

Intern rapport

Intern rapport
nr. 2151

MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE
TUNNELER

Delprosjekt C: Tetteteknikk

BERGINJEKSJON



Statens vegvesen
Vegdirektoratet

April 2000

Vegteknisk avdeling

Intern rapport nr. 2151

Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt C: Tetteteknikk

BERGINJEKSJON

Sammendrag

- Berginjeksjon er et teknisk komplekst fag som krever inngående praktisk erfaring og bred geologisk bakgrunn av de som er ansvarlige for planlegging og utførelse.
- Prosjekteringsarbeider skal på bakgrunn av hydrologiske og hydrogeologiske utredninger konkludere med bl.a. kriterier for tillatt drenering av grunnvannsmagasin i berg og løsmasser ved tunnelen, og kriterier for nødvendige tett tiltak i tunnelen. Prosjekteringsarbeidet skal også angi metoder for injeksjonsarbeider og forventet tilpasning til varierende bergforhold.
- I hydrogeologisk sensitive områder skal det opprettes system for overvåking av grunnvannsforholdene i god tid før tunneldriving starter.
- Der det er tvil om berginjeksjon alene kan innfri gitte tetthetskriterier, må det opprettes system for vanninfiltrasjon og/eller overrisling.
- Berginjeksjon må i praksis baseres på gitte tetthetskriterier og tilpasses stedlige bergforhold. Avhengig av forholdene har hullantall variert mellom ca. 7 og ca. 80 injeksjonshull pr. injeksjonsomgang, hullengdene har variert mellom ca. 10 m og 35 m.
- De bergforhold som er viktigst for injeksjonsstrategien er bergartstype, tektonisk påvirkning, sprekkekarakter og -orientering, sprekkefylling og spenningstilstand.
- Sementbasert injeksjonsmasse, ev. tilsatt tilsetningsstoffer, har vist seg å virke tilfredsstillende under de fleste bergforhold. Kun injeksjon med sementbasert masse er beskrevet.
- Den drivende kraft bak injeksjon er injeksjonstrykket. Det må benyttes så høyt trykk som forholdene tillater. Dvs. at injeksjon av hvert hull vanligvis avsluttes med trykk på 50-100 bar.
- Berginjeksjon har ved siden av tetteffekt også stabiliserende virkning på berget.
- Lav temperatur på vann/ement før og under blanding sinker herdeprosessen. Med lav temperatur menes $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ned mot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vil herdeprosessen gå meget tregt.
- Riktig utført injeksjon kan redusere eller eliminere vann-/frostsikring.
- Det bør utarbeides egen HMS-prosedyre for injeksjonsarbeider på grunn av arbeidens spesielle karakter.

Emneord: *Tunneler, berginjeksjon, injeksjonsteknikk*

Kontor: *Geologi og tunnel*

Saksbehandler: *Bjørn Helge Klüver*

/BK

Dato: *April 2000*

Statens vegvesen, Vegdirektoratet

Vegteknisk avdeling

Postboks 8142 Dep, 0033 Oslo

Telefon: 22 07 39 00 Telefax: 22 07 34 44

Innhold

1 INNLEDNING	2
2 SAMMENDRAG	3
3 BERGINJEKSJON FORAN STUFF I TUNNELER	4
4 KRAV TIL TETTHET I TUNNELER	5
4.1 Ytre miljø	5
4.2 Indre miljø	5
5 PROSJEKTERING AV TETTEARBEIDER	6
6 INJEKSJONSTEKNIKK GENERELT	7
6.1 Injeksjonstrykk	7
6.2 Injeksjonsmassens egenskaper	9
6.3 Utbredelse og inntrengning av injeksjonsmasse	10
6.4 Mengde injeksjonsmasse	12
7 INJEKSJONSSTRATEGI	13
7.1 Krav til tetthet og tetthetskriterier	13
7.2 Fjelloverdekning	14
7.3 Bergmasseeenskaper	15
7.4 Oppsprekking	18
7.5 Svakhetssoner	19
7.6 Spenningstilstand	20
8 HMS	21

1. INNLEDNING

Rapporten bygger på 30 års erfaringer fra prosjektering og praktisk berginjeksjon i trafikk tunneler, gassrørtunneler, råsprengte gass- og oljehaller i fjell, samt vanntunneler og vannkraftstasjoner i fjell.

Berginjeksjon er i hovedsak et praktisk fag der erfaringer og kunnskaper for en stor del vinnes på stuff. Når beskrivelse av berginjeksjon utarbeides på prosjekteringsstadiet og massefortegnelse mv. innarbeides i anbudsokumentene, er det reell fare for at arbeidet blir utført av personer med manglende praktisk innsikt i faget. Dette kan medføre at beskrivelse og anbudsgrunnlag for injeksjonsarbeider ikke blir tilfredsstillende. Ved flere tunnelanlegg har dette resultert i at mindreverdige injeksjonsarbeider har blitt utført. Andre steder har injeksjonsarbeidene blitt totalt mislykkede. Det har ikke vært stilt de samme krav til tettearbeider i ikke-urbane strøk som i urbane områder.

Denne rapporten er ment som faglig informasjon om praktisk/teknisk kunnskap vedrørende injeksjonsarbeider, for personer som arbeider med planlegging og prosjektering av tunnelanlegg.

Rapporten inneholder også informasjon som kan være til støtte for de som utfører og følger opp injeksjonsarbeider på tunnelanlegg. Det som er beskrevet må imidlertid ikke oppfattes ukritisk som oppskrift på hvordan injeksjon skal utføres under de forskjellige forhold som blir beskrevet. Hensikten er at beskrivelsen skal tjene som en del av beslutningsgrunnlaget når forsøk skal utføres, for å utvikle et best mulig injeksjonsopplegg ved et tunnelanlegg på bakgrunn av stedlige bergforhold og andre forhold. Opplegget må justeres fortløpende og tilpasses varierende bergforhold og andre stedlige forhold når disse forandrer seg underveis.

Kvalitet og kostnader på injeksjonsarbeider er avhengig av erfaring og kunnskaper hos de mannskaper som utfører arbeidene. Det er særlig grunn til å understreke det ansvar byggherren har for injeksjonsarbeider ute på tunnelanlegg. Byggeleder har vanligvis delegert dette ansvaret til byggherrens anleggsgeolog på stuff, jf. de kontraktsbestemmelser som gjelder i dag. Det har stadig vist seg at det er en klar sammenheng mellom anleggsgeologens og andre involverte personers kvalifikasjoner, og kvaliteten på injeksjonsarbeidene. Manglende kvalifikasjoner har medført at arbeider har blitt dårlig utført eller mislykkede. Arbeider har også blitt kostbare, har tatt lengere tid enn nødvendig og har blitt utført med redusert sikkerhet. Det er prosjektleders ansvar å påse at nødvendig ekspertise finnes i prosjektorganisasjonen.

2. SAMMENDRAG

- Berginjeksjon er et teknisk komplekst fag som krever inngående praktisk erfaring og bred geologisk bakgrunn av de som er ansvarlige for planlegging og utførelse.
- Prosjekteringsarbeider skal på bakgrunn av hydrologiske og hydrogeologiske utredninger konkludere med blant annet kriterier for tillatt drenering av grunnvannsmagasinet i berg og løsmasser ved tunnelen og kriterier for nødvendige tetttiltak i tunnelen. Prosjekteringsarbeidet skal også angi metoder for injeksjonsarbeider og forventet tilpasning til varierende bergforhold.
- I hydrogeologisk sensitive områder skal det opprettes system for overvåking av grunnvannsforholdene i god tid før tunneldriving starter.
- Forutsatt riktig planlegging og utførelse har det med få unntak vært teknisk mulig å oppfylle alle tetthetskriterier med berginjeksjon som har vært aktuelle til nå.
- Der det er tvil om berginjeksjon alene kan innfri gitte tetthetskriterier, må det opprettes system for vanninfiltrasjon og/eller overrisling.
- Berginjeksjon må i praksis baseres på gitte tetthetskriterier og tilpasses stedlige bergforhold. Løsmasseoverdekning, fjelloverdekning og andre stedlige forhold er også viktige for fremgangsmåten. Avhengig av forholdene har hullantall variert mellom ca. 7 og ca. 80 injeksjonshull pr. injeksjonsomgang for vanlige tofelts vegtunneler. Hullengdene har variert mellom ca. 10 m og ca. 35 m.
- De bergforhold som er viktigst for injeksjonsstrategien er bergartstype, tektonisk påvirkning, sprekkekarakter og -orientering, sprekkefylling (fyllingsgrad og kvalitet) og spenningstilstand.
- Sementbasert injeksjonsmasse, eventuelt tilsatt egnede tilsetningsstoffer, har vist seg å virke tilfredsstillende under de fleste bergforhold. Med sementbasert masse menes alt fra vanlig industrisement til den mest finkornete mikrosegment. I denne rapporten er kun injeksjon med sementbasert masse beskrevet.
- Den drivende kraft bak injeksjon er injeksjonstrykket. Det må benyttes så høyt trykk som forholdene på stedet tillater. Dette betyr at injeksjon av hvert hull vanligvis avsluttes med trykk på 50-100 bar.
- Berginjeksjon har ved siden av tetteffekt også stabiliserende virkning på berget.
- Lav temperatur på vann/sement før og under blanding sinker herdeprosessen. Med lav temperatur menes < 10 °C. Ned mot 0 °C vil herdeprosessen gå meget tregt.
- Riktig utført injeksjon kan redusere eller eliminere vann-/frostsikring.
- Det bør utarbeides egen HMS-prosedyre for injeksjonsarbeider pga. arbeidenes spesielle karakter.

3. BERGINJEKSJON FORAN STUFF I TUNNELER

Planlegging av tetteinjeksjon i berget rundt tunneler må starte tidlig i planleggingsfasen. Som utgangspunkt for planleggingen er det viktig å klarlegge konsekvensene som vannlekkasjer inn i tunnelen kan få for tunnel og omgivelser, og i denne forbindelse lekkasje-kriterier gitt i tillatt innlekkasje. Videre planlegging må omfatte de tiltak som må iverksettes for å begrense vannlekkasjene.

I denne rapporten vil kun injeksjon foran stuff, ofte kalt forinjeksjon, bli beskrevet. Dette har sin årsak i at forinjeksjon med etterfølgende tetthetskontroll er den eneste riktige måten å utføre tetteinjeksjon på. Eventuell injeksjon bak stuff, ofte kalt etterinjeksjon, er så lite effektiv at dersom dette mot formodning skulle bli aktuelt, bør også andre alternative metoder for tetting av tunnelen utredes. En slik utredning vil bli et meget omfattende arbeid og vil falle utenfor intensjonen med denne rapporten.

Selv under meget vanskelige forhold har det vist seg at det har vært mulig å oppnå så tett berg ved forinjeksjon at alle aktuelle krav til tetthet har latt seg oppfylle.

Under tunneldriften må opplegget for tetteinjeksjon justeres kontinuerlig i henhold til variasjon i fjellforhold og andre stedlige forhold.

Det forekommer at deler av det overordnede ansvaret for injeksjonsarbeidene blir delegert til entreprenøren. Uansett er det ytterst viktig at ansvarsforholdene byggherre/entreprenør blir avklart i detalj, da dette kan ha stor betydning for både omgivelser og prosjekt.

Da egenskaper til injeksjonsmasse og tilsetningsstoffer vil være under stadig utvikling, vil de forskjellige massetyper som er tilgjengelige på markedet ikke bli omtalt i detalj her, heller ikke aktuelle tilsetningsstoffer. Det vises til kontinuerlig oppdatert dokumentasjon som finnes hos de forskjellige leverandører. For sementbasert masse gjøres et lite unntak da både kornstørrelse og tilsetningsstoffer er berørt i senere avsnitt.

I den senere tid har sementbasert injeksjonsmasse med egnede tilsetningsstoffer vist seg å fungere utmerket under de aller fleste bergforhold, forutsatt riktig bruk. Det er eksempler på at selv de vanskeligste injeksjonsarbeider har blitt vellykket med riktig bruk av slik masse. Da massen i tillegg er forholdsvis rimelig, enkel å bruke og kan tilpasses gjeldende HMS-krav på en grei måte, anbefales massen for fortsatt bruk. I det følgende er all beskrivelse basert på bruk av sementbasert masse.

4. KRAV TIL TETTHET I TUNNELER

Det er krav tilknyttet indre og ytre miljø som bestemmer de tetthetskrav som danner basis for tetteinjeksjon. Med indre miljø menes her miljøet for tunnelarbeiderne i anleggsfasen. Med ytre miljø menes forholdet til omgivelsene i byggefase og driftsfase samt forholdet til trafikantene i driftsfasen.

Følgende problemstillinger kan listes opp for ytre og indre miljø:

4.1 Ytre miljø

Grunnvannsdrenering som resulterer i setninger i løsmasser.

Drenering av brønner, tjern, vann og vassdrag over tunnelen.

Grunnvannsdrenering som påvirker floraen og faunaen ved tunnelen.

Tapping av grunnvannsmagasiner generelt.

Permanent vann- og frostsikring.

4.2 Indre miljø

Vannproblemer og vannsikring for tunneldriften og anleggsbemanningen.

Ofte vil tetthetskrav som gjelder i byggeperioden angis som tillatt innlekkasje i tunnelen (liter/min), for hele tunnelen, seksjoner av tunnelen eller for avgrensede vannførende soner i tunnelen.

Med hensyn til setningsproblematikk og drenering av brønner, vann, tjern, myrer etc., der selv meget små lekkasjer inn i tunnelen kan få alvorlige følger for omgivelsene, må i de fleste tilfeller tetthetskrav som går på innlekkasje bare anses som retningsgivende. Avgjørende i denne forbindelse vil være krav tilknyttet poretrykk og/eller grunnvannsnivå i grunnen ved fjellanlegget.

5. PROSJEKTERING AV TETTEARBEIDER

Det vil være forskjell på de konsekvenser som variasjoner i grunnvannstand har på omgivelsene. Uansett mulige konsekvenser må inngrep som påvirker grunnvannsforholdene klareres med de rette offentlige etater så tidlig som mulig i planfasen.

Der miljøet er avhengig av grunnvannsforholdene er det viktig at grunnvannsforholdene blir registrert i god tid før tunneldriften starter. Dette vil i praksis si at måling av grunnvannsnivå og/eller poretrykk i aktuell løsmasse og bergmasse bør igangsettes så tidlig at relevante data foreligger tidlig i planleggingsfasen. Dataene bør også dekke nedbørsvariasjoner og sesongvariasjoner, hvilket betyr at målingene bør igangsettes minst et år før anleggsstart, helst flere år i forveien. Det vises også til Norges geologiske undersøkelses landsomfattende grunnvannsnett som pr. 1998/99 omfattet 37 grunnvannsbrønner i løsmasse med måling av grunnvannsnivå og temperatur.

Tetthetskrav angis vanligvis på bakgrunn av hydrologisk og hydrogeologisk utredning tidlig i prosjekteringsfasen. Den hydrogeologiske utredningen bør i praksis utarbeides i to trinn. Første trinn utarbeides på grunnlag av hydrologisk utredning og geologisk befaring i det aktuelle området og skal blant annet konkludere med anbefalt program for prøveboringer inklusive testprogram (pumpetester etc.) for å frembringe data for bergmassens hydrogeologiske egenskaper. Annet trinn skal konkludere med relevante hydro-geologiske data for tunneldriften hva angår innlekkasjer i tunnelen og den påvirkning dette kan ha på omgivelsene. Det skal angis kriterier for innlekkasjer i tunnelen, og i hydrogeologisk sensitive områder; kriterier for minimum poretrykk og/eller grunnvannsnivå.

Dersom vanninfiltrasjon eller overrisling kan bli nødvendig, skal sannsynligheten for dette angis og bli fulgt av anbefaling om slike arbeider skal igangsettes. Dersom arbeidene er aktuelle skal opplegget prosjekteres i detalj som grunnlag for anbud. Det skal angis lokaliteter, lengder, antall og retning på hull. I tillegg beskrives system for fremføring av vann. Eventuell overrisling medfører et enklere system, men også dette skal beskrives i detalj. Det må også angis når opplegget skal kunne settes i drift. Vanligvis er dette i god tid før tunneldriften startes opp.

Hydrogeologisk utredning skal blant annet konkludere med rapport som skal være grunnlag for å angi, seksjonsvis for tunnelen, hvor omfattende sonderboringer, injeksjonsarbeider og vann-/frostsikringsarbeider forventes å bli, samt tids- og kostnads-aspektet. Som grunnlag for utarbeidelse av anbudsdokumenter skal forventet prosedyre for injeksjon angis, dvs. hullengder og antall hull for sonderboring og injeksjon samt forventet forbruk av tid og injeksjonsmasse. Det skal også beskrives i hvilken grad det forventes systematisk injeksjon, overlapp av skjærmer mv. Utredningen skal dekke hele tunneltraseen og i tillegg belyse spesielle seksjoner av tunnelen, samt svakhetssoner og eventuelle andre soner med spesielle hydrogeologiske egenskaper og angi hva dette forventes å medføre av variert opplegg for sonderboring, injeksjon og vann-/frost-sikring.

6. INJEKSJONSTEKNIKK GENERELT

De viktigste punkter å ha forståelse for ved injeksjon er:

- **Injeksjonstrykk**
- **Injeksjonsmassens egenskaper**
- **Utbredelse og inntrengning av injeksjonsmasse**
- **Mengde injeksjonsmasse**

6.1 Injeksjonstrykk

Det er injeksjonstrykket som er den drivende kraften bak injeksjon. Kort sagt bør trykket være så høyt som forholdene på stedet tillater.

Er forholdene i berget slik at trykket vanskelig lar seg bygge opp, må injeksjonen legges opp slik at dette blir mulig, der det tilsiktes tett fjell.

Dette kan gjøres på flere måter: skifte over til masse som gir økt injeksjonsmotstand, legge inn pauser under injeksjon av hvert hull med stor masseinnngang, injisere en ytre skjerm før injeksjon utføres av berget nær tunnelen, mv.

Den vanligst forekommende feil ved injeksjonsarbeider foran stuff er at det benyttes for lavt trykk. Feilen kan forklares med påstander om at det er tilstrekkelig at injeksjonstrykket overstiger grunnvannets poretrykk. Samtidig har det vært hevdet at injeksjonstrykket ikke må være så høyt at det kan oppstå «hydraulisk splitting» i berget, med nedsatt stabilitet i tunnelen som resultat. Spesielt under damfotinjeksjon har det vært hevdet at hydraulisk splitting og heving av fjelloverflaten måtte unngås. På anlegg hvor det har vært motvilje mot å anvende høyt injeksjonstrykk, har det vært anvendt trykk ikke særlig høyere enn stedlig poretrykk pluss ca. 10 bar. Dette er vanligvis ikke tilstrekkelig for å oppnå vellykket injeksjon. I praksis viser det seg at injeksjonstrykket avtar så mye med økende avstand fra injeksjonshullet at trykket i injeksjonsmassen sjelden vil kunne redusere stabiliteten i tunnelen vesentlig under forinjeksjon. Det forutsettes da pakkerplassering tilstrekkelig langt inne i hullet og vanlige tunnelprofiler (T9 e.l.). I store profiler som fjellhaller etc., er det imidlertid god grunn til å vurdere eventuell uheldig stabilitetsutvikling nøye.

Det understrekes at generelle sikkerhetsregler alltid må følges under injeksjon, med kontinuerlig inspeksjon for å oppdage nedsatt stabilitet, utgang av masse, mv.

Med begrepet «hydraulisk splitting» menes her både utvidelse av eksisterende sprekker/slepper og etablering av nye sprekker. Det er viktig at injeksjonstrykket, ved siden av å overvinne poretrykket, overvinner motstand mot masseinntrengning i bergmassen som skyldes begrenset sprekkeåpning, ruhet, sleppe-/sprekkefylling og opptredende spenninger.

I hydrogeologien er det nå anerkjent at vannveiene i store deler av bergmassen opptrer som kanaler i slepper og sprekker. I praksis vil sonderhull og injeksjonshull sjelden treffe kanalene. Det vil si at vannlekkasjer ut av borehull ofte ikke er representative for bergmassens konduktivitet (vannledningsegenskaper).

Registrerte lekkasjer vil nesten alltid være for lave i forhold til gjennomsnittlig konduktivitet i bergmassen.

Injeksjonsmassen vil i liten grad kommunisere med kanalene med mindre injeksjonstrykket er så høyt at det oppnås kommunikasjon mellom hull og kanaler, og innbyrdes mellom kanalene. For å oppnå dette bør det anvendes så høyt trykk at det oppstår «hydraulisk splitting» i bergmassen ved hullet. Dette anses som en grunnleggende forutsetning for å oppnå den tetthet som er oppnåelig ved avansert berginjeksjon. Der tetthetskravene er strenge, for eksempel i setningsømfintlige områder, er det lite sannsynlig at bruk av lavere trykk kan gi tilfredsstillende resultat.

Konduktiviteten i bergmassen kan være så høy, for eksempel ved lav innspenning og opptreden av åpne sprekker med lavt leirinnhold, at det har liten verdi å planlegge injeksjon med høye trykk innledningsvis. Ved siden av tiltak som akseleratortilsetning, massefortykning, mauring mv., kan det være god strategi å redusere konduktiviteten i mer perifere deler av bergmassen ved innledende injeksjon. Slik kan det dannes en barriere som gjør det mulig å benytte nødvendig høyt injeksjonstrykk i bergmassen nærmere tunnelen. Mer om dette under kapittel om injeksjonsstrategi.

Når lekkasjevann forekommer i sonderhull eller andre hull, er som nevnt dette beskjed om at berget fører vannmengder som er *like store eller større* enn registrert lekkasje. På bakgrunn av slik registrering og tidligere tilegnet lokalgeologisk kunnskap må strategien for sonderboring og injeksjon justeres.

Det bør være en regel at det utføres ordinære lekkasjemålinger og/eller vanntapsmålinger med 10 bars overtrykk (over stedlig poretrykk). Dette gjelder for lugeonverdier. I tillegg bør det også vurderes å utføre vanntapsmålinger med trykk som det kan bli aktuelt å benytte under injeksjon, for å åpne kommunikasjon mellom hull og kanaler. Dette vil gi bakgrunn for valg av type injeksjonsmasse, flytegenskaper, v/c (vann/ sement)-forhold, etc. I denne forbindelse kan det være nyttig å notere det trykknivå som åpner bergets sprekker og som er så viktig for inntrengning og injeksjonsforløp. Avhengig av spenningsbildet kan det bli nødvendig å benytte høyere trykk for å åpne andre sprekkesett.

Vanntapsmålinger må utføres med forsiktighet der fjelloverdekningen er liten og der vannstrømmen kan påvirke stabiliteten i overliggende løsmasser. Dette gjelder også for vanninfiltrasjon gjennom borhull som er boret fra tunnelen eller dagen.

Det er klare indikasjoner på at berginjeksjon også virker stabiliserende på berget. Som ventet ser dette ut til å ha sammenheng med anvendt injeksjonstrykk, da høyere trykk gir bedret stabilitet.

Høyt injeksjonstrykk og tilstrekkelig tett boring av injeksjonshull vil kunne redusere eller eliminere vann- og frostsikring. Der forholdene ligger til rette for det, kan det ved hjelp av relativt lave injeksjonsressurser spares betydelig på vann- og frostsikring.

6.2 Injeksjonsmassens egenskaper

Injeksjonsmassen bør først og fremst anvendes til tetting i nærheten av tunnelen. Tetting av berget langt vekk fra tunnelen er bortkastet, og en bør tilstrebe å begrense fjerntransport av massen.

Gode flyteegenskaper hos injeksjonsmassen er viktig for å oppnå god inntrengning. Det er også viktig at injeksjonsmassen holder seg homogen gjennom injeksjonsforløpet. Dersom massen separerer vesentlig (vann presses ut av massen), vil inntrengningsevnen til den del av massen som er tetteeffektiv reduseres betydelig og tetteeffekten avta tilsvarende.

Gode flyteegenskaper har tradisjonelt vært oppnådd ved bruk av høyt v/c-forhold. Høyt v/c-forhold øker imidlertid risikoen for separasjon i massen. Sementens finmalingsgrad, og tildels dens mineralogi, innvirker sterkt på hvor effektivt vannet bindes. Finmalt sement binder vannet bedre og sikrer bedre mot separasjon enn grovmalt sement. Derfor er industrisement (tidligere benevnt rapidsement) gunstigere til berginjeksjon enn grovmalt sement. Effekten av mikrosement, ekstremt finmalt sement, er ikke bare at sementkornene trenger lettere inn i fine sprekker, men at homogeniteten i massen opprettholdes bedre ved økende trykk.

Silikastøv, som i dag er vanlig å bruke i betong og som tildels har vært benyttet ved berginjeksjon, har betydelig innvirkning på bindingen av vannet. Støvet har ekstrem finhet, tilnærmet 1/100 av sementkorns størrelse.

I tillegg til sement, vann og eventuelt silikastøv, kan også enkelte tilsetningsstoffer benyttes. Vannreducerende tilsetningsstoffer bedrer massens flyteegenskaper uten bruk av mer vann. Fordi relativt hurtig avbinding er sterkt ønsket for injeksjonsmasse, benyttes fortrinnsvis SP-(superplastiserende)-stoffer på melaminbasis. Lignosulfat (P og LP) har retardert avbinding som bivirkning, og er derfor som regel uaktuell til tross for lavere pris.

En del av SP-stoffenes virkning er at de dispergerer partiklene bedre, dvs. skiller partiklene som opptrer i agglomerater til adskilte enkeltpartikler. I praksis medfører dette at sementen oppfører seg som om den var mer finmalt. Ved bruk av silikastøv er SP-stoffer en forutsetning for å få dispergert partiklene tilfredsstillende.

Andre hjelpestoffer som for eksempel ekspanderende stoffer, fortykningsmidler, akseleratorer, kan benyttes i tillegg til SP-stoffer under spesielle forhold.

Herdetiden til injeksjonsmassen er blant annet avhengig av temperaturen på vann og sement før og under blanding. Lav temperatur sinker herdeprosessen, som vist i tabellen nedenfor. Under 10 °C vil herdeprosessen gå tregt, og ned mot 0 °C vil prosessen gå meget tregt.

Sementens relative reaksjonshastighet (omtrentlige verdier):

5 °C	10 °C	20 °C	35 °C
0,29	0,5	1	2

6.3 Utbredelse og inntrengning av injeksjonsmasse

Transport av injeksjonsmasse i en gitt bergmasse er i hovedsak avhengig av injeksjons-trykk samt flyt og inntrengningsegenskaper til injeksjonsmassen. Hvilken masseressept som gir best resultat er avhengig av stedlige forhold og bergkvalitet.

Store deler av Norges berggrunn har egenskaper som gjør at det vil være tilstrekkelig å benytte vanlig industrisement, forutsatt riktig injeksjonsstrategi. Dette vil også være avhengig av tetthetskravene. I berg med høy innspenning eller lukket sprekkestruktur, kan det være vanskeligere å oppnå fullgod tetting med industrisement, særlig der sprekken har høyt leirinnhold. Det kan da være riktig å forsøke *innledningsvis* med finkornede sementer, (for eksempel mikrosementer) og høyt v/c-forhold; ca. 1,0. Gir dette tilfredstillende inntrengning, reduseres v/c-forholdet gradvis ned mot 0,5-0,6 samtidig som trykket tilsvarende økes til 60-80 bar. Injeksjon avsluttes ved maksimalt trykk ca. 90-100 bar.

Lagringsforhold og lagringstid påvirker sementkvaliteten. Særlig er dette viktig for de mest finkornete sementtyper. Leverandør bør pålegges å fremlegge kvalitetsdokumentasjon ved levering for å sikre at mottatt vare er i henhold til spesifikasjonene og har vært lagret betryggende. Særlig viktig er det å sjekke at de forskjellige sementtyper, særlig mikrosementer oppfyller angitt finhet.

Erfaringsmessig har tilsetning av plastiserende stoffer og stoffer som bedrer inntrengningsevnen bidratt til å utvide anvendelsesområdet for vanlig industrisement.

Høyt v/c-forhold bidrar til å øke flyt og inntrengningsevne, men er samtidig ledsaget av negative faktorer:

- * **Nedsatt kvalitet på herdet masse**
- * **Lengre tid til herdeprosessen starter og lengre herdetid**
- * **Lav trykkoppbygging i nærliggende bergmasse på grunn av tendens til fjernttransport, dette betyr redusert tetteeffekt nær tunnel**

I utgangspunktet er fjellets sprekker og slepper fylt med vann. Injeksjonsmassen vil dels fortrenge vannet, dels blande seg med vannet slik at effekten reduseres. Masse med lavt v/c-forhold tåler mer utvanning før kvaliteten blir ødelagt. Dette er av ganske stor betydning da det er flere forhold som virker reduserende på massekvaliteten, som leirinnblanding, utvasking mv. Massekvaliteten kan ved spesielle bergforhold også bli forringet ved at massen blir utsatt for uttørking før avbinding.

Injeksjonstid og herdetid er gjennomgående de dyreste elementer ved injeksjon. Lavt v/c-forhold gir raskere trykkoppbygging mot sluttrykk og raskere avbinding.

Det er viktig å være klar over hvor mye masse som går med bare for å fylle injeksjons-hullene. Forutsatt en borhulldiameter på 51 mm, vil et hull romme ca. 3,7 kg injeksjonsmasse pr. løpemeter eller ca. 2,1 kg sement (v/c-forhold 0,75). Til å fylle et 25 m langt hull vil det gå med ca. 53 kg sement, og til å fylle 30 hull vil det da gå med tilsammen 1,6 tonn. Dette er masse som går med før effektiv injeksjon av bergets sprekkvolum starter. I avsnitt 6.4 er disse massene inkludert i totalmassene.

Der injeksjonhull skjærer berg med så høy konduktivitet at injeksjonstrykket vanskelig lar seg bygge opp, vil det være fare for at berg med lavere konduktivitet i hullet får minimal masseinnngang. Flere tiltak for å redusere stor inngang (avsnitt 6.1) kan resultere i at mindre sprekker blir tilstoppet i hullveggen og blir enda vanskeligere å tette. Dette er eksempel på at det er viktig å ha pumper som har høy mengdekapasitet ved høye trykk. I slike tilfeller er det spesielt viktig å tilstrebe så høye trykk som mulig, og hullene bør være relativt korte.

Det har vist seg fordelaktig å starte en injeksjonsrunde med å injisere sålehullene først. Deretter injiseres vegghullene og til slutt hullene i hengen. I tilfeller der det bores en ytre sperreskjerm mot dagen, bør det vurderes spesielt om denne skjermen skal injiseres før både hull i hengen og hull lenger nede i profilet.

Der det noteres god kommunikasjon mellom injeksjonshullene kan dette bety at det kan være riktig å bore relativt få injeksjonshull.

6.4 Mengde injeksjonsmasse

Masseinngang vil, ved siden av å være avhengig av injeksjonsmassens egenskaper, være direkte avhengig av injeksjonstrykk og pumpetid. Valg av injeksjonstrykk og pumpetid er i stor grad tilknyttet bergmassens egenskaper.

Sprekkevolumet vil i de fleste tilfeller representere en meget liten del av volumet i total bergmasse. Den del av sprekkvolumet som kan regnes som injiserbart er igjen vesentlig mindre enn opptredende sprekkvolum.

Forbruk av injeksjonsmasse i tofelts vegg-tunneler, eksempelvis profil T9, har vanligvis variert mellom 340 kg og 1750 kg, tilsvarende henholdsvis 200 kg og 1000 kg sement for hver løpemeter tunnel der injeksjon har vært utført. Det forutsetter da v/c-forhold lik 0,75 og egenvekt på injeksjonsmasse lik 1,75. Dersom influenssonen i injeksjons-sammenheng meget grovt anslås til 1000 m³ (ca. 18 m utenfor tunnelsentrum) vil beregnet volum av injisert masse utgjøre i størrelsesorden 0,2 ‰ til 1 ‰ av bergmassen. I realiteten er det grunn til å forvente at massen stedvis er transportert lenger bort enn 18 m fra tunnelsentrum. Dette er spesielt tilfelle der det bores lange injeksjonshull med stor vinkling ut fra tunnelaksen.

Under henvisning til avsnittet over kan det anslås teoretisk at godt berg inneholder injiserbart sprekkvolum lik 0,2 ‰, som i volum tilsvarer én gjennomsettende sprekk med sprekkåpning 0,2 mm pr. m³ berg. Likeledes kan det anslås at oppsprukket berg inneholder injiserbart sprekkvolum på 1 ‰, tilsvarende én gjennomsettende sprekk med sprekkåpning 1 mm pr. m³ berg.

De to angitte sprekkvolumer er ikke spesielt store. Dette betyr at det lett kan gå med betydelig større mengder injeksjonsmasse, for eksempel når berget er intenst oppsprukket og har åpne sprekker med lite fylling. Høy konduktivitet i bergmassen vil som oftest bety høyt forbruk av injeksjonsmasse.

Mengde injeksjonsmasse pr. hull må velges med omhu da masseforbruket i så stor grad varierer med bergforholdene. Også tetthetskriteriene vil ha stor betydning for hvor mye masse som bør pumpes inn.

Merk at betraktningen som nevnt bare tar med fjell 18 m ut fra tunnelsentrum. I praksis vil massen stedvis flyte lengre ut. Spesifikt injiserbart sprekkvolum vil imidlertid være mindre enn angitt, da de fleste sprekker vil inneholde sprekkfylling og i tillegg være mer eller mindre lukket (skjærbetinget brudd, etc.).

Under henvisning til avsnitt 7.3, forventes at bergmasse A) med åpne sprekker kan gi høyt masseforbruk, bergmasse B) med kanaltendens vil ha vesentlig mindre forbruk, og at bergmasse C) med meget beskjedent åpent sprekkvolum vil gi minst forbruk. Bergmasse D) vil kreve varierende mengder, fra meget store til meget små volum.

Der fjelloverdekningen er liten eller der det finnes nærliggende bergrom, er det av lett forståelige grunner mye opp til mannskapene hvor store masser som vil gå med.

7. INJEKSJONSSTRATEGI

Når best mulig injeksjonsopplegg skal utvikles i en tunnel, er det vanligvis riktig å ta utgangspunkt i et opplegg som innebærer tiltak som er i overkant av de som oppfyller gitte tetthetskrav.

De viktigste faktorer er: høyere hullantall, kortere hull, mer finkornet injeksjonsmasse - med bedre flytegenskaper

Avhengig av stedlige forhold kan andre faktorer være viktige. Når tilsiktet resultat oppnås kan opplegget forsøksvis forenkles.

Injeksjonsstrategien må alltid baseres på de stedlige forhold. Det som hovedsaklig er bestemmende for strategien er som følger:

- * **Krav til tetthet og tetthetskriterier**
- * **Fjelloverdekning**
- * **Bergmasseegenskaper (type A, B, C, D)**
- * **Oppsprekking (intensitet, orientering, åpning, fylling)**
- * **Svakhetssoner (knusningssoner, eruptivganger mv.)**
- * **Spenningstilstand**

7.1 Krav til tetthet og tetthetskriterier

Kravene er omtalt tidligere og er krav som skal oppfylles gjennom hele byggeperioden. Dersom kravene ikke kan oppfylles ved injeksjon alene, må andre metoder tas i bruk. Dette kan bety anvendelse av membranisolert utstøpning e.l. Der tunnelen skal drives i nærheten av setningsømfintlige byggverk eller andre installasjoner som er lett påvirkelig av grunnvannsdrenering, bør det vurderes å opprette system for vanninfiltrasjon og/eller vannoverrisling som ekstra sikring for å opprettholde poretrykket. Systemet bør opprettes før tunneldriften starter. Det kan stenges av dersom det viser seg at tettingen i tunnelen over tid er tilstrekkelig til å opprettholde grunnvannsnivå og poretrykk innen tillatte kriterier.

Da tetting som for eksempel membranisolert utstøpning i setningsømfintlige områder også nødvendigvis innebærer injeksjon som foreløpig tetting, er det lite trolig at dette kan konkurrere på tid og kostnader med injeksjon. Dette forutsetter at injeksjonen utføres så omfattende at metoden oppfyller tetthetskravene alene.

Som nevnt under kap. 3 har det vist seg at aktuelle tetthetskriterier har latt seg oppfylle forutsatt riktig utført forinjeksjon. Membranisolert utstøpning skulle da bare være aktuell der lekkasjeprobemene opptrer i fjell med så lav stabilitet at injeksjon ikke har tilstrekkelig stabiliserende virkning.

7.2 Fjelloverdekning

Fjelloverdekning er viktig for injeksjonsopplegget. Når fjelloverdekningen er mindre enn anslagsvis 10-20 m (varierer etter bergforhold og omgivelser) er det spesielt viktig at massesammensetning, borehullslengde og -mønster, masseinnngang og injeksjonstrykk vurderes fortløpende og justeres omgående i henhold til de erfaringer som kontinuerlig vinnes underveis. Det er også viktig å overvåke poretrykk og grunnvannsnivå kontinuerlig. Det er notert at det kan være sammenheng mellom utgang i dagen og plutselige poretrykksvariasjoner.

Masseinnngang og masseutbredelse kan kontrolleres med v/c-forhold, massesammensetning, injeksjonstrykk og injeksjonstid pr. hull. Dersom det er viktig å unngå masseutgang i dagen, må det jevnlig inspiseres visuelt. Ved meget liten fjelloverdekning må slik inspeksjon utføres kontinuerlig i dagen på utsatte punkter. Det kan også være riktig å variere injeksjonstrykk etter hullets beliggenhet. Sålehull kan for eksempel pålastes vesentlig høyere trykk enn hull i hengen. Ved injeksjon i fyllitt og minimal fjelloverdekning (ca. 4-6 m), foreligger eksempel på at det er injisert i sålen med opp til 65 bar, i hengen opp til 50 bar. Det er verdt å merke seg at så høye trykk kan anvendes også under ekstremt vanskelige forhold, og at slike trykk ofte er nødvendig for å oppnå et vellykket resultat.

Da massen alltid følger minste motstands vei, som oftest i retning opp mot dagen, vil det gjerne lønne seg å etablere en ytre skjerm mot dagen før hull under denne skjermen injiseres med økt trykksetting som beskrevet. Dette fordi motstanden som den ytre skjerm øver mot injeksjonen er en forutsetning for å oppnå høye trykk i underliggende hull.

Liten fjelloverdekning forutsetter:

restriksjoner på følgende punkter:

- * Hullengde
- * Injeksjonstrykk
- * Injeksjonstid pr. hull
- * Injeksjonsmengde pr. hull

økt innsats på følgende punkter:

- * Økt antall injeksjonshull
- * Omfattende observasjonsopplegg vedr. masseutgang i stuff og i dagen
- * Omfattende tilpasning av så lavt v/c-forhold som praktisk mulig, ev. tilsats av akselerator

Ved større fjelloverdekning er det gjennomgående riktig å anvende høyt trykk. Dette vil som regel si at injeksjon av hvert hull avsluttes med så høyt trykk som pumpa kan gi. Med stempelpumper som er på markedet i dag vil dette si ca. 100 bar. Forutsetningen er at utstyret forøvrig som slanger, koblinger, pakkere mv., kan ta trykket. Injeksjonsmassen må ha sammensetning som hindrer utskilling av vann. Likeså må fjellet på og ved stuff stadig observeres med hensyn til utgang og ev. nedsatt stabilitet. Det kan benyttes færre og lengre hull og lengre injeksjonstid pr. hull sammenlignet med injeksjonsopplegg der fjelloverdekningen er liten.

7.3 Bergmasseegenskaper

Bergmasseegenskaper er grunnleggende for valg av injeksjonsstrategi. Den følgende oppstilling gir en oversikt over de bergmasseegenskaper som er viktigst i injeksjons-sammenheng, samt typiske bergmasser der disse egenskapene er mest fremtredende. De opplistede bergmasseegenskaper er representert i hoveddelen av norsk berggrunn. Det antas å være mest relevant med en firedeling av bergmasseegenskapene selv om dette innebærer at en ikke får med absolutt alle forhold.

- **A)** Bergmasse med åpne sprekker uten vesentlig sprekkebelegg (sandsteiner, kvartsitter, samt Oslofeltets lavabergarter mv.).
- **B)** Bergmasse med sprekker belagt med sprekkefylling, og som har typisk tendens til kanaldannelse (prekambriske gneiser og andre tilsvarende metamorfe bergarter). Bergmassen utgjør hoveddelen av norsk berggrunn.
- **C)** Tette plastiske bergarter med høy grad av sprekkefylling og opptreden av små kanaler på sprekker (metamorfe sedimenter som leirskifre, fyllitter og glimmer-skifre samt grønnsteiner, grønnskifre mv.).
- **D)** Forskjellige bergmasser med tektonisk påvirkning eller karstfenomener som har ført til ekstrem åpen oppsprekking eller åpne rom i berget (bergmasse i sentrale og nordøstlige deler av Sør-Norge, kalkstein i Nord-Norge mv.).

Ad A: Dette er bergmasse som vanligvis er lett å injisere. Konduktiviteten er gjennomgående høy med lav motstand mot inntrengning av injeksjonsmasse. Forutsatt trygg fjelloverdekning, kan det bores lange injeksjonshull foran stoff, opp mot 35 m. Merk at ved så lange hull må det kontrolleres at boreavviket ikke er større enn akseptabelt for sonder- og injeksjonshull. Det kan benyttes få hull, ned mot 7-10 hull der forholdene er spesielt gunstige. V/c-forholdet bør tilstrebes lavt, ned mot 0,5. Det vil gjennomgående være riktig å anvende industrisement ved moderate tetthetskrav.

I lavabergarter kan sedimentære og forvitrede lag som ligger mellom lavalagene dels være ganske tette, dels vannførende. Disse horisontene kan være vanskelige å injisere og injeksjonen må da legges opp lokalt som for bergarter som er tyngre å injisere, se nedenfor. Også steiltstående svakhetssoner, gjerne kombinert med eruptivganger kan gi vanskelige forhold i lavabergartene. Disse sonene kan inneholde mye leire og føre mye vann hvilket kan resultere i tildels meget kompliserte injeksjonsarbeider. Under slike forhold er det meget viktig å operere med høyt trykk og lavt v/c-forhold. Det kan også være nødvendig å injisere flere omganger og benytte mikrosegment. Lavabergarter kan inneholde hulrom (gasslommer) med ganske store volumer som lokalt gir høyt masseforbruk.

Kvartsitter og sandsteiner har gjerne høy konduktivitet i tektonisk utsatte områder, men det finnes også eksempler på at svakhetssoner i slike bergmasser er så nedknust og finmalt at de er tilnærmet tette (eksempel Osa kraftverk). Sprekker og kanaler kan da være så fine at det er vanskelig å oppnå særlig masseinnngang. Det vil være riktig å operere med relativt høyt v/c-forhold. Injeksjonstrykket må være høyt.

Ad B: Dette er metamorf bergmasse, med gjennomgående tendens til leirromvandling og kanaldannelse i sprekkene. Leirinnholdet er for en stor del avhengig av tilstedeværelse av feltspat, spesielt alkalifeltspat. Bergmassen er middels lett å injisere. Da mengde sprekk-/sleppefylling med leire/silt/bergartsfragmenter varierer fra sted til sted, bør injeksjonsopplegget kontinuerlig tilpasses varierende fjellforhold. Leirmengden på sprekker og slepper øker vanligvis i nærheten av knusningssoner, hvilket betyr tettere bergmasse, men nedsatt injiserbarhet.

I vanlig grunnfjellsgneis foreslås hullengder mellom 15 og 30 m og hullantall 15-40 stk, forutsatt vanlig tunnelprofil. Forutsatt strenge tetthetskrav bør økende leirinnhold på slepper og sprekker bety redusert hullengde og økt hullantall. Avtakende leirmengde kan bety at hullengden kan økes og hullantallet reduseres.

Under bergforhold med mye leire på sprekker/slepper vil et vellykket resultat nesten alltid være avhengig av at det benyttes så høyt trykk som mulig, vanligvis vil dette si det pumpene kan mobilisere, ca. 100 bar ved avslutning av injeksjon. Dette for å oppnå kommunikasjon mellom injeksjonshull, kanaler og annet sprekkvolum. Det anbefales å prøve med v/c-forhold varierende mellom 0,9 og 0,5. I praksis betyr dette reduksjon av vanninnhold inntil det går for mye ut over flytegenskapene. Etter innledende injeksjon med v/c-forhold ca. 0,9; anbefales reduksjon av v/c-forhold mot 0,5 til injeksjonstrykket øker til 60-80 bar. Injeksjonen kan pågå ved dette trykknivå over et tidsintervall som er tilpasset bergforholdene, til avslutning med trykkoppbygging til ca. 90-100 bar. Det kan være riktig å benytte industrisement og/eller mikrosegment. Bergets motstand mot inntrengning av masse og restlekkasjer i injisert berg vil indikere nødvendig finhet på sementen.

Grunnfjell kan være gjennomslått av åpne sprekker som kan gi store lekkasjer ned til 200-300 meters dyp. Eksempler er Borgund kraftverk i Lærdal, Osa kraftverk, Dokka kraftverk, Kjela kraftverk og Øvre Otta kraftverk. Sprekkene som ga lekkasje på disse stedene var utvaskete kalkspatslepper.

Ad C: Bergmassen har gjennomsnittlig lav konduktivitet og er ofte meget vanskelig å injisere. Da sprekker og slepper gjennomgående er ganske lukket og leirinnholdet høyt, vil det gjerne dannes små kanaler i varierende antall. Dette kan resultere i små og ganske mange lekkasjer i tunnelen, gjerne i forbindelse med opptreden av små og større svakheter. Det vil gjennomgående være vanskelig å treffe kanalene og oppnå kommunikasjon mellom borehull og kanaler med sonder- eller injeksjonshull. Dette understreker nødvendigheten av høyt hullantall under sonderboring og injeksjon, relativt korte hull og anvendelse av høyt trykk, mot maksimaltrykk ved avslutning av injeksjonsrunden. Også her foreslås v/c-forhold 0,9 som utgangspunkt, men reduksjon av v/c-forholdet må gjøres mer forsiktig enn for bergmasse B) for å opprettholde inntrengning og flytegenskapene. Anbefalt masse vil vanligvis være mikrosegment.

Ad D: Bergmassene har gitt tildels store lekkasjer inn i tunneler og bergrom, noen steder ekstreme vanninnbrudd. Dette er hovedårsaken til at det ble vanlig å sondebore foran stoff fra tidlig på 1970-tallet i tunneler der fallet på tunnelsålen ikke ga selv-drenering. Ekstreme lekkasjeforhold har etter hvert blitt temmet ved hjelp av en mengde improvisasjoner. Det har blitt benyttet alt fra vanlig injeksjonsmasse, inklusiv mauringsmateriale, til betong med grovt tilslag, sagflis og høvelspon samt deler av skumgummimadrasser for å stoppe lekkasjene. I de fleste tilfeller har en lyktes med å tette berget. Suksess har gjennomgående vært betinget av at lekkasjene har blitt påvist foran stoff slik at tettearbeidene kunne planlegges og utføres før tunnelen ble drevet inn i lekkasjesonene.

Vi skal ikke anbefale noe spesielt tettemateriale her, men nevne at en ved store vannlekkasjer gjennomgående har lyktes bra med å pumpe inn betongmasse med sammensetning og grovhet på tilslaget som er tilpasset sprekkevidden og bergforholdene. Avslutningsvis vil det ofte være riktig å benytte sementbasert injeksjonsmasse med kornstørrelse avhengig av angitte tetthetskrav.

Erfaringsmessig har det vist seg at det kan oppstå store vannlekkasjer og vanninnbrudd i bergmasse både under og over de store skyvesonene i Sør-Norge. Likeså finnes flere eksempler på at det i det sydnorske grunnfjell opptrer åpne, gjennomsettende, vertikale sprekker som har resultert i store vanninnbrudd (se eksempler under B, forrige side). Disse fenomenene kan også opptre med 200 m til 300 m bergoverdekning. Karstfenomener for eksempel i Nordland fylke er et kjent begrep.

7.4 Oppsprekking

Oppsprekking har stor betydning for konduktivitet og injiserbarhet. Åpne sprekker uten særlig leirinnhold gir god konduktivitet, dvs. store vannlekkasjer og liten injeksjonsmotstand. I dagen er sprekkeene gjennomgående åpne, men lukker seg gjerne med økende bergoverdekning. Dette bidrar til at konduktiviteten er vesentlig høyere i dagberget enn dypere nede. Erfaringsmessig er det oftest de steiltstående sprekkeene som er mest vannførende.

Leirfyllingsgrad av sprekkeene er avgjørende for konduktiviteten. Økende leirinnhold gir nedsatt konduktivitet og injiserbarhet. Total leirfylling av sprekkeene gir meget lav konduktivitet og ingen merkbare vannlekkasjer dersom innspenningen er god. Slike forhold betyr også minimal injiserbarhet, uten at dette har anleggsteknisk betydning da berget i utgangspunktet er tett.

Hoveddelen av berggrunnen i Norge har sprekker som er delvis fylt med knust fjell og leire. Dette er basis for utstrakt kanaldannelse i berggrunnen. Også grunnvannsstrøm og type tektonisk påvirkning vil være viktig i denne forbindelse. Det er i første rekke leirinnholdet som bestemmer tetthet i forbindelse med innlekkasje av moderate og små mengder vann. Inntrengning av sementmasse under sementinjeksjon vil også erfaringsmessig være mye avhengig av konsistensen av både knust fjell og leire i sprekkeene. Der-som sprekkefyllingens korngradering nærmer seg god filtergradering kan motstanden mot inntrengning av injeksjonsmasse bli stor. Det er viktig å understreke at sprekke-fylling inklusive leire kan variere mye både mht. sammensetning og mengde fra sprekkesett til sprekkesett.

Også sprekkeintensiteten har stor betydning for konduktiviteten i berget og lekkasjeintensitet inn i bergrom. Eksempelvis gir to like vannførende sprekker pr. m³ berg gjerne dobbelt så mye vann som én, osv. Det er verd å merke seg at sprekkeintensiteten i likhet med sprekkeåpning er høy i dagen, men at intensiteten vanligvis avtar nedover i berg-grunnen under dagfjellsonen.

Sprekkeorientering, sprekkeåpning og sprekkefylling har ved siden av topografi stor betydning for grunnvannsforholdene som igjen har betydning for vanntilførsel til bergmassene rundt tunnelen.

Ved boring av sonderhull og injeksjonshull er det utslagsgivende for resultatet at hullene skjærer de sprekker som er vannførende. Sprekker som er parallellorientert tunnelen gir ofte meget vanskelige forhold for tetting. Uten nitid sprekkekartlegging, riktig tettestrategi og kontinuerlig justering av boreopplegget på stuff vil en da vanskelig oppnå godt resultat.

7.5 Svakhetssoner

Svakhetssoner gir vanligvis spesielle hydrogeologiske forhold sett i forhold til omliggende bergmasse. Men bergmassens sammensetning, struktur og tektonikk er som regel bestemmende for svakhetssonenes hydrogeologiske egenskaper.

Typiske knusningssoner forekommer ofte i det norske grunnfjellet. Der nedknusing og kjemisk omvandling har kommet langt, hvilket ofte er tilfelle, er gjerne så store deler av sonematerialet omvandlet til leire at sonene vanligvis er tette. Slike soner vil derfor resultere mer i stabilitetsproblemer enn vannproblemer. Der sideberget til leirsoner er oppsprukket, kan sprekke være leirholdig og tette. Men sideberget kan også være oppsprukket uten særlig leirinnhold og kan da gi innlekkasjer. Dårlig utført injeksjon kan i slike tilfeller ikke bare medføre lekkasje problemer, men også medvirke til rasutvikling i selve leirsonen. Sideberget kan være vannførende på begge sider av en leirson, eller bare på den ene siden. Det er tydelig tendens til at berget vil være mest oppsprukket på oversiden av svakhetssoner som har fall vesentlig mindre enn 90°. Dette bidrar gjerne til at konduktivitet og lekkasjer inn i tunnelen vil være større i berget over sonene enn under.

Det er grunn til å være på vakt mot «fiederspaltetendenser», dvs. åpne vannførende strekksprekker i sideberget som tenderer å stå ca. 45° på hovedsonen. Fenomenet kan være lokalt, direkte tilknyttet sonen, men kan også være utbredt over avstander på flere hundre meter eller flere kilometer, gjerne mellom store forkastningssoner.

Det er flere eksempler på at når tunneldriften nærmer seg store knusningssoner vil leirinnholdet i sprekke øke og lekkasjene i bergmassen avta. Inn mot sonen, og i selve sonen, kan berget bli så tett at det støver av urørt røys lenge etter at salven er skutt. Typiske eksempler er flere undersjøiske tunneler i prekambrisk gneis ved Rafnes og Kårstø. Berget var en del vannførende på tunnelstuffedene på vei ned under fjordene, men da stuffedene nærmet seg de store forkastningene under fjordene ble berget leirholdig og tett.

Svakhetssoner i andre bergarter, for eksempel i Oslofeltets eruptivbergarter som larvikitt, drammensgranitt mv., inneholder vanligvis høyere andel knust berg og mindre leire enn grunnfjellets store forkastningssoner. Denne typen sonemateriale opptrer i både steiltstående og tilnærmet horisontalorienterte soner. Dette betyr som regel høyere konduktivitet og større vannlekkasjer enn i grunnfjellets svakhetssoner, og er igjen forhold som kan bety vanskelige injeksjonsarbeider.

Eruptivganger betyr også endrete hydrogeologiske forhold i forhold til omliggende berg. I Oslofeltets sediment- og eruptivbergarter opptrer tallrike eruptivganger, bl.a. diabas og syenittganger. Ofte er disse gangene eller sidefjellet så vannførende at det har vært nødvendig å utføre injeksjonsarbeider. Der tetthetskravene har vært strenge har tette-arbeidene vært meget omfattende. Se også beskrivelse for bergmasse A) under avsnitt 7.3.

7.6 Spenningstilstand

Bergets spenningstilstand har betydning for bergmassens konduktivitet og egenskaper mht. injeksjon. Vanligvis er fjellet nær dagen lite innspent og har åpne sprekker. Dette bidrar til god konduktivitet. Innspenningen øker raskt mot dypet for hver meter fjell-overdekningen øker. Allerede på 100 m dyp vil spenningene, dersom de i det vesentlige avhenger av overlagingen, ha vokst til nærmere 3 MPa. På 200 m dyp vil spenningen være tilnærmet det dobbelte. Dette er en viktig årsak til at konduktiviteten vanligvis avtar fra dagen og ned mot dypere nivåer. Det skal understrekes at også andre egenskaper i berget kan ha innvirkning på konduktiviteten som tidligere beskrevet.

Mot dypet tenderer spenningsbildet mot hydrostatisk spenningstilstand, dvs. at spenningene blir like i alle retninger. Dette betyr også at normalspenningene på sprekkeplaner blir like store uansett sprekkeorientering. At spenninger og sprekkekarakter øker mot dypet har betydning for injeksjonsstrategien, det vil si antall og lengde av hull, v/c-forhold, injeksjonstrykk mv.

Det kan også opptre høye spenninger i dagberget som er geologisk (regionale spenninger e.l.) eller topografisk betinget. Ofte er da spenningstilstanden anisotrop, som fører til at sprekkeplaner er pålastet forskjellig normalspenning, avhengig av sprekkeorientering. Dette fører gjerne til at sprekkeplaner har forskjellig åpning. Injeksjonsmasse kan da fylle opp et sprekkesett ved et gitt injeksjonstrykk, mens andre sprekkesystemer som er mer innspent krever høyere trykk for å bli tettet. Sluttrykk under injeksjon bør da være så høyt at alle sprekkesystemer enten blir fylt med injeksjonsmasse eller blir komprimert slik at tilsiktet tetthet oppnås i alle retninger. Under injeksjon kan dette avdekkes ved at masseinngangen øker markant ved forskjellige trykknivåer. Selv berg med mye leire på sprekker/slepper kan ha høy konduktivitet dersom innspenningen er lav. Det kan være tilfelle nær dagen, men det er langt fra noen regel at dagfjell med høyt leirinnhold har åpen struktur og er lett mottagelig for injeksjonsmasse.

Selv om det hører med til unntakene skal det gjentas her at det er påtruffet åpne vannfylte sprekker på dyp ned til 200 m og mer. Dette vitner om lave spenninger i retning normalt på sprekkeplanet.

8. HMS

HMS er en viktig del av injeksjonsarbeidene. Vanlige arbeider som tunneldriving og bergsikring skal ikke berøres her, kun de arbeider som er spesielle for injeksjon.

Det skal foreligge brukerveiledning for det utstyr som benyttes. Det må påses at pumper og det utstyr som benyttes i tilknytning til pumpene (pakkere, slanger, koblinger osv.) er dimensjonert for pumpenes designtrykk. Kun injeksjonsmiddel som er godkjent av byggherren, dvs. offentlige helse- og forurensingsetater, må benyttes. Det kreves at eget HMS datablad er tilgjengelig på anlegget for alle injeksjonsmidler. Det må spesielt påses at disse også er kjent for de som utfører arbeidene.

Personlig verneutstyr skal være i bruk i henhold til instruks.

Når injeksjon pågår skal det være fjellteknisk ekspertise på stuff som kan bedømme forandringer i berget og stabilitet på og bak stuff som blant annet forårsakes av injeksjonsarbeidene. Er det mulighet for at stabiliteten i tunnelen kan påvirkes i uheldig retning av arbeidene, bør det påføres fiberarmert sprøytebetong på og eventuelt ved stuff før injeksjon igangsettes. Sprøytebetongen observeres kontinuerlig for sprekker som gir forvarsel om nedsatt stabilitet under arbeidene.

Det må observeres fortløpende at det ikke oppstår lekkasjer på utstyr eller ved pakker i injeksjonshull. Likeså må pakker overvåkes kontinuerlig for å notere om denne forskyves ut av hullet. Dersom dette er tilfelle, må injeksjonen avbrytes og lekkasjer utbedres. Er det nødvendig, må pakker plasseres lenger inn i hullet eller forankres i stoffen. Pakker bør i utgangspunktet plasseres minst 2 m inne i hullet, i meget godt fjell kan plassering tillates noe lenger ute. Det kan også bli nødvendig å skifte pakker, montere dobbeltpakker, eller montere pakker i innstøpt rør mv. Vanligvis vil det la seg gjøre å planlegge stoffdriften slik at berget er av bra kvalitet ved stuff der pakkerne skal plasseres.