

nr. 104

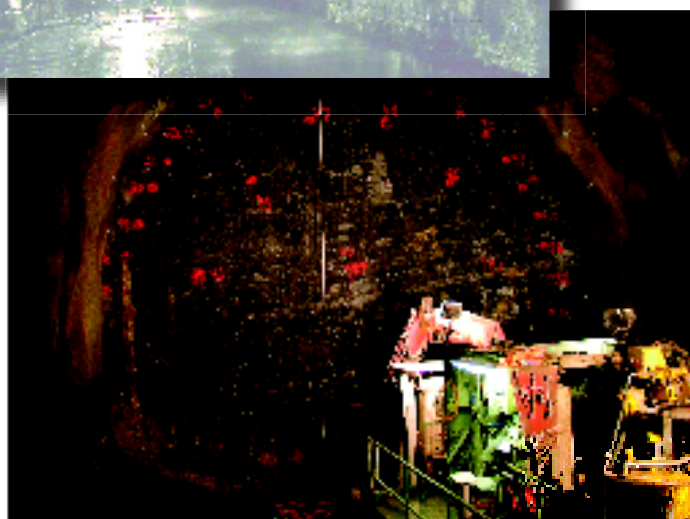
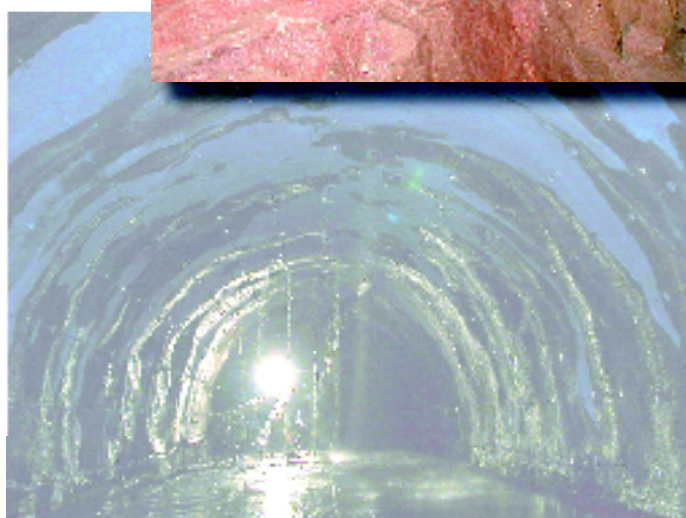
Publikasjon



Statens vegvesen

MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE
TUNNELER

Berginjeksjon i praksis



Teknologiavdelingen

Publikasjon nr. 104



Berginjeksjon i praksis

Bjørn Helge Klüver
Vegdirektoratet

Alf Kveen
Vegdirektoratet

Omslagsdesign: *Svein Aarset, Oslo*
Forsidebilder: *Helge Hamar, Region Øst og Alf Kveen, Teknologiavdelingen*
Fagskisser: *Bjørn Helge Klüver, Teknologiavdelingen*
Produksjonskoordinator: *Helge Holte, Teknologiavdelingen*
Trykk: *Lobo Media AS, Oslo*
Opplag: 1000

Forord

Miljø- og samfunnstjenlige tunneler er et forsknings- og utviklingsprosjekt som har samlet store deler av tunnelbransjen i Norge til felles innsats for å heve kompetansen for å unngå utilsiktet grunnvannssenkning i forbindelse med tunnelbygging.

Arbeidet har foregått i tre delprosjekter: Forundersøkelser
Samspill med omgivelsene
Tetteteknikk.

Prosjektet har hatt en enestående mulighet til å prøve ut og sammenligne en rekke nye metoder, utstyr og teknikker parallelt med bygging av utvalgte tunneler. I tillegg er erfaringer fra både grunnundersøkelser og tetting av gjennomførte anlegg samlet inn og evaluert.

Vi har med de nye metodene mulighet for å få ut mer presis kunnskap om grunnforhold og om sårbare naturtyper. Dette gjør at vi kan sette inn de nødvendige tiltak i forhold til tetting av tunnelen og anvende riktig metode, utstyr og kompetanse. Resultatene fra prosjektet utgjør et viktig grunnlag for optimal planlegging, prosjektering og gjennomføring av tunnelprosjekt, i forhold til grunnvann- og poretrykkskontroll.

Resultatene fra arbeidet er utgitt i en egen rapportserie og er sammenfattet i følgende fem publikasjoner:

Publikasjon nr. 101: Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg

Publikasjon nr. 102: Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport

Publikasjon nr. 103: Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø

Publikasjon nr. 104: Berginjeksjon i praksis

Publikasjon nr. 105: Miljø- og samfunnstjenlige tunneler – Sluttrapport.

Denne publikasjonen (nr. 104) gir retningslinjer for effektiv og sikker tetting av tunneler med berginjeksjon.

Styret i bransjeprojektet består av følgende firmaer:

Statens vegvesen (prosjektledelse)
Jernbaneverket (prosjektformann)
Norges forskningsråd, NFR
NCC AS
Selmer Skanska AS
Veidekke ASA
Norconsult AS
Norges geologiske undersøkelser, NGU
Norges Geotekniske Institutt, NGI
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU.

I tillegg har følgende bidratt:

Norsk vandbyggningskontor, NVK AS
SINTEF Bygg og miljø
NOTEBY AS
GeoVita AS
Aquateam - Norsk vannteknologisk senter AS
Norsk institutt for naturforskning, NINA
Jordforsk
Geoteknisk Spiss-Teknikk AS
Nick Barton & Associates Rock Engineering
Geomap AS
Rockma
Samferdselsetaten i Oslo.

Teknologiavdelingen, januar 2004

Sammendrag

Det er i prosjektet funnet at det er fullt mulig å gjennomføre teknisk kompliserte tunnelanlegg med full kontroll på grunnvannet. Det kan gjøres med systematisk sementbasert injeksjon. I de senest drevne vellykkete og godt dokumenterte vegg-tunnelene Storhaug, Hagan og T-banetunnelen ved Tåsen er injeksjonene foretatt på en spesiell måte, som her kalles ”aktiv injeksjon”. De undersøkte tunnelene dekker et vidt spekter av vanskelighetsgrad og bergarter.

Aktiv injeksjon kjennetegnes ved en kontinuerlig trykkoppbygging og at det tilstrebes så høyt sluttrykk som forholdene på stedet tillater, opptil 100 bar. Trykkoppbyggingen i hvert hull skal være jevnt stigende og styres med å variere vann/sement-forholdet (v/c-forholdet). Det tilstrebes så lavt vann/ sementforhold som mulig slik at tilsiktet masseinnngang oppnås i bergmassen i nærheten av bergrommet, uten at det går for mye ut over masseinntregningen. Lavt v/c-forhold forårsaker økt trykkfall pga. økt kohesjon og friksjon i massene, i forhold til strømning av tynnere masser.

Metoden forutsetter aktiv styring/oppfølging av hvert injeksjonshull, med kontinuerlig overvåkning og reduksjon av v/c-forholdet. Reduksjon av v/c-forholdet skal også gi så stort trykkfall ut i fra hull og nærliggende bergmasse at utilsiktet massetransport (og masseforbruk) til omgivelsene reduseres og skader på nærliggende arealer og byggverk unngås. Det anbefales under de første injeksjonsrundene å starte med mange hull, også i stuff og vurdere resultatene før man reduserer antall hull. Skjermgeometrien må kjøres inn etter de stedlige forhold for å få til injeksjonsresultater som er optimale.

Planlegging av forinjeksjon 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, poretrykk, grunnvannsnivå, omgivelser og hvilke lekkasjekriterier som gjelder. Tillatt innlekkasje er alltid en funksjon av tillatt senkning av grunnvannsstanden.

Forinjeksjon må alltid baseres på de stedlige forhold og kan i dag oppfylle alle gjeldene krav til tetthet. Det som hovedsaklig er bestemmende for en vellykket injeksjon er avhengig av at det blir et vellykket samspill mellom de enkelte faktorene i injeksjonsarbeidet. Berginjeksjon er et erfaringsbasert fag.

Kontrakten mellom byggherre og entreprenør skal være et hjelpemiddel til å få utført injeksjonen i forhold til kravene. Det er viktig at den utformes slik at den har et incitament for å få injeksjonsarbeidet vellykket. Det er viktig å skille tid og materiale.

Bergmasseegenskaper er grunnleggende for valg av injeksjonsstrategi. Det innføres en firedeling av bergmassen: A, B, C, D og de opplistede bergmasseegenskaper representerer hoveddelen av norsk berggrunn. Vann og injeksjonsmasse i berg beveger seg i sprekker eller kanaler. Injeksjonsmassen og vannet vil alltid ta minste motstands vei. Konduktiviteten i bergmassen vil være påvirket av sprekkeintensitet og retning, antall sprekkesett, konsistensen av både knust fjell og leire i sprekke- og spenningstilstanden. Det er viktig å understreke at sprekkefylling inklusive leire kan variere mye både mht. sammensetning og mengde fra sprekkesett til sprekkesett.

Bergets spenningstilstand har betydning for bergmassens konduktivitet og egenskaper mht. injeksjon. Bergoverdekning er viktig for injeksjonsopplegget. Når overdekningen er mindre enn anslagsvis 10–20 m (varierer etter bergforhold og omgivelser) er det spesielt viktig at v/c-forhold, massesammensetning, borehullslengde og -mønster, masseinngang og injeksjonstrykk vurderes fortløpende og justeres omgående i henhold til de erfaringer som kontinuerlig vinnes underveis.

Masseinngang er ved siden av geologiske egenskaper til berget avhengig av injeksjonsmassens sammensetning, injeksjonstrykk og pumpetid og injeksjonsskjermens geometri.

Det er i den senere tid utviklet nye injeksjonsrigger med datastyring av injeksjonsblandingen. Disse er gjerne utstyrt med 2–3 separate linjer og blandekar. Massen kommer i store sekker som fylles i silo på injeksjonsriggeren. Det er en meget positiv utvikling som sikrer at injeksjonsarbeidet blir optimalt og dokumenterbart. Pumpene må kunne gi 100 bars trykk og levere nok masse under injeksjonen.

Innhold

1 Innledning.....	7
2 Grunnvannsstand – vannlekkasjer.....	9
3 Injeksjon	10
3.1 Krav til tetthet og tetthetskriterier	11
3.2 Kompetanse.....	11
3.3 Kontrakt	12
4 Bergmasseegenskaper	13
4.1 Bergarter	13
4.2 Oppsprekking.....	17
4.3 Svakhetssoner.....	18
4.4 Spenningstilstand	19
4.5 Bergoverdekning.....	19
5 Aktiv injeksjon	21
5.1 Injeksjonstrykk.....	22
5.2 Injeksjonsmasse	23
5.3 Mengde injeksjonsmasse.....	26
5.4 Injeksjonsskjerm	26
5.5 Utstyr	28
6 Mauring	29
7 Eksempler på praktisk berginjeksjon	31
7.1 Injeksjon i tunnel med liten bergoverdekning under overliggende bebyggelse	31
7.2 Tunneler med moderat og stor bergoverdekning	34
7.3 Injisering av vannførende soner på store dyp	35
7.4 Sjakter.....	36
7.5 Haller/store tverrsnitt	37
8 Helse, miljø og sikkerhet (HMS)	39
9 Referanser.....	40
Vedlegg A: Teoretisk og empirisk forståelse av forinjeksjon (av Nick Barton).....	42
Vedlegg B: Tabell over forbruk av masse i forskjellige tunneler	59

1 Innledning

Innholdet i publikasjonen er et resultat av erfaringer fra injeksjonsgruppen (delprosjekt C: Tetteteknikk) i prosjekt "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler". Teksten har sitt utgangspunkt fra Klüver 2000; Berginjeksjon og fokuserer på geologiske og injeksjonstekniske parametere og samspillet mellom disse. Rapporten representerer flere tiårs erfaringer fra injeksjonsarbeider i tunneler og bergrom innen sektorene veg og jernbane, olje og gass samt vannkraftutbygging. Prosjektet har vært med på å revidere Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikks Håndbok nr. 1: Berginjeksjon.

Den senere tid har det vært drevet tunneler under sårbare naturområder og under bebyggelse med lite eller meget liten bergoverdekning med til dels store negative konsekvenser. Det har aktualisert behovet for videreutvikling av injeksjon. Leverandører har de seneste år har utviklet mer finkornete sementer, mikrosilika og bedre plastiserende stoffer. I regi av Miljø- og samfunnstjenlige tunneler har en optimalisert og videreutviklet injeksjonsmetodikken. Begrepet *aktiv injeksjon* innføres her med en konkret beskrivelse av metoden for berginjeksjon som gir størst teknisk/økonomisk sikkerhet med hensyn til gjennomføring og å oppnå krav til innlekkasje.

Metoden bygger på at trykkoppbygningen i hvert hull aktivt styres ved kontinuerlig overvåking og styring av vann/semntforholdet (v/c-forholdet). Trykkoppbygningen i hvert hull skal være jevnt stigende fra stedlig poretykk til opp mot 100 bar, for å sikre inntrengning av masse; v/c-forholdet tilstrebes så lavt som mulig for å oppnå et enda mer markant trykkfall ut i bergmassen, enn det som er vanlig for derved å unngå skader på omgivelser og unødvendig masseforbruk.

Metoden har fått sitt gjennombrudd og er dokumentert av prosjektet i flere tunneler hvor en har hatt strenge krav til innlekkasje, liten bergoverdekning og en har klart innlekkasjekravene med sementbasert forinjeksjon. Tunnelene er drevet i forskjellige bergarter som fyllitt, syenitt og skifer/knollekalk.

I denne rapporten vil kun sementbasert injeksjon foran stuff kalt forinjeksjon bli beskrevet. Erfaringer viser at injeksjon bak stuff, ofte kalt etterinjeksjon, er lite effektiv og frarådes. Med sementbasert masse menes masse bestående av sement, microsilica, plastiserende stoff og vann. Det skilles mellom systematisk forinjeksjon og sporadisk injeksjon, men prinsippene er de samme for begge tilfeller. Sporadisk injeksjon er vanskeligere å få til og det er en fare for å gå for langt mot vannlekkasjen før en begynner injeksjonen.

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 på grunn av bedre inntrengning og fylling av sprekke.

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 med vann- og frostsikringsinstallasjoner.

Nick Barton (Barton 2003) har utarbeidet det teoretiske grunnlaget som støtter oppunder aktiv injeksjon og hvordan væsker strømmer i sprekkeplan og kanaler i berg. Det er demonstrert at disse åpningene er følsomme for forandringer i effektiv normalspenning på grunn av høytrykksinjeksjon (se vedlegg A).

Kvalitet og kostnader på injeksjonsarbeider er avhengig av erfaring og kunnskaper hos de mannskaper som utfører arbeidene. Injeksjonskostnadene utgjør en stor del av byggekostnadene og kan bli større enn nødvendig ved dårlig gjennomføring av arbeidet.

2 Grunnvannsstand – vannlekkasjer

Planlegging av forinjeksjon 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, poretrykk, grunnvannsnivå, omgivelser og hvilke lekkasjekriterier som gjelder. Tillatt innlekkasje er alltid en funksjon av tillatt senkning av grunnvannsstanden. Videre planlegging av forinjeksjonen må omfatte de tiltak som må iverksettes for å begrense vannlekkasjene i henhold til krav, se Karlsrud et al. (2003).

Senkning av grunnvannsnivå vil for det ytre miljø føre til:

- 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.

Det er 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 igangsettes så tidlig at relevante data foreligger tidlig i planleggingsfasen. Dataene må også dekke nedbørsvariasjoner og sesongvariasjoner. Målingene bør igangsettes minst to år før anleggsstart, helst flere år i forveien. Det vises også til Norges geologiske undersøkelses landsomfattende nett av grunnvannsbrønner med måling av grunnvannsnivå og temperatur.

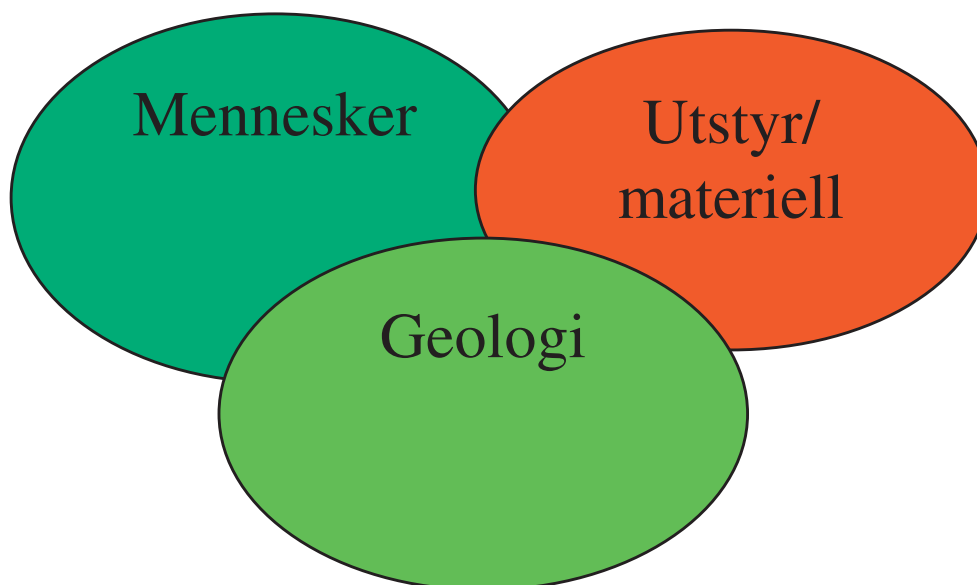
Tetthetskrav angis vanligvis på bakgrunn av hydrologisk og hydrogeologisk utredning tidlig i prosjekteringsfasen. Den hydrogeologiske utredningen bør i praksis utarbeides i to trinn. Alle tunnelprosjekter bør utrede de hydrologiske forholdene. Første trinn utarbeides på grunnlag av en hydrologisk utredning og geologisk befarings i det aktuelle området. Hvis det viser seg nødvendig på grunn av sårbar natur eller setningsproblematikk, skal rapporten inneholde blant annet anbefalt program for prøveboringer inklusive testprogram (pumpeforsøk osv.) for å frembringe data for bergmassens hydrogeologiske egenskaper. En mulig tolkning av disse forsøk er oppsummert i vedlegg A etter Snow (1968) og Barton (1985, 2003).

3 Injeksjon

Forinjeksjon må alltid baseres på de stedlige forhold og det er i dag mulig å oppfylle alle gjeldene krav til tetthet.

Det som hovedsaklig er bestemmende for en vellykket injeksjon er avhengig av at det blir et vellykket samspill mellom de enkelte faktorene:

- Krav til tetthet og tetthetskriterier (kap. 3.1)
- Kompetanse (kap. 3.2)
- Kontrakt (kap. 3.3)
- Geologiske parametere (kap. 4)
 - Bergmasseegenskaper (type A, B, C, D) (kap. 4.1)
 - Oppsprekking (intensitet, orientering, åpning, fylling) (kap. 4.2)
 - Svakhetssoner (knusningssoner, eruptivganger mv.) (kap. 4.3)
 - Spenningstilstand (kap. 4.4)
 - Bergoverdekning (kap. 4.5)
- Aktiv injeksjon (kap. 5)
 - Injeksjonstrykk (kap. 5.1)
 - Injeksjonsmassens egenskaper (kap. 5.2)
 - Mengde injeksjonsmasse (kap. 5.3)
 - Injeksjonsskjerm (kap. 5.4)
- Utstyr (kap. 5.5).



Figur 3.1 viser elementer det er viktig å få til et samspill mellom for å få til en vellykket injeksjon. Erfaringer og empiriske resultater er også viktige parametere.

3.1 Krav til tetthet og tetthetskriterier

Kravene skal oppfylles gjennom hele byggeperioden. Der tunnelen skal drives i nærheten av setningsømfintlige byggverk eller andre installasjoner som er lett påvirkelig av grunnvannsenkning/poretrykksfall, bør det vurderes å opprette system for vanninfiltrasjon og/eller vannoverrisling som ekstra sikring for å opprettholde poretrykket. Systemet bør opprettes før tunneldriften starter slik at det kan benyttes i byggeperioden, som er mest kritisk mht. å opprettholde poretrykket. Det stenges av når tettingen i tunnelen over tid er tilstrekkelig til å opprettholde grunnvannsnivå og poretrykk innen gitte kriterier. Prosjektet ved Wold Magnussen og Kveldsvik (2003) fraråder permanent vanninfiltrasjon.

Riktig utført injeksjon vil for de aller fleste tilfeller eliminere behovet for vannsikring med membranisolert utstøpning.

Som nevnt viser all erfaring at aktuelle tetthetskriterier lar seg oppfylle forutsatt at forinjeksjon er utført riktig. Utstøpning av lekkasjesoner skulle da bare være nødvendig der en trenger ytterligere stabilitetssikring av berget i tillegg til den økningen i stabilitet forinjeksjonen vanligvis vil ha gitt.

Vi foreslår det denne inndelingen av innlekkasjekrav for tunneler med tverrsnitt 8,5 meter:

Ekstremt strengt < 1–3 liter pr. minutt pr. 100 m tunnel

Strengt < 3–7 liter pr. minutt pr. 100 m tunnel

Middels strengt < 7–15 liter pr. minutt pr. 100 m tunnel

Moderate krav > 15 liter pr. minutt pr. 100 m tunnel.

Det må i tillegg utarbeides egne krav til innlekkasje ved enkeltsoner. Krav med hensyn på setningsømfintlige bygninger og naturmiljø må vurderes hver for seg. Inndelingen baserer seg på og hva som erfaringsmessig er mulig å oppnå i presisjon i injeksjonsresultat med hensyn på innlekkasjemålinger (Karlsruh et al. 2003, s. 73, figur 3.3).

Målingene gjelder ved systematisk injeksjon og vurderingen foretas på samlet innlekkasje fra neste injeksjonsskjerm.

3.2 Kompetanse

Berginjeksjon er et erfaringsbasert fag. Riktig kompetanse er viktig både under prosjektering, anbudsbeskrivelse og ikke minst under utførelse, for å få et optimalt resultat.

Det er viktig at det finnes nøkkelpersoner med nødvendige kvalifikasjoner i prosjektorganisasjonen og hos utførende. Dette gjelder for både konvensjonelle kontrakter og totalentrepriser. Det er særlig grunn til å understreke det ansvar byggherren har for planlegging og oppfølging av injeksjonsarbeider ved tunnelanlegg (Klüver 2000, Intern rapport 2131).

Byggeleder har vanligvis delegert dette ansvaret til byggherrens anleggsgjeolog på stuff, se kontraktsbestemmelsene som gjelder i dag. Det har stadig vist seg at det er en klar sammenheng mellom byggherren og andre involverte personers kvalifikasjoner, og kvalitet på injeksjonsarbeidene. Manglende kvalifikasjoner har medført at arbeider har blitt dårlig utført

eller mislykket. Arbeider har også blitt kostbare ofte med flere titalls millioner i unødvendige tap, pr. prosjekt. I tillegg har tid gått tapt og nærliggende miljø og byggverk blitt påført skader.

3.3 Kontrakt

Kontrakten mellom byggherre og entreprenør skal være et hjelpemiddel til å få utført injeksjonen i forhold til kravene. Det er viktig at den utformes slik at den har et incitament for å få injeksjonsarbeidet vellykket blant annet ved å skille tid og injeksjonsmateriale.

Viktige punkter i forhold til kontrakt er:

- Klargjør ansvarsforhold byggherre/entreprenør
- Sett krav til injeksjonsutstyr/linje: kvalitet, trykk, kapasitet, antall linjer, v/c-forhold som kan håndteres
- Benytt egne enhetspriser for injeksjonstid og masser
- Ved injeksjonsstopp for entreprenør, hvem betaler tapt tid og tetteproblemer?
- Opp og ned rigg må inkluderes i injeksjonstid, eventuelt regnes en time for opp og en for nedrigg
- Påbegynt injeksjonstid skal avsluttes, selv inn i fritid
- Klargjør hvilke masser og mengder som skal være på lager
- Klargjør oppgjørsform for ikke benyttede masser
- Klargjør bolteproblematikk. Lengde og gysing med hensyn på fare for punktering av skjerm
- Det må være lett for byggherre å variere injeksjonsopplegget med skjermgeometri inkl. antall/lengde borhull
- Det må utarbeides en prosedyre for samspill mellom byggherre og entreprenør.

Som grunnlag for utarbeidelse av anbudsdokumenter skal forventet prosedyre for injeksjon angis. Det vil si hullengder, 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 skjermer. 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- og frostsikring.

4 Bergmasseegenskaper

4.1 Bergarter

Bergmasseegenskaper er grunnleggende for valg av injeksjonsstrategi. Den følgende oppstilling gir en oversikt over de bergmasseegenskaper som er viktigst i injeksjonssammenheng basert på erfaringer fra tunnelanlegg i de siste 30 år, 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 (Klüver 2000).

Bergartstype A: Bergmasse med åpne sprekker uten vesentlig sprekkebelegg (sandsteiner, kvartsitter, samt Oslofeltets lavabergarter, syenitter, granitter mv.). Dette er bergmasse som vanligvis er lett å injisere. Konduktiviteten er gjennomgående høy med lav motstand mot inntrengning av injeksjonsmasse. Forutsatt nok bergoverdekning, kan det bores lange injeksjonshull foran stuff, opp mot 35–45 m og under gunstige forhold enda lengre. 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 i tunneler med tverrsnitt 8,5 m, der forholdene er spesielt gunstige. Vann/semest-forholdet (v/c-forholdet) bør tilstrebes lavt, gjerne ned mot 0,5 for å begrense uheldig utbredelse. Det vil gjennomgående være riktig å bruke industri-semest ved moderate tetthetskrav, men også ofte ved strenge krav på grunn av åpne sprekker.

I lavabergarter kan sedimentære og forvitrede lag som ligger mellom lavalagene dels være ganske tette, dels vannførende. Horisontene kan være vanskelige å injisere, og injeksjonen må da legges opp lokalt som for bergarter som er tyngre å injisere, se nedenfor. Også steilt stående svakhetssoner, gjerne kombinert med eruptivganger som syenitt og diabas, kan gi vanskelige forhold i både lavabergarter og sedimentar. Disse sonene kan dels være tette, der leirinnholdet er høyt og dels være vannførende og være meget vanskelig å tette, hvilket kan resultere i tildels meget kompliserte injeksjonsarbeider. Under slike forhold er det meget viktig å operere med mange injeksjonshull, høyt trykk og varierende v/c-forhold, men så lavt som forholdene tillater. Mikrosemest/mikrosilika vil ofte være nødvendige ingredienser.

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



Bilde 4.1 viser bergartstype A. Bildet er tatt ved Hagantunnelen, Gjelleråsen i Akershus (foto: Kveen).

Bergartstype 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. Det er metamorf bergmasse med gjennomgående tendens til leiomvandling og kanaldannelse i sprekken. Leirinnholdet er for en stor del avhengig av tilstedeværelse av feltspat, spesielt alkalifeltspat. Bergmassen er middels lett å injisere. Da mengde sprekke-/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 med nedsatt injiserbarhet.



Bilde 4.2 viser bergartstype B. Det er en grunnfjellsgneis tatt ved Ås i Akershus (foto: Kveen).

I vanlig grunnfjellsgneis foreslås hullengder mellom 15 og 30 m og hullantall 15–40 stk, forutsatt tunneltverrsnitt 8,5 m. Ved 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 det si det pumpene kan mobilisere (ca. 100 bar) ved avslutning av injeksjon. Dette for å oppnå kommunikasjon mellom injeksjonshull, kanaler og annet sprekkevolum. Det anbefales innledningsvis å prøve med v/c-forhold varierende mellom 1,2 og 0,9. Etter innledende injeksjon med v/c-forhold ca. 1,0 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 opptil 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 i sentrale deler av Syd-Norge kan være gjennomsluttet 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.

Bergartstype C: Tette plastiske bergarter med høy grad av sprekkefylling og opptreden av små kanaler på tynne sprekker (metamorfe sedimenter som leirskifre, fyllitter og glimmer-skifre samt grønnsteiner, grønnskifre mv.).



Bilde 4.3 viser bergartstype C. Bergarten er en av Oslofeltets skifre ved Sandvika (foto: Kveen).

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. Det 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 eventuelt med mikrosilika.

Bergartstype 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.). Bergmassene har gitt tildels store lekkasjer inn i tunneler og bergrom, noen steder ekstreme vanninnbrudd. Det er hovedårsaken til at det ble vanlig å sonderbore foran stuff fra tidlig på 1970-tallet i tunneler der fallet på tunnelsålen ikke ga selvdrenering.

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. Ekstreme lekkasjeforhold har etter hvert blitt temmet ved hjelp av en mengde improvisasjoner. Ofte er det brukt injeksjonsmasse inklusiv mauringsmateriale, se kapittel 6 om mauring. 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.

Erfaringsmessig har det vist seg at det kan oppstå store vannlekkasjer og vanninnbrudd i bergmasse både under og over de store skyvesonene i sentrale deler av 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 bergartstype B). Disse fenomenene kan også opptre ved 200–300 m bergoverdekning.

4.2 Oppsprekking

Vann og injeksjonsmasse i berg beveger seg i sprekker eller kanaler. Injeksjonsmassen og vannet vil alltid ta minste motstands vei. Konduktiviteten i bergmassen vil være påvirket av sprekkeintensitet og retning, antall sprekkesett, konsistensen av både knust fjell og leire i sprekke og spenningstilstanden. Det er viktig å understreke at sprekkefylling inklusive leire kan variere mye både mht. sammensetning og mengde fra sprekkesett til sprekkesett.

Åpne sprekker uten særlig leirinnhold gir god konduktivitet, dvs. store vannlekkasjer og liten injeksjonsmotstand. I dagen er sprekke gjennomgående åpne, men lukker seg gjerne med økende bergoverdekning. Det kan være andre spenningstilstander enn de gravitative som dominerer, se kapittel 4.4. Dette bidrar til at konduktiviteten oftest er vesentlig høyere i dagberget enn dypere nede. Erfaringsmessig er det oftest de steiltstående sprekke (> 55°) som er de mest vannførende.

Økende leirinnhold gir nedsatt konduktivitet og injiserbarhet. Stor grad med leirfylling av sprekke gir lav konduktivitet og minimale vannlekkasjer, dersom innspenningen er god. Slike forhold betyr også lav injiserbarhet uten at det trenger å ha anleggsteknisk betydning i forhold til vannlekkasjer, da berget kan være tett. Men økende leirinnhold betyr nedsatt stabilitet og behov for tyngre sikring. Hvis sprekkefyllingens korngradering nærmer seg god filtergradering, kan motstanden mot inntrengning av injeksjonsmasse bli stor.

Det er verd å merke seg at sprekkeintensiteten i likhet med sprekkeåpning er høy i dagen, men at intensiteten og sprekkeåpningene vanligvis avtar nedover i berggrunnen under dagfjellsonen.

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

4.3 Svakhetssoner

Svakhetssoner gir vanligvis spesielle hydrogeologiske forhold sett i forhold til omliggende bergmasse. Men bergmassens sammensetning, struktur og tektoniske påvirkning 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 sprekkene være leirholdig og tette. Men sideberget kan også være oppsprukket uten særlig leirinnhold og kan 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 leirsoner, eller bare på den ene siden. Det er en tydelig tendens til at berget vil være mest oppsprukket på oversiden av svakhetssoner som har fall vesentlig mindre enn 90°. Det bidrar gjerne til at konduktivitet og lekkasjer inn i tunnelen vil være større i berget over sonene enn under. Ukritisk tunneldriving gjennom tørt sidefjell og svakhetssoner gir fare for rasutvikling når stoffen kommer frem til vannførende berg på andre siden av svakhetssonen.

Det er grunn til å være på vakt mot «fiederspaltetendenser», dvs. åpne vannførende strekk-sprekker 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 opptil flere kilometer, gjerne mellom store forkastningssoner.

Det er flere eksempler på at når tunneldriften nærmer seg store knusningssoner, vil leirinnholdet i sprekkene øke og lekkasjene i bergmassen avta. Inn mot sonen, og i selve sonen, kan berget være 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 i Rogaland. Berget var en del vannførende på tunnelstoffene på vei ned under fjordene, men da stoffene nærmet seg de store forkastningene under fjordene ble berget leirholdig og tett og en kunne passere uten injeksjon

Svakhetssoner i andre bergarter som for eksempel i Oslofeltets eruptivbergarter, larvikitt, drammensgranitt osv. 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. Et eksempel er T-baneringen (Åndal 2001). Der tetthetskravene har vært strenge ved slike forhold, har tettarbeidene vært meget omfattende. Se også beskrivelse for bergmasse A i kapittel 4.1.

4.4 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 bergoverdekningen 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. Det er en viktig årsak til at konduktiviteten vanligvis avtar fra dagen og ned mot dypere nivåer. Mange steder i Norge er det de horisontale spenningene som dominerer, og da vil spenningsbilde være annerledes enn der det er rene overlagingsspenninger, se vedlegg A.

Mot dypet kan det være mer hydrostatisk spenningstilstand, dvs. at spenningene blir mer like i alle retninger. Det betyr at normalspenningene på sprekkeorientering. At spenninger øker mot dypet har betydning for injeksjonsstrategien det vil si antall og lengde av hull, v/c-forhold, injeksjonstrykk mv. Det er vanskeligere å få til hydraulisk splitting på store dyp på grunn av innspenningen.

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 sprekkeorientering. Dette fører gjerne til at sprekkeorientering. Dette fører gjerne til at sprekkeorientering. 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 (Barton 2003). 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/kanaler på dyp ned til 200 m. Det vitner om lave spenninger i retning normalt på sprekkeplanet.

4.5 Bergoverdekning

Bergoverdekning er viktig for injeksjonsopplegget. Er overdekningen mindre enn 10–20 m (varierer etter bergforhold og omgivelser), er det spesielt viktig at v/c-forhold, massesammensetning, borehullslengde og -mønster, masseinngang 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 av injeksjonsmasse i dagen og plutselige poretrykkvariasjoner.

Masseinngang 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 bergoverdekning 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 få høyere v/c-forhold og pålastes vesentlig høyere trykk enn hull i hengen. Ved injeksjon i fyllitt og minimal bergoverdekning (4–6 m)

foreligger eksempel fra Storhaug på at det er injisert i sålen med opp til 65 bar, i hengen opp til 50 bar (Pedersen og Iversen 2000). Det er verdt å merke seg at så høye trykk kan anvendes også under ekstremt vanskelige forhold dersom v/c-forholdet er lavt, og at slike trykk ofte er nødvendig for å oppnå et vellykket resultat.

Da massen alltid følger minste motstands vei kombinert med spenningsparallellell strømning 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. Det fordi motstanden som den ytre skjerm gir mot injeksjonen, er en forutsetning for å oppnå høye trykk i underliggende hull.

Liten bergoverdekning medfører:

restriksjoner på følgende punkter:

- * Hullengde
- * Injeksjonstrykk
- * Injeksjonstid pr. hull
- * Injeksjonsmengde pr. hull
- * høyt v/c-forhold må unngås pga. masseutbredelse

økt innsats på følgende punkter:

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

Ved større bergoverdekning er det gjennomgående riktig å anvende høyt trykk. Det 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 det si ca. 100 bar. Forutsetningen er at utstyret forøvrig som slanger, koblinger, pakkere mv., kan ta trykket. Injeksjonsmassen må ha en sammensetning som hindrer utskilling av vann. Likeså må fjellet på og ved stuff stadig observeres med hensyn til utgang og evt. nedsatt stabilitet. Det kan benyttes færre og lengre hull og lengre injeksjonstid pr. hull sammenlignet med injeksjonsopplegg der bergoverdekningen er liten.

5 Aktiv injeksjon

Prosjektet har funnet at det er fullt mulig å gjennomføre teknisk kompliserte tunnelanlegg med full kontroll på grunnvannet. Det kan gjøres med systematisk sementbasert injeksjon. I de senest drevne og godt dokumenterte vegtunnelene Storhaug og Hagan og T-banetunnelen ved Tåsen er injeksjonen foretatt på en spesiell måte, som her kalles ”aktiv injeksjon” (Boge et al. 2002, Andersson, H. 2003, Internrapport 2325, Åndal et al. 2001, Iversen og Pedersen 2000).

Aktiv injeksjon kjennetegnes ved en kontinuerlig trykkoppbygging og at det tilstrebes så høyt sluttrykk som forholdene på stedet tillater, opptil 100 bar. Trykkoppbyggingen i hvert hull skal være jevnt stigende og styres med å variere vann/sement-forholdet (v/c-forhold) Det tilstrebes så lavt v/c-forhold som mulig slik at tilsiktet masseinnngang oppnås i bergmassen i nærheten av bergrommet, uten at det går for mye ut over masseinntregningen. Lavt v/c-forhold forårsaker økt trykkfall pga. økt kohesjon og friksjon i massene i forhold til strømning av tynnere masser. Uttrykket er hentet fra (Aasen 2000, Vedlegg: Aktivitet A3 av Dr. ing Bjørn Buen).

Metoden forutsetter aktiv styring/oppfølging av hvert injeksjonshull, med kontinuerlig overvåking og reduksjon av v/c-forholdet. Reduksjon av v/c-forholdet skal også gi så stort trykkfall ut i fra hull og nærliggende bergmasse at utilsiktet massetransport (og masseforbruk) til omgivelsene reduseres og skader på nærliggende arealer og byggverk unngås.

Er forholdene i berget slik at trykket vanskelig lar seg bygge opp, må injeksjonen legges opp slik at dette blir mulig. Det 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, eller anvende akselerator, eller herder, eller tilsette mauringsmasse. Utformingen av skjermen med antall hull og lengder er viktige parametere å vurdere. Ved strenge krav til innlekkasje er det viktig å ikke gi seg før en har lyktes.

Aktiv injeksjon krever forståelse og fokus på følgende punkter:

- **bergets egenskaper (se kapittel 4)**
- **injeksjonstrykk**
- **injeksjonsmassens egenskaper**
- **utbredelse og inntrengning av injeksjonsmasse**
- **mengde injeksjonsmasse**
- **injeksjonsskjermens geometri og hullantall**
- **mauring.**

Avhengig av stedlige forhold kan også andre faktorer være viktige.

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 det som oppfyller gitte tetthetskrav for aktuell bergmasse. All injeksjon bør utføres på basis av prøve og feileprinsippet for å optimalisere injeksjonen underveis iht. vekslende bergforhold.

5.1 Injeksjonstrykk

Så høyt injeksjonstrykk som forholdene tillater, er en viktig forutsetning for å lykkes med aktiv injeksjon. Den vanligst forekommende feil ved injeksjonsarbeider foran stuff har vært at det har vært benyttet for lavt trykk og for høyt v/c-forhold. Trykkutviklingen i hvert hull styres ved å regulere injeksjonsmassens v/c-forhold. Tørr masse gir rask trykkstigning, vannholdig masse motsatt. Trykkstigning kan også skje uten redusering av v/c-forhold, i lavkonduktiv bergmasse. Ingen eller meget lav trykkøkning over tid, betyr oftest for høyt v/c-forhold. For rask trykkoppbygging betyr gjerne for lavt v/c-forhold som reduserer eller ødelegger hullets evne til å motta mer masse. På mange anlegg har det vært anvendt trykk ikke særlig høyere enn stedlig poretrykk pluss ca. 10 bar. Dette er vanligvis ikke tilstrekkelig for å oppnå vellykket aktiv injeksjon med åpning av sprekker og omlagring av spenningen i berget.

I praksis viser det seg forutsatt riktig v/c-forhold som ikke må være for høyt, at injeksjonstrykket avtar så mye med økende avstand fra injeksjonshullet at trykket i injeksjonsmassen sjelden vil kunne redusere stabiliteten i tunnelen vesentlig under forinjeksjon. (Barton 2003). Det forutsettes da berg av bra kvalitet og pakkerplassering tilstrekkelig langt inne i hullet (2 m) og vanlige tunnelprofiler med tverrsnitt 8,5 m e.l. Pakkerne i stuffhullene kan med fordel plasseres lengre inn ved systematisk injeksjon.

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. Med begrepet «hydraulisk splitting» menes her både utvidelse av eksisterende sprekker/slepper og etablering av nye sprekker. Barton (2003) kaller høytrykks forinjeksjon for en kontrollert sprekkeåpningsprosess, dvs. hydraulisk splitting ut fra en meget begrenset radius fra hvert hull. Injeksjonsmassen i borhullet vil i liten grad kommunisere med andre enn de påtrufne kanaler med mindre injeksjonstrykket er så høyt at det oppnås kommunikasjon mellom borhull og kanaler, og innbyrdes mellom kanalene/sprekkene. For å oppnå det bør det brukes så høyt trykk at det oppstår «hydraulisk splitting» i bergmassen ved hullet og gjennomtrengning av sprekkefylling mellom kanaler. Det anses som en grunnleggende forutsetning for å oppnå den tetthet som er oppnåelig ved avansert aktiv berginjeksjon. Der tetthetskravene er strenge som i setningsømfintlige områder er det lite sannsynlig at bruk av lavere trykk kan gi tilfredsstillende resultat uten unødvendig høyt forbruk av injeksjonsmasse.

I områder der konduktiviteten i bergmassen er meget høy for eksempel ved lav innspenning og opptreden av åpne sprekker med lavt leirinnhold, har det liten verdi å planlegge injeksjon med høye trykk innledningsvis. Ved siden av tiltak som reduksjon av v/c-forhold, akselerator-tilsetning, muring 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 få opp injeksjonstrykket ved å benytte lavt v/c-forhold i bergmassen nærmere tunnelen.

Når lekkasjevann forekommer i sonderhull eller andre hull, er dette beskjed om at berget fører vannmengder som er større enn registrert lekkasje. På bakgrunn av slik registrering og tidligere tilegnet lokalgeologisk kunnskap må strategien for sonderboring og injeksjon vurderes og eventuelt justeres. Vanntapsmålinger må utføres med forsiktighet der bergoverdekningen er liten og der vannstrømmen kan påvirke stabiliteten i overliggende løsmasser. Det gjelder også for vanninfiltrasjon gjennom borhull som er boret fra tunnelen eller dagen.

5.2 Injeksjonsmasse

Det er i «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» dokumentert at en kan klare seg med sementbasert injeksjon i alle tilfeller som prosjektet har undersøkt. De undersøkte tunnelene dekker et vidt spekter av vanskelighetsgrad og bergarter. Avhengig av bergartstype og tilstedeværelse av leire på sprekkene velges det type sement. Det har blitt vist i prosjektet at en klarer seg oftere med industrisement enn finhetsgraden til sementen skulle tilsi. Injeksjonsmassen skal først og fremst anvendes til tetting nærmest mulig tunnelen. Tetting av berget langt vekk fra tunnelen er bortkastet, og en bør tilstrebe å begrense fjerntransport av massen. Valg av type sement og tilsetningsstoffer avhenger av en rekke forhold (Åndal et al. 2001, Åndal 2001, Holm og Heimli. 2001, Internrapport 2235 og 2250).

Sementtypene som vanligvis benyttes til injeksjon kan deles i to kategorier, industrisement og mikrosegment. Innenfor hver type er det flere leverandører og underinndelinger i forhold til finhet og egenskaper. Injeksjonssement er ferskvare. Lagringsforhold og lagringstid påvirker sementkvaliteten. Særlig er det viktig for de mest finkornete sementtyper. Leverandører 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 mikrosegmenter oppfyller angitt finhet og ikke er for gamle.

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 v/c-forholdet til den faste delen av massen reduseres og inntrengningsevnen og med det tetteeffekten, avta tilsvarende. Gode flyteegenskaper har tradisjonelt vært oppnådd ved bruk av høyt v/c-forhold, dette øker imidlertid risikoen for separasjon i massen. Sementens finmalingsgrad og tildels dens mineralogi innvirker sterkt på hvor effektivt vannet bindes i injeksjonsmassen. Finmalt sement binder vannet bedre og sikrer bedre mot separasjon enn grovmalt sement. Effekten av ekstremt finmalt sement, (mikrosegment) er ikke bare at sementkornene trenger lettere inn i fine sprekker, men at homogeniteten i massen opprettholdes bedre ved økende trykk.

Mikrosilikastøv som i dag brukes i betong og ofte ved berginjeksjon, har betydelig innvirkning på bindingen av vannet i injeksjonsmassen, for å hindre separasjon. Støvet har ekstrem finhet, tilnærmet 1/100 av sementkorns størrelse. Mikrosilika har stor innvirkning på flyteegenskapene til injeksjonsmassen både i pumper og slanger, koblinger og bergmasse. Mikrosilika brukes vanligvis sammen med mikrosegment, men og sammen med industrisement.

I tillegg til sement, vann og eventuelt silikastøv, kan også enkelte vannreducerende tilsetningsstoffer brukes for å bedre massens flyteegenskaper uten bruk av mer vann. Fordi relativt hurtig avbinding er sterkt ønsket for injeksjonsmasse, benyttes fortrinnsvis SP-(superplastiserende)-stoffer på melaminbasis. En del av SP-stoffenes virkning er at de dispergerer partiklene bedre, dvs. skiller partiklene som opptrer i agglomerater til atskilte enkeltpartikler. I praksis medfører det 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 brukes i tillegg til SP-stoffer under spesielle forhold.

Herdetiden til injeksjonsmassen er først og fremst avhengig av temperaturen i berget. Lav temperatur sinker herdeprosessen, se tabell 5.1. Under 10 °C vil herdeprosessen gå tregt, og ned mot 0 °C vil prosessen gå meget tregt (Holm og Heimli 2001 b).

Sementens relative reaksjonshastighet (omtrentlige verdier) er gitt i tabell 5.1.

Tabell 5.1 viser sementens relative reaksjonshastighet med omtrentlige verdier.

5 °C	10 °C	20 °C	35 °C
0,3	0,5	1	2

Valg av masse

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 mikrosemeter) og høyt v/c-forhold; ca. 1,0–1,3. Gir det god inntrengning, reduseres v/c-forholdet gradvis, slik at trykket bygger seg jevnt opp mot 100 bar eller eventuelt høyere hvorved hullet avsluttes. Dersom masseinnngang ikke blir som tilsiktet, justeres massesammensetningen.

For bergmasse A, se kapittel 4, er det grunn til å prøve industrisement innledningsvis. Dersom inntrengningen ikke blir tilfredsstillende, kan mikrosilikatilsetning forsøkes. En kan også forsøke mikrosemeter med eller uten silika dersom industrisement ikke fungerer. For bergmasse B kan både industrisement eller mikrosemeter være riktig, avhengig av leirfylling, og sprekkestruktur for bergmassen med henholdsvis lite leire/åpen sprekkestruktur og berg med mye leire/lukket sprekkestruktur. For bergmasse C er det riktig å starte med mikrosemeter og sannsynligvis med mikrosilika i tillegg.

Vann/semeter-forhold

Transport av injeksjonsmasse i en gitt bergmasse er i hovedsak avhengig av injeksjonsmassens flyteegenskaper, inntrengningsegenskaper og trykkutvikling. Hvilken masseressept som gir best resultat er avhengig av stedlige forhold og bergkvalitet.

Høyt v/c-forhold bidrar til økt 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, det betyr redusert tetteeffekt nær tunnel
- unødvendig høyt masseforbruk
- fare for hydraulisk splitting/jekking (omgivelser).

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. Det 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 dyre elementer ved injeksjon. Lavt v/c-forhold gir raskere trykkoppbygging mot sluttrykk og raskere avbinding (Holm og Heimly 2001, Intern rapport 2235 og 2250, Bøge 2002).

Hovedårsaken til skadelig utbredt hydraulisk splitting eller jekking av berg mot dagen eller inn i bergrom er høyt v/c-forhold, kombinert med for høyt injeksjonstrykk. Med lavt v/c-forhold vil trykket avta så mye ut fra hullet at kun mindre sprekkeflater nærmest hullet blir påvirket av trykket (Barton 2003).

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



Bilde 5.1 viser utgang i dagen og er et eksempel på masse med for høyt v/c-forhold i forhold til overdekning og bergart (foto: Kveen).

5.3 Mengde injeksjonsmasse

Masseinnngang er ved siden av geologiske egenskaper til berget avhengig av injeksjonsmassens sammensetning, injeksjonstrykk og pumpetid og injeksjonsskjermens geometri. Både trykk og pumpetid kan i stor grad styres med v/c -forholdet som er bestemt ut fra tetthetskrav og bergmassens egenskaper. Med god flyt og høyt v/c -forhold som tidligere var vanlig, er det påvist at masse stedvis transporteres langt bort fra tunnelen og ønsket injeksjonssted.

Sprekkevolumet vil i de fleste tilfeller representere en meget liten del av volumet i total bergmasse. Den del av sprekkevolumet som kan motta masse, vil være vesentlig mindre enn opptredende sprekkevolum, men det økes lokalt rundt hullene på grunn av høyt trykk.

Eksempel på forbruk av injeksjonsmasse i vegtunneler med tverrsnitt 8,5 m har vanligvis variert mellom 340 kg og 1750 kg pr. løpemeter tunnel, tilsvarende henholdsvis 200 kg og 1000 kg sement for hver løpemeter tunnel der injeksjon har vært utført (se vedlegg B). Omregningene er basert på v/c -forhold lik 0,75 og egenvekt på injeksjonsmasse lik 1,75. Det kan gå med betydelig større mengder injeksjonsmasse, for eksempel når berget er intenst oppsprukket og har åpne sprekker med lite fylling, eller det brukes for høyt v/c -forhold. Det er injeksjonsmannskapenes evne til å regulere injeksjonsmassens flyt og vanninnhold som avgjør om masseforbruket blir unødvendig høyt.

I Hagantunnelen var masseforbruket lokalt oppe i 4–6 tonn pr. løpemeter tunnel i de mest oppsprukne partier av syenitten. I gjennomsnitt var masseforbruket i syenitten ca. 3,5 tonn pr. løpemeter tunnel. Det til tross for at det ble påvist at masseutbredelsen stort sett var begrenset under 10 m fra tunnelprofilen. Dette antas derfor å være nær øvre grense for spesifikt injisert sprekkevolum i aktuelle norske bergarter. Se vedlegg B.

Under henvisning til kapittel 4 om bergartstyper forventes at bergmasse A med åpne sprekker kan gi høyt masseforbruk, bergmasse B med kanaltendens vil ha varierende men vesentlig mindre forbruk, og at bergmasse C med meget beskjedent åpent sprekkevolum vil gi minst forbruk. Bergmasse D vil kreve varierende mengder, fra meget store til meget små volum.

Det er også viktig å være klar over hvor mye masse som går med bare til å fylle injeksjonshullene. 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).

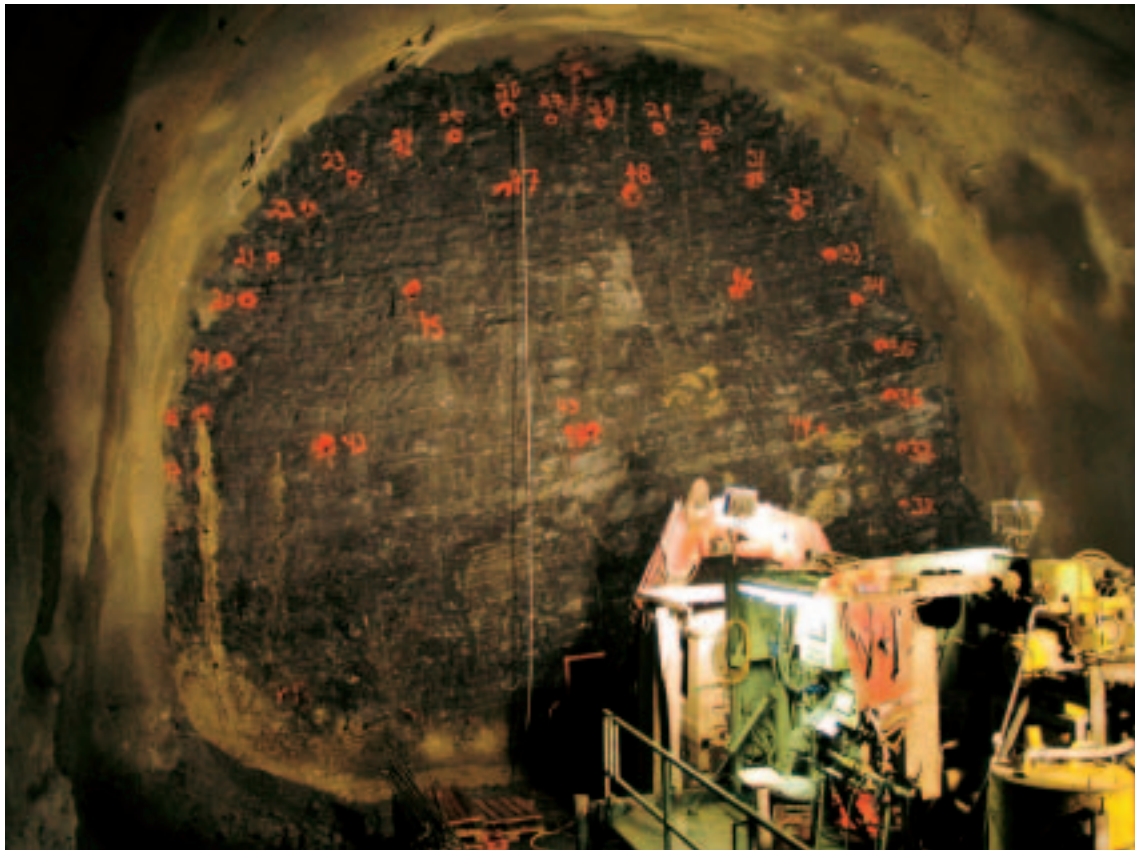
5.4 Injeksjonsskjerm

Det anbefales under de første injeksjonsrundene å starte med mange hull, også i stuff og vurdere resultatene før man reduserer antall hull. Skjermgeometrien må kjøres inn etter de stedlige forhold for å få til injeksjonsresultater som er optimale. Hullgeometri velges i det vesentlige på bakgrunn av sprekke-/sleppegeometri slik at hullene skjærer sprekker/slepper som gir best kommunikasjon for injeksjonsmassen ut i den del av bergmassen som en ønsker å tette.

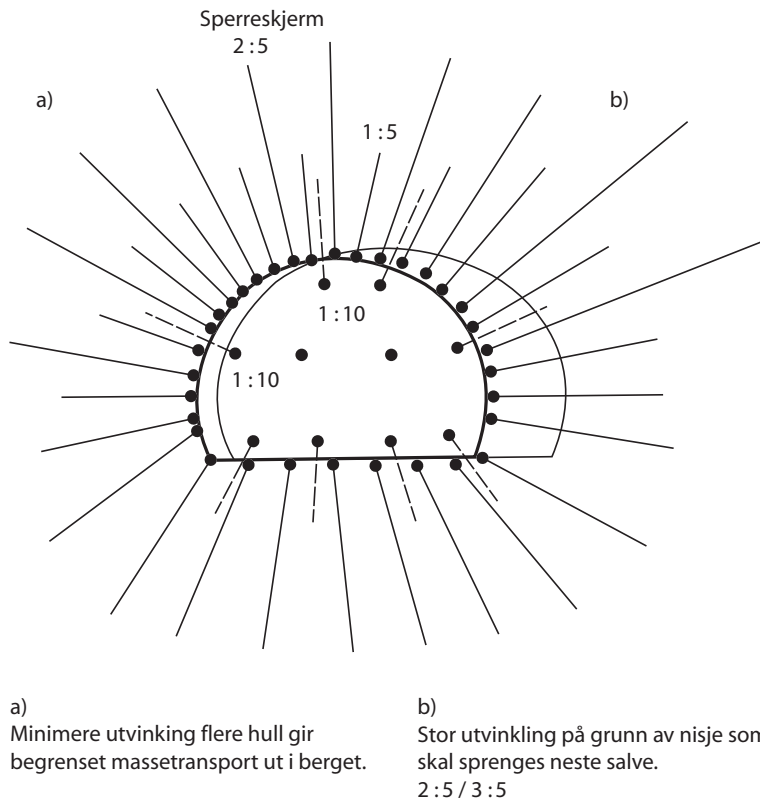
Basis for valg av hullengde og hullantall er hovedsakelig avstand til byggverk, bergoverdekning og bergmassens injiserbarhet (vesentlig basert på konduktivitet). Med liten bergoverdekningen og tungt injiserbart berg (bergmasse C og delvis B) bør hullene være relativt korte, ca. 12 m og 24 m og i antall ligge mellom 35 og 60 stk. forutsatt ganske strenge

lekkasjekriterier og tunneltversnitt 8,5 m. Med større bergoverdekning kan hullengden for bergmasse A og delvis B økes til 24–50 m og antall hull reduseres til 7–35 stk. avhengig av forholdene. Bergmasse B kan variere mye i injiserbarhet pga. varierende sprekke/kanalåpning, leirinnhold og innspenning.

For øvrig vises det til kapittel 4 Bergmasseegenskaper.



Bilde 5.2 viser en injeksjonsskjerm med hull i såle, rundt profilet og i stoffen. Det anbefales å bruke moderne injeksjonsrigg med gode dokumentasjonsmuligheter. Etablert praksis har vist at det er fordelaktig å starte en injeksjonsrunde med å injisere sålehullene først. Deretter injiseres vegg hullene sammen med stoffhullene suksessivt 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 det bety at en kan redusere antall injeksjonshull (foto: Kveen).



Figur 5.1 viser eksempel på en injeksjonsskjerm med forskjellig stikning avhengig av problemet som ligger foran.

5.5 Utstyr

Det er i den senere tid utviklet nye injeksjonsrigger med datastyring av injeksjonsblandingen. De er gjerne utstyrt med 2–3 separate linjer og blandekar. Massen kommer i store sekker som fylles i silo på injeksjonsriggeren. Det er en meget positiv utvikling som sikrer at injeksjonsarbeidet blir optimalt og dokumenterbart. Pumpene må kunne gi 100 bars trykk og levere nok masse under injeksjonen.

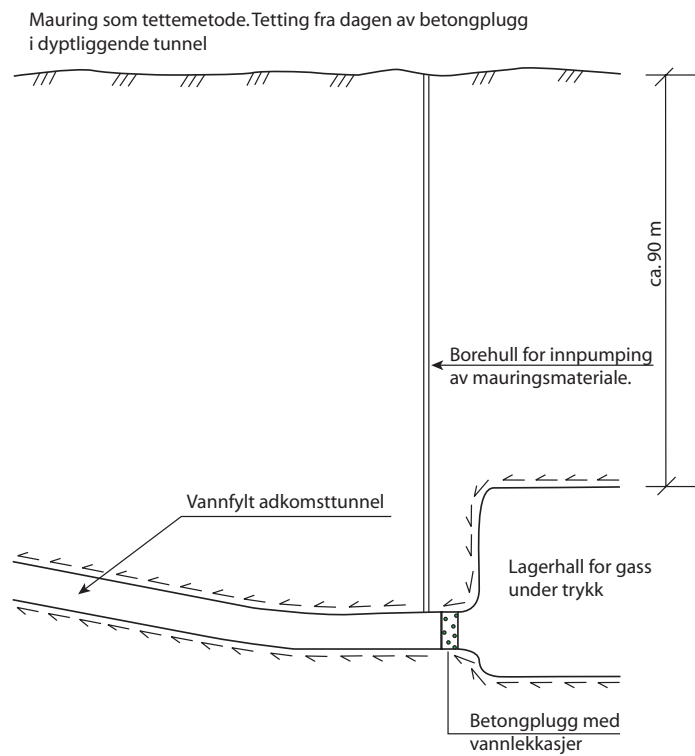
Blandere, omrørere og pumper må kunne gi minst 50–100 liter injeksjonsmasse pr. minutt ved høye trykk. Systemet må virke tilfredsstillende med v/c -forhold ned mot 0,5, og for kortere tid ned mot 0,4. Øvrige deler av injeksjonslinja inklusive koblinger, staver og pakkere må også tåle 100 bar.

6 Mauring

Med mauring menes injeksjon av mauringsmasse som pumpes gjennom borehull i berget og strømmer mot lekkasjested der massen avsettes. Mauring brukes ved store lekkasjer og åpne sprekker der en ikke får trykkoppbygging. Mauringsmasse består av partikler som blandes med vann eller injeksjonsmasse. Massen må ha partikkelstørrelse under en viss verdi tilpasset sprekkeåpningen som muliggjør transport frem til lekkasjestedet. Korngraderingen må likevel ikke være så fin at tilstopping ikke skjer der en ønsker. Ofte vil forutsetningen for mauring være innsnevrende kanaler eller sprekkeplan frem mot tettestedet. Mauringsmasse kan ha herdeegenskaper, men kan virke godt også uten.

Som mauringsmasse kan mye benyttes: skumgummibiter, oppmalt bark, høvelspon, sagflis og masse som kan kjøpes hos spesialfirmaer. Sagflis med kornstørrelse tilpasset åpningene til vannveiene i berget er mye brukt alene sammen med vann, eller blandet sammen med sementmasse. Ved siden av å være lett å blande inn og pumpe, absorberer sagflis vann og ekspanderer etter en tid i vann eller vandig oppløsning. Det betyr økende strømningsmotstand etter en tid, hvilket er en positiv egenskap. Kornstørrelse må velges med omhu (ikke for grov) og tilsats av mauringsmasse må gjøres meget forsiktig, for å unngå å stoppe til hullet for raskt. Når vannstrømmen har stanset, kan tettingen avsluttes ved å injisere sementbasert masse dersom man frykter at tremassen kan ha begrenset varighet (forråtnelse i surstoff rikt vann osv.). Mauringsmasse må alltid pumpes inn blandet sammen med større mengder vann eller injeksjonsmasse bortsett fra i grove vannførende soner/lekkasjer der massen kan være ganske tørr. Tetteforløpet avgjør videre dosering av masse. I Norge har det vært vanlig å utføre etterinjeksjon fremfor mauring av lekkasjer bak stuff. Mauring er best egnet i berg med meget åpen sleppe-/sprekkestruktur.

Også ved eldre tunneler med vannlekkasjer kan mauring benyttes. Masse blir da pumpet gjennom borehull som bores med stikning ca. 45° inn i lekkasjesonene med ansett i godt berg, ca. 15–25 m fra lekkasjeområdet. Innledningsvis pumpes masse/vann inn med så fin gradering at mesteparten kommer ut i på lekkasjestedet, sammen med lekkasjevannet. Etter hvert økes kornstørrelsen forsiktig til innvasket mengde mauringsmasse avtar. Korngraderingen er da nær optimal eller litt for grov for videre arbeider.



Figur 6.1 viser eksempel fra gasshall (LPG, trykklager) på Mongstad, foreligger vellykket eksempel på bruk av mauringsmasse i vannfylt adkomsttunnel. Langhull ble boret fra dagen ned i tunnelen oppstrøms betongplugg som skilte adkomsttunnelen fra gasshallen. Det var på forhånd konstatert sjenerende vannlekkasje fra tunnel gjennom plugg og inn i hallen. Etter en tids pumping med mauringsmasse gjennom hullet ble lekkasjene stoppet.

7 Eksempler på praktisk berginjeksjon

Nedenfor er eksempler på spesielt vanskelige prosjekter som har vært utført med godt resultat i henhold til spesifiserte krav. De representerer også helt forskjellige geologiske forhold.

7.1 Injeksjon i tunnel med liten bergoverdekning med overliggende bebyggelse

Eksempel 1: Hagantunnelen, Rv.4, stuff Slattum

Tunnelen T 8,5 og T12, ble drevet i hovedsaklig syenitt med velutviklet benkning og meget høyt sprekkevolum (bergmasse A). Stedvis opptrer diabasganger med opptreden av leire i kontakt mot syenitt. Gangene er nær parallellorientert tunnelen. Bergoverdekningen er på kritiske strekninger 8–12 m. Lekkasje kravet var 5 l/min pr. 100 m tunnel i kritisk del (600 m). Det ble stort sett boret 24 m lange skjerm systematisk med 9 m overlapp. Noen få steder ble det lagt sperreskjerm i hengen litt over hovedskjerm. Hullantallet i skjermen varierte fra ca. 25 til ca. 45 stk. med 24 m hullengde og stikning ut lik 1:5 og 1:4 (såle). Med skjerm på 45 hull var ca 9 hull inne i profilet. Injeksjonsmiddel var industrisement, mikro-sement, mikrosilika, brukt alene eller i kombinasjon. SP ble alltid benyttet. Sluttrykk var stort sett 100 bar i hvert hull. Injeksjon ble vanligvis startet opp med v/c-forholdet lik 1,1 som ble gradvis redusert mot 0,5 (Andersson 2003).

I ren syenitt ble store deler av injeksjonen utført med industrisement og SP uten mikrosilika og med v/c-forholdet 0,5. Meget tørr masse ble valgt for å begrense masseutbredelse og oppnå tilsiktet trykkøkning. I noen hull var det nødvendig å bruke venteintervall og/eller forsiktig mauring selv ved v/c-forholdet 0,4. I partier med mer lukket sprekkestruktur og diabasganger ble det stedvis injisert mikro-sement og mikrosilika; v/c-forholdet ble redusert gradvis fra 1,1 mot 0,9 og 0,7 og i noen få hull mot 0,5. Sluttrykket var som før 100 bar. Kombinasjonen lavt v/c-forhold og høyt trykk gjorde det mulig å begrense massetransporten radikalt ved siden av å ivareta god inntrengning i bergmassen nærmest tunnelen. Det høye masseforbruket, på det meste opp i 4-6 tonn/lm tunnel, må skyldes den åpne sprekkestrukturen da det gjennom boring og inspeksjoner ble verifisert at masseutbredelsen stort sett var begrenset, maksimalt 8–10 m fra tunnelprofilet.

Til tross for det høye masseforbruket, ble tetthetskravene oppfylt og injeksjonen en økonomisk suksess. Det skyldes hovedsaklig at det ble benyttet industrisement i stedet for mikro-sement og at mikrosilika dels kunne sløyfes. På grunn av tett oppfølging av arbeidene og kontinuerlig utprøving kom injeksjonskostnadene mot slutten ned mot NOK 10000/lm tunnel (inkludert boring, tid, masse). Det foreligger dokumentasjon på at kostnadene kunne vært mange ganger så høye ved bruk av annen masse.

Eksempel 2: Storhaugtunnelen, Stavanger

Tunnelprosjektet var meget utfordrende med fyllitt, lav bergoverdekning og strenge lekkasjekrav. Den har et tunnelprofil på T 8,5 og ble drevet i mekanisk svak fyllitt (bergmasse C) med tildels intens oppsprekking. Det opptrer mye leire på sprekker og stikk. Bergarten regnes som

tung og vanskelig å injisere. Det ble injisert systematisk langs 165 lm tunnel der bergoverdekningen var 10 m eller mindre helt nede i 4,5 m i et punkt.

Skjermene ble boret 14 m lange med overlapp 6–8 m. I sålen ble noen ekstra hull redusert til 8 m lengde. Den første skjermen ble boret med 34 hull som viste seg å være for lite. Hullantallet ble gradvis økt til 62 hull, hvorav 12 var inni i profilet. Det viste seg å være tilstrekkelig til å oppnå lekkasje på 1,5 l/min pr. 100 m tunnel. Kravet var 3 l/min pr. 100 m tunnel (Iversen og Pedersen 2000).

Denne type bergart krever ofte korte hull og høyt antall hull, fordi det er mange små sprekker med leire. Det er vanskelig å få inn massen. Derfor må en ha trykk nok ute i hullet til å få presset inn injeksjonsmassen.

Det ble injisert med mikrosement (ultrafin 12), mikrosilika og SP40. Injeksjon av hvert hull ble startet med høyt v/c-forhold som gradvis ble senket mot v/c-forhold lik 0,5 med tilhørende trykkøkning opp mot 50 bar i heng. Nede i profilet var sluttrykket opptil 70 bar.

Det ble notert tilfeller av utgang i dagen over tunnelen der bergoverdekningen var minst. Stort sett ble utgang (også i tunnel) stoppet ved å akselerere herdingen med herdeakslerator. På injisert strekning gikk det med i overkant av 1000 kg injeksjonsmasse pr. løpemeter tunnel, hvilket er en tredjedel av gjennomsnittlig masseforbruk i syenitt på Hagantunnelen. Likevel ble injeksjonskostnadene i gjennomsnitt pr. løpemeter tunnel tilnærmet tre ganger så høye som på Hagantunnelen (Iversen og Pedersen 2000, Åndal et al. 2001).

Eksempel 3. T-baneringen i Oslo

Tunnelen er 1240 m lang og går mellom Ullevål og Nydalen. Delprosjekt C fulgte injeksjonsarbeidet tett og deltok aktivt med hensyn på injeksjonsopplegget i tunnelen. Injeksjonen i tunnelen var vellykket. Kravene til innlekkasje er oppfylt med enkle og effektive metoder. Arbeidet er godt dokumentert (Åndal 2001, Åndal et al. 2001, Boge et al. 2002). Tunnelen går under et tettbebygd område med strenge krav til grunnvannsnivå. Det var problemer under byggingen av Tåsentunnelen like ved, her måtte det installeres permanent vanninfiltrasjon.

Viktige hovedmål for «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» og tunnelprosjektet har vært å utvikle en injeksjonsmetode som gir en tilstrekkelig tett tunnel på enkel måte og kortest mulig tid ved varierende geologiske forhold. I tillegg har man sett spesielt på noen utvalgte temaer:

- sporadisk kontra systematisk injeksjon
- optimale v/c-forhold, tilsetningsstoffer og injeksjonstrykk
- utprøving av industrisement kontra mikrosement
- tilstrekkelig tetthet gjennom 1. injeksjonsrunde
- tidsoptimalisering av hele injeksjonssyklusen.

Gjennom de data som er samlet inn og sammenstilt, har vi fått en del erkjennelser og erfaringer som støtter de påstander som er fremført. Udiskutable ”beviser” er vanskelig å etablere på dette fagområdet (Boge et al. 2002).

Sporadisk/systematisk

En ble tidlig klar over at sporadisk injeksjon ikke var en god nok metode for å få tett nok tunnel. Grunnlaget for sammenligning mellom sporadisk injeksjon (etter vurdering basert på sonderboring) og systematisk injeksjon etter hver andre/tredje salve er derfor begrenset.

Målingene som er gjort viser at tidsforbruket ved sporadisk injisering er større enn ved systematisk. I områder der kravene til tetthet er moderate er risikoen for å ikke oppfylle kravet stort pga. at lekkasjene flytter seg til områder som ikke ble injisert.

V/c-forhold

Det er behov for å benytte sementtyper som gir tilstrekkelig tetthet på kortest mulig tid. For å redusere herdetiden må det unngås v/c-forhold over 1,0. Nye tilsetningsstoffer og bedre injeksjonsutstyr har gjort det mindre problematisk å bruke lave v/c-forhold. Laboratorieforsøk utført på de blanderseptene og materialene som var brukt på dette prosjektet, viste at høye v/c-forhold (>1,0) var ugunstig for herdeforløpet, ved at herdetiden økte vesentlig (Holm og Heimli 2001 a, b).

Trykk

På mange borehull hvor masseinngangen i utgangspunktet var lav, viste det seg effektivt å gi massene et "trykk-kick" (her 60–80 bar). Svært ofte åpnet det hullene og en kunne fortsette injeksjonen ved "normale" trykk (20–40 bar). Kombinasjonsbruken av mikrosilika (her Grout Aid) og superplastiserende tilsetning (her Rescon HP) til sementene har her bidratt til å gjøre slik trykkfilosofi mulig uten å blokkere masseinngangen. (Dette avviker fra filosofien i "aktiv injeksjon".)

Industri- og mikrosement

Utprøvingen og sammenligningen mellom industri- og mikrosement er utført på flere sammenlignbare strekninger, og alle viser at forskjellen på tetteresultatet er ubetydelig. Det er derfor nærliggende å trekke den konklusjonen at samme tetthet kunne vært oppnådd for hele denne tunnelen kun ved bruk av industrisement. Dersom denne konklusjonen er riktig, ville bruk av bare industrisement ført til et enklere injeksjonsopplegg med betydelige besparelser, både med hensyn på tid og kostnader. Oslofeltets sedimentære bergarter er i utgangspunktet relativt tette med tynne, ofte leirfylte sprekker. Erfaringsmessig har disse bergartene vært vanskelig å tette. Med unntak av andre skiferbergarter, har de fleste andre norske bergarter et mer åpent sprekkesystem som gjør de lettere å injisere. Konklusjonen fra T-baneringen med gode resultater med industrisement, bør derfor være gyldig også for andre typer bergarter enn leirskifer og knollekalk.

Tidsoptimalisering

Den overordnede målsetting for tidsoptimal injeksjon er pr. definisjon å oppnå størst mulig inndrift med tett nok tunnel. En må tilstrebe å oppnå tilstrekkelig tetthet med én injeksjonsrunde. Utstyret må være moderne og veltilpasset og med tilstrekkelig kapasitet, likeledes med god mannskapsorganisering og effektivt transportsystem. Kontrakten må gi rom for en innkjøringsperiode med tilpassing av tidsoptimal injeksjonsprosedyre. Det må tilstrebes et fleksibelt opplegg som kan tilpasses varierende injeksjonsforhold og lekkasjekrav. Lengde av injeksjonsskjerm og drivlengde mellom hver injeksjonsomgang må tilpasses skiftordningen og eventuelle tidsrestriksjoner. Minst mulig dødtid må tilstrebes og forsøkene på tidsoptimalisering ved T-baneringen ga gode resultater.

Pakkere

Bruk av engangspakkere synes mest tidsgunstig. Det må tilstrebes størst mulig inndrift pr. salve.

Optimal skjermgeometri

Ved T-baneringen med et tverrsnitt på 9,5 m synes en injeksjonsprosedyre bestående av 32 stk. 21 m lange injeksjonshull, én injeksjonsrunde og 2 salver mellom hver injeksjonsomgang å ha vært mest tidsoptimal.

Sammenlikning Tåsen og T-baneringen

Det ble lagt ned en annen og større tetteinnsats i T-baneringen enn i Tåsentunnelene, noe som ga et klart bedre tetteresultat og som har medført at en har unngått setningsskader og etablering av permanente infiltrasjonsbrønner. Denne erfaringen er spesielt viktig sett på bakgrunn av at bergmasseforholdene på de to prosjektene må anses som identiske. Den anvendte injeksjonsmetodikken er meget "robust", idet den er meget systematisk og produksjonsvennlig for entreprenøren, og har gitt god nok tetthet under de varierende bergmasseforhold på T-baneringen

7.2 Tunneler med moderat og stor bergoverdekning

Det er vanligvis enklere å injisere tunneler med stor bergoverdekning fordi det er liten mulighet for å miste trykket og få utgang i dagen i kjellere osv. I tillegg er berget vanligvis mer innspent og lukket i sprekkestrukturen. Poretrykket øker vanligvis med tunneldybden, og det kan bety vansker i vannførende sprekke- og sleppesoner. Med våken oppfølging vil vannførende soner av betydning oppdages under sonderboring i betryggende avstand foran stoffen og bli injisert.

For å unngå grunnvannssenkning og setninger på byggverk fundamentert på løsmasse er det like viktig å tette lekkasjer i dyptliggende som i gruntliggende tunneler. Injeksjonen utføres ofte på samme måte som i tunneler med liten bergoverdekning. På grunn av mer lukket sprekkestruktur vil det i dypet gjennomgående være riktig å benytte mer finkornig sement og mer silika enn nær dagen. Trykkøkningen i hvert injeksjonshull tenderer å komme raskere. V/c-forholdet bør for å unngå for rask trykkøkning ikke reduseres like raskt som i gruntliggende tunneler. I hvert hull bør også v/c-forholdet innledningsvis forsøkes høyere enn for gruntliggende tunneler, men vi anser ikke verdier over 1,5 for å være praktisk riktig bortsett fra i helt spesielle tilfeller.

Å bruke et sluttrykk på minimum 100 bar er en grunnleggende forutsetning. Med nye pumpe typer som kan gi enda høyere trykk vil ytterligere trykkøkning øke inntrengningen og bety mer effektiv tetting. På større dyp vil høyere trykk enn de som brukes i dag etter hvert bli etterspurt. Det stiller krav til utvikling av bedre pumper og til utstyr for øvrig, spesielt pakkere som frem til i dag har vært et svakt punkt.

I lett injiserbare bergarter (bergmasse A og delvis B) vil injeksjonshull og injeksjonsskjermer i mange tilfeller kunne økes til opp mot 50 m lengde og under gunstige forhold enda lenger. Lange hull krever gunstige hydrogeologiske forhold og gjennomgående lite leire på sprekker og stikk. Det foreligger eksempel på at vannførende kvartsittisk sprekkesone ble injisert tett

40 m foran stuff (Rafnes, propanlager i 1975, Rogaland). I sonen ble det injisert industriement (rapid) gjennom kun 7 hull. I sjakter har det vist seg at god tetting kan oppnås med over 100 m lange hull. Se figur 7.1.

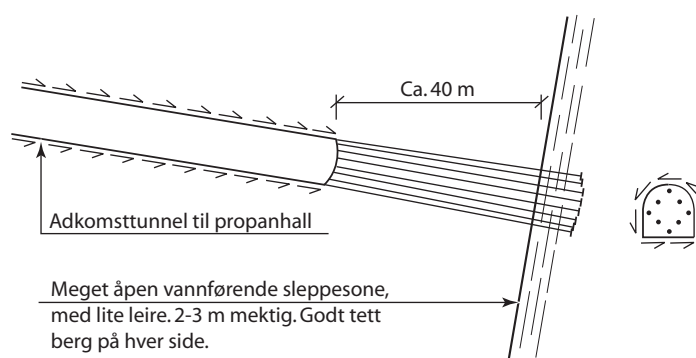
7.3 Injisering av vannførende soner på store dyp

Hovedregelen for injisering av vannførende soner er generelt at tunneldrivingen avbrytes i sikker avstand fra sonen, i godt berg. For vannførende soner på store dyp er det svært viktig. Med sikker avstand menes at man minst må ha tunnelbredden av godt berg mellom stuff og sone. Er berget delvis dårlig, kommer det i tillegg.

I dårlig bergmasse, eksempelvis intenst oppsprukket fyllitt o.l., bør mektigheten av brukbart berg mellom stuff og sone være *minimum* 2 x tunnelbredden. Det må også påses at ytterste del av injeksjonshullene blir boret i så godt berg at pakkeren får bra feste og slik at en unngår at injeksjonsmasse trenger forbi pakker eller på annen måte flyter ut i stuffen.

Dårlig berg/leire i stuffen har ved flere anledninger blitt presset ut av poretrykket og gitt betydelige problemer. Slike soner skal påvises på forhånd ved sonderboring foran stuff. I soner med moderat og lav konduktivitet kan poretrykket avlastes ved å bore hull inn i sonen fra sikker posisjon bak stuff. Hullene bores på stigning fremover til de treffer sonen ca. 8 til 10 meter over hengnivå. Det foreligger eksempel på at rasutvikling på stuff er stoppet med slik boring (Kaarstørørtunneler i 1983).

I høykonduktive soner med stuffen for nære kan situasjonen bli meget vanskelig da poretrykkavlastning vanskelig vil være effektiv eller ha virkning i det hele tatt. Løsningen kan da bli vekselvis injeksjon/mauring og boring av poretrykkavlastningshull i flere omganger for å berge tunnelen.



Prinsippkisse (vertikalsnitt).
Eksempel med Propanlager Rafnes 1975.

Figur 7.1 viser injeksjon av sterkt vannførende sone. Legg merke til at en har stoppet stuffen i god avstand fra sonen for å få til optimal injeksjon.

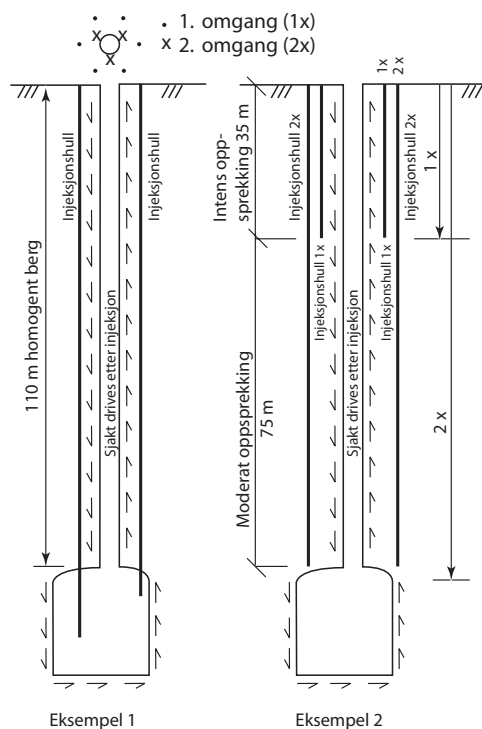
Når høykonduktive soner påvises i sikker avstand foran tunnelen, kan sonen injiseres som vanlig for tunneler med industrisement eller andre vanlige injeksjonsmasser. Det gjelder også ved meget høye vanntrykk, eksempelvis Borgund kraftverk 1972, Lærdal.

Ved meget store vannmengder og høye trykk er det flere eksempler på at en ikke har fått trykkoppbygging med industrisement. Eksempel: Åkrafjorden E-134, Holen kraftverk, Setesdal. En har da etablert 4" injeksjonshull (100 mm) isatt pakkere som har gjort det mulig å pumpe inn betong og/eller mauringsmateriale. Det krever betongpumpe som kan gi høye trykk, opp mot 80–90 bar. Korngraderingen i tilslaget må tilpasses sprekkevidden i sonen ved at det innledningsvis brukes finsand e.l., og ved at kornstørrelsen gradvis økes til det på vanlig måte oppnås trykkoppbygging i hvert hull. Det er avgjørende at boring av nye hull, eventuelt for ny injeksjonsrunde ikke utføres før injeksjonsmassen med sikkerhet har herdet. For å begrense vannmengder og problemer bør det i hver injeksjonsomgang bores et begrenset antall injeksjonshull, maks. 3–4 stk.

7.4 Sjakter

Sjakter virker i likhet med tunneler, drenerende på omliggende bergmasse. Internt miljø kan også påvirkes ved at arbeider i sjakten etter driving kan bli hemmet av vannlekkasjer. Vannlekkasjer vil også gi korrosivt miljø i sjakten og kan for eksempel nedsette kvalitet på betongarbeider mv.

Det foreligger tallrike erfaringer fra forinjeksjon av sjakter fra hele landet. De fleste sjakter er vertikale og har lengder under 150 m. Sjaktareal er vanligvis 6–25 kvadratmeter. Et avrundet sjaktprofil uten 90° hjørner bidrar til å lette sprengningspåkjenning på nærliggende berg og tilrådes der en har tetthetskrav. Injisering utføres vanligvis ved at det injiseres gjennom lange hull boret ovenfra i hele sjaktlengden. Der det ikke er adkomst til sjakttopp, kan det bores nedenfra. Dersom bergets konduktivitet varierer vesentlig over sjaktlengden, kan det lønne seg å bore og injisere seksjonsvis, eventuelt gjøres det for ytterskjerm mens innerskjerm tas i full lengde.



Figur 7.2 viser eksempel på injeksjon av sjakt før driving. For sjakt i eksempelet med 10 m^2 areal bores og injiseres ca. 6 hull i hele sjaktlengden 1,5–2 m utenfor kontur. Etter herding bores og injiseres tilsvarende ca. 3 hull i sjaktvegg. Ytre skjerm (1. injeksjonsomgang) injiseres med industriement (høyt v/c-forhold for liten inngang og lavt v/c-forhold for høy inngang). Hull i sjaktvegg (2. injeksjonsomgang) injiseres forslagsvis med mikroement/mikrosilika og v/c-forhold tilpasset inngang. Deretter drives sjakten. Eksemplet er med utgangspunkt i ganske strenge lekkasjekrav og bergmasse B. For bergmasse A er det sannsynlig at hullantallet kan reduseres noe. For å unngå stort masseforbruk bør v/c-forhold holdes meget lavt. Motsatt for bergmasse C som sannsynligvis krever flere hull og eventuelt mikroement/mikrosilika i begge skjermene og høyere v/c-forhold.

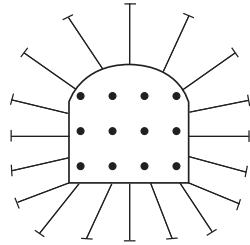
7.5 Haller / store tverrsnitt

Med store tverrsnitt menes spennvidder over 12 og 15 m for berg av henholdsvis middels god og god kvalitet. Interessant for injeksjonsarbeider er også høyden. Over ca. 10 m høyde betyr gjerne at det sprenges og injiseres i to høyder. Taks-kiva tas først, deretter strosses ned til sålen.

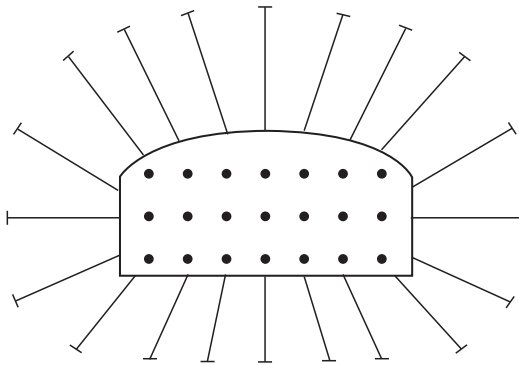
Injeksjon av store tverrsnitt utføres stort sett som for mindre profiler med sålen først. Men det er grunn til å vie den øverste del av profilet med hengen spesiell oppmerksomhet, da denne delen kan bli påført relativt store deformasjoner med åpning av sprekker under videre sprengning og eventuelt senere. Det gjør at det i berg som er forinjisert lett kan oppstå lekkasjer under videre sprengning. Her er riktig bedømming av bergkvalitet og passende bruk av systematisk bolting ofte viktig for stabiliteten av berget.

Som kompensasjon for dette kan injeksjonshullene vinkles mer ut fra heng/vegg enn for mindre profiler. Forslagsvis vinkles hullene ut 2:5 for 20 m spennvidde dersom det for 10 m spenn er funnet effektivt med 1:5. Det forutsettes 20–30 m lengde på injeksjonsskjermene, se figur. Overlapp for injeksjonsskjermene må minst være den samme for store profiler som for små. Det gjelder for hele hengen. For vegger vil høyden være viktig. For doubling av vegg-høyden foreslås vinkling ut 2:5 i vegg, eventuelt noe mindre lengre nede. Det forutsettes like nøyaktig boring og forsiktig sprengning for haller som for tunneler.

Uforsiktig og tung sprengning kan generelt ikke tillates der en har forinjisert. I en hall er dette svært viktig å unngå. Det motsatte bør være tema, dvs. hvor forsiktig det må sprenges. Ved tverrsnittendring, eksempelvis nisjesprengning, er det nødvendig å ta hensyn under skjerm-boring før nisjen drives.

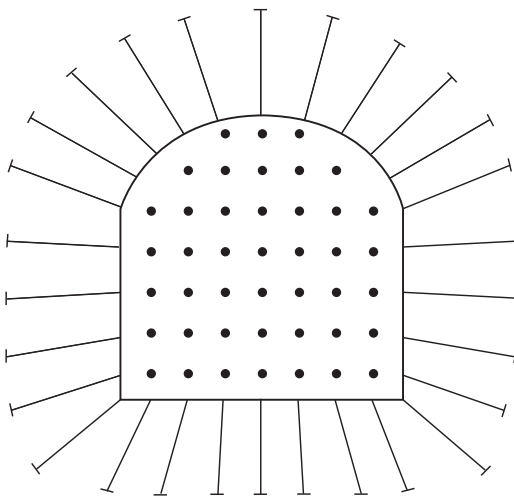


Stikning 1 :5



Taket setter seg mer ved større spennvidde.
Hullene inn vinkles mer ut i heng.

Stikning 2 :5



Større spennvidde og høyde, dvs større utvinkling
av injeksjonssymbol både i heng og vegger.

Figur 7.3 viser store tverrsnitt og eksempler på tilpassing av stikningen i forhold til bergrommets geometri.

8 Helse, miljø og sikkerhet (HMS)

HMS er en viktig del av injeksjonsarbeidene. 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 brukes. Det må påses at pumper og det utstyr som brukes i tilknytning til pumpene (pakkere, slanger, koblinger osv.) er dimensjonert for pumpenes designtrykk. Kun injeksjonsmiddel som er godkjent av byggherren, må brukes. 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 det er tilfelle, må injeksjonen avbrytes og lekkasjer utbedres. Er det nødvendig, må pakker plasseres lenger inn i hullet eller forankres i stuffen. 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 stuffdriften slik at berget er av bra kvalitet ved stuff der pakkerne skal plasseres.



Bilde 8.1 viser en moderne injeksjonsrigg som er viktig for HMS og for å få til et godt injeksjonsresultat (foto: Kveen).

9 Referanser

Andersson, H.: *Injeksjon – erfaringer fra Hagantunnelen*. Intern rapport nr. 2325; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 31. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 30 s.

Barton, N.: *Teoretisk og empirisk forståelse av forinjeksjon og mulighet for redusert sikringsmengde i utvalgte tunnelstrekninger*. Intern rapport nr. 2323; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 29. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 140 s.

Barton, N.: *Deformasjonsfenomener i bergmasser (Rock mass deformation phenomena)*. Fjellsprengningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk, 1985, s. 32.1-32.24. Norsk Jord- og Fjellteknisk Forbund, Oslo 1985.

Barton, N., Buen, B. and Roald, S.: *Strengthening the case for grouting*. Tunnels & Tunneling International, Dec. 2001, pp. 34–36, and Jan. 2002, pp. 37–39.

Barton, N. and de Quadros, E.F.: *Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses*. Proc. of NY Rocks '97 "Linking Science to Rock Engineering". Ed. K. Kim. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. 1997, Vol. 34, No. 3-4, pp. 907-916.

Barton, N. and de Quadros, E.F.: *Improved understanding of high pressure pre-grouting effects for tunnels in jointed rock*. In: Proc. of 10th ISRM Congress, South Africa, 2003. Balkema, Lisse 2003.

Barton, N.: *Some new Q -value correlations to assist in site characterization and tunnel design*. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 2002, Vol. 39, No. 2, pp. 185-216.

Boge, K., Åndal, T., Aasen, O. og Kjølberg, R. 2002: *Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen*. Intern rapport nr. 2289; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 16. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2002. 229 s.

Holm, J.V. og Heimli, P.: *Laboratorietesting av mikrosemeter ved T-baneringen*. Intern rapport nr. 2235; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 4. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. 94 s. (NOTEBY rapport 100212-1).

Holm, J.V. og Heimli, P.: *Laboratorieprøving av injeksjonssementer*. Intern rapport nr. 2250; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 6. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2002. 70 s. (NOTEBY rapp. 100212-2).

Iversen, E. og Pedersen, K.B.: *Erfaringer fra Injeksjonsarbeider i Storhaugtunnelen*. Intern rapport 2126. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2000. 15 s. + bilag.

Karlsrud, K., Erikstad, L. og Snilsberg, P.: *Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø*. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Publikasjon nr. 103. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 95 s.

Klüver, B.H.: *Berginjeksjon*. Intern rapport nr. 2151. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2000. 21 s.

Klüver, B.H.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt D: Organisering*. Rapport fra forprosjektet. Intern rapport nr. 2131. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2000. 7 s.

Løset, F. og Kveldsvik, V.: *T-bane Ullevål stadion - Nydalen: forundersøkelser og injeksjon*. Intern rapport nr. 2331; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 33. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 51 s. (NGI rapport 20001042-5).

Norsk Forening For Fjellsprenningsteknikk: *Berginjeksjon*. Håndbok nr. 1. Oslo, NFF 2002. 110 s.

Snow, D.T.: *Rock fracture spacings, openings, and porosities*. J. of Soil Mech. And Found. Div., Proc. ASCE, 1968 SMI, pp. 73–91.

Wold Magnussen, A. og Kveldsvik, V.: *Vanninfiltrasjon. Erfaringer og anbefalinger*. Intern rapport nr. 2324; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 30. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2003. 75 s. (NGI rapport 20001042-4).

Aasen, O.: *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Delprosjekt C: Tetteteknikk*. Rapport fra forprosjektet. Intern rapport nr. 2130. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2000. 120 s.

Åndal, T.: *Injeksjon av "problemsone" ved byggingen av T-baneringen*. Intern rapport nr. 2234; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 3. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. 80 s.

Åndal, T., Andersson, H. og Aasen, O.: *Injeksjon – erfaringer fra utførte tunnelprosjekter*. Intern rapport nr. 2233; og «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler», Rapport nr. 2. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, Oslo 2001. Rapport nr. 2. 90 s.

Vedlegg A

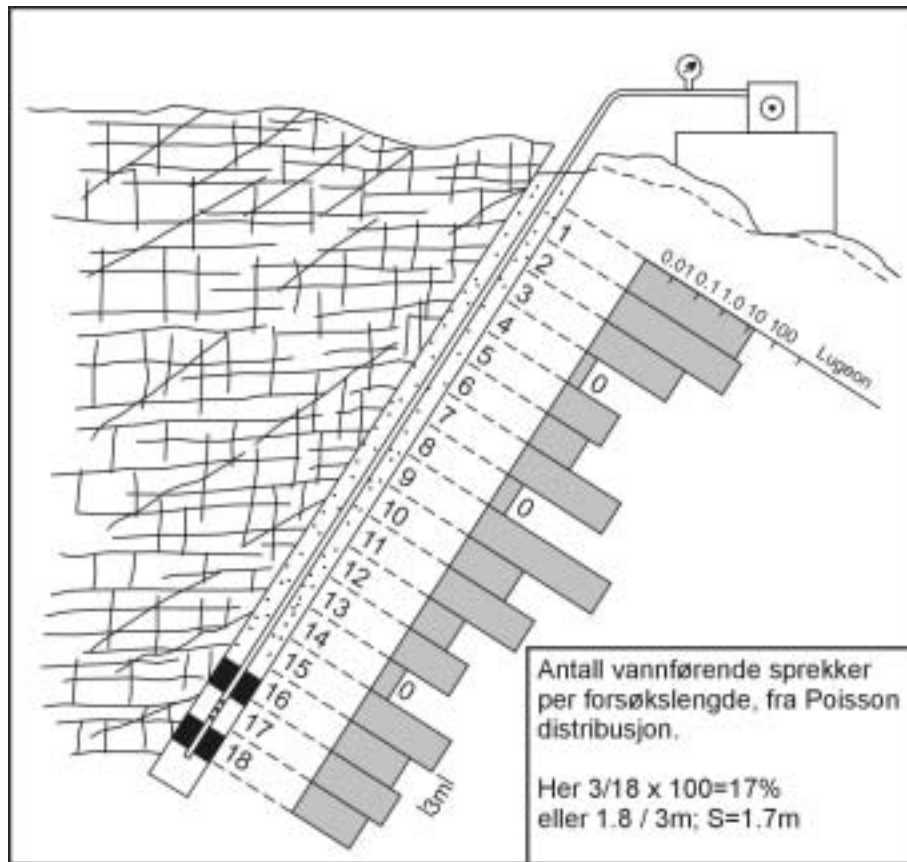
utarbeidet av Nick Barton

TEORETISK OG EMPIRISK FORSTÅELSE AV FORINJEKSJON

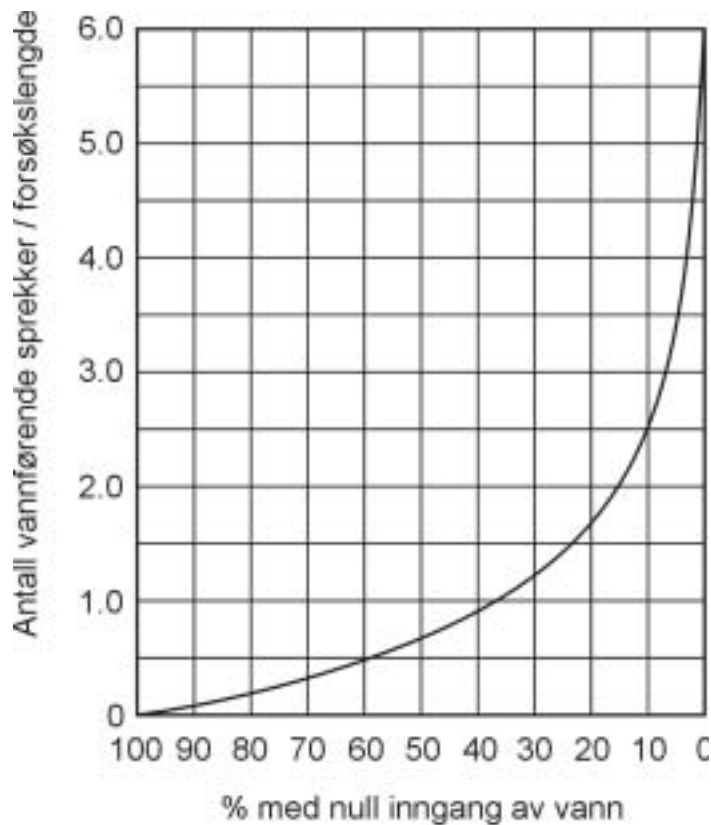
Forinjeksjon under høyt trykk (f.eks. 5 til 10 MPa, eller 50 til 100 bar) forårsaker lokal åpning av sprekke- og injiseringshullene. Men på grunn av logaritmisk til lineært trykktap ut fra sprekkeinngangene (mest for lav v/c , minst for høy v/c) er dette en kontrollert prosess. Det er også helt nødvendig med høyt trykk ved tett bergmasse for å få sammenhengende strømningsveier, ved utvidelse av kanaler i sprekkeplanene og for å få hydraulisk kontakt mellom flere sprekkesett. Det er mulig å planlegge omtrentlig behov for høyt trykk og type masse (dvs. kornstørrelse av sementen). Følgende emner er kort behandlet for å hjelpe med tolkning av det som muligens foregår med høytrykkinjisering:

1. hydrologiske forundersøkelser og statistisk tolkning av (1D) data
2. kubisk nettverk modell og forenkling av realiteten
3. teoretisk (3D) tolkning av Lugeon resultater
4. konvertering av gjennomsnittlig hydraulisk åpning til fysisk (injiserbar) åpning
5. sammenligning av f.eks. $4 \times d_{95}$ med *udeformerte* fysiske åpninger
6. modellering av mulig sprekkeåpning på grunn av økt injiseringstrykk
7. trykktap fra hull til sprekkeplan – dvs. kontrollert hydraulisk splitting
8. 3D-effekter målt ved hydrotomografi før og etter injisering
9. sannsynlige forbedringer i enkelte Q-parameter ved injisering
10. empirisk-baserte forbedringer i bergmasseparameter og redusert sikringsbehov.

1) Hydrologiske forundersøkelser og statistisk tolkning av data

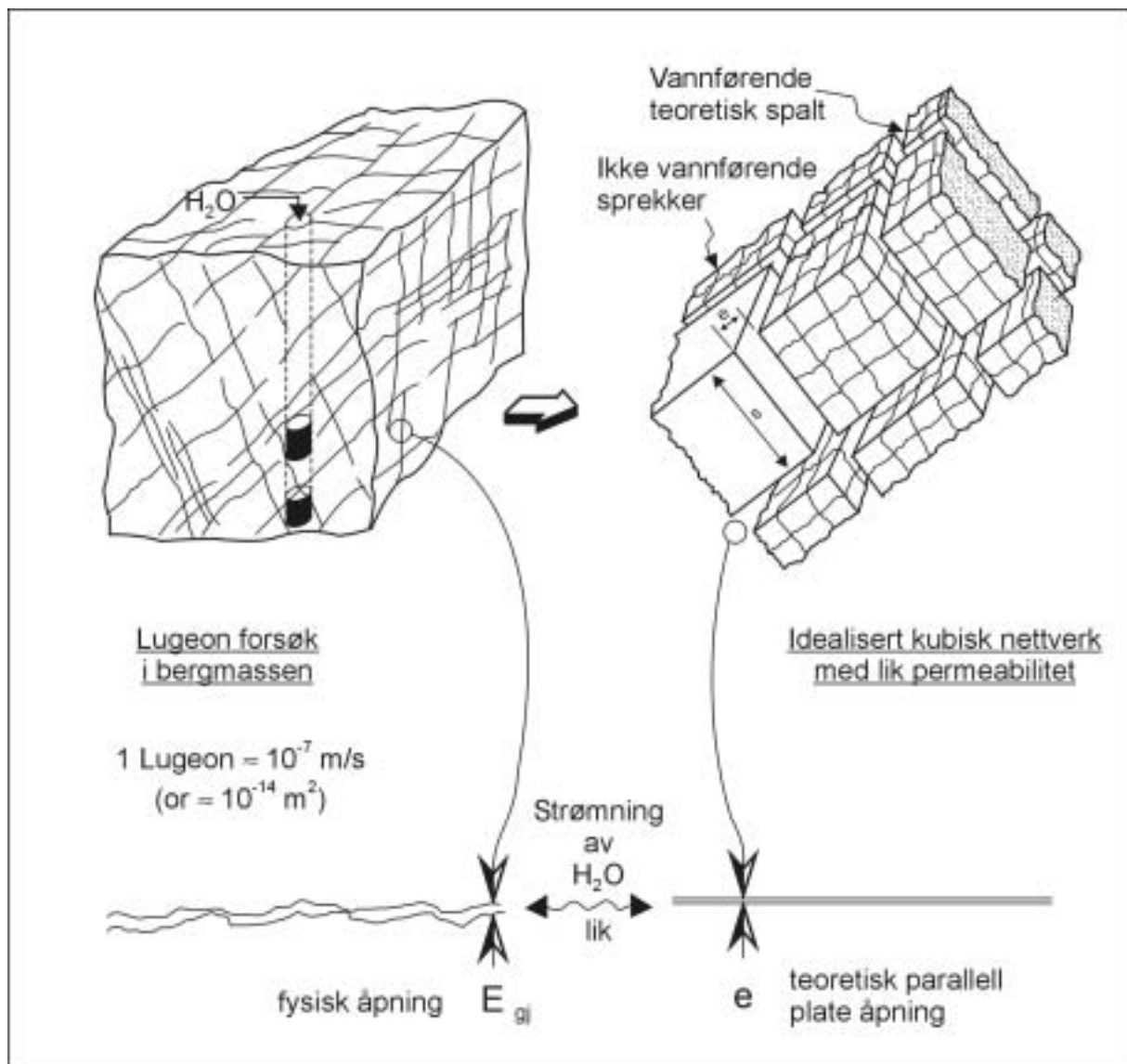


Figur A1: Systematisk måling av Lugeon-verdier i et undersøkt borhull. Antall 'nuller' er viktig for tolkningen i Figur A2 av gjennomsnittlig avstand mellom de vannførende sprekke som krysser borhullet (Barton, 2003).

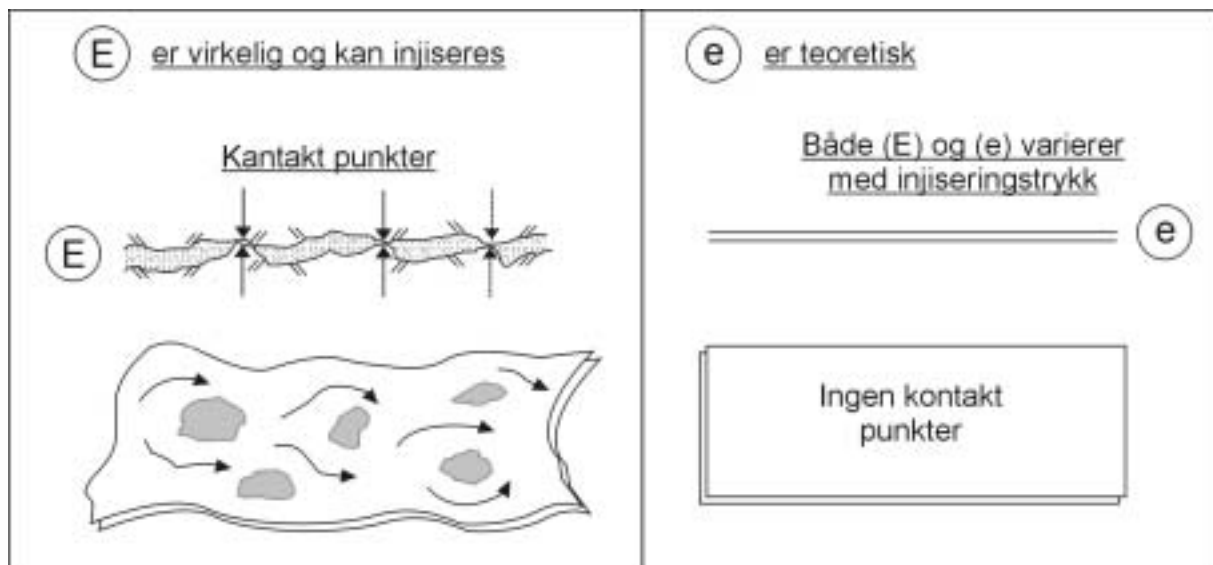


Figur A2: Antatt Poisson-distribusjon av vannførende sprekkefrekvens som funksjon av forsøkslengde og % 'nuller' (Snow, 1968). Pakkeravstanden holdes helst konstant. Fra Figur A1 er det $3/18 = 17\%$ 'nuller'. I gjennomsnitt er det derfor ventet 1,8 vannførende sprekker/forsøkslengde, eller en gjennomsnittavstand $S = 1,7$ m ved 3 m pakkeravstand, eller $5/3$ ganger større (S) ved 5 m pakkeravstand.

2) Kubisk nettverk modell og forenkling av realiteten



Figur A3: Venstre: én mulighet med tre sprekkesett som er vanligste mønster. Høyre: kubisk nettverk av vannførende, glatte, parallelle plater som er bygget ved enkel statistikk til å ha ekvivalent permeabilitet, basert på Snow, 1968 (Barton, 2003). Ved flere forundersøkelsesborhull kommer man nærmere virkeligheten.



Figur A4: Venstre: Større og mindre kanaler i hvert sprekkeplan med kontakt punkter eller leire fylling (som gir mer eller mindre overføring av normal spenning). Begge disse gjennomsnittåpningene (E og e) er følsomme for økning av vanntrykk (i Lugeon-forsøk) og er spesielt følsomme for de mye større økningene i injiseringsstrykk og den dramatiske men lokale reduksjonen i effektiv normalspenning. Inngangsåpningen til sprekkeplanene er avgjørende, og her hjelper det med et høyt (1,0) v/c-forhold i starten, og eventuelt mikro- eller ultrafin, mikrosilika og plastifiserende midler hvis E fortsatt er for liten.

3) Teoretisk (3D) tolkning av Lugeon-resultater

Basert på Snow (1968) og fundamentert i hydraulisk teori, blant annet fra Louis :

$$\text{Teoretisk permeabilitet av én glatt parallell plate:} \quad k = e^2/12 \quad (\text{A1})$$

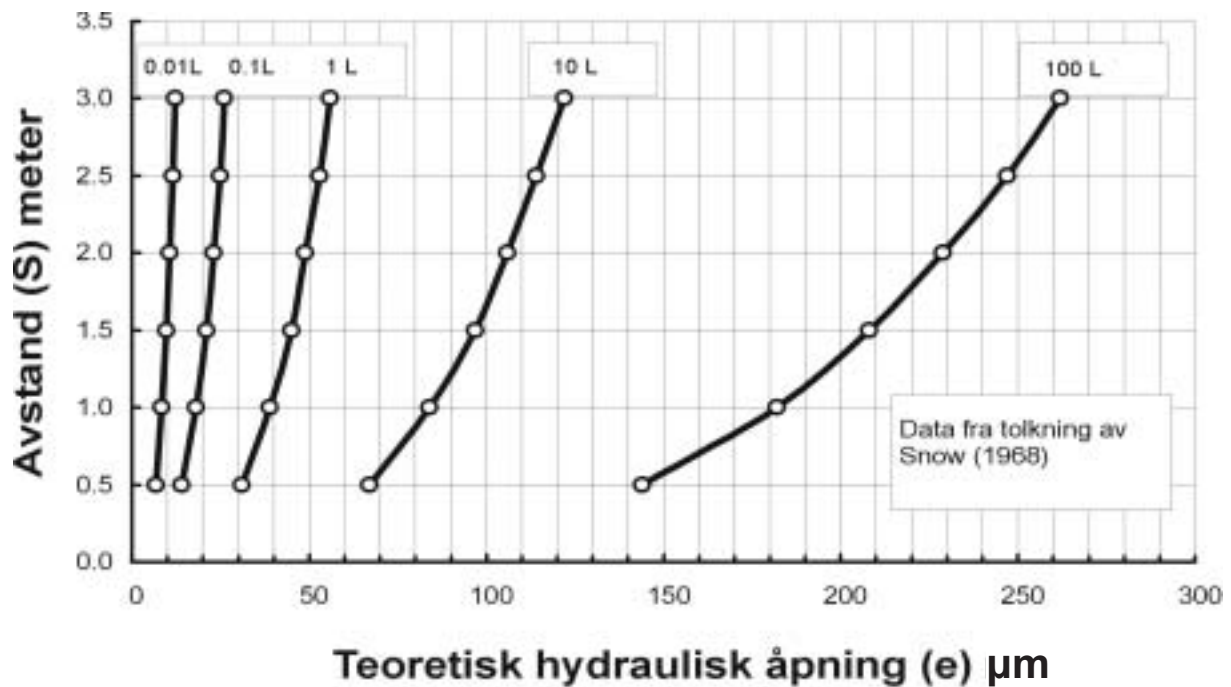
$$\text{Teoretisk permeabilitet av ett sett med plater:} \quad K_1 = e^2/12 \times e/S \quad (\text{A2})$$

$$\text{Teoretisk permeabilitet av 'bergmassen' med 3 sett:} \quad K_{\text{mass}} = 2 e^3/12 S \quad (\text{A3})$$

Med forenklinger etter Barton 2003, bl.a. 1 Lugeon $1 \cdot 10^{-7}$ m/s, og 10^{-7} m/s $1 \cdot 10^{-10}$ m² (og laminær strømning) får man en enkel ligning for omtrentlig (og 3D) tolkning av Lugeon-forsøk:

$$e = (6LS \times 10^{-8})^{1/2} \quad (\text{A4})$$

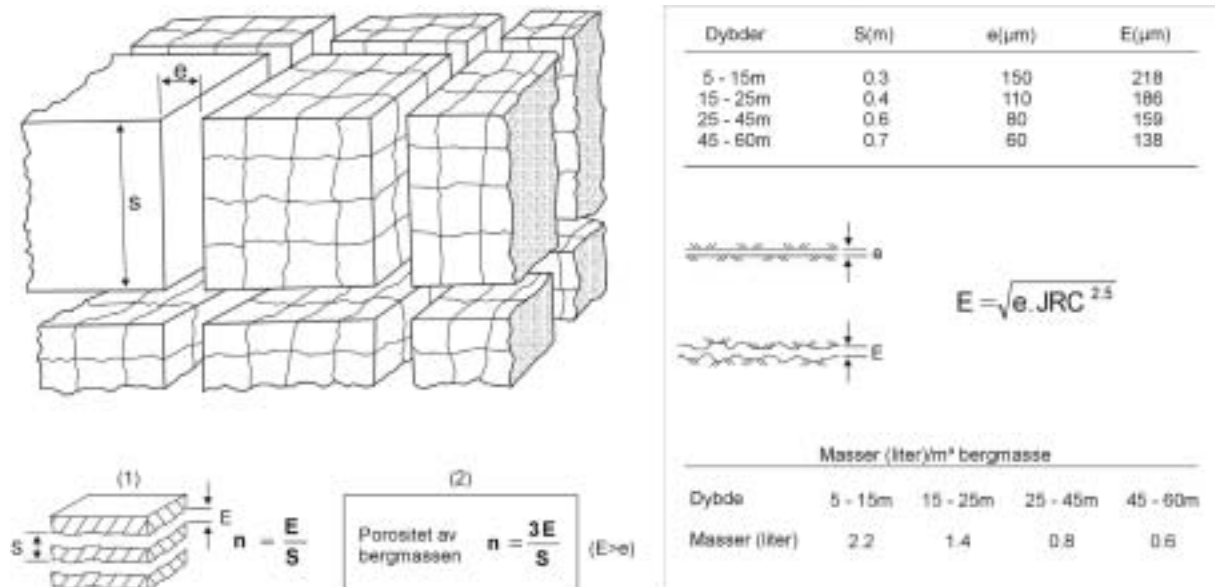
I likning A4 er e og S i millimeter, L er gjennomsnittlig Lugeon-verdi. For alle tre parametrene i likning A4 er det de enkelte strukturdomener og/eller bergarter som er bestemmende for verdiene som er målt og ønsket tolket.



0.01 Lugeon		0.1 Lugeon		1 Lugeon		10 Lugeon		100 Lugeon	
S (m)	e (mm)	S (m)	e (mm)	S (m)	e (mm)	S (m)	e (mm)	S (m)	e (mm)
0.5	6.7	0.5	14	0.5	31	0.5	67	0.5	144
1.0	8.4	1.0	18	1.0	39	1.0	84	1.0	182
1.5	9.7	1.5	21	1.5	45	1.5	97	1.5	208
2.0	10.6	2.0	23	2.0	49	2.0	106	2.0	229
2.5	11.5	2.5	25	2.5	53	2.5	114	2.5	247
3.0	12.2	3.0	26	3.0	56	3.0	122	3.0	262

Figur A5: Grafiske fremstilling av ligning A4 med typiske L -, S - og e -verdier. Det er naturlig å anta at forinjisering begynner å bli vanskelig når $L \leq 1,0$. Alt avhenger av forholdet $E \geq e$, sprekkeruhet er her bestemmende.

4) **Sammenhengen mellom gjennomsnittlig hydraulisk åpning og fysisk injiserbar sprekkeåpning ved bruk av sprekkeveggruhet.**



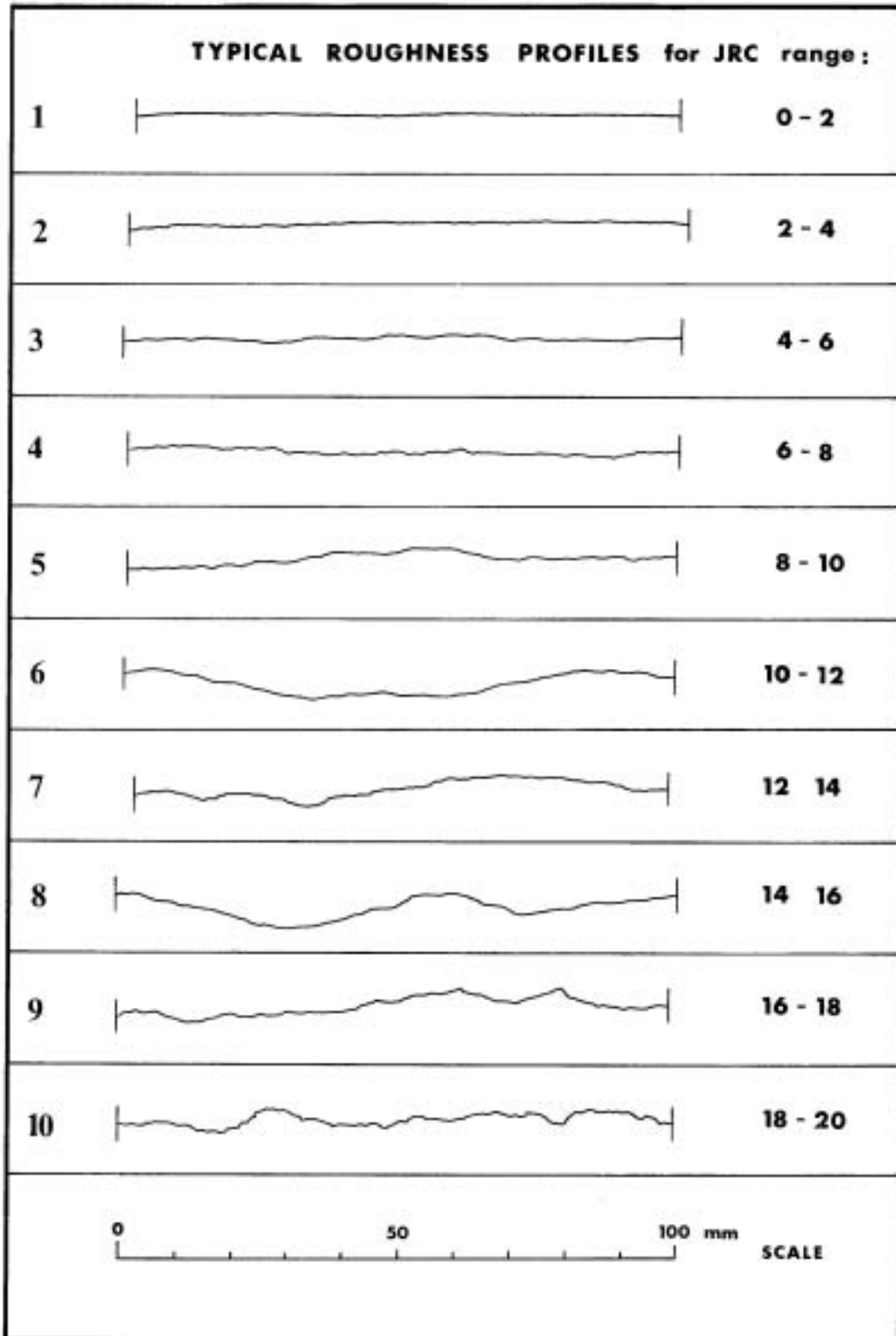
Figur A6: Beregninger av Lugeon forsøk fra et permeabelt damsted, med omregning av (e) til (E) med sprekkeruhet JRC. I dette eksemplet fra 1970-tallet er konservativt (lavt) sement-injiseringstrykk antatt, og derfor er antall liter/m³ bergmasse også lavt. I dette tilfellet var ingen sprekkeformasjon ventet eller modellert (Barton et al. 1985).

Forholdet mellom E (som er injiserbar) og (e) (hydraulisk parallellplate åpning) er:

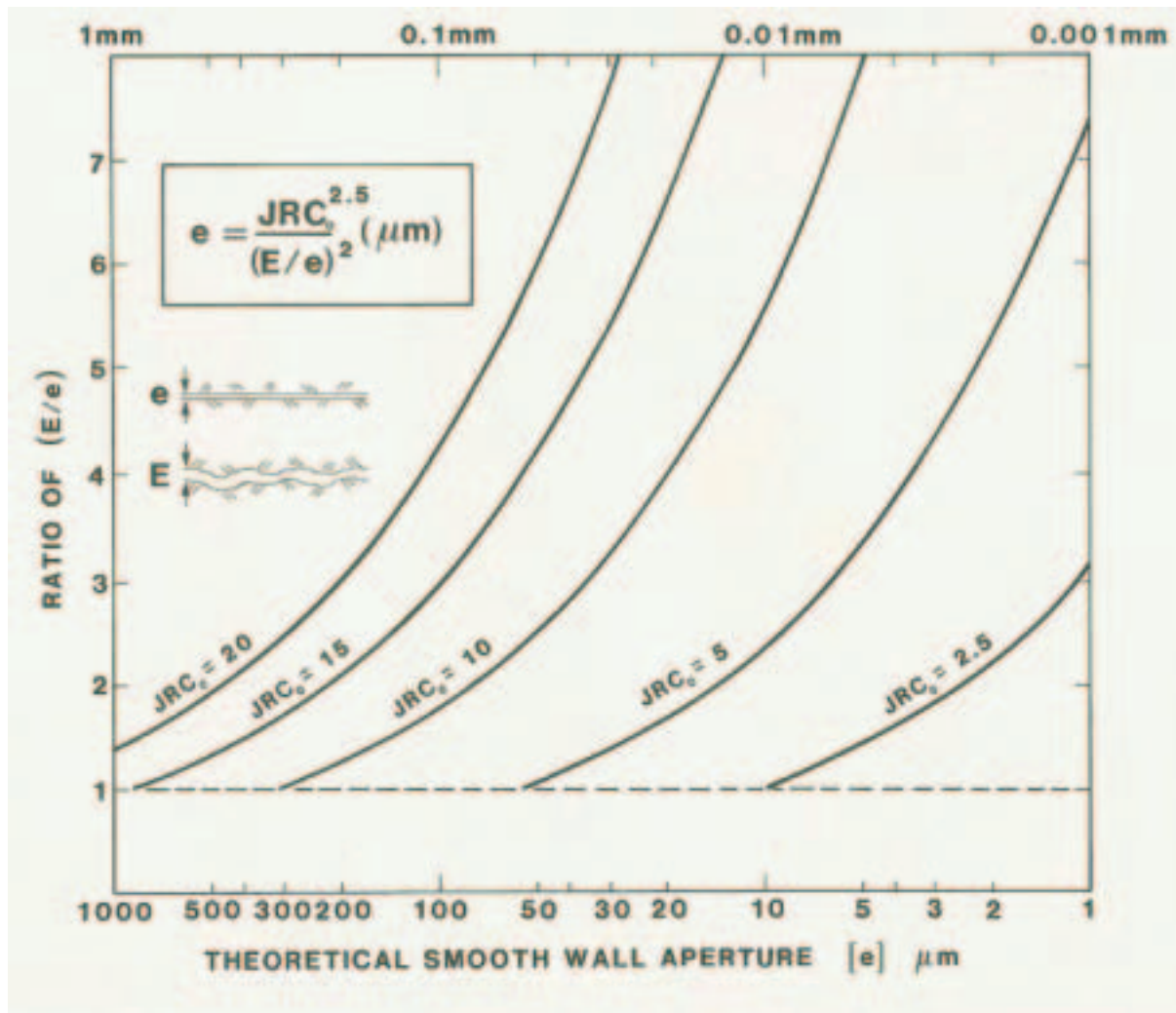
$$E = (e \cdot JRC_0^{2.5})^{1/2} \quad (A5)$$



Figur A7 fortsetter neste side.



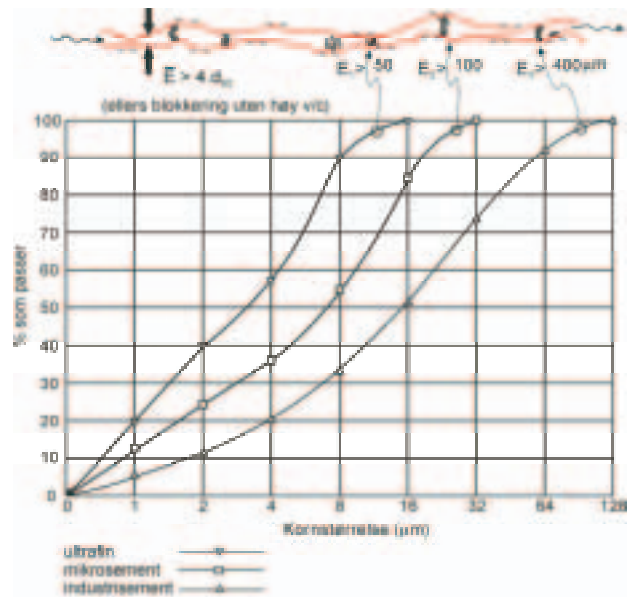
Figur A7: Ruhet av sprekker samlet fra Oslofeltet. Basert på (130) direkt skjærforsøk og (390) helningsforsøk, er omtrentlige JRC-verdier angitt ved siden av de 10 målte ruhetsprofiler. Basert på borkjernelogging ved Jong-Asker tunnelene, er det utviklet et omtrentlig forhold mellom J_r fra Q-systemet, og JRC_0 basert på 100 prøver, med på ruhetsprofilering. Figur 8 viser hvor viktig estimering av JRC_0 er.



Figur A8: Konvertering mellom (e) fra Lugeon til gjennomsnittsverdi av (E) som er injiserbar. Bruk av gjennomsnittsverdier for sprekker som har kontaktpunkter før injisering under høyt trykk, er forsvarlig på basis av tolkning av vannstrømningsforsøk i røe sprekker (Barton et al. 1985), og tolkning av forinjisering med forskjellige sementtyper i Norsk og Svensk tunnelanlegg, under forskjellige injiseringsstrykk.

5 Sammenligning av f.eks. $4 \times d_{95}$ (fra korngraderingskurve) med udeformerte fysiske sprekkeåpninger

Hvis følgende 'partikkel' representert d_{maks} eller d_{95} under injiseringsforsøk, er det klart at enten må 'partikkelstørrelsen' reduseres eller så må sprekkeåpningen økes. Store blokker (i malmsjaksammenheng) forårsaker kostbar blokkering når sjakt-diameteren er mindre enn ca. $3-4 d_{95}$.



Figur A9: Blokkering i malmsjakter og filtrering i sprekker har mye tilfelles. En tommelregel for begge er $E \geq 4d_{95}$, tross en forskjell på 10^4 til 10^5 i partikkelstørrelse.

En annen 'løsning' til blokkering eller filtrering er redusert tetthet av strømmende blokker eller i injiseringsammenheng, økt v/c -forhold. Ved *ønskelige* sammensetninger er blokkene eller partiklene gjerne tett sammen og trenger plass til mulige stasjonære blokker/partikler på de røe veggene (av sjakten eller bergsprekken). 'Boundary-layer'-effekten er et kjent begrep i hydraulikk og sammen med sprekkeveggruheten sannsynlig årsak til de brukbare tommelreglene:

$$E \geq 3d_{\text{maks}} \quad \text{eller} \quad E \geq 4d_{95}$$

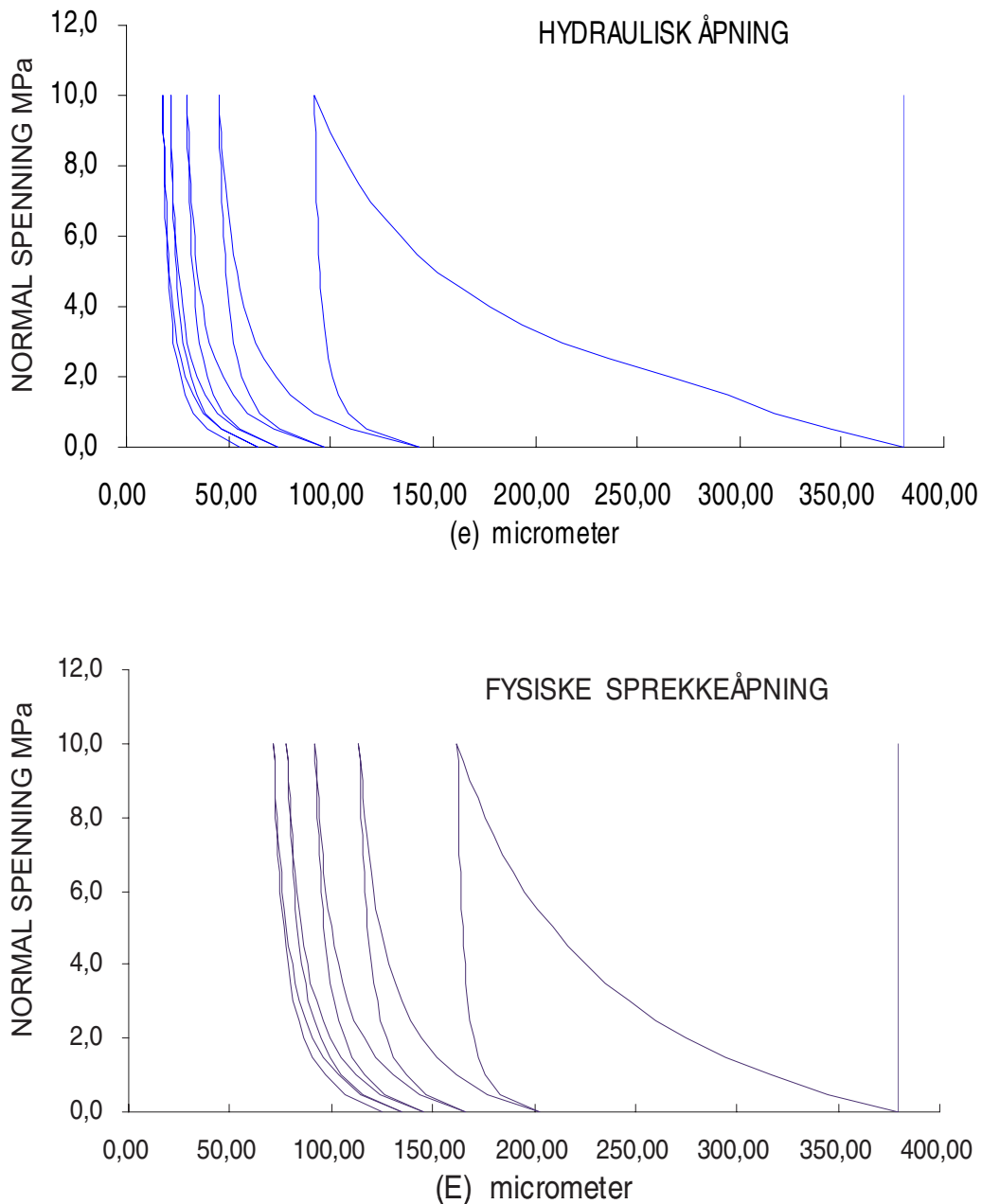
Så langt er (E) etterberegnet, via (e) fra Lugeon forsøk, dvs. under samme effektivspenningsnivå, som vanligvis er lik $\sigma'_n = \sigma_n - h_v - 10 \text{ bar}$ (fordi Lugeon-forsøk er gjennomført ved maks. 10 bar overtrykk i forhold til vanntrykk).

6 Modellering av mulig sprekkeåpning på grunn av økt injiseringstrykk

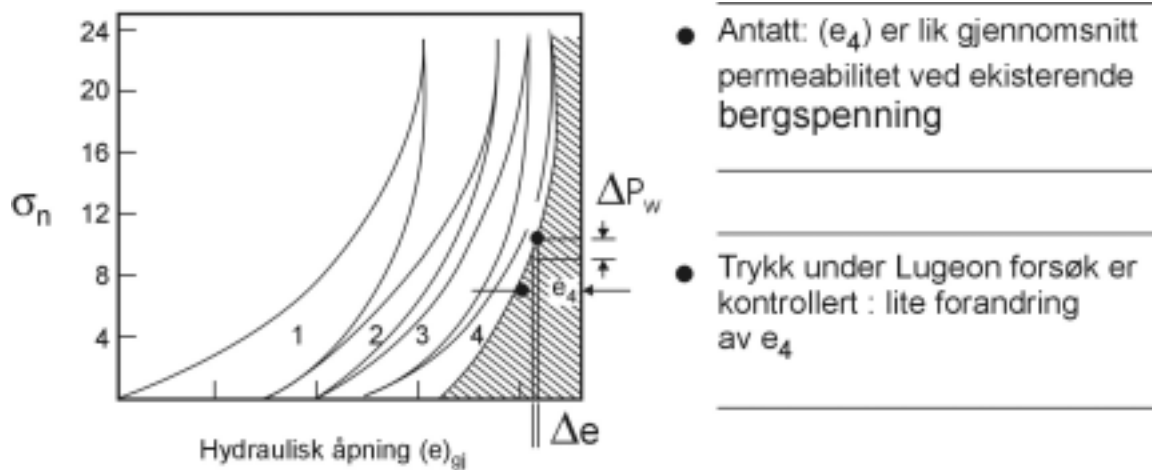
Når det er utilstrekkelig *gjennomsnittlig* sprekkeåpning (E) i forhold til disse to tommelreglene, er det et klart behov for betydelig injiseringstrykk, fordi alle sprekkeinngangsarealer rundt injiseringshullene (som er $\geq \pi D \times E$) er så små. Et heldig sammentreff er at sprekkeene har en meget ikke-lineær deformasjonsegenskap ved lav *effektiv normalspenning*, som er mulig å oppnå ved høytrykksinjisering.

Følgende figurer fra Barton–Bandis sprekkemodellering og bruk av Jong–Asker-sprekkeparameter demonstrerer hvorfor både (e) og (E) er lett å påvirke ved bruk av 50 til 100 bar injiseringstrykk. Tolkning av Lugeon-forsøk for bergartene ved Jong–Asker hadde gitt mesteparten av de hydrauliske åpningene (e) i området 25–45 μm ,

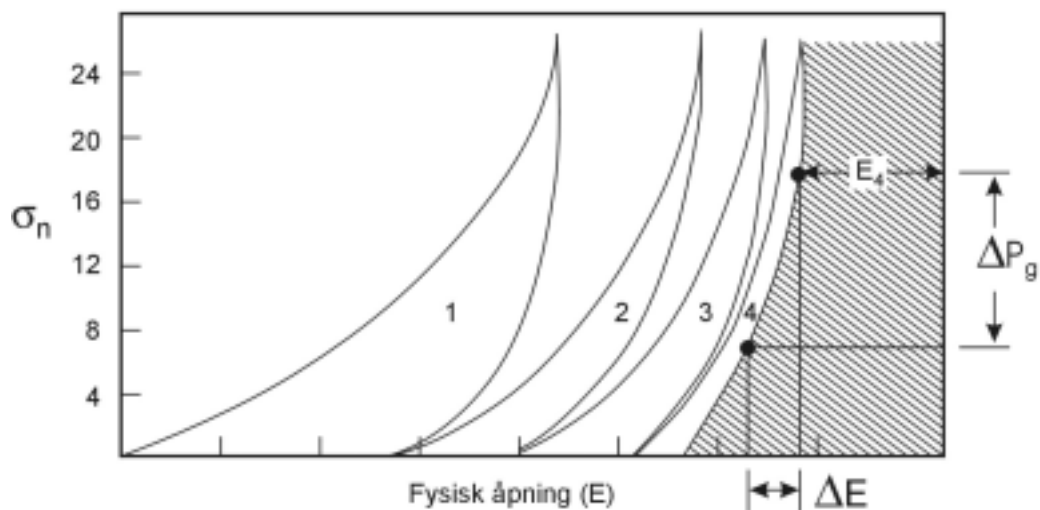
og mesteparten av de fysiske sprekkeåpninger (E) (beregnet ved bruk av bergarts-relevant JRC-verdier) i området 45–150 μm . På basis av e -, E - og S -tolkning var de *udeformerte* bergmassenes porøsiteter ($n=3E/S$) varierende fra 0,004 % (skifer) til 0,12 % (knollekalk). (Se forøvrig figur 6.)



Figur A10: Øverst: 1D-modellering av hydrauliske åpninger og mulig påvirkning av vanntrykk (les 4. syklus). Nederst: 1D-modellering av gjennomsnittlig fysiske sprekkeåpninger (etter konvertering av e) til E) med JRC (les 4. syklus, etter antatt konsolidering).

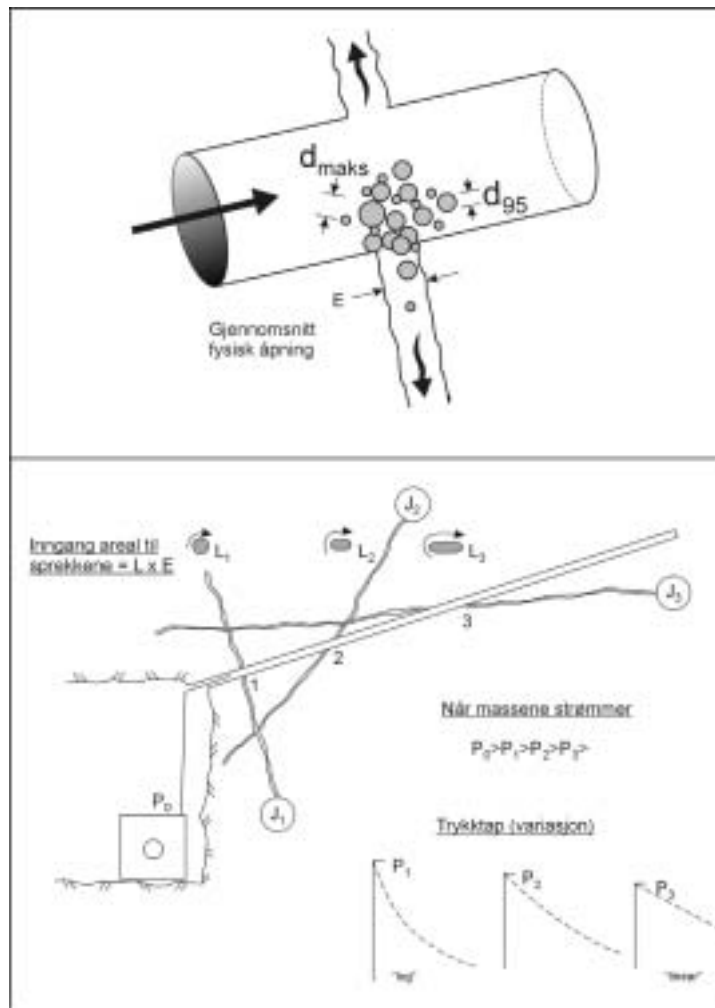


- Antatt: (E_4) er lik gjennomsnitt sprekkeåpning ved eksisterende bergspenning



Figur A11: Lugeon-forsøk skal helst gjennomføres med minst mulig deformasjon av sprekke, og derfor er permeabiliteten registrert i et forholdsvis uforstyrret bergmasse ved bruk av lavt overtrykk (dvs. ≤ 10 bar). Forinjisering under høyt trykk har en helt annet hensikt, dvs. kontrollert sprekkeåpning, eventuelt lokal hydraulisk splitting rundt borhullene. $\Delta P_g \gg \Delta P_w$ i disse to figurene.

7 Trykktap fra hull til sprekkeplan – dvs. kontrollert hydraulisk splitting



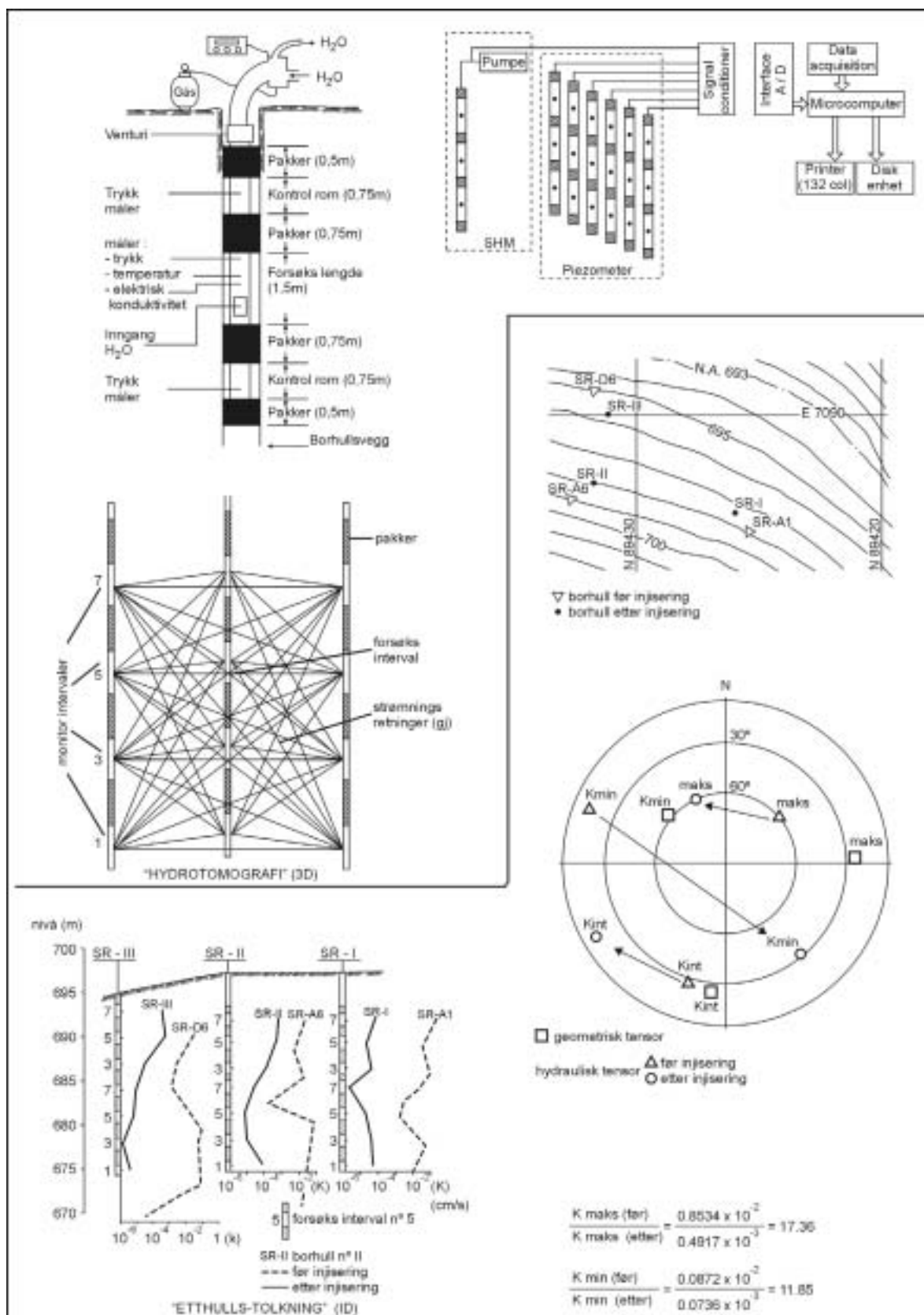
Figur A12: Forskjellige kilder til trykktap fra pumpe, rør og koblinger, men spesielt ved sprekkeinn- gangene og utover i hver sprekkeplan som tar massene.

Injiseringmassene strømmer lengst og i større volum gjennom J_3 , pga. mindre trykkfall (hvis de effektive normalspenningene er lik i J_1 , J_2 , J_3). Forskjellig sprekkeruhet for 'settet' J_1 , J_2 , og J_3 vil forårsake forskjellige fysiske sprekkeåpninger (E_1 , E_2 og E_3) og gi mulighet for flere trykkplataer under injiseringen.

Tilnærmet logaritmisk trykkfall er beregnet for 'Newtonske' væsker som vann hvis borhullet skjærer sprekkeplanet ved ca. 90° . Jo nærmere skjæringsvinkelen er 0° , desto mindre er trykkfallet, og pga. en vesentlig større sprekkeinngangsromkrets (L_3) og en mekanisk jekke-effekt, vil mengden injisert vann kunne være vesentlig større i J_3 enn i J_1 .

Sementmassene er ikke en 'Newtonsk' væske og oppfører seg tregere enn vann pga. både (internt) friksjonstap og kohesjonstap, i tillegg til vanlig hydraulisk trykktap pga. veggruhet. Ved logaritmiske trykktap (90° og vann) er 40–80 % av trykket borte 1,0 m fra borhullet. Derfor er injisering med sementmassene vanligvis en veldig kontrollert sprekkeåpning/splittede metode, som virker kraftigst nærmest hullene.

8 3D-effekter målt ved hydrotomografi før og etter injisering



Figur A13: Måling av permeabilitet både før og etter injisering (i 30 m dype hull) i et damvederlag i Brazil (Quadros og Correa Filho 1995).

Forfatterne Quadros og Correa Filho er sannsynligvis de første og eneste som har demonstrert i 3D hvordan de tre hovedkomponentene (tensorer) av permeabilitet både roterer og reduserer pga. injisering. Det var brukt vanlig industrisement i disse permeable, metamorfe bergartene.

Det er viktig å registrere at rundt hvert borhull gav en 'enkelthullstolkning' en forbedring i K m/s fra 1 til 4 størrelsesorden (eksempelvis 10^{-7} til 10^{-8} m/s, eller 10^{-4} til 10^{-8} m/s). Men i 3D ved pumping fra hvert hull (i tur og orden) og registrering i de andre to hullene, var forbedringen ikke så god på grunn av ca. 4 og 8 m mellom hullene. Dette sier en del om begrenset strømming av sementmassene, men injiseringstrykket var beskjedent her på grunn av terrengets helning mot elven.

9 Sannsynlige forbedringer i enkelte Q-parameter ved injisering

Det er flere forhold som peker i retning forbedret stabilitet ved injisering med høyt trykk. Det er for eksempel målt betydelige økninger i seismisk P-bølgehastighet etter injisering i damfundamenter (1–3 km/s er vanlig). Man har registrert redusert behov for tunnelsikring, redusert deformasjon og selvfølgelig reduserte vannlekkasjer.

For å demonstrere det som kan ha foregått, også i sammenheng med de observerte trykkplatåer og 3D-rotasjon av permeabilitetstensorer, kan Q-parametrene brukes. I følgende tenkte eksempel er forholdsvis små (konservative) forandringer av de fleste parameter rimelig å anta.

$$\text{Før forinjisering } Q = \frac{30}{9} \times \frac{1}{2} \times \frac{0.5}{1} = 0.8 \quad (1)$$

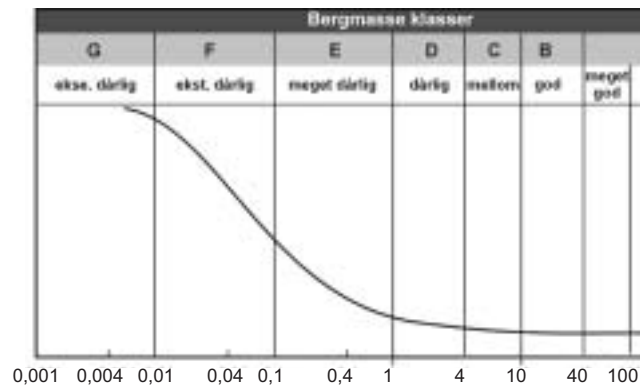
$$\text{Etter forinjisering } Q = \frac{50}{6} \times \frac{2}{1} \times \frac{1.0}{1} = 17 \quad (2)$$

J_r/J_a , er 1/2 i (1); og er forandret til 2/1 etter forinjisering i (2). Dette er basert på antatt tetting av sprekkesett 1.

10 Empirisk-baserte forbedringer i begmasseparametre og redusert sikringsbehov

De forholdsvis beskjedene forandringene i 5 av 6 Q-parameter ovenfor kan muligens ha følgende positive effekter på bergmasseparameter, basert på empiriske likninger utviklet av Barton i 2002:

FØR	ETTER
Q = 0,8 (meget dårlig)	Q = 17 (god)
$V_P = 3,1 \text{ km/s}$	$V_P = 4,4 \text{ km/s}$
$E_{\text{mass}} = 7 \text{ GPa}$	$E_{\text{mass}} = 20 \text{ GPa}$
<u>Tunnelsikring:</u> B 1,6 m c/c S (fr) 10 cm	<u>Tunnelsikring:</u> B 2,4 m c/c S (fr) ingen



Figur A14: Relativ kostnad for tunnel driving og sikring relatert til Q-verdien (Barton, Buen og Roald, 2001/2).

Figur A14 demonstrerer ved hjelp av relativ kostnad for tunneldriving og sikring hvordan godt gjennomført forinjisering kan ved forbedrede Q-verdier redusere sikringskostnader (og tid) ved forinjisering av dårlig fjell (se kurvens bratte helning).

Vedlegg B

Tabellene B1–B4 viser sammenstillinger med de sentrale parameterne ved injeksjonsarbeider i tunnelene: Tåsen, Svartdal, Lundby, Storhaug, Bragernes, Baneheia, Lunner (øst) og Hagan. For detaljer vises det til Anderson, H., Intern rapport nr. 2313 og 2325, 2003 og Åndal et al. 2001.

Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnel-projekter:	Forutsetninger			Organisering av injeksjon					
	Bergmasse-forhold	Bergover-dekning	Tetthetskrav l/min/100 m	Injeksjons-strategi	Mannskap og opplæring	Spesiell beredskap	Rutinemessig injeksjon	Tilpasset injeksjon	Kriterier for injisering
Tåsen	Kalk/leirskifer gjennomskåret av oppsprukne syenittganger.	5-20 m.	Selvpålagt krav ved systematisk injeksjon: 10 , og ved sporadisk injeksjon: 15-20 .	Sporadisk / systematisk.	Ord.stufflag m/spesialformann.	Ingen.	Systematisk injeksjon pel 2525-2956Ø og 2525-2912V basert på utlekkasjemålinger.	Pel 2750-2815Ø og 2800-2860V: tett oppsprukne syenittganger med borevansker.	Utlekkasje sonder/kontrollhull (se tabell 5, rapport nr 2, for videre detaljer).
Svardal	Gneis inkl. Ekeberg-forkastningen.	2,5-3 m (i området med tilpasset injeksjon).	Selvpålagt krav: 5 .	Sporadisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Stave maskin.	Ingen.	Ikke injisert utenfor området med tilpasset injeksjon	Pel 400-555Ø og 645-745V (eneste området som ble injisert)	Utlekkasje sonder/kontrollhull.
Lundby	Skifrig gneis, inkl. knusnings-sone med liten overdekning.	5-35 m.	Pel 600-1190: 2,5 . Pel 1190-1780: 1,0 . Pel 1780-2040: 2,0 . Pel 2040-2660: 0,5 .	Systematisk, alltid to runder.	Spesiallag.	Ingen.	Hele veien, tre tetthetsklasser satt opp med detaljerte injeksjonsopplegg.	Pel 2300-2400 (Lammelyckan): hullengde 9-10 m, en salve mellom hver skjerm.	Vanntapsmåling utført i alle hull, to runder injeksjon uansett, 2. runde av og til utelatt ved null vanntap i 1. runde.
Storhaug	Fyllitt (finkrystallisk glimmerskifer).	3-15 m.	Pel 1250-1550: 3 . Pel 750-900: 10 .	Systematisk / sporadisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Tunnelsupport.	Ingen.	Ikke injisert utenfor området med tilpasset injeksjon.	Pel 1400-1550 (eneste området som ble injisert).	Vanntapsmåling i sonder- og kontrollhull, ved Lugeon over 0,1 skulle injeksjon vurderes, varsling BH ved inngang >300 kg i ét hull.
Bragernes	Basalt, rombeporfyrt og kvartsporfyrt.	10-150 m, ca 100 m i snitt.	Pel 800-1700: 10 . Pel 400-800 og 1700-1900: 30 .	Systematisk.	Ordinære stufflag.	Ingen.	Stort sett hele veien, ble besluttet tidlig, pga pumpeproblemer og innlekkasje tilbake i uinjiserte områder.	Pel 1257-1293 (Bjerringdalsforkastningen): skjerm m/ 2-4 runder, 1-2 salver mellom skjerm.	Utlekkasje fra sonderhull over 5 l/min samlet ga injeksjon, varsling BH ved inngang over 1000 kg i ét hull (senere økt til 5000 kg og v/c 0,5 direkt ved inngang >3000 kg).
Baneheia	Gneis med pegmatitt-ganger.	10-40 m.	Under Stampene: 6-12 og 60 l/min totalt (se tabell 17, rapport nr 2, for videre detaljer).	Systematisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Tunnelsupport.	Ingen.	Stort sett hele veien, ble besluttet tidlig, pga tilbakepressing av vann i uinjiserte områder.	Pel 3609-3624V: skjerm m/ 5 runder. Pel 3543-3590Ø: skjerm m/ 3 runder.	Vanntapsmåling i 5 hull pr. skjerm i starten (ca 3 måneder), ble ganske tidlig forlatt og systematisk injeksjon innført.
Lunner (øst)	Syenitt, vulkanitt og sandstein/konglomerat.	10-220 m, ca 130 m i snitt.	Pel 1450-1600, 1800-2100 og 2700-3850: 10 . Pel 1250-1450, 1600-1800, 2100-2700 og 3850-3960: 20 .	Systematisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Tunnelsupport.	Ingen.	Stort sett hele veien østfra, ble besluttet tidlig, pga lekkasje i uinjiserte områder.	Pel 3770-3742: borevansker, stor inngang, sprøytebetongbuer/spiling.	Utlekkasje sonder/injeksjonshull bestemmer bruk av industri/mikro-ement, varsling BH ved inngang over 600 kg i ét hull (er blitt økt).
Hagan	Hornfels og syenitt.	6-60 m, ca 25 m i snitt.	Pel 1600-2200: 5 . Pel 1400-1600 og 2200-2900: 10 .	Systematisk / sporadisk.	Ord. stufflag, m/opplæring av Elkem.	Ingen.	Systematisk injeksjon ved liten overdekning og krav 5 l/min/100 m, resten sporadisk basert på utlekkasjemålinger.	Injeksjonen ble definert som rutinemessig pga det store omfanget av spesielle forhold som liten overdekning.	Utlekkasje fra sonderhull over 10 l/min samlet ga injeksjon ved ingen spesielle tetthetskrav, over 5 l/min samlet ved krav på maksimal innlekkasje 10 l/min/100 m.

Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnelprosjekter:	Injeksjonsskjerm				Utstyr for injeksjon		
	Utstyr for boring	Borhullslengder og -stikning, c/c-avstand og skjermoverlapp	Injeksjons-hull i stuff	Boravviksmåling	Pakkere og plassering	Registrering av mengder	Utstyr for blanding og pumping
Tåsen	Tunnelrigg.	I start 21 m, men økte til 24 m for å øke overlapp og salver mellom injeksjon. 5 m stikning. 25 hull ved systematisk injeksjon. Tre salver mellom hver skjerm. Ytre og indre skjerm ved tilpasset injeksjon.	Dersom der var slepper som kom ut i stuffen.	Boravvik testet en gang med enkelt utstyr, lomme-lykt montert inne i 6 m langt plastrør.	Mekaniske pakkere, plassert 1 m inn i hullet.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	1 mikser, 2 aktivatører, 2-3 pumper m/totalt 9 uttak fra manifold (brakte bare 3). Krav til pumpe 60 bar og 100 l/min.
Svartdal	Tunnelrigg.	Lengde 21 m, ble ofte kortere pga borevansker. 5 m stikning, 15-16 hull pr. skjerm (c/c-avstand 1,5-2 m).	Enkelte ganger ved lekkasje på stoff, med stor stikning for mest mulig å inngå i skjerm.	Boravviksmåling med i kontrakt, ble ikke utført.	Mekaniske pakkere, plassert 1 m inn i hullet.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	Rigg med 1 mikser, 1 aktuator og 1 pumpe m/4-5 utganger (brakte opptil 4). Krav til pumpe var 75 bar trykk.
Lundby	Tunnelrigg.	Tre tetthetsklasser: hullengde 10-17 m, 4 m stikning og antall hull 30, 44 og 62. To salver mellom hver skjerm. Dårligere fjell/strengere krav gav generelt flere og kortere hull og større overlapp.	Av og til.	Boravvik målt på over 20% av skjermene, med Inclinometer 95 i alle hull (1-1,5 h). Stort sett bra, toleranse 80 cm i enden.	Engangs og hydrauliske pakkere av type Stabilator 48 og 60 mm diameter, plassert 1-1,5 m inn.	Riggen hadde Loggart, men registrering ble gjort manuelt.	To rigger med 1 EPV Craelius mikser på vekt, 1 aktuator og 2 Craelius ZBE200 pumper m/4 utganger (trykk og volum lest av for hver slange).
Storhaug	Tunnelrigg.	Hullengde 14 m. Stikning 2 m i heng, 4 m i vegg og 6 m i sålen. Antall hull variert mellom 30-70, havnet optimalt på 62. To salver à 3 m mellom hver skjerm.	Hele veien (12 hull i stoff av totalt 62 hull pr. skjerm).	Boravviksmåling med i kontrakt, ble ikke utført.	Mekaniske pakkere med 48 mm diameter, plassert 1 m inn i hullet først, deretter økt til 2-3 m.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	To sett med kolloidblandere, aktuator og stempelpumpe. Bare én pumpelinje ble valgt å bruke pga enklere å følge opp.
Bragernes	Tunnelrigg.	I start 21 hull (c/c ca 1,5-2,5 m) à 22 m, 2-3 salver à 5 m mellom hver skjerm. Senere 7 hull (c/c ca 3,5-6,5 m) à 27 m og 4 salver mellom. Stikning ca 5 m i heng og vegger og 7,5 m i såle.	Av og til, basert på erfaringene fra forrige skjerm og sleppemønster.	Pga få hull ble det ikke ansett som nødvendig.	Codan 48 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 1,5 m inn i hullet, fikk problem med at de gikk tett ved bruk av Mauring.	Riggen hadde automatisk reg. (LOGAC), men registreringen ble gjort manuelt.	1 Cemix mikser, 2 aktivatører, 2 pumper m/2 utganger (trykk og volum leses av for hver) og vekt for blanding. Krav til pumpe var 90 bar trykk og 100 l/min.
Baneheia	Tunnelrigg.	Lengde 21 til 24 m, 6-8 m stikning. Optimale antall hull ca 30 for et tunnel-tverrsnitt på 50-80 m ² , c/c-avstand mellom hvert hull 1-2 m. Tre salver mellom hver skjerm. Ytre, indre og sperreskjerm prøvd ut.	Hele veien (4-7 hull i stoff av totalt 30 hull pr. skjerm).	Boreavvik var satt til 0,5 m i kontrakten, men måling ble ikke utført.	Codan 58 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 1,5 inn, hadde hurtigkobling og brukte jekker for å feste pakkene.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	Gammel rigg ble brukt til Thermax. Ny rigg med 2 mikser, 2 aktivatører, 2 pumper m/2 utganger hver og vekt for blanding. Krav till pumpe var 50 bar og 50 l/min.
Lunner (øst)	Tunnelrigg.	Lengde 24 m, 5 m stikning i heng og vegger og 8 m i såle. 24 hull (c/c ca 2 m) i start, senere nede i 14 hull (c/c 2-3 m). Oftest tre salver mellom hver skjerm.	Av og til (3-5 hull), gjerne Thermax om utgang i store sprekker.	Boreavvik var satt til 0,5 m i kontrakten, men måling ble ikke utført.	Codan 63 el. 57 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 2 m inn.	Manuell registrering av mengder og trykk for hvert hull.	1 Cemix mikser, 2 Cemag aktivatører, 2 Craeliuspumper og vekt for blanding. Krav til pumpe var 100 bar trykk og 60-0 l/min.
Hagan	Tunnelrigg.	Lengde 24 m, 5 m stikning i heng og vegger og 6 m i såle. 20-45 hull, inkludert 6-10 hull inne i profilet. Oftest tre salver mellom hver skjerm.	Hele veien (6-10 hull i stoff av totalt 20-45 hull pr. skjerm).	Boreavvik var beskrevet i kontrakten, men måling ble ikke bedømt nødvendig.	Codan 48 mm mekaniske engangspakkere, plassert ca 4 m inn, fikk problem med at det kom masse mellom pakker og berg.	Riggen hadde automatisk reg. (LOGAC), og registreringen fungerte fint.	1 mikser, 3 aktivatører, 3 pumper og vekt for blanding. Krav til pumpe var 70-80 l/min ved lik kapasitet for trykket.

Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnel-projekter:	Injeksjonsmiddel			Prosedyre			Resultat		
	Injeksjons-middel	Tilsetnings-stoffer	Andre midler	v/c-tall	Rekkefølge av injeksjonshull	Slutt-trykk	Lekkasje-forhold	Vurdering av tetthetsresultat	Prosjekt-status
Tåsen	Industrisement Rapid Rp 38 fra Norcem	Rescon HP 2-3%, Grout Aid prøvd i en skjerm sent i prosjektet.	Mikrosement Rheocem 650, Tacss til etterinjeksjon.	2,0-0,5.	Startet nede og gikk oppover, 2-3 slanger ble brukt.	15-45 bar, vanligvis 25-30 bar.	25,7 l/min/100 m og 240 l/min totalt (se tabell 4, rapport nr 2, for videre detaljer).	Opptil 3 runder på en skjerm, men tetting konstatert ikke tilstrekkelig, 4 infiltrasjonsbrønner installert fra tunnelen.	Tett nok, men med ikke planlagt vanninfiltrasjon i problemsone.
Svardal	Industrisement Rapid Rp 38 fra Norcem	-	Mauring brukt til plugging av hull.	1,5-0,7.	Startet nede, pakker montert ved gjennomgang og injeksjon startet der. Runde 2 tilpasset etter lekkasje i 1. runde.	20-30 bar.	4,3 l/min/100 m for hele tunnelen på 3450 m. Kun injisert over 260 m totalt.	Opptil 3 runder på en skjerm, 4 m-bolter punkterte ikke skjermen, 25 cm differensialsetning på en 30 m lang mur.	Tett nok totalt, ikke målt i injisert område.
Lundby	Injeksjonsement fra Cementa	Bentonitt 3%, Intraplast 0,5%.	Tacss og Rhocagil, til etterinjeksjon.	3,0-0,5 (0,3 ved hullfylling).	Startet i hull med størst vann-tap, pakker ble montert ved gjennomgang og hull injisert, v/c-tall redusert avhengig av sluttrykk eller motstand.	25 bar.	0,9 l/min/100 m for hele tunnelen på 4358 m.	Tetthetskrav (0,5 l/min/100 m) ved Lammelyckan ikke oppfylt, lekker ca 1,0 l/min/100m. En del bolter punkterte skjermen, planlagt infiltrasjonsbrønn installert.	Tett nok, med planlagt vanninfiltrasjon i Lammelyckan.
Storhaug	Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-15%, SP40 2%.	Thermax for plugging av hull.	1,1-0,4 (vanligvis 0,9-0,7).	Startet nede, pakker ble montert ved gjennomgang og hullet injisert.	30 bar i kontrakt, senere 50 bar i heng og 70 bar i sålen.	1,6 l/min/100 m mellom pel 1400-1550.	Dobbel injeksjonsskjerm (stort overlapp), men en del bolter punkterte skjermen.	Tett nok.
Bragernes	Industrisement Rapid Rp 38 fra Norcem	Rescon HP 2-3%.	Mauring når det var problem med utgang i stoff.	1,0-0,5.	Startet nede med 1-2 slanger, ved gjennomgang ble pakker montert og injeksjonen fortsatte der.	20-30 bar i kontrakt, etter hvert brukt 40-70 bar (også opptil 90 bar).	10 l/min/100 m over hele tunnelen. 8 l/min/100 m mellom pel 240-1730 og 25 l/min/100 m mellom pel 1730-2540.	Injeksjonsskjerm punktert av en del 3 og 4 m-bolter. Prøvd halv skjerm - ikke vellykket, medførte bare at lekkasje flyttet på seg.	Tett nok.
Baneheia	Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-15%, SP40 2%.	Thermax for plugging av hull (ikke alltid vellykket).	0,9-0,7.	Startet nede med 2 slanger, ved gjennomgang ble pakker montert og injeksjonen fortsatte der. Ved store innganger lot en hullet hvile før en gikk tilbake til dem senere.	50 bar vanligvis, men brukt opp til 80 bar.	1,8 l/min/100m eller 50 l/min totalt (når 2390 m var drevet).	4 og 5 m-bolter punkterte en del skjerm, 3 m-bolter gjorde ikke det. 95% av skjermene fullført med én runde.	Tett nok.
Lunner (øst)	Industrisement fra Norcem el. Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-25%, SP40 2-3%.	Thermax når det var problem med utgang i stoff.	2,0-0,5.	Startet nede med 1-2 slanger, ved gjennomgang ble pakker montert og injeksjonen fortsatte der.	50 bar vanligvis, men brukt opp til 70 bar.	8,4 l/min/100m (når 1565 m var drevet fra øst, pel 3850-2395).	Muligens injisering av noen bolter. 95% av skjermene fullført med én injeksjonsrunde.	Tett nok.
Hagan	Industrisement fra Norcem el. Ultrafin 12 fra Scancem	Grout Aid 5-25%, SP40 2-3%.	Mauring og Thermax når det var problem med utgang i stoff.	1,1-0,4.	Startet nede med 2 slanger, pakker ble installert direkte etter boring pga stort utlekkasje. Ved nærhet til brønner startet en der, lot hull hvile for så å gå tilbake igjen.	80-100 bar.	12 l/min/100 m over hele tunnelen. 4 l/min/100 m mellom pel 1680-2200 og 19 l/min/100 m mellom pel 2200-2850.	Injeksjonsskjerm punktert av en del 3 m-bolter.	Tett nok.

Sammenstilling av injeksjon for følgende tunnel-prosjekter:	Tunnelfakta			Gjennomsnittstall for boring og sementforbruk							
	Tunnel-lengde	Utforming og tverrsnitt	Drevet mellom	Bormeter pr m inj.tunnel	Bormeter pr m ² inj.tunnel	Masse kg pr hull, inkl. fyll	Masse kg pr m hull, inkl. fyll	Masse kg pr m inj.tunnel	Masse kg pr m ² inj.tunnel	Masse kg pr time inj.tid	Inj.tid time pr m inj.tunnel
Tåsen	933 m Ø 937 m V	To løp med flere ramper, 65-80 m ²	1997-1998	85	2,74	535	26	802	26	870	0,92
Svardal	1700 m N 1450 m S	To løp med tilsluttende ramper, ca 65 m ²	1998-2000	22	0,65	1358	80	1719	51	978	1,76
Lundby	2060 m N 2060 m S 238 m vent.-tunnel	To løp med 13 tverrforbindelser, 86-92 m ²	1994-1998	80	2,00	79	6	476	12	-	-
Storhaug	1260 m	Ett løp, 85 m ²	1998-2001	130	3,33	112	8	1014	26	273	3,71
Bragernes	2310 m totalt inkl. vent.- og rømnings-tunnel	Ett løp, 72-83 m ²	1999-2001	17	0,57	2050	81	1242	42	2774	0,45
Baneheia	3000 m totalt	To løp med tilsluttende ramper, 44-87 m ²	1999-2001	40	1,08	256	9	514	14	755	0,68
Lunner (øst)	1555 m av 3800 m	Ett løp, ca 61 m ²	2001-2003	40	1,26	722	30	1299	41	1224	1,06
Hagan	2700 m totalt	Ett løp, 62-85 m ²	2001-2003	45	1,29	1418	59	2716	78	1893	1,43

Publikasjoner fra Teknologivdelingen

45. Proceedings of the International Research Symposium on Pavement Wear, Oslo 6th-9th June 1972. 227 p. 1973.
46. Frost i veg 1972. Nordisk Vegteknisk Forbunds konferanse i Oslo 18-19 sept. 1972 (Frost Action on Roads 1972. NVF Conference in Oslo 1972). 136 p. 1973.
47. Å. KNUTSON. Praktisk bruk av bark i vegbygging (Specifications for Use of Bark in Highway Engineering).
E. GJESSING, S. HAUGEN. Barkavfall – vannforurensning (Bark Deposits – Water Pollution). 23 p. 1973.
48. Sikring av vegtunneler (Security Measures for Road Tunnels). 124 p. 1975.
49. H. NOREM. Registrering og bruk av klimadata ved planlegging av høgfjellsveger (Collection and Use of Weather Data in Mountain Road Planning).
H. NOREM. Lokalisering og utforming av veger i drivsnømråder (Location and Design of Roads in Snow-drift Areas).
H. NOREM, J. G. ANDERSEN. Utforming og plassering av snøskjermer (Design and Location of Snow Fences).
K. G. FIXDAL. Snøskredoverbygg (Snowsheds).
H. SOLBERG. Snørydding og snøryddingsutstyr i Troms (Winter Maintenance and Snow Clearing Equipment in Troms County). 59 p. 1975.
50. J. P. G. LOCH. Frost heave mechanism and the role of the thermal regime in heave experiments on Norwegian silty soils.
K. FLAATE, P. SELNES. Side friction of piles in clay.
K. FLAATE, T. PREBER. Stability of road embankments in soft clay.
A. SØRLIE. The effect of fabrics on pavement strength – Plate bearing tests in the laboratory.
S. L. ALFHEIM, A. SØRLIE. Testing and classification of fabrics for application in road constructions. 48 p. 1977.
51. E. HANSEN. Armering av asfaltdekker (Reinforced bituminous pavements).
T. THURMANN-MOE, R. WOLD. Halvsåling av asfaltdekker (Resurfacing of bituminous pavements).
A. GRØNHAUG. Fremtidsperspektiver på fullprofilboring av vegtunneler (Full face boring of road tunnels in crystalline rocks).
E. REINSLETT. Vegers bæreevne vurdert ut fra maksimal nedbøyning og krumming (Allowable axle load (technically) as determined by maximum deflection and curvature). 52 p. 1978.
52. T. THURMANN-MOE, S. DØRUM. Lyse vegdekker (High luminance road surfaces).
A. ARNEVIK, K. LEVIK. Erfaringer med bruk av overflatebehandlinger i Norge (Experiences with surface dressings in Norway).
J. M. JOHANSEN. Vegdekkers jevnhet (Road roughness).
G. REFSDAL. Vegers bæreevne bestemt ved oppgraving (indeksmetoden) og nedbøyningsmåling. Er metodene gode nok? (Road bearing capacity as decided by deflection measurements and the index method). 44 p. 1980.
53. E. HANSEN, G. REFSDAL, T. THURMANN-MOE. Surfacing for low volume roads in semi arid areas.
H. MTANGO. Dry compaction of lateritic gravel.
T. THURMANN-MOE. The Otta-surfacing method. Performance and economy.
G. REFSDAL. Thermal design of frost proof pavements.
R. G. DAHLBERG, G. REFSDAL. Polystyrene foam for lightweight road embankments.
A. SØRLIE. Fabrics in Norwegian road building.
O. E. RUUD. Hot applied thermoplastic road marking materials.
R. SÆTERS DAL, G. REFSDAL. Frost protection in building construction. 58 p. 1981.
54. H. ØSTLID. High clay road embankments.
A. GRØNHAUG. Requirements of geological studies for undersea tunnels.
K. FLAATE, N. JANBU. Soil exploration in a 500 m deep fjord, Western Norway. 52 p. 1981.
55. K. FLAATE. Cold regions engineering in Norway.
H. NOREM. Avalanche hazard, evaluation accuracy and use.
H. NOREM. Increasing traffic safety and regularity in snowstorm periods.
G. REFSDAL. Bearing capacity survey on the Norwegian road network method and results.
S. DØRUM, J. M. JOHANSEN. Assessment of asphalt pavement condition for resurfacing decisions.
T. THURMANN-MOE. The Otta-surfacing method for improved gravel road maintenance.
R. SÆTERS DAL. Prediction of frost heave of roads.
A. GRØNHAUG. Low cost road tunnel developments in Norway. 40 p. 1983.
56. R. S. NORDAL. The bearing capacity, a chronic problem in pavement engineering?
E. REINSLETT. Bearing capacity as a function of pavement deflection and curvature.
C. ØVERBY. A comparison between Benkelman beam, DCP and Clegg-hammer measurements for pavement strength evaluation.
R. S. NORDAL. Detection and prediction of seasonal changes of the bearing capacity at the Vormsund test road.
P. KONOW HANSEN. Norwegian practice with the operation of Dynaflect.
G. REFSDAL, C-R WARNINGHOFF. Statistical considerations concerning the spacing between measuring points for bearing capacity measurements.
G. REFSDAL, T. S. THOMASSEN. The use of a data bank for axle load policy planning and strengthening purpose.
T. S. THOMASSEN, R. EIRUM. Norwegian practices for axle load restrictions in spring thaw. 80 p. 1983.
57. R. S. NORDAL, E. HANSEN (red.). Vormsund forsøksveg. Del 3: Observasjoner og resultater (Vormsund Test Road, Part 3: Observations and Results). 168 p. 1984.
58. R. S. NORDAL, E. HANSEN (red.). The Vormsund Test Road. Part 4: Summary Report. 82 p. 1987.
59. E. LYGREN, T. JØRGENSEN, J. M. JOHANSEN. Vannforurensning fra veger. I. Sammendragsrapport. II. Veiledning for å håndtere de problemer som kan oppstå når en veg kommer i nærheten av drikkevannforekomst (Highway pollution). 48 p. 1985.
60. NRRL, ASPHALT SECTION. Surfacing for low volume roads.
T. E. FRYDENLUND. Superlight fill materials.
K. B. PEDERSEN, J. KROKEBORG. Frost insulation in rock tunnels.
H. ØSTLID. Flexible culverts in snow avalanche protection for roads.
K. FLAATE. Norwegian fjord crossings why and how.
H. S. DEIZ. Investigations for subsea tunnels a case history.
H. BEITNES, O. T. BLINDHEIM. Subsea rock tunnels. Preinvestigation and tunnelling processes. 36 p. 1986.
61. Plastic Foam in Road Embankments:
T. E. FRYDENLUND. Soft ground problems.
Ø. MYHRE. EPS – material specifications.
G. REFSDAL. EPS – design considerations.
R. AABØE. 13 years of experience with EPS as a lightweight fill material in road embankments.
G. REFSDAL. Future trends for EPS use.
Appendix: Case histories 1-12. 60 p. 1987.
62. J. M. JOHANSEN, P. K. SENSTAD. Effects of tire pressures on flexible pavement structures – a literature survey. 148 p. 1992.
63. J. A. JUNCA UBIERNA. The amazing Norwegian subsea road tunnels. 24 p. 1992.

64. A. GRØNHAUG. Miljøtiltak ved vegbygging i bratt terreng (Environmental measures for road construction in mountain slopes). Ø. MYHRE. Skumplast uten skadelige gasser (The phase out of hard CFCs in plastic foam). T. JØRGENSEN. Vurdering av helsefare ved asfaltstøv (Evaluation of health risks of dust from asphalt wear). N. RYGG. Miljømessig vegtilpassing (Environmental road adjustment). 52 p. 1992.
65. C. HAUCK. The effect of fines on the stability of base gravel. A. A. ANDRESEN, N. RYGG. Rotary-pressure sounding 20 years of experience. 24 p. 1992.
66. R. EVENSEN, P. SENSTAD. Distress and damage factors for flexible pavements. 100 p. 1992.
67. STEINMATERIALKOMITEEN. Steinmaterialer (Aggregates). 20 p. 1993.
68. Å. KNUTSON. Frost action in soils. 40 p. 1993.
69. J. VASLESTAD. Stål- og betongelementer i løsmassetunneler (Corrugated steel culvert and precast elements used for cut and cover tunnels). J. VASLESTAD. Støttekonstruksjoner i armert jord (Reinforced soil walls). 56 p. 1993.
70. SINTEF SAMFERDSELSTEKNIKK. Vegbrukers reduserte transportkostnader ved opphevelse av telerestriksjoner (Reduced transportation costs for road user when lifting axle load restrictions during spring thaw period). 144 p. 1993.
71. R. Evensen, E. Wulvik. Beregning av forsterkningsbehov basert på tilstandsvurderinger – analyse av riks- og fylkesvegnettet i Akershus (Estimating the need of strengthening from road performance data). 112 p. 1994.
72. Fjellbolting (Rockbolting). 124 p. 1994.
73. T. BÆKKEN, T. JØRGENSEN. Vannforurensning fra veg – langtidseffekter (Highway pollution – long term effect on water quality). 64 p. 1994.
74. J. VASLESTAD. Load reduction on buried rigid pipes. J. VASLESTAD, T. H. JOHANSEN, W. HOLM. Load reduction on rigid culverts beneath high fills, long-term behaviour. J. VASLESTAD. Long-term behaviour of flexible large-span culverts. 68 p. 1994.
75. P. SENSTAD. Sluttrapport for etatsatsingsområdet «Bedre utnyttelse av vegens bæreevne» («Better utilization of the bearing capacity of roads, final report»). 48 p. 1994.
76. F. FREDRIKSEN, G. HASLE, R. AABØE. Miljøtunnel i Borre kommune (Environmental tunnel in Borre Municipality). F. FREDRIKSEN, F. OSET. GEOPLOT – dak-basert presentasjon av grunnundersøkelser (GEOPLOT – CAD-based presentation of geotechnical data). 48 p. 1994.
77. R. KOMPEN. Bruk av glideforskaling til brusøyler og -tårn (Use of slipform for bridge columns and towers). 16 p. 1995.
78. R. KOMPEN. Nye regler for sikring av overdekning (New practice for ensuring cover). R. KOMPEN, G. LIESTØL. Spesifikasjoner for sikring av armeringens overdekning (Specifications for ensuring cover for reinforcement). 40 p. 1995.
79. The 4th international conference on the «Bearing capacity of roads and airfields» – papers from the Norwegian Road Research Laboratory. 96 p. 1995.
80. W. ELKEY, E. J. SELLEVOLD. Electrical resistivity of concrete. 36 p. 1995.
81. Å. KNUTSON. Stability analysis for road construction. 48 p. 1995.
82. A. ARNEVIK, E. WULVIK. Erfaringer med SPS-kontrakter for asfaltering i Akershus (Experiences with wear-guaranteed asphalt contracts on high volume roads in Akershus county). 28 p. 1996.
83. Sluttrapport for etatsatsingsområdet «Teknisk utvikling innen bru- og tunnelbygging» («Technical development – bridge and tunnel construction, final report»). 20 p. 1996.
84. OFU Gimsøystraumen bru. Sluttrapport «Prøvere-parasjon og produktutvikling» («Trail repairs and product development, final report»). 156 p. 1997.
85. OFU Gimsøystramen bru. Sluttrapport «Klimapåkjenning og tilstandsvurdering» («Climatic loads and condition assessment, final report»). 248 p. 1998.
86. OFU Gimsøystraumen bru. Sluttrapport «Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon» («Instrumentation, documentation and verification, final report») 100 p. 1998.
87. OFU Gimsøystraumen bru. anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong (Recommendations for inspection, repair and surface treatment of coastal concrete bridges). 112 p. 1998.
88. OFU Gimsøystraumen bru. anbefalinger for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong. (Recommendations for instrumental corrosion monitoring of coastal concrete bridges). 60 p. 1998
89. OFU Gimsøystraumen bru. Hovedresultater og oversikt over slutt-dokumentasjon (Main result and overview of project reports). 24 p. 1998.
90. J. KROKEBORG. Sluttrapport for Veg-grepsprosjektet «Veggrep på vinterveg» («Studded tyres and public health, final report»). 52 p. 1998.
91. A. GRØNHAUG. Tunnelkledinger (Linings for water and frost protection of road tunnels). 68 p. 1998.
92. J. K. LOFTHAUG, J. MYRE, F. H. SKAARDAL, R. TELLE. Asfaltutviklingsprosjektet i Telemark (Cold mix project in Telemark). 68 p. 1998.
93. C. ØVERBY. A guide to the use of Otta Seals. 52 p. 1999.
94. I. STORÅS et al.: Prosjektet HMS – sprøytebetong (Full-scale testing of alkali-free accelerators). 64 p. 1999.
95. E. WULVIK, O. SIMONSEN, J. M. JOHANSEN, R. EVENSEN, B. GREGER. Funksjonskontrakt for lavtrafikkveg: Rv 169, Stensrud-Midtskog, Akershus, 1994–1999 (Performance-contract for the low traffic road Rv 169). 40 p. 2000.
96. Estetisk utforming av vegtunneler (Aesthetic design of road tunnels). 64 p. 2000.
97. K. I. DAVIK, H. BUVIK. Samfunnstjenlige vegtunneler 1998–2001 (Tunnels for the citizen, final report). Sluttrapport. 94 p. 2001.
98. K. MELBY et al. Subsea road tunnels in Norway. 28 p. 2002.
99. J. VASLESTAD. Jordnagling (Soil nailing). 52 p. 2002.
100. T. E. FRYDENLUND, R. AABØE et al. Lightweight filling materials for road construction. 56 p. 2002.
101. A. PALMSTRØM, B. NILSEN, K. BERGE PEDERSEN, L. GRUNDT. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler; Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg (Appropriate amount of investigations for underground rock constructions). 134 p. 2003.
102. J. S. RØNNING. Miljø og samfunnstjenlige tunneler; Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport (New geological and geophysical methods for tunnel investigations). 68 p. 2003.
103. K. KARLSRUD, L. ERIKSTAD, P. SNILSBERG. Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø (Requirements concerning tunnel leakages and environmental aspects). 100 p. 2003.
104. B. H. KLÜVER, A. KVEEN. Berginjeksjon i praksis (Practical pre-grouting). 68 p. 2004.

Teknologiavdelingen

Organisasjon

Teknologiavdelingen ble etablert 1. januar 2003. Avdelingen består av tre seksjoner i Oslo og én i Trondheim:

SEKSJON FOR GEO- OG TUNNELTEKNIKK SEKSJON FOR MATERIALTEKNIKK SEKSJON FOR BRUTERTEKNIKK ADMINISTRASJON Telefon 22 07 35 00	Postadresse: Statens vegvesen Vegdirektoratet Teknologiavdelingen Postboks 8142 Dep 0033 Oslo	 Brynsengfareet 6A - Oslo
VEG- OG TRAFIKKFAGLIG SENTER Telefon 73 95 46 30	Postadresse: Statens vegvesen Vegdirektoratet Teknologiavdelingen Postboks 8142 Dep 0033 Oslo	 Abels gate 5 - Trondheim

Oppgaver

Hovedoppgavene er å drive forsknings- og utviklingsarbeid og være rådgiver innenfor avdelingens fagområder. I arbeidet inngår kurs, opplæringsvirksomhet og rekruttering.

Besøksadresse i Oslo: Brynsengfareet 6 a
Besøksadresse i Trondheim: Abels gate 5.
e-post: firmapost@vegvesen.no

www.vegvesen.no



Statens vegvesen

Returadresse:
Teknologiavdelingen
Postboks 8142 Dep
0033 Oslo

« Miljø- og samfunnstjenlige tunneler » er et omfattende bransjeprojekt som har pågått i perioden 2000 – 2003, støttet av Norges forskningsråd. Representanter fra byggherre, entreprenører, konsulenter, forsknings- og utdanningsinstitusjoner har sammen drevet prosjektet med felles målsetting om å heve kompetansen for påvisning og håndtering av svakhetssoner og grunnvann ved tunneldrift.

Resultatene er sammenfattet i følgende publikasjoner:

Publikasjon nr. 101:

Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg

Publikasjon nr. 102:

Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport

Publikasjon nr. 103:

Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø

Publikasjon nr. 104:

Berginjeksjon i praksis

Publikasjon nr. 105:

Miljø- og samfunnstjenlige tunneler – Sluttrapport