343. Arbetsbeskriv-ningar för stålprofilens montering och tätning mot betonginbyggnaden skall upprättas av entreprenören. Arbetsbeskrivningar och material skall före utförande vara godkända av beställaren.

Beställaren kommer fortlöpande och från fall till fall avgöra var, i vilken omfattning och vilken typ av dränering som skall utföras. Entreprenören skall vara beredd att montera kompletterande dräner även i ett sent skede av arbetena.

Entreprenören skall utanpå sprutbetongen med färg markera läget för insprutade dräner samt ange dränens centrumlinje med sektionsangivelse. Markeringen görs från på nedre delen av väggen mellan tunnelbotten och upp till en nivå 0,1 m under överkant barriärelement. Över barriärelementet skall brytpunkter i dränens yttre kontur markeras med rostfri dubb, materialkvalitet SS 2343, Ø 8 mm och längden 50 mm. Dubben fixeras med bruk i borrarade hål. 10 mm av dubben skall sticka ut utanför sprutbetongytan.

Förprovning

Förprovning av infästningselement, bult och bricka, skall utföras enligt principerna för förprovning av bultar enligt C5.23.

Löpande kontroll

Montagekontroll skall utföras före betongsprutning. Beställaren skall ges möjlighet att delta vid montagekontrollen. Sprutbetong provas enligt C5.12 med frekvens enligt GK2.

Inklädnad av rampanslutningar

Rampanslutningar skall kläs in med en inklädnad av material som köldisolerar och förhindrar vatteninträngning i tunnel.

Inklädnad av följande rampanslutningar ingår i entreprenad SL 01:

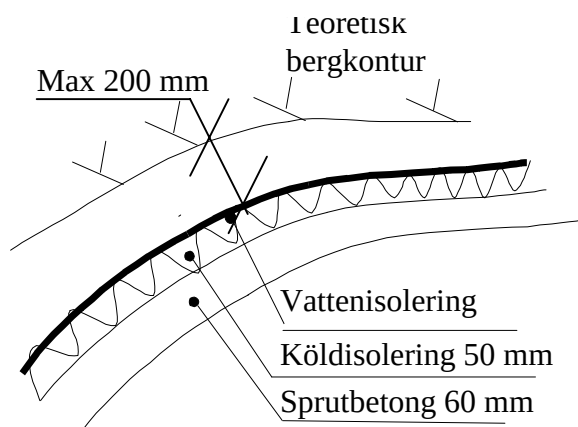
- Inre huvudtunnel ca 2/358-2/441
- Yttre huvudtunnel ca 2/335-2/416 och ca 3/037-3/119
- Ramp 214 ca 1/595-1/521

Inklädnadens yta ut mot trafikrummet skall utgöras av sprutbetong för att efterlikna en betongsprutad bergyta.

Läge och omfattning av inklädnaden redovisas på bergschaktritningarna.

Avslutning av inklädnad mot barriärelement utförs enligt samma princip som tak- och väggdränering i tunnlar. Ritning över barriärelementen erhålls vid entreprenadstart.

Principiellt tekniskt utförande redovisas på nedanstående figur.



Figur 5.1 Principiell uppbyggnad av inklädnad i rampanslutning

Avståndet mellan utsida beklädnad (mot berget) och teoretisk bergkontur skall vara max 200 mm.

Föreslår entreprenören sådan konstruktion som kräver större utrymme skall i arbetet ingå extra utsprängning, extra bergförstärkning, eventuell omprojektering samt övriga extra arbeten som kan påverkas av den större tjockleken på konstruktionen.

Det åligger entreprenören att upprätta konstruktionsritningar och montagebeskrivningar för offererad inklädnad som uppfyller nedanstående tekniska specifikationer.

För av entreprenören föreslagna konstruktion samt ingående material gäller nedanstående kravspecifikation.

Samtliga krav enligt denna specifikation skall verifieras.

Beställaren skall ha godkänt dokumentationen innan montaget påbörjas.

Konstruktionen skall inom alla delar ha tvärfall för att säkerställa borttransport av från berget inläckande vatten.

Inspektion av berg och konstruktionen skall kunna ske genom rivning av del av konstruktion. Entreprenören skall för beställaren ange metod för att återställa konstruktionen till ursprungligt skick.

I de fall som inklädnad utformas som en lättkonstruktion för vilken långtidserfarenhet saknas bör förundersökning och fullskaleprov genomföras för att den tekniska lösningen skall kunna godkännas av beställaren. Detta kan lämpligen utföras genom provanvändning i en befintlig tunnel.

Brand

Inklädnad skall ansluta tätt mot berget och uppfylla brandtekniskt krav enligt EI-60.

Vattentäthet och frostsäkerhet

Tunnel 95, publ. 1995:32, kap 5.5.2.1.1 gäller med förutsättning att klimatzon 2 gäller.

Beständighet

Inklädnaden dimensioneras för en teknisk livslängd på 40 år enligt Tunnel 95, publ. 1995:32, kap 2.3.

För stål gäller miljöklass M4A.

För betong och sprutbetongkonstruktion gäller följande miljöklasser enligt BBK94 avsnitt 7.3.2:

- Betong B4
- Armering A4

Verifiering av motståndsförmåga enligt Tunnel 95, publ. 1995:32, kap 5.5.2.1.4 skall gälla.

Material enligt Tunnel 95, publ. 1995:32, kap 5.5.2.1.5 skall gälla.

Ytan skall utgöras av sprutbetong. Sprutbetongen skall motsvara kvalitet enligt C5.12 samt ha minsta lagertjocklek 60 mm.

Entreprenören skall genom materialval i infästningar och förband säkerställa att ingen galvanisk korrosion uppstår.

Utförande enligt Tunnel 95, publ. 1995:32, kap 5.5.2.1.6 skall gälla.

För sprutbetong gäller C5.12.

Kontroll enligt Tunnel 95, publ. 1995:32, kap 5.5.2.1.7 skall gälla. För sprutbetong gäller C5.12.

Innertak

Funktion

Takelement i bergtunnlar skall förutom att ge optisk ledning och komfort för trafikanterna fungera som säkring mot att is, vatten eller stenar kommer ner från bergtaket på körbanorna. Det innebär att takelementen skall vara isolerade och att de skall ansluta tätt emot bergtaket vid sidorna och mot fläktfundament och andra betongkonstruktioner som bryter igenom eller avbryter innertaket. Vatten som kommer på takelementens ovansida skall kunna ledas bort utan att frysa.

Vatten- och frostisolering

Vatten från berget skall ej komma från taket ner på körbanorna. Risken för läckage minskar ju färre skarvar och fogar som finns i takytan. Alla skarvar och fogar skall ha fullgod tätning mot vatten.

Isolering

Innertaket skall ha en värmeisolerande förmåga, med ett U-värde på högst $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ (medelvärde). Isolering utföres av obrännbart material. (Enl. BBK 94)

Tätskikt

Ett tätskikt placeras ovanför det värmeisolerande skiktet. Vattnet som kommer in på taket skall ledas till längsgående rännor och vidare i stuprör ner längs bergväggen till dränering under vägbanan.

Membran utföres armerat med minsta tjocklek 1,2 mm.

Membranet skall vara motståndskraftigt mot nedbrytning från mikroorganismer enligt DIN 16726 eller ISO 846.

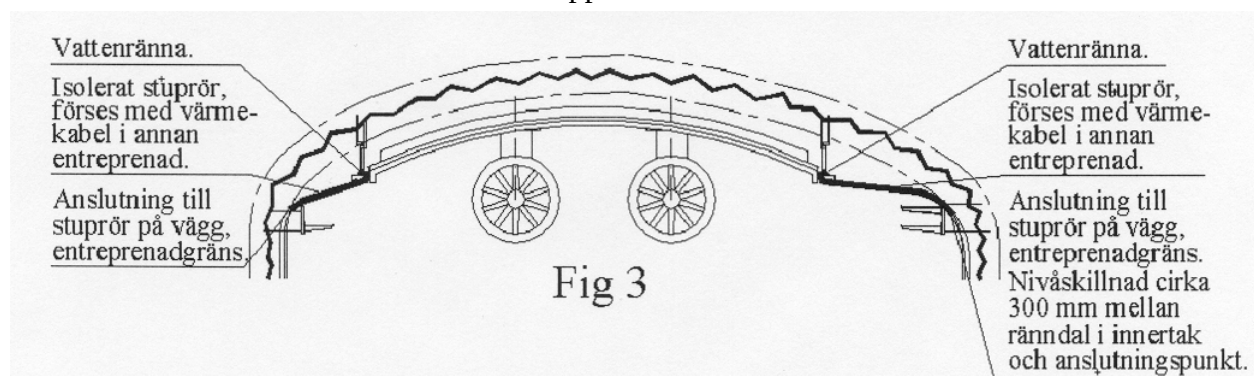
Membranet skall vara självsläckande enligt NT Fire 006.

EGENSKAP	KRAV
Minsta tjocklek (Bestämd enligt SS-EN 964-1)	Armerat 1,2 mm (medeltjocklek)
Tolerans på tjocklek	Största avvikelse från medeltjocklek +/- 0,1 mm
Brottöjning (Bestämd enligt pr EN 12113-2)	> 10%
Rivstyrka (Bestämd enligt pr EN 12112-2)	200 N/mm
Punktering Ökande kraft (Bestämd enligt SS-EN ISO 12236)	300 N
Slag	12 mm
Vattentryck (enligt DIN 16938)	tät

För använd produkt skall tillhandahållas provning från organ som ackrediterats av Styrelsen för teknisk ackreditering, SWEDAC eller likvärdig, som visar att ovanstående krav innehålls.

Lagring och hantering av membran skall ske enligt tillverkarens anvisningar. Bortledning av vatten i ränna integrerat i elementet skall ske frostfritt enligt ovan. Rännan skall ha bredd 110 mm och djup min 80 mm och skall kunna förses med värmekabel.

Frostfri anslutning från takets vattenränna till stuprör (PE dim 50) vid bergvägg skall utföras med värmekabel i isolerat rör, se figur 5.2 nedan. Avståndet varierar normalt från 1-3 m. För anbudet räknas med 180 ställen, avstånd = 2 m mellan ränna och anslutningspunkt. I samband med varje stuprör och c:a var femtonde meter skall från rännan finnas ett skvallerrör som indikerar stopp i vattenrännan.



Figur 5.2 Frostfri anslutning från takets vattenränna till stuprör (PE dim 50) vid bergvägg skall utföras med värmekabel i isolerat rör.

Inspektion

Berget ovan innertaket, innertakets upphängningsanordningar isoleringar samt ränna för avvattnings av taket skall kunna inspekteras. Ett minsta utrymme på 200 mm fritt ovan innertak krävs mellan slitslägen. Innertaks-konstruktionen kan då inte ha en tjocklek överstigande 150 mm annat än vid slitsar c/c 10 m.

I den vertikala anslutningen mellan takelement och bergtak skall finnas demonterbara delar som används vid inspektion. Sådana skall finnas minst c/c 10 meter och skall ha en minsta storlek 300x600 mm. Inspek-tionsanordningar anpassas för inspektionsintervall på c:a 5 år.

Utrymmet mellan innertak och berg planeras att inspekteras med fjärrstyrda inspektionskameror. Isolering och tätskikt skall ha tillräcklig bär-förmåga och tålighet för att bära en hjul- eller bandförsedd inspektions-vagn med en totalvikt av 45 kg på en yta av 0,2 x 0,4 m. Vagnen skall kunna passera slitsarna c/c 10 m på minst ett ställe per slits.

5.3 Erfarenheter från Lundbytunneln

Lundbytunneln i Göteborg ingår i den s k göteborgsuppgörelsen och är en drygt 2 km lång vägtunnel med två separata tunnelrör i berg. Tunneln är utförd med fristående väggelement av prefabricerad betong som di-mensionerats för att klara påkörningslaster (påkörning 500 kN, sug 0.8 kPa, tryck 0.5 kPa). Taket består av sprutbetong direkt på bergytan. Berg-förstärkning utgörs i normalfallet av bult kompletterat med sprutbetong.

Tunneln passerar under två dalgångar med sättningskänslig bebyggelse grundlagd på lera. Utförda geohydrologiska undersökningar visade på att mycket små inläckage kan accepteras för att klara ett bibehållet porttryck i leran. Det innebär även att tunneln är belägen under grundvattenytan un-der hela året och att tunnelkonstruktionen är belastad med vattentryck hela tiden.

Tunneln byggdes med kontinuerlig förinjektering med ett omfattande program med vattenförlustmätning och kontroll av förekommande in-läckage. Resultatet blev mycket gott och nuvarande inläckage ligger be-tydligt under de hårda krav som fastställdes i vattendomstolen (35-40 l/min. jämfört med tillåtna 135 l/min.). Det förekommer dock små in-läckage i tak, väggar och sula. Inläckagen är så små att de inte har någon betydelse under den varma årstiden, enstaka dropp i begränsad omfatt-ning inverkar inte på tunnelns funktion. För att avleda vattnet installera-des ett system med rör för att samla och avleda vattnet innan tunneln togs i drift. Problem med igensättning p g a kalk från cementbruket har med-fört att metoden inte används längre.

Kvarvarande inläckage innebär risk för isbildning på vägbanan och istappar under kalla perioder vintertid. Tunneln har därför kompletterats med dräner, totalt ca 2000 m² har satts upp under de senaste åren för att minska underhållsbehovet vintertid och för att höja säkerheterna för trafikanterna.

Vid en inventering och sammanställning av behov och utformning av dräner utfört av Bergab och Vägverket under 1998 identifierades i det norra och södra tunnelröret vardera 16 sektioner som i första hand borde åtgärdas. Ytterligare 18 resp. 13 sektioner föreslogs att om möjligt även åtgärdas i resp. tunnelrör. På den milda vintern 1998 gav inte besiktningarna någon klar bild av omfattningen av isproblemet, t ex vid vilken storlek av inläckagen som isproblem uppstår.

Dränerna består av polyetylenmattor med 2 m bredd som installeras från tunneltakets mitt ned till vägg, mattans längd är normalt 8m. Innanför mattan sitter ett eller två korrugerade och perforerade dränrör (PEM 50/60) som huvudsakligen fungerar som distanser mellan berget och mattan. Vatten strömmar således inte enbart i dränerna utan över en större del av bergytan. Polyetylenmattorna är monterade med band och bult mot berget och är tätade med PE-skum i kanterna av isoleringsskäl. Platserna där dräner placerats sammanfaller vanligen med de avsnitt av tunneln som varit mer hydrauliskt konduktiv och tagit mer injekteringsmedel.

Kylan är begränsad under vinterhalvåret och tunneln är inte dimensionerad mot frostaktivitet. Isoleringen är inte dimensionerad för att förhindra frostsprängning av block då behov av detta inte föreligger. Vid flera kalla nätter i rad uppstår problem med istappar under den andra natten. Orsaken är att köldmängden då är tillräcklig och istappar bildas normalt inte i tunneln dagtid på grund av trafikintensiteten som dels ökar luftomsättningen och dels höjer temperaturen.

Vintertid utför anlita undershållsentreprenör isrensning nattetid under några timmar. Behovet är relativt begränsat, under vintern 1999 utfördes rensning totalt cirka 8-10 gånger.

Erfarenheterna visar även att det är mycket viktigt att vara på plats och observera hur isproblemen och kvarvarande inläckage ser ut för att hitta en lämplig lösning. Arbetet att åtgärda kvarvarande isproblem sker successivt under de närmaste åren.

5.4 Erfarenheter från övriga vägtunnlar, region Väst

Ett antal tunnlar i Västsverige har renoverats under senare tid på grund av problem med vatten, is och frostsprängning, exempelvis Jerikotunneln (E20) vid Jonsered och Viskantunneln (E6) norr om Varberg. Det gäller både tunnelportaler och inuti tunnlar. Arbetena har omfattat skrotning av sprutbetong och berg, kompletterande efterinjektering (cement och polyuretan) och dränering. Även portaler och bergslänter ovanför portaler har

rensats och förstärkts i kombination med dränering av markvatten (utförande och omfattning har varierat).

Problem med igensatta dräner har uppkommit tidigt efter det att tunnlar-na varit byggda. Igensättningen beror bl.a. på kalkutfällning från inläck-ande vatten. Dräner har utförts huvudsakligen med 1 meter breda cell-plastdräner från takmitt ned till frostfritt djup i sidan. Vid större avsnitt i Viskantunneln har dränerna monterats på ett skal av armeringsjärn som står ett stycke ut från väggen. I ändarna ansluts dränmattorna mot väggen för att förhindra inträngning av kyla innanför isoleringen.

Problemen med frostsprängning gäller huvudsakligen sprutbetong men även förstärkning av berget p g a frostaktivitet har utförts.

Ytterligare några tunnlar som har åtgärdats är Boxvik på Orust och Ste-nungsötunneln. Renovering utförs vanligen nattetid, del på grund av tra-fikeringen av tunnlar-na och dels genom att det är svårare att arbeta om inte hela tunnlar-na kan stängas av för trafik.

Tingstadstunneln i Göteborg är den enda betongtunneln för vägtrafik un-der vatten i Sverige. Den invigdes 1968. Redan tidigt uppmärksammades problem med sprickbildning i betongen i fogarna mellan elementen som är 100 meter långa. Renovering utfördes vintern 1998-99 i två etapper då injektering utfördes med epoxi. Hösten 99 utfördes renovering av tunn-larnas innerväggar och belysning.

Ett stort problem med livslängden för vägtunnlar-na är luftföroreningarna från bilarnas avgaser som innebär att betongen vid tunneländarna åldras snabbt. Det gäller tunnelportaler för vanliga bergtunnlar och problemen varierar mycket med det lokala klimatet som styr var avgasbemängd luft ansamlas. För Tingstadstunneln innebär det att betongen vid respektive tunnelmynning åldras i förtid.

5.5 Erfarenheter från Arlandabanan

Nedanstående skrivning är helt baserat på erfarenheter gjorda under byggnadstiden samt från korta diskussioner med folk inblandade i projek-tet. Tunnlar-na har ännu inte varit i trafik så pass länge varför generella drifterfarenheter ännu saknas.

Vatteninläckage:

En ganska stor andel av Arlandabanans tunnelsträckning är klädd med dräner (mer än 25%). De installerade och insprutade dränerna har varit ca 2 meter breda enligt Vägverkets koncept. Dränerna har utförts i tunneln med 50 mm isolering från tunnelmynningarna och ca 800 m in. Problem med bakteriell järnutfällning har endast identifierats i något enstaka fall. Ett relativt omfattande arbete med efterinjektering och dränsättning har utförts i de tre stationerna där kraven varit exceptionellt höga. Här kan konstateras att större delen av stationsområdena blivit täckta med dräner. Trots detta har ett stort antal så kallade "trattar" fått installeras för att undvika dropp på perrongerna. Orsaken till kvarstående dropp trots i det

närmaste 100% täckning med dräner kan vara läckage genom dränsidor. Sannolikt hade många problem undvikits om bredare sammanhängande dräner/dränsystem, eventuellt hela stationslängderna, installerats från början.

Betongportaler och betongkonstruktioner anslutande mot berg:

Generellt har samtliga betongkonstruktioner som ansluter mot berg armerats och förankrats i berget på ett sådant sätt att kontakt- och ytbergsinjektering kunnat utföras med ca 0,15 MPa's tryck. Dessa injekteringar har endast utförts på de platser där läckage kunnat konstateras. Enligt nu tillgänglig information har inte några betongkonstruktioner skadats av frysning eller istryck.

Injekteringsarbeten under byggtid:

Projektets centrala underjordsdelar togs ut under stor tidspress. För att klara tidsramarna utvecklades en mycket snabb injekteringsteknik baserad på mycket höga initiella injekteringstryck och bestämda injekteringsmängder i varje injekteringshål. Denna snabba metodik klarade vattendomskraven men medförde att en del störande vatteninläckningar kvarstod efter tunneldrivningen. I ett projekt med något mindre tidspress skulle det sannolikt vara lönsamt att ägna mera tid åt injekteringsarbeten.

5.6 Banverket - Frostsäkring av tunnlar

Återkommande problem med vatten, svallis och frostsador i både äldre och nyare järnvägstunnlar har krävt omfattande åtgärder för att minska underhållskostnader och säkerheten för trafiken. Det gäller tunnlar över hela landet men här görs en kort beskrivning av frostsäkringsåtgärder i några tunnlar i Norrland.

Nuolja

På malmбанan mellan Abisko och Björkliden finns en tunnel genom Nuoljafjället. Den ytligt belägna tunneln togs i drift redan 1902. Under åren har stora problem med svallis uppstått och under 1980-talet valde Banverket att driva en ny tunnel bredvid den gamla. Den nya togs i drift 1990. Även den nya tunneln har drabbats av svallis- och frostsprängningsproblem. En mängd åtgärder har vidtagits för att minska dessa problem. 1992 injekterades bergmassan med polyuretanbaserat medel och 1992 och 1993 gjordes försök att dränera omgivande berg, dock kvarstod svallisproblemen. Istillväxten hade emellertid minskat kraftigt. 1996 frostisolerades vissa speciellt utsatta sektioner med PE-mattor vilka täcktes med både armerad och oarmerad sprutbetong. Denna lösning har visat sig vara väl fungerande. I Nuolja finns även betongelement med isolerande mineralull installerat.

Bergträsk – Älvsbyn

Sedan driftstarten 1982 har järnvägstunneln i Bergträsk varit utsatt för svallisbildning och frostsprängning. En mängd åtgärder har vidtagits för att minska dessa problem. Årligen skrotas tunneltak och väggar och förstärkning med ingjutna bergbultar har skett efter behov. På fyra platser

har större betongklackar gjutits som stöd åt tunnelväggen. 1995 uppfördes 10 -14 meter långa prefabricerade betongtunnlar i bägge tunneländarna. Mellan prefabelementen gjordes en utfyllnad med halm och sågspån. PE-skivor (Ethafoam) har satts upp på väggar och tak. Ett problem med detta har varit att leda ner vattnet innanför skivorna till dräneringen. Problem med isbildning bakom och frostsprängning av isolerskivorna har också förekommit.

Vid denna typ av lösning är det viktigt att täta sidorna noggrant och att dra ner isoleringen i ballasten där det även finns en bit horisontell markisolering. För att leda ner vattnet skåras inklädnaden.

Laduberg – Älvsbyn

Ladubergstunnels byggdes 1982 och problemen har varit liknande de i Bergträsk. 1990 bultade man, även en omfattande skrotning utfördes. 1992 skedde ytterligare bultning och skrotning, samt att isolerskivor monterades. Se även Bergträsk.

Glödborget

I Glödborgstunneln, på sträckan Mellansel – Vännäs, monterades 1998 inklädnad med PE-mattor. PE-mattorna är bultupphängda och betonginsprutade och samtidigt som även marken har isolerats. Konstruktionen är gjord för en livslängd på minst 50 år. Konstruktionen skall vara vattentät under hela sin livslängd.

PE-mattorna ligger an mot berget. Skåror för vattenavrinning har utförts så att avrinningen sker tvärs tunnelriktningen. Anslutningar av inklädnad i slutet på sektioner har utförts vattentätt och isolerade. Alla skarvar har utförts för att bli vattentäta. Isoleringen av väggen har dragits ner i ballasten där horisontell markisolering finns.

Hällåsen – Söderhamn

I tunnlar genom Hällåsen i Söderhamn har injektering och vatten/frostisolering utförts. Injekteringen, med cement och siprogel, har inte varit speciellt omfattande, berget har i huvudsak varit tätt. Emellertid har dräneringsinsatserna visat sig bli betydligt större än beräknat, vilket kan tyda på ett misslyckat injekteringsresultat. Enligt kontrollant blev tätningsresultatet bättre med det kemiska medlet än med cement. Frostisoleringen har utförts enligt liknande konstruktion som i Älvsbyn och Glödborget.

Material

Banverket i Sverige började använda cellplast för isolering av tunnlar 1979. Använt material är en smidig, extruderad cellulär polyetylen, Ethafoam 220. Numera använder Banverket i Sverige en svart version istället för den tidigare vanliga vita varianten (Sandegren, 1987). Den svarta versionen är att föredra med anledning av dess högre motståndskraft mot nedbrytning p g a exponering för solljus. I södra Sverige har ett lager isolering använts medan två lager isolering har använts i norra Sverige.

Erfarenheter från Banverket i Sverige visar att,

- flexibel cellplast med fördel kan användas för att frostisolera tunnlar och bergskärningar
- materialet skall vara stabilt mot ultraviolett strålning
- isoleringens kanter måste förseglas noggrant, så att kallluft förhindras att tränga in bakom isoleringen från sidorna
- materialet är brandfarligt och således måste uppmärksamhet riktas mot gnistbildning
- kostnaderna för isrensning är vanligtvis så omfattande att kostnaderna för att installera isolering tjänas in på några få år.

6 Metoder för vattenavledning och frostisolering i Norge

6.1 Allmänt

I Norge har olika typer av inklädnader för avledning av inläckande vatten varit vanligt förekommande under flera decennier. Fram till 1997 har ca 800 vägtunnlar byggts i Norge (total tunnellängd 600km) varav hälften har en trafikbelastning lägre än 1000 ÅDT. Utveckling av tunnelutförandet för lågtrafiktunnlar har pågått sedan 1965. Under senare år har fokus delvis legat på tätning via injektering p g a negativ påverkan på grundvattennivåer vid några tunnelbyggen, företrädesvis då högtrafikerade tunnlar i stadsbebyggelse. Även om injekteringsinsatserna ökar kan man dock aldrig klara av att bygga vägtunnlar helt utan någon form av inklädnad eftersom injekteringen vanligen inte ger fullständig täthet. Utvecklingsarbetet och erfarenheter har visat att separata metoder för bergförstärkning och vatten/frost säkring kan vara optimalt med hänsyn till resultat och ekonomi vid de förutsättningar som gäller för vägtunnlar i Norge.

1995 startade ett FoU-projekt ”Tunnelkledningar” som pågått under 3 år. Det omfattar följande delprojekt:

A: Översikt över tunnelkledningar

B: Fuktsäkring

C: Frostsäkring

D: Utformning med hänsyn till trafiksäkerhet och estetik

Projektet är en uppföljning av ett tidigare genomfört projekt ”Metoder för vann- og frostsikring av vegtunneler”.

6.2 Tunnelinklädnad

Den norska metoden med säkring av bergstabilitet och vatten/frost separat har medfört utveckling av flera olika konstruktioner för säkring mot vatten som, under vissa förutsättningar, ger en rimlig och jämförelsevis låg totalkostnad för tunnelbygge. Projektet ”Tunnelkledningar” ger dels en översikt över de konstruktioner/ konstruktionstyper som givit värdefulla erfarenheter och som har en framtida utvecklingspotential och dels lösningar som är aktuella i dagens situation.

Tunnelinklädnad indelas enligt praxis i Norge i tre huvudgrupper:

1. *Betongvalv*. Prefabricerade och platsgjutna, isolerade och/ eller oisolerade, betongelement. Alternativt, sprutbetongbelagda valv med PE-skum. Här ingår även membranlösningen.

2. *Lätta konstruktioner.* Isolerade eller oisolerad valv av aluminium eller stålplåt, sandwichvalv av belagt plastskum och valv av tunnelduk.
3. *Kombinerade valv.* Kombination av betongelement i väggar och andra typer av inklädnad i tak.

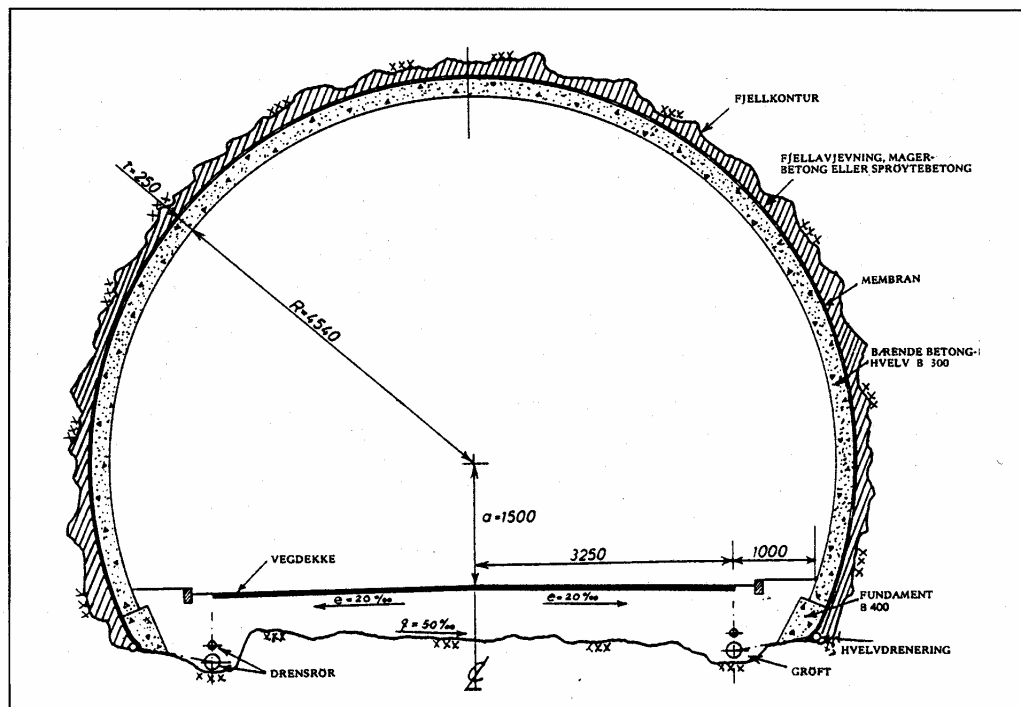
Ett generellt krav på 50 års livslängd gäller för installationer i Norska vägtunnlar (Statens vegvesen, 1998). Erfarenheter från Norge visar att ökade hastigheter och tung trafik har medfört stora påkänningar för installerade vatten- och frostsäkringskonstruktioner. Dessutom har det under de senaste åren uppförts ett antal relativt billigare lösningar med lägre kvalitet. I Norge har det därför bedömts som nödvändigt att genomföra undersökningar av de aktuella belastningarna och att ställa krav på både stabilitet och brandsäkerhet.

6.2.1 Betongvalv

Tunnelinklädnad i betong och sprutbetong har använts i norska vägtunnlar under flera år (Statens vegvesen, 1998). Några typlösningar är,

Membranisolerad "utstöpning"

Betonginklädnad med tätmembran är en lösning med hög standard som är lämplig för svaga bergförhållanden och för motorvägs- och stadstunnlar. Erfarenheterna visar att alla ingående delarbeten måste anpassas till fukt- och vattensäkringsarbetet. Tillfredsställande resultat kräver bra arbetsplanering, "tillräckligt med tid", hantverkskunnande och fungerande kvalitetssäkring. Reparationsarbeten blir sällan lyckade och bör undvikas. I figur 6.1 visas en principskiss över en gjuten betonglining med tätmembran.

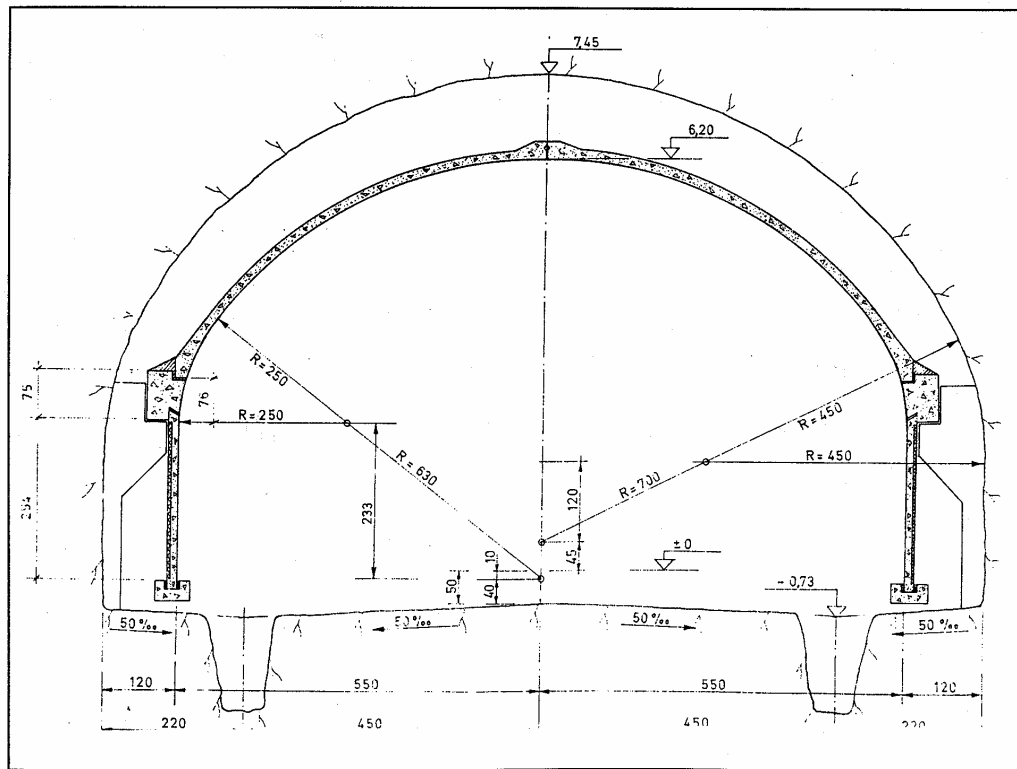


Figur 6.1 Gjuten betonglining med tätmembran, dränerad botten. (Statens vegvesen. Publikasjon nr. 91).

Fritt bärande betongvalv

Fribärande betongvalv med prefabricerade element är en lösning med hög standard. Lösningen är dock använd i relativt liten omfattning beroende på att den kräver ett extra stort tvärsnitt för montage, vilket medför en merkostnad i förhållande till andra lösningar. Positivt är dock att lösningen resulterar i god plats för inspektion av bergssidan av valvet. Erfarenheterna visar att konstruktionen fungerar mycket bra och att den kräver lite underhåll. Tunga element och höga anläggningskostnader är huvudorsaken till att lösningen sällan är använd. I figur 6.2 visas en principskiss över ett fribärande betongvalv.

Betongvalv skall, i Norge, dimensioneras för islast (Statens vegvesen, 1995). Betongvalv kan utföras utan isolering vid köldmängder $F_{10} < 8000$ h°C.



Figur 6.2 Fribärande betongvalv. (Statens vegvesen. Publikasjon nr 91.)

Betongelement och lättbetongelement

Lösningen består av prefabricerade betong- och lättbetongelement som är förankrade i berg med bergbultar. Metoden har dock mestadels använts med lättbetongelement. Frostisolerade och icke frostisolerade betongelement har främst använts i kombination med andra lösningar som t.ex. Miljövalv och Ekebergvalv. Vid användning av en lösning med enbart betongelement måste beaktas att metoden ger en komplicerad elementgeometri vid tvärsnittsförändringar.

De först genomförda projekten med lättbetongelement har konstaterats vara behäftade med fuktproblem. Dessa projekt utfördes utan tätande membran och med fogar och bultgenomföringar där silikon använts som tätningsmassa.

Krav på heltäckande membran har sedan dess införts i Norge, p g a problem med vattenläckage genom konstruktionen. Med heltäckande membran fungerar konstruktionen bra med hänsyn till vatten- och frostsäkring, men det har visat sig att lättbetongelement är ömtåliga och lätt kan gå sönder vid montering eller påkörning.

Frostisolerade betongelement har använts vid ett flertal tunnlar i Norge. I Nordbytunneln på E6 i Akershus har frostisolerade betongelement med namnet ConForm använts. ConForm är ett "tyngre" sandwichelement som består av frostisolering mellan två lager betong. Ännu så länge är erfarenheten av dessa "tyngre" sandwichkonstruktioner med betongelement

inte så stor. En förutsättning för god funktion är att membranarbetet utförs noggrant så att konstruktionen blir tät. Elementen är tunga vilket medför att montering och eventuella byten kräver specialutrustning. Monteringen vid genomförda tunnelprojekt har dock visat sig vara skonsamma för elementen. Under monteringsarbetet i Nordbytunneln gick endast tre element sönder av totalt 10 000 monterade element.

Lättbetongvalv skall dimensioneras för islast (Statens vegvesen, 1995). Lättbetongvalv med tjocklek mindre än 0.150 m och värmekonduktiviteten mindre än 0.45 W/m,K kan användas vid köldmängder $F_{10} < 12000$ h°C.

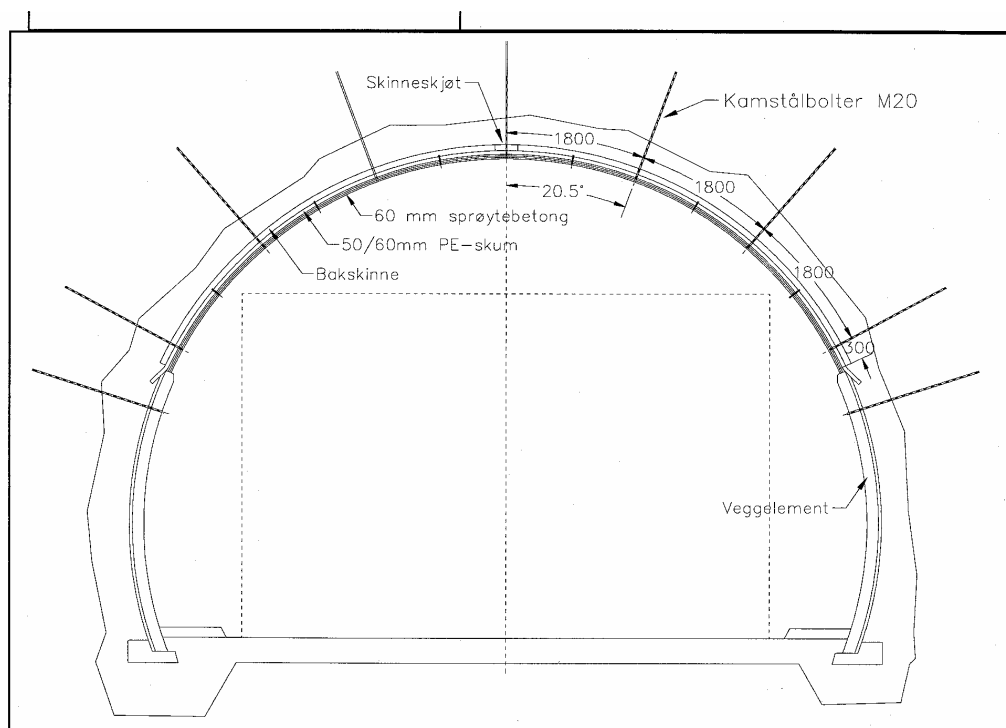
PE med armerad sprutbetong

Metoden som lanserades kring 1980 är enkel, flexibel och billig att anlägga. Polyetylen(PE)-mattor fästs mot berg och sprutas sedan över med sprutbetong. Erfarenheter visar att vid ett riktigt utförande har konstruktionen en livslängd på över 50 år med ett visst löpande underhåll. Den armerade sprutbetongen appliceras främst som brandskydd (I Norge är minimitjockleken 60-70 mm utanpå PE-mattor, Statens vegvesen. Publikasjon nr 91). Denna konstruktionslösning är dock inte helt enkel att underhålla, särskilt inte i tunnlar med mycket trafik. Heltäckande vatten- och frostsäkring med denna lösning bedöms därför som inaktuell för framtiden för högtrafiktunnlar. Användningen av denna lösning är idag huvudsakligen för avledning av punktläckage i tunnlar.

Valvkonstruktioner med armerad sprutbetong skall dimensioneras för islast (Statens vegvesen, 1995), detta då armerad sprutbetong används som bärande valvkonstruktion. Beroende på köldmängd skall olika tjocklek av PE-mattor användas.

Ekebergvalv

Konstruktionen består av nätarmerad sprutbetong på PE-skum fäst i tvärgående profiler bultat i berget. I figur 6.3 visas ett utförande med Ekebergvalv i tak och betongelement i väggar för att förbättra hållbarhet och trafiksäkerhet. Valvet kan också utformas helt, i väggar och tak, med en "Ekebergslösning". Ekebergvalvet är en relativt ny lösning men har hittills gett goda erfarenheter. Erfarenheter visar dock att sprutbetongen kan vara ras- och sprickbenägen.



Figur 6.3 Ekebergvalv i tak og betongelement i vegg. (Statens vegvesen, Publikasjon nr 91.)

6.2.2 Lätta konstruktioner

Lätta konstruktioner innebär valv av lätta material, eventuellt i två lager med mellanliggande frostisolering. De vanligaste plattmaterialen är stål och aluminium. Aluminium väljs med hänsyn till de goda korrosionsegenskaperna, lätthanterligheten och priset. Valvet bör målas, företrädesvis i en ljus nyans. Dessa lösningar är känsliga för skador och kräver därför ett effektivt skydd mot påkörningar och stennedfall, (undantag är Giertsenduken som tål mindre nedfall av sten). I Norge måste lätta inklädnader vara typgodkända av vegdirektoratet innan de får tas i bruk.

Lätta konstruktioner bör normalt inte användas i områden med $F_{10} > 25000 \text{ h}^\circ\text{C}$ (Statens vegvesen, 1995). Några typlösningar inom gruppen lätta konstruktioner är,

Plattinklädnad i aluminium, som helvalv och frostisolerat efter behov eller som plattak med takränna

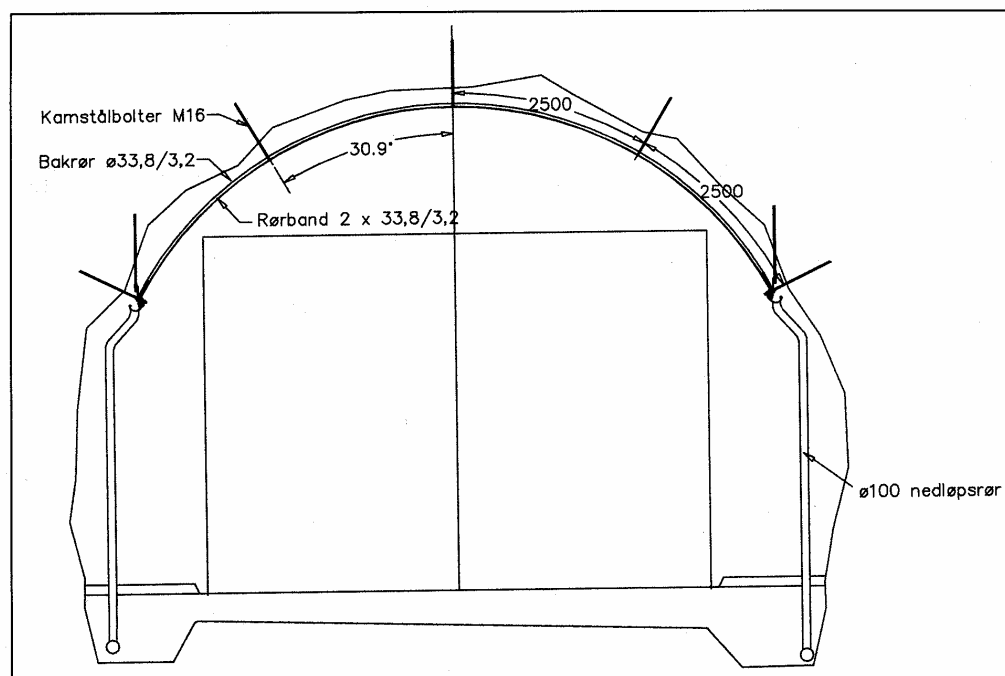
Frostisolerade plåtvalv består av två valv av korrugerade aluminiumplattor med mellanliggande isolering av folieemballerad mineralull. Frostisolerat försöksvalv på E18 med trafik har fungerat tillfredsställande sedan 1971. Konstruktionslösningar med förenklad frostisolering har haft varierande kvalitet. Montering av denna typ av valv är normalt tidskrävande och kräver många komponenter. I flera tunnlar i Norge har korrosionsskador uppstått med läckage som följd, (Granfosslinjen, Freifjordtunne-

len). På Granfossilinjen har aluminiumplattorna ersatts med Ekebergvalv i båda tunnelrören.

Tunnelduk

Tunnelduk i PVC-belagd polyesterarmerad duk byggd som helvalv eller som takvalv med takränna. Tunnelduken fästs i tvärgående rörprofiler bultat i berget. Duken är motståndskraftig mot droppslitage, kemikalier och olja. Tillsatser krävs för hindra angrepp från bakterier, alger och mögel. Monteringstiden är kort och duken är billig och enkel att hålla ren. Duken kräver liten plats. Vid skador eller slitage är duken lätt att byta ut. Trafikvibrationer gör att is som bildas mellan berg och duk skakas ner längs kanterna. Duken är brandsäker och leverantören garanterar vattentätthet i 15 år. Det finns även en mineralulls isolerad och dyrare variant, vilken i försök har visats stå emot nedisning bra (Statens vegvesen, 1997b). Tunnelduken motstår mindre stennedfall och islaster. Den är även godkänd i Norge ur brandsynpunkt. I figur 6.4 visas en principskiss över Giertsen halvvalv med takränna.

Erfarenheter från Holmestrandtunnelen (ÅDT 13000, 70 km/tim och relativt mycket tung trafik) visar att konstruktionen väl klarar den gräns Giertsenduken är godkänd för (ÅDT 1000). För att minska belastningen pga tryck- och sugkrafter är det viktigt att dukens anslutningar i ändarna görs täta. Kan luftströmmarna bakom duken hindras, halveras tryckkrafterna på duken (Statens vegvesen, 1998).



Figur 6.4 Giertsen halvvalv med takränna. (Statens vegvesen. Publikasjon nr 91.)

Miljövalv

Konstruktionen består av ett valv uppbyggt av isolerade stålkassetter med heltäckande membran. Vid tidigt utförda anläggningar med denna metod har problem uppstått med läckage i bultgenomföringar. Det har även konstaterats brott i bärprofilen av glasfiber p g a trafikens tryck- och sug-effekter. I vissa fall har även korrosion uppkommit på plattorna. Dagens miljövalv är justerade efter tidigare erfarenheter.

Miljövalv är lätta att anpassa efter varierande tvärsnitt. Plattorna är lätta att hålla rena och de är brandsäkra. Plattorna kan lätt bytas ut och därför är det även behändigt att inspektera bakom valvet. Miljövalv tål inte nedfall eller påkörningar.

Sandwich plastelement

Denna konstruktionstyp består av två element av polyuretan belagt på bägge sidor med glasfiberarmerad polyester. Erfarenheterna visar att denna konstruktion blir vattentät om monteringsanvisningarna följs. Konstruktionen är stabil och ytan kan lätt rengöras och målas. 15 års drifttid visar på goda erfarenheter. Brandsäkerheten är emellertid låg.

6.2.3 Kombinerade valv

Kombinerade tunnelinklädnader består vanligtvis av betongelement i väggarna. I taket kan Ekebergvalv, stål- eller aluminiumvalv utföras. De kombinerade valven eftersträvar en optimal lösning med betoning på vattentätning och isolering i tak och trafiksäkerhet i vägg. Tre typlösningar presenteras,

- Ekebergvalv och betongelement
- Miljövalv och betongelement
- Plattinklädnad och betongelement

Ekebergvalv och betongelement

Erfarenheterna från denna lösning är hittills goda, bortsett från att sprutbetongytan är svår att hålla ren. Ett tillfälle med en bussbrand i Ekeberg-tunneln visade att metoden har goda brandtekniska egenskaper. Se figur 6.3, ovan.

Miljövalv och betongelement

Konstruktionen består av ett valv som byggs upp av isolerade stålkassetter (plattor) med väggelement i betong. På platser där det har använts väggar av lättbetongelement utan tätande membran har skador p g a fukt och påkörningar registrerats.

Plattinklädnad och betongelement

Konstruktionen är uppbyggd av ett dubbelt valv av aluminiumplattor med mellanliggande isolering samt av väggelement av betong. Denna konstruktion har ännu inte prövats.

6.3 Material

Generellt gäller i Norge att alla material som skall användas för frostsäkring av vägtunnlar skall vara beständiga mot miljöpåverkan från vatten, frost, vägsalt, avgaser, asfalt- och oljespill för en period av 50 år. Vatten- och frostkonstruktioner skall vara dimensionerade för både statisk och dynamisk belastning. Lätta konstruktioner är undantagna från detta.

Följande allmänna krav ställs på det material som ska användas för frostisolering av en tunnel e dyl.,

- Mycket låg värmeledningskoefficient
- Vattenavstötande, ingen förändring av isoleringsegenskaperna får ske över tiden
- Väderbeständighet
- Trafikbeständig, vinddrag och mindre mekanisk påverkan
- Tillräckligt smidig och formbar för okomplicerad applicering

Vidare skall brandaspekterna för tunnelinklädnaden som helhet beaktas.

Frostisoleringen dimensioneras efter den för platsen aktuella köldmängden (Statens vegvesen, 1995). Dimensioneringskriterierna är baserade på F_{10} ($h^{\circ}C$), definierat som den köldmängd som statistiskt sett överskrider en gång per 10 år. Då $F_{10} < 3000 h^{\circ}C$ kan i allmänhet oisolerade konstruktioner användas.

Vintrarna 1995/96 och 1996/97 utfördes temperaturmätning i 15 utvalda tunnlar i Norge. Resultaten visar att frostmängden i långa tunnlar ($> 4km$) blir lägre än i motsvarande korta tunnlar vid samma avstånd från mynningen. I isolerade enkeltfiktunnlar med mekanisk ventilation tränger frosten långt in i körriktningen (ventilationsriktningen). För mindre trafikerade tvåvägstunnlar med stigning och begränsad mekanisk ventilation avtar frostmängden relativt snabbt de första 200-300 metrarna från nedre mynningen. Frostmängden avtar sedan relativt jämnt upp till den övre mynningen pga skorstenseffekten. (Statens vegvesen 1997).

Cellplast

Som isoleringsmaterial används vanligtvis olika typer av cellplast såsom polyetylen (PE), extruderad polystyren (XPS) eller mineralull. Cellplast kan reagera med andra material varför det är av största vikt att notera vilka material plastmaterialet skall ligga i kontakt med.

PE levereras i plattor, vanligtvis med ca 0.05 m tjocklek och kan användas för köldmängder, $F_{10} \leq 8000 h^{\circ}C$. Plattorna skall inte användas utan brandskydd. Innan applicering av brandskydd bör täthetskontroll av monterade valv genomföras.

Membran

Membranen är till för att hindra vatten från att tränga in i tunnelrummet. Membran består av ett eller flera tunna lager av material med mycket låg permeabilitet. Foliemembran kan bestå av plast såsom PVC eller EDPM (butylgummi), i framtiden kan PP och PE bli aktuella. Även asfaltmembran används. En förutsättning för användande av membran är att membranet stöttas inifrån med en bärande konstruktion dimensionerad för att klara vattentryck och andra eventuella laster.

Sprutbetong

I områden med stor sannolikhet för frost kan vattengenomträngning medföra volymförändringar och därmed frostsprängning i sprutbetongen. Norska erfarenheter visar att den viktigaste frostskademekanismen för sprutbetong är lössprängning från underlaget pga vattenföringen i berget (Statens vegvesen, 1997c). I våta områden försämras kvaliteten på tunna sprutbetonglager snabbare än i torra områden. Det har även visat sig att mindre vattenmängder kan ge större problem än vid situationer med stora vattenmängder. Kombinationen av vatten och frost och därpå följande frostsprängning antas vara den viktigaste orsaken till mekanisk nedbrytning av sprutbetongkonstruktioner. Har man dessutom en tilläggsbelastning av salt ökar nedbrytningshastigheten.

Den nya och tätare betongen har bättre frostbeständighet än den äldre. För att maximera beständigheten bör acceleratortillsatser användas och doseras med måttfullhet.

Erfarenheter från Vegvesendet i Norge visar att sprutbetongen uppvisar urlakning vid vattenläckage och lossprängning från underlaget vid frostsprängning. Sprutbetongen blir således inte att beakta som permanent i ett långtidsperspektiv, i tunnelsektioner med stora vattenläckage genom betongen. Livslängden på sprutbetongkonstruktioner i våta områden, utan dränering, kan förväntas vara ca 30 år. Naturligtvis påverkas livslängden av betongkvalitet, tjocklek, armering, antal frostcykler samt vattenmängd. Den på senare tid pålagda fibersprutbetongen (från cirka 1980 och senare) uppvisar dock inte motsvarande, stora skador på sprutbetongen.

Bentonitmattor

Bentonitmattor finns i en mängd olika utföranden med en huvudsaklig användning som tätning mellan jordlager. För att en bentonitmatta skall fungera i en konstruktion med övertäckning på enbart en sida måste mattan antingen vara bunden till en geotextil och vara laminerad till ett geomembran eller också bestå av en speciellt preparerad bentonit mellan skikt av geotextil.

Den studie som gjorts i Norge begränsas till konstruktioner utan yttre vattentryck på bentonitmattan. Den avser även konstruktioner med övertäckning på en sida.

Följande grundläggande krav ställs:

- Torr bentonit får enbart användas i ett sammansatt tätskikt bestående av geotextil och geomembran som är minst 0,5mm tjockt.
- Skarvar med överlapp skall vara minst 150 mm breda och får endast användas på helt dränerade konstruktioner med ett fall större än 1:20
- Är fallet mindre än 1:20 eller om det finns risk för dämning av vatten skall skarven av geomembran svetsas
- Innehåller något material för motfyllnad skarpa kanter eller motsvarande skall översidan av membranen skyddas med en geotextil med vikten 250 g/m².

Erfarenheter från kombinerade tätskikt med bentonit finns från projekt med några års användning (det framgår inte om det gäller något vägtunnelprojekt). Det har inte gjorts någon samlad analys och värdering av bentonit som tätskikt för fuktsäkring av vägtunnlar eller kulvertar.

6.4 Erfarenheter

Dyrköpta erfarenheter visar att på ekonomiska-, säkerhetsmässiga-, underhålls- och miljömässiga grunder kan det vara fördelaktigt att investera i vattentäta tunnelvalv framför att ta olägenheten med underhåll. Långsiktig ”fullständig” vattentäthet kan bara erhållas om tunnelvalvet isoleras med vattentätt membran. Membranerna kan ingå antingen i en fribärande konstruktion i tunneln eller inlagd mellan betongskikt.

Membranerna kan vara av asfalt, plast(folier), bentonitlera eller stål. De vanligaste plastmembranerna i tunnelsammanhang är idag PVC, i framtiden kommer troligen PE (polyetylen), och PP (polypropylen) att konkurrera. Mindre vanliga är EPDM, butylgummi.

PVC har länge varit den dominerande produkten i tunnelsammanhang. Det finns därför mycket erfarenheter av det materialet. Egenskaperna hos PVC påverkas mycket av ingående tillsatsämnen. Detta innebär att egenskaperna kan variera mycket mellan olika PVC-material. Tillsatsmedel som förbättrar vissa egenskaper hos folien kan medföra oönskade förändringar av andra egenskaper.

Montering av membran

Arbetsutförandet vid monteringen av membran är helt avgörande för det slutliga resultatet, oavsett vilket membran som väljs. Eftersom det ofta visar sig att vattenproblematiken varit den svåraste delen i många tunnelprojekt är det viktigt att byggprocessen anpassas till det arbetsmomentet. Monteringsarbetet är ett specialistarbete som kräver lång erfarenhet. Det är därför extra viktigt att ha en väl utarbetad arbetsplan, tidplan, kontrollplan och en tydlig ansvarsfördelning mellan byggherre och entreprenörer (och underentreprenörer).

I slutrapporten från delprojektet ”Fuktisolering av vegtunnlar” ingår en beskrivning av de viktigaste momenten med hänsyn till planläggning och

genomförande av membranarbeten och det ges även ett exempel på en kvalitetssäkringsbok. Det görs även en beskrivning för upprättande av en kontrollplan.

Frostsäkring

Dimensioneringen av säkerhet mot frysning baseras i Norge på manuella mätningar utförda för 20-25 år sedan. För att erhålla ett bättre underlag för frost-dimensionering har därför ett mätprojekt genomförts med mätningar under 5 vintrar i 15 tunnlar i Norge. Mätningar har även gjorts i naturligt ventilerade tunnlar och i undervattenstunnlar vilket inte gjorts tidigare. Resultaten från mätningarna visar att det är stora lokala variationer i frostinträngning.

Mätningar bakom valv visar att luftgenomströmningen är avgörande för frostmängden. En oisolerad tunnelduk som är tätad mot berget i ändarna visar sig mer effektivt mot frost än t ex ett valv av PE-skum som är placerat med en glipa mot berget. De nya mätningarna visar att lokala klimatvariationer påverkar frostinträngningen i stor utsträckning. Mätningarna kommer att resultera i nya dimensioneringsregler för frostdimensionering.

6.5 Sammanfattning

Utvecklingen av tunnelinklädnader i Norge har styrts av kravet på enkla och billiga lösningar för lågtrafiktunnlar. Denna utveckling har pågått under lång tid och resulterat i en mängd olika typer och kombinationer av metoder. Utvecklingen har varit nödvändig för att kunna fortsätta med utbyggnaden av trafiktunnlar även där trafikbelastningen är låg. Detta skiljer sig till stora delar från vägtunnlar som byggs i Sverige och i övriga Europa, där tunnlar byggs med en större trafikintensitet och ekonomin kan tillåta dyrare lösningar. En tendens i Norge är att lösningar som tidigare enbart använts i lågtrafiktunnlar även börjar provas i tunnlar med större trafikbelastning, framförallt lösningar som givit goda erfarenheter samt olika kombinationer av utförande i vägg och tak. I framtiden ser man även att nya lösningar successivt utvecklas. Vid val av frostsäkringsmetod är det många faktorer som spelar in vilket medför att det inte finns en allmänt giltig bästa metod. Ett antal olika lösningar kommer att tillämpas även i fortsättningen.

En sammanställning av erfarenheter av olika tunnelinklädningar baserat på en rapport från Vegvesendet i Norge redovisas i bilaga 2. Studien presenterar erfarenheter av skador och reparationer av olika metoder för vatten- och frostsäkring av vägtunnlar i Norge. (Metoder for vann- og frostsikring av vegtunneler, Delprosjekt D: Vedlikehold, Intern rapport 1681, 1994)

7 Metoder för vatten – och frostsäkring i alperna och Mellaneuropa.

7.1 Allmänt

Vid tunnelbyggande i Mellaneuropa och alperna är bergets kvalitet och ”stand-up”-tid en viktig parameter ur drivningssynpunkt. ”Stand-up-tiden” måste vara tillräcklig för att hinna installera erforderlig förstärkning innan bergmassan deformeras för mycket eller kollapsar. Ytan på denna initiella förstärkning som installerats för att kunna applicera en kraftigare permanent förstärkning, måste vara tillräckligt slät för att möjliggöra anläggning med vattentätande membran utan att detta skadas. Membranet appliceras med skyddsskikt och dräneringsskikt och innanför detta byggs en inre betonglining. Denna lining dimensioneras vanligen inte för att klara något större vattentryck eftersom tunnarna vanligen byggs dränerande i botten.

I alperna är det vanligen inte några höga krav på inläckage av vatten ur miljösynpunkt. Det är vanligen inte några kontinuerliga grundvattenmagasin samtidigt som nederbörd och grundvattenbildning är relativt hög och det är förhållandet mellan inläckagets storlek och grundvattenbildningen som avgör påverkan på grundvattennivåer. Det innebär att betongliningen vanligen inte utförs runt hela tunneltvärsnittet och att konstruktionen inte behöver dimensioneras för fullt vattentryck. Underhållsproblem av dräneringsledningarna förekommer, omfattningen varierar beroende på det inläckande grundvattnets sammansättning.

7.2 Historik

Tidigare, fram till ungefär 1930, byggdes järnvägstunnlar med en stensatt inklädnad, (murad huggen sten).

Metodiken med tunnelinklädnader som används i Norge användes tidigare i Schweiz (ca 30 år sedan) för motorvägstunnlar. Bergförstärkning utfördes med sprutbetong och bultar. Huvuddelen av vattnet hanterades med injektering och resterande dränerades. Den slutgiltiga inklädnaden bestod av prefabricerade betongelement som monterades på balksystem mot berget. Funktionen visade sig dock inte vara tillfredsställande av två orsaker, dels på grund av korrosion av infästningssystemet och dels på grund av skador vid trafikolyckor. Metoden används inte längre i alperna. (En kommentar till att denna lösning inte fungerade kan vara att de använda materialen var mycket sämre för 30 år sedan. Sprutbetong idag är väsentligt mycket bättre än den som användes för bara 15 år sedan.)

7.3 Nuvarande metodik

Den metod som används i Schweiz, Österrike och Tyskland idag är en integrerad lösning som dels utgör den permanenta bergförstärkningen, dels utgör den erforderliga vattentätningen. Det är normalt en betonglining som inkluderar ett vattentätt membran som placeras direkt mot den tillfälliga förstärkningen, som utförs direkt bakom tunnelfronten. Den slutliga liningen utgör samtidigt den permanenta förstärkningen och utförs som en inre betongliniad konstruktion. Konstruktionsdelarna samverkar med berget genom motgjutning och injektering. Erfarenheter har visat att även tunnlar i stabilt berg behöver en permanent lining och frostisolering för att förhindra skador och instabilitet på grund av frostaktivitet.

I det fall tunneln skall vara tät måste liningen dimensioneras för fullt vattentryck. För en vägtunnel anges en praktisk gräns för en "normal" lining till ca 50 meters vattenpelare. Som jämförelse kan nämnas att den planerade järnvägstunneln genom Hallandsås kommer att dimensioneras för ett vattentryck som motsvarar cirka 150 meters vattenpelare (15 bar).

7.4 Material

Som material i tätskikt har under 90-talet andra material än PVC provats. På grund av stor andel tillsatsmedel i PVC, exempelvis ftalater, får det ej användas vid förekomst av aggressivt grundvatten och inte i närheten av grundvattentäkter. Samlingsnamnet på en produkt som installerats sedan 1992 är polyolifiner, exempel är polyetylen och polypropylen.

Polyolifiner är styvare och svårare att montera än PVC men mjukare material har utvecklats, (FPO). Polyolifiner är en renare plastprodukt och mer homogen till sin uppbyggnad än PVC. Mjukheten i materialet erhålls genom att anpassa molekylstrukturen och inte genom tillsatsmedel. Den bör även vara mer stabil med tiden även om det idag saknas erfarenheter av åldringsegenskaperna. Avsaknad av tillsatsmedel gör den även mindre farlig vid brand än PVC.

I en vägtunnel väster om Stuttgart (Engelberg tunneln) används PE i en helinklädd konstruktion med dubbla lager betong. Tunneln är 2500 meter lång varav 1800 meter i berg.

I det tyska regelverket för membraner anges krav på flexibilitet, styrka och kemisk stabilitet, oavsett vilken typ av plastmaterial som avses.

Tyska krav på vattensäkring

Vatten och fuktsäkring av vägtunnlar måste utföras så att:

- Tekniska och elektriska installationer skyddas mot vatten och kondens
- Trafiksäkerheten uppfyller givna krav

- Isbildning i tunnel och portaler förhindras
- Den permanenta förstärkningen skyddas från eventuellt aggressivt grundvatten

Byggmetoden som vanligen används innebär att reparationsåtgärder är svåra att utföra. Därför dimensioneras vattentätningen för 100 års livslängd.

Tyska, schweiziska och österrikiska krav och erfarenheter när det gäller frost

Frostsäkring är mycket viktig i de områden där det är stor sannolikhet för frostinträngning. Det gäller de delar av tunnelarna som utsätts för frost. Mätningar i Schweiz vid enkelspårstunnelar visar att på den sida där frosten tränger in längst, når den ca 400 meter. I den andra änden tränger frosten enbart in ca 100-150 meter.

Exempel från Tyskland visar på upp till 1 km långa tunnelar som är in-frusna längs hela tunnelsträckningen under särskilt kalla vintrar. Generellt utförs frostisolering 300-400 meter in i tunnelarna. För kortare tunnelar frostisolerar hela tunneln.

Montering och utförande

För den normala utformningen med sprutbetong, dräneringsskikt, tätmembran och betonglining är det viktigt att arbetsutförandet för olika delkomponenter anpassas till helheten. I tyska, österrikiska och schweiziska anvisningar är kraven på underlagets (sprutbetongens) jämnhet höga (geometrin på sprutbetongens yta) för att erhålla god anliggning mellan berg och betong vilket är en förutsättning för en god funktion med avseende på lastfördelning och ur täthetssynpunkt. Kritiska framgångsfaktorer är även montering av dräneringsskikt (geotextil) och tätskikt (utförande och testning av fogning av membraner mm).

Utförandet sker normalt i fyra steg:

- A Förstärkning med sprutbetong och avjämning av ytan
- B Montering av dräneringsskikt av geotextil samt montering, svetsning samt test av tätmembran
- C Formarbete för inre betonglining, rörlig form (glidform)
- D Utförande av inre betonglining

Arbetena kvalitetssäkras och hela utförandet med ingående material regleras med ett stort antal normer.

8 Utveckling och erfarenheter

8.1 Slutsatser

Utveckling av vatten- och frostsäkringsmetoder för vägtunnlar har genomförts under de senaste 20-40 åren i Skandinavien och under en något längre tid i Mellaneuropa och alperna. Främst på grund av skilda bergtekniska förhållanden, klimatfaktorer och trafikbelastningar har olika koncept utvecklats i alperna jämfört med Skandinavien.

En viktig skillnad mellan tunnelbestånden i Norge och Sverige, som påverkat utvecklingen av olika metoder för vatten- och frostsäkring, är att en stor mängd tunnlar i Norge huvudsakligen har en liten trafikbelastning (< 1000 ÅDT), till skillnad mot de Svenska förhållandena. Detta innebär att de, i Norge anpassade metoderna inte alltid kan tillämpas direkt för vägtrafiktunnlar i Sverige som huvudsakligen byggs i eller nära våra storstäder med en betydligt högre trafikbelastning. Skillnaden gäller även synen på bergsäkring. I lågtrafikerade tunnlar är det inte några helt avgörande trafiktekniska problem att stänga av ena väghalvan för underhållsåtgärder vilket medger att andra och mer underhållskrävande lösningar kan tillämpas.

I Sverige är det vanligaste tätningsförfarandet vid nybyggnation av tunnlar en systematisk förinjektering kompletterat med väggdräner. Dräneringen utförs normalt med isolerskivor som förses med sprutbetong som fungerar både som mekaniskt skydd och som brandskydd. De praktiska erfarenheterna både i Norge och Sverige är att den applicerade sprutbetongen kan kräva en del underhåll. Metoden med förinjektering i kombination med väggdräner på begränsade ytor innebär att konstruktionen uppfyller kravet på inspekterbarhet vilket annars är ett generellt problem med tunnelinklädnad.

De metoder för tunnelinklädnad som används i Norge och som bedöms uppfylla kravet på inspekterbarhet enligt Tunnel 99 är bl.a. Ekebergvalv, betongvalv och eventuellt tunnelduk, typ Giertsen, förutsatt att avstånd mellan det bärande huvudsystemet berg och valvkonstruktionen medger handnära inspektion eller möjlighet till fjärrinspektion kombinerat med möjlighet till lätt demontering.

Intressanta resultat under senare år i Norge som bör följas upp är dels den ombyggnad av tunnelinklädnad där Ekebergvalv ersatt skadade aluminiumtak och dels de försök som görs med att använda Giertsenduk i tunnlar med högre trafiklast än vad de ursprungligen avsetts för.

Val av metod och utförande varierar utifrån en sammanvägning av följande aspekter/ ämnesområden:

- Bergkvalitet, byggbarhet, stabilitet
- Grundvatten-ytvattenförhållanden (tunnelns läge)

- Täthet (miljökrav)
 - Frost, dropp säkring (funktionskrav)
- Klimat (kombination med vattenproblem)
 - istappar (funktionskrav)
 - frostproblem
 - svallis
- Livslängdsanalys (LCC)
 - installationskostnad
 - underhållskostnad
 - reinvesteringarkostnad
- Olyckslast på inklädnad
 - Påkörningskraft av fordon
 - Oavsiktlig stöt
 - Brand
- Material för frostisolering, dränering och inklädnad
 - brandaspekter
 - beständighetsaspekter
 - dimensionering för påkörning
- Material för kemisk injektering
 - miljöaspekter
 - beständighetsaspekter
- Inspektionsmöjlighet avseende bärande huvudsystem
- Övriga underhållsaspekter

Klimatet gör att problembilden är annorlunda i norra jämfört med södra Sverige. Vid ett kallt klimat tjälar marken och tunneln fryser (åtminstone vid ändarna). Underhållsarbeten i form av att kartera och hacka is, kan krävas tidigt på vintern och i samband med snösmältning och tjällossning.

I ett mildare klimat kan problemet uppstå flera gånger under vintern i samband med köldperioder. Däremellan tinar tunneln. Insatserna för underhåll kan variera mycket från år till år.

Ett underhållsproblem som framkommit i studien gäller frost och svallisproblem vid tunnelportaler och i bergskärningar som också bör uppmärksammas.

Ytterligare en aspekt som kanske bör ingå i valkriteriet är reinvesteringskostnaden. D v s vad kostar det och hur går det till att om x antal år byta ut den utförda inklädnaden. Det är särskilt viktigt i högtrafikerade väg- och järnvägstunnlar där redan ett begränsat intrång för renoveringsarbeten innebär stora konsekvenser för trafiken i området.

8.2 Fortsatt arbete – förslag till inriktning – kunskapsbrister

Fortsatta arbeten bör inriktas på olika delområden:

- Beskrivning av problembilden map inläckande vatten och frost, systematisering mht berggrund, geohydrologi, klimat etc..
- Klimatfaktorer och dimensionering av frostsäkring
- Kemiska injekteringsmedel; miljö- och beständighetsaspekter
- Material för frostisolering, dränering och inklädnad (brandaspekter)
- Arbetsutförande vid tunnelinklädning
- Praktisk erfarenhet av tillståndsanalys, underhåll, beständighetsaspekter (livslängd), renoveringsmöjligheter etc..
- Urvalsmetoder – kriterier vid val av olika tekniska lösningar, vad är styrande.

När det gäller de två första punkterna avses svenska förhållanden men erfarenheter från Norge bör kunna tillföra en hel del. När det gäller de tre sista punkterna bör erfarenheter från Norge och alpländerna kunna tillföra mycket.

Speciellt bör de erfarenheter som framkommit i Norge tas till vara. Det är dock viktigt att hela tiden vara medveten om de grundläggande skillnader som finns mellan svenska och norska förhållanden. Det gäller t ex trafikbelastningen, regelverk (livslängd, bergsäkring, inspekterbarhet m m), möjligheter till underhåll, miljökrav när det gäller grundvattensänkning m m. Svenska tunnelprojekt bör närmast jämföras med de vägtunnlar som byggts i Osloområdet, med hög trafikbelastning och höga krav när det gäller inläckning.

8.3 Förslag till angelägna FoU projekt

Här följer en kortfattad beskrivning av dels några områden som skulle behöva fördjupas genom initiering av FoU-projekt och dels en mer praktisk konkret studie, erfarenhetsåterföring av metoder använda i Norge och alperna.

- *Total(ekonomisk) analys över tunnlar/ tunnelsträckor med återkommande vatten och frostproblem.* Erfarenheterna avseende omfattningen av vatten- och frostproblem i Vägverkets tunnlar är i nuläget inte sammanställd och lättillgänglig, dvs. problemets omfattning är inte tydliggjort. Kunskap om var och när vatten- och frostproblem uppstår med avseende på klimatfaktorer, trafikmängder, tunnelns utformning samt vilka konstruktionsdelar som "drabbas" är inte tillräckligt hög. För att utöka kunskapen på detta område måste en bedömning av sambandet mellan underhållskostnader och klimatvariationer göras för ett antal väg(- och järnvägs)tunnlar. För en sådan analys måste en omfattande datainsamling genomföras med avseende på tunnelns utformning, trafikmängd, köldmängd, antal frostcykler, nederbörd, grundvattennivå, kartering av förekommande is samt platsspecifika geologiska undersökningar. Studien bör helst omfatta ett antal olika metoder för av vatten- och frostsäkring. Även fenomenet svallis, som är ett konstaterat problem vid tunnelportaler och i bergskärningar, bör beaktas.
- *Klimatfaktorer och dimensionering av frostisolering.* Kunskapen avseende frostinträngning för nya tunneltyper, under sjöar och tunnlar med mekanisk ventilation är i nuläget inte tillräcklig. Erfarenheter från Norge visar att det lokala klimatets egenskaper och användandet av mekanisk ventilation har stor betydelse för frostinträngningen i tunnlar. För att öka kunskapen bör mätning av frostinträngning för ett antal olika tunneltyper, med och utan isolering göras. Detta arbete bör då samordnas med ett pågående Banverksprojekt som syftar till att studera teoretiska modeller för köldinträngning i järnvägstunnlar. Denna pågående studie genomförs av Mats Sandberg vid Gävle högskola.
- *LCC-analys* av olika tätnings- och frostsäkringskoncept. För att kunna göra en övergripande ekonomisk sammanvägning av nyttan och kostnaderna för olika tätnings- och frostsäkringskoncept för en tunnel erfordras att befintliga LCC-modeller utvecklas. För en framgångsrik LCC-analys krävs relevanta grund/indata för de konstruktioner och konstruktionsdelar som förekommer i en tunnel. På sikt är det nödvändigt att pågående FoU-insatser på LCC-området utvecklas mot en anpassning mot byggnadsverket tunnel, där generella indata analyseras (exempelvis anläggnings-, drifts- och underhållsdata samt eventuell reinvesteringarkostnad) och modelleras för några vanliga konstruktionselement i tunnlar.
- Vägverket har också, i samverkan med Banverket, Elforsk och SveBeFo planer på att under år 2002 initiera ett arbete som skall resultera i en (kunskaps)handbok avseende cementinjektering. De ökande antalet entreprenörtlister avseende tätning/tättningsresultat och dess påverkan på projekten, de senaste åren är ett uttryck för att de svårigheter som finns vad gäller praktisk injekteringskunskap eller i förväntningar på möjliga resultat. Svårigheter finns i hela ledet från beskrivning av bergets vattenvägar till hur injekteringen bör utföras

och vilken tid eller omfattning som erfordras. För att få en bättre grund för branschens behandling av tätningsfrågorna och främja ett mer strukturerat och planerat arbetssätt är det viktigt att få ut de färsta forskningsresultaten till praktisk applikation..

- *Istryck.* Kunskapen avseende storleken och effekterna av istryck är i nuläget bristfällig. Med ökad kunskap om storleken och spridningen av det tryck som bildas på grund av den adsorptionsstyrda isanrikningen skulle det vara möjligt att analysera betydelsen av olika sprickors orientering relaterat till hur och i vilken omfattning vattentillförseln sker. Koppling bör även göras till bergförstärkning och skydd av dräner med sprutbetong.
- *Brandskydd.* Det är viktigt att de material som används i en tunnel inte bidrar till uppkomst av brand, brandspridning eller rökspridning, allt i syfte att säkerställa att krav avseende brandsäkerhet kan uppfyllas. Krav/ råd i Tunnel 99 på ingående delmaterial behöver förbättras och differentieras mer samt att verifieringsmetoder identifieras, exempelvis rekommendationer avseende vilka provningar som ska utföras och vilken kravnivå som bör väljas. Provningsmetoder som är lämpliga för att verifiera olika konstruktioners brandegenskaper bör tas fram. Inklädnader med PE-skum som är skyddad med sprutbetong är ett exempel på en konstruktion som bör kunna verifieras med en standardiserad provningsmetod. Möjligheten att driva samarbetsprojekt med andra länder, exempelvis Norge, bör noga studeras. Förbättrade krav kan sedan ligga till grund för vidare utveckling av acceptabla tekniska lösningar.
- *Beständighet hos kemiska injekteringsmedel.* Idag har vare sig Vägverket eller Banverket tagit ställning till vilka krav avseende provningsmetoder för beständighet av injekteringsmaterial som skall ställas, vilket är en klar brist. Det är nödvändigt att rekommendationer avseende vilka provningar som ska utföras och vilken kravnivå som bör väljas, etableras. En detaljerad analys av befintliga metoder på beständighetsområdet (generellt) tillsammans med en analys av testmetoder för injekteringsmedel bör därför genomföras.

Utöver dessa föreslagna FoU-insatser finns det en mer praktiskt inriktning som bör genomföras parallellt med föreslagna FoU-projekt enligt ovan. Det är en systematisk genomgång och värdering av olika, främst norska metoder för vatten och frostsäkring (kombinerade lösningar med betongvägg och Ekebergvalv/ØS-valv eller Giertsenduk i taket alternativt tunnelduk i tak kombinerat med lokala dräner). Detta bör baseras dels på en del rapporter (se referenslistan) och dels på kontakter, studiebesök i några norska tunnlar och möten med Norska vegvesendet. Motsvarande kontakter med Tyskland eller Österrike/ Schweiz bör också undersökas. Inte minst skall praktiska erfarenheter både från utförande och löpande underhåll belysas. Vikten av ett fortlöpande och naturligt samarbete med Banverket kan inte nog understrykas. Detta bör kunna utmynna i förslag

på några metoder som har potential att kunna fungera för svenska tunnlar och uppfylla kraven enligt Tunnel 99.

9 REFERENSER

Andrén, A. 1995. Tjälbildningsprocesser i kristallint berg. Examensarbete. Tekniska högskolan i Luleå, 1995:154E.

Davik K I, Beständighet av sprutbetong i tunneler – resultat av norske undersökningar. Statens vegvesen.

Grønhaug A, 1995. Strategier för vanttetting av norske vegtunneler. NIF, Vann- og frostsikring av trafiktunneler – injektion och kledning. Trondheim januar 1995.

Herskedal K. Tunnelplatene rustet opp. Våra vegger nr.5 1999.

Knutsson, S. 1985. Några synpunkter på tjältningsprocessen och dess termodynamiska bakgrund. Tekniska Högskolan i Luleå, Avdelningen för geoteknik 1985:08.

Lindblom Ulf, Albertsson A, Sjöholm A, 1999. Krav på injektering vid tunnelbyggande. Rapport B 1999:5. Institutionen för Geoteknik, CTH.

Linde, B. 1997. Frostsprängning och svallisbildning i bergslänter. Examensarbete. Luleå tekniska universitet, 1997:111.

Lundbytunneln, Förslag till vatten- och frostisolering. Vägverket Region Väst. Bergab 1998.

Ouchterlony F. och Olsson M, 2000. Dags att komplettera befintlig skadezonstabell, Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte BK2000.

RINGEN OCH YTTRE TVÄRLEDEN 1995. Konstruktiv utformning av ringentunnlarna med hänsyn till drift och underhåll. Användning av beslutsteori, Rapport 0092

RINGEN OCH YTTRE TVÄRLEDEN 1995. Test av dräner i tunnel vid Hornsberg. Delrapport
Produktionsuppföljning. Rapport 0145

RINGEN OCH YTTRE TVÄRLEDEN 1995. Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport - En pilotstudie av metoder för mätning av igensättning. Rapport 0146

RINGEN OCH YTTRE TVÄRLEDEN 1996. Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport 3, Belastningsförsök. Rapport 0147

RINGEN OCH YTTRE TVÄRLEDEN 1996. Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport 4, Dränfunktion vid igensättning. Rapport 0148

RINGEN OCH YTTRE TVÄRLEDEN 1996. Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport 5, Dränfunktion vid kyla. Rapport 0149

RINGEN OCH YTTRE TVÄRLEDEN 1996. Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Slutrapport, Dräner för bergtunnlar – Funktion och utformning. Rapport 0150

Sandegren, E. 1987. Insulation against ice in railroad tunnels. Transportation research Record, 1150, 43-48.

Statens vegvesen. 1980. Frostinntrengning i vegtunneler – Kort beskrivelse med regneeksempel. Statens vegvesen Veglaboratoriet Intern rapport nr. 948.

Statens vegvesen. 1995. Vann- og frostsikring i tunneler. Konstruktioner for avskerming. Funktionskrav og dimensioneringsregler. Statens vegvesen Nr. 163 i Vegvesenets håndbokserie.

Statens vegvesen. 1997a. Frostinntrengning i tunneler. Statens vegvesen Veglaboratoriet Intern rapport nr. 1946.

Statens vegvesen. 1997b. Oppfølging av markeringsduk, vann og frostsikring i Hordaland Befaringsrapport 13/2 1997 Statens vegvesen Veglaboratoriet Intern rapport nr. 1947.

Statens vegvesen. 1997c. Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler – sluttrapport. Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Statens vegvesen. 1998. Tunnelkledninger – Vann- og frostsikring i vegtunneler. Statens vegvesen Vegdirektoratet Publikasjon 91.

Statens vegvesen. 1998. Tunnelkledninger – Info fra geologi og tunnelkontoret. Statens vegvesen, Vegdirektoratet Informerer Nr.1 oktober 1998.

Statens vegvesen. 1997. Frostmålinger i 15 tunneler vintern 1996/97. Intern rapport nr.1998. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1996. Water and frost protective linings in road tunnels. Intern rapport nr.1904. Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Statens vegvesen. 1996. Performance of shotcrete linings in road tunnels. Intern rapport nr.1905. Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Statens vegvesen. 1996. Tunneling Asia 97. Optmization of linings in road tunnels. Intern rapport nr.1906. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1999. Polyolefinmembraner som vannsikring i vegtunneler, erfaringer fra Tyskland og Østerrike. Intern rapport nr.2068. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1993. Vann- og frostsikring av tunneler. Utenlandske krav og retningslinjer. Intern rapport nr.1582. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1999. Bentonitmembraner til fuktsikring av vegtunneler og kulverter. Intern rapport nr.2080. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1997. Typegodkjente metoder for vann og frostsikring av vegtunneller og retningslinjer for brannsikring av PE-skum. NA-Rundskriv 97/2. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1998. Tunnelduk i Holmestrandtunnelen. Befaring av försöksfelt 24/11 1998. Intern rapport nr.2065. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1998. Road tunnel linings: design for safety, comfort and aesthetics. Symposium, Oct. 9-10 1997. Intern rapport nr.2048. Statens vegvesen Vegdirektoratet

Statens vegvesen. 1994. Metoder for vann- og frostsikring av vegtunneler Delprosjekt D: Vedlikehold. Statens vegvesen Vegdirektoratet Intern rapport nr. 1681.

Statens vegvesen. 1998. Tunnelkledninger – hvordan sokre mot vann med folimembraner. Statens vegvesen Vegdirektoratet Intern rapport nr. 2033.

Statens vegvesen. 1998. Frostsikring av tunneler NIF-kurs FROST I JORD. Sikring mot teleskader Storefjell, Gol 15-17 september 1997. Statens vegvesen Vegdirektoratet Intern rapport nr. 2043.

Steiner W, Malmtoorp J, Rosengren L. 1999. A comparison of solutions for waterproofing. Rapport i konsept.

SveBeFo. 2001. 4th Nordic Rock Grouting Symposium, Proceedings. SveBeFo Rapport 55, ISSN 1104-1773.

Torkeli, C. och Ödmark, L. 1996. Tätning av järnvägstunnlar - Hantering och minimering av vattenproblem. Examensarbete. Tekniska högskolan i Luleå, 1996:079E.

Vägverket. 1995. Strategi vid tätning av bergtunnlar – förutsättningar och bedömningsgrunder. Vägverket Rapport i konsept 990630.

Vägverket. 1994a. Beräkning av temperaturer bakom isolerat innertak i bergtunnel. Vägverket Rapport RAP 0058.

Vägverket. 1994b. Temperaturen ovanför innertak i tunnlar samt möjligheterna att undvika frostbildning i utrymmet mellan berg och innertak. Vägverket Rapport RAP 0068.

Vägverket. 1995. Bergteknik Temperaturmätning i söderledstunneln – utvärdering av mätningar mellan januari 1994 och juni 1995. Vägverket Rapport RAP 0138.

Vägverket. 1996. Beräkning av istillväxt på innertak. Vägverket Rapport RAP 0165.

Vägverket. 1997. Istryck bakom förstärkningskonstruksjoner i tunnlar. Vägverket Rapport RAP 0220.

Vägverket, 1999. Teknisk beskrivning, bergarbeten. Arbetshandling, Revidering B, Årsta Entreprenad SL 01, Södra Länken, 1999-06-01.

Vägverket, 1999. Teknisk beskrivning, handling 9.1. Innertak, Entreprenad SL 37, Södra Länken, 1999-07-09.

Vägverket. 2000. Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser. Vägverket Publ. 2000:101. ISSN 1401-9612.

55 mill. Spart på Granfoss. Våra veger nr.10 1999.

Muntliga kontakter/information:

Bengtsson B, Vägverket, Region Väst VVÄuh, Göteborg

Eckerlid P-O, Vägverket, Region Väst VVÄgp, Göteborg

Grov, Eivind, OT Blindheim, Trondheim

Lindblad, K., SwedPower AB, Luleå

Ljunggren, Ch., SwedPower AB, Luleå

Lundman, P; Banverket HK, Borlänge

Nålsund, Roar, Jernbaneverket, Trondheim

Persson, M., SwedPower AB, Luleå

Bilaga 1 Metoder att förhindra frostrelaterade problem

1(1)

Metoder för att förhindra frostrelaterade problem samt allmänna för- och nackdelar. (Torkeli och Ödmark, 1996, Linde, 1997)

Metod	Beskrivning	Fördelar	Nackdelar
Skonsam sprängning	Konturraderna laddas med mindre mängd sprängmedel.	Sprängskadorna på kvarstående berg minska.	Förhållandevis tidskrävande.
Förinjektering	Injektering av injekteringsmedel, cement eller kemikalier innan utsprängning.	Höga tryck kan användas, bra spridning av injekteringsmedlet. Kan vara lämpligt för att tätta en vattenförande zon som korsar slänten. Bra när det finns krav på bibehållen grundvattennivå.	Grundvattentrycket bakom slänten öka.
Efterinjektering	Utförs på liknande sätt som förinjektering. Ofta används kemiska tätningsmedel.	Lämpligare att använda vid lokala tätningsåtgärder än förinjektering.	Låga tryck, sämre spridning. Tidsödande och kostsamt, ofta dåligt resultat. Kan vara miljöfarligt. Vattenflödet söker nya vägar och problemet flyttas till en annan del av bergskärningen. Grundvattentrycket ökar och det är svårt att tätta enstaka dropp mha efterinjektering
Sprutbetong	Relativt viskös betong sprutas på bergytan.	Stabiliserar kraftigt uppsprucket berg och förhindrar därmed nedfall av block.	Sprutbetong på en våt bergyta riskerar att drabbas av frostsprängning och blir därefter verkningslös.
Isolering	Bergytan isoleras och tjälinträngningen förhindras vilket medför att vattnet inte fryser.	Förhindrar både svallis och frostsprängning. Vattenvägarna förändras inte.	Monteringen anses kostsam och tidskrävande.
Dränering	Dräneringshål borrar in i bergmassan för att punktera vattenförande zoner. Vattnet leds därefter ner till ordinarie dränering.	Med relativt liten insats koncentreras vattenläckaget från ett större område till en punkt där det kan omhändertas.	Ställer höga krav vid utförandet. Svårt att erhålla 100%-ig dränering, flera borrkampanjer kan erfordras.
Nät	Stålnät hängs över bergytan.	Förhindrar okontrollerade nedfall av block. Hindrar smältande svallis från att rasa.	Åtgärder inte frostriskproblemet utan förhindrar endast vissa skador.
Bergbult	Bultar gjuts eller bottenförankras i borrhål.	Fastbultade block förhindrar inom vissa gränser okontrollerade accelererande ras.	Minskar inte svallisbildningen och förhindrar oftast endast ett litet område närmast bultet från att rasa pga frostsprängning.

Bilaga 2 Erfarenheter när det gäller underhåll

1(3)

Erfarenheter när det gäller underhåll av vatten- och frostsäkringsmetoder. Statens vegvesen. 1994. Metoder for vann- og frostsikring av vegtunneler Delprosjekt D: Vedlikehold. Statens vegvesen Vegdirektoratet Intern rapport nr. 1681.

LÄTTA KONSTRUKTIONER

	PLATTVALV - ENKELT	PLATTVALV	PLATTVALV - FROSTISOLERAT
Material	Aluminium	Aluminium	Aluminium med mellomliggende mineralullmatta
Skador	Korrosion, skarvar, nedfall, tryckimpulser från tung trafik	Smutsansamling på baksidan av taket og i takrännor, tryck/sug från trafik, algtillvæxt	Korrosion, skarvar, nedfall, tryckimpulser från tung trafik
Reparationsmetoder	Byte av plattor	Spolning, efterspänning av bultar, byte av plattor, förstärkning	Byte av plattor og isolering
Skador vid påkörning	Skydd krævs	-	Skydd krævs
Tvättbarhet	Lätt	Lätt	Lätt
Inspektion	Demontering av inspektionslucka	Demontering av inspektionslucka	Demontering av inspektionslucka
Brandsikkerhet	Brandsikker	Brandsikker	Brandsikker
Erfarenheter, kommentarer	Kræver bergforstærkning mot nedfall. Dokumentrat vattensikkert i 10 år	Hållbarheten beror av priset	Tidskrævende montering, forholdendevis kostsam Dokumentrat vattensikkert i 20 år

2(3)

	SANDWICHVALV	PE-SKUM	TUNNELDUK	TUNNELDUK MED FROSTSÄKRING
Material	PU-skum inkapslad i glasfiberarmerad polyester	Extruderat poluetylenskum	WG tunnelduk: PVC-belagt polyesterduk	WG tunnelduk med insvetsat mineralullmatta
Skador	Inga synliga	Glipor i skarvar leder till isbildning, läckage i bultgenomföringar	Slitage mot bergkanter	Slitage mot bergkanter
Reparationsmetoder	Som regel måste hela profilen bytas ut efter påkörning	Tätning av skarvar, byte av mattor.	Insvetsning av ny duk	Insvetsning av ny duk
Skador vid påkörning	Omfattande påkörningsskador	Lokala	Lokala	Lokala
Tvättbarhet	Lätt	Svårt	Lätt	Lätt
Inspektion	Nedplockning av element	Demontering av mattor	Levereras med blixtlås, ev uppskärning av duk	Levereras med blixtlås, ev uppskärning av duk
Brandsäkerhet	Svårantändlig	Kräver brandskydd	Brandsäker	Brandsäker
Erfarenheter, kommentarer	Förhållandevis kostsam, krav på specialutrustning vid montering/demontering. Valvet är vattentätt, stabilt och solitt. Snabb montering, viss skepsis pga brandrisken.	Enkelt och billigt att byta ut mattor. Lämpligt vid äldre och lågtrafiktunnlar.	Lågt pris, kort monterings tid, lite platskrävande, god linjeföring, lättvättad.	Mer solid och styv än utan frostisolering.

3(3)

TUNGA KONSTRUKTIONER

	BETONGVALV – FRITTBÄRANDE	LÄTTBETONG VALV	CON-FORM TUNNELEMENT
Material	Prefab betongelement med heltäckande membran	Platsgjutna vägg- element förankrade med bergbultar, fuktsäkring mha fogmassa och heltäckande membran	Sandwich av XPS- skum och betong
Skador	Nedfall av sten och sprutbetong, korrosion, läckage i bultgenomföringar	Läckage i bult- genomföringar	Korrosion
Reparations- metoder	Lagning av membran, utbyte av element	Tätning av genom- föringar, byte av element.	Byte av element.
Skador vid påkörning	Knäckskador	Knäckskador	Knäckskador
Tvättbarhet	Lätt	Lätt	Lätt
Inspektion	Mindre behov	Begränsad tillgänglighet	Begränsad tillgänglighet
Brandsäkerhet	Brandsäker	Brandsäker	Brandsäker
Erfarenheter, kommentarer	Hög kvalitet, redu- cerad bergsäkring, hög vikt.	Liten erfarenhet	Liten erfarenhet

Bilaga 3 Miljöbelastning vid rengöring och underhåll

Vid en studie i Norge av miljöbelastning på gata vatten- och frostsäkring av väg- tunnlar har belastning av rengöring och underhåll inkluderats. Rengöringsmedel, tvättutrustning och metoder klassificerats samt miljöbelastning på olika valv har klassificerats. Vid tvättning har roterande metoder visats ge bäst resultat, antingen som rundstråledysor monterade på ett roterande tvätthjul eller som roterande dysor på ett upp- och nedåtgående bärarm. Erfarenheterna visar att rengöringsmedel bör användas för att få väggarna helt rena: För att medlet ska kunna verka effektivt bör detta påföras separat ca 2-5 minuter innan rengöringen påbörjas.

Spoltryck, vattenmängd, avstånd mellan dysor och vägg och dystyp hänger samman och kan inte bestämmas separat. Emellertid föreslås följande, dystyp: roterande dysa eller stationär dysa monterad på tvätthjul, spoltryck: 150 bar, vattenmängd: 25 l/min, dysa, avstånd dysa-vägg: 50 cm. Dessa värden är dimensionerade efter den mest sårbara typen av valv, oskyddad PE-skum, dock räcker värdena även till för andra typer av valv.

Statens vegvesen. 1994. Metoder for vann- og frostsikring av vegtunneler Delprosjekt C: Miljøpåkjenninger. Statens vegvesen Vegdirektoratet Intern rapport nr. 1653