

# Berginjeksjon



NFF's publikasjoner er utarbeidet av fagpersoner oppnevnt av NFF's styre. Myndighet og ansvar for denne håndboken er delegert til foreningens fagkomite for utviklingsprosjekter.

Det forutsettes at publikasjon benyttes av kompetente personer med forståelse for de forutsetninger og begrensninger som ligger til grunn.

NFF, fagkomite eller forfattere har ikke ansvar for mulige feil og/eller mangler i publikasjon eller konsekvensen av slike.

Dersom du oppdager trykkfeil eller har spesielle kommentarer ber vi deg ta kontakt med foreningen.

## FORORD

For Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF) er det sentralt å engasjere seg i arbeid som kan utvikle og styrke norsk bergteknologi. Dette arbeidet skjer i et nært samarbeid med bransjen.

Utviklingsarbeidet i regi av NFF gjøres kjent gjennom utgivelse av håndbøker og tekniske rapporter.

Denne håndboken er en revisjon av Håndbok nr. 1, Fjellinjeksjon, som ble utgitt i 1995.

Det pågår for tiden et forskningsprosjekt i regi av Norges forskningsråd (NFR) under tittelen ”Miljø- og samfunnstjenlige tunneler”. Arbeidet ble startet i 2000 og vil bli avsluttet 2003.

Ved revisjonen av denne håndboken har det vært et nært samarbeid med forskningsprosjektet ved delprosjekt C, Tetteteknikk.

Boken er utgitt av Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF) i samarbeid med Norsk Bergmekanikkgruppe (NBG).

Faglig sekretær for denne utgaven har vært Knut Boge, GeoVita as.

Viktige bidragsytere fra deltagere i forskningsprosjektet ”Miljø- og samfunnstjenlige tunneler” har vært:

Kjell Inge Davik,	Statens vegvesen
Alf Kveen,	Statens vegvesen
Oddbjørn Aasen,	NVK Vandbygningkontoret AS
Torkild Åndal,	NVK Vandbygningkontoret AS
Reidar Kjølberg,	Norconsult AS
Per Heimli	Noteby A/S

Norsk forening for Fjellsprenningsteknikk  
Utviklingskomiteen

November 2002



# INNHold

<b>English Summary</b> .....	5
------------------------------	---

<b>Innledning</b> .....	6
-------------------------	---

## Del I Praktisk veiledning i valg av tettestrategi og injeksjonsopplegg

<b>1.1 Bestemmelse av funksjonskrav og tettestrategi</b> .....	7
1.1.1 Vurdering og fastsettelse av maksimal tillatt inn- eller utlekkasje .....	9
1.1.2 Vurdering og fastsettelse av maksimal tillatt grunnvannsendring .....	10
1.1.3 Vurdering og fastsettelse av maksimal tillatt innlekkasje m.h.t. anleggsdriften .....	10
1.1.4 Grunnforhold og forundersøkelser .....	10
1.1.5 Valg av tettestrategi .....	12
<b>1.2 Bestemmelse av materialer for injeksjon</b> .....	14
1.2.1 Inntregningsevne .....	14
1.2.2 Fasthet og bestandighet .....	15
1.2.3 Helse, miljø og sikkerhet .....	16
<b>1.3 Bestemmelse av injeksjonsparametre</b> .....	18
1.3.1 Valg av bormetode og spyling av borhull .....	18
1.3.2 Valg og tilpasning av boremønster og borhullslengde .....	19
1.3.3 Valg av injeksjonstrykk.....	19
1.3.4 Valg av injeksjonsblandinger .....	20
1.3.5 Valg av utstyr for injeksjon .....	21
1.3.6 Utførelse - stoppkriterier .....	22
<b>1.4 Kontroll av injeksjonsprosedyre og injeksjonsresultat</b> .....	23
1.4.1 Kontroll av materialer .....	23
1.4.2 Kontroll av boring og spyling .....	23
1.4.3 Kontroll av ferdig blandede injeksjonsmaterialer .....	23
1.4.4 Etterkontroll .....	24
1.4.5 Sjekkliste .....	25

## Del 2 Bakgrunnstoff med utdypning av de enkelte parametre ved injeksjonsarbeider

<b>2.1 FUNKSJONSKRAV</b> .....	27
2.1.1 Innledning .....	27
2.1.2 Sammenheng mellom endring av poretrykk og lekkasjer i et anlegg .....	28
2.1.3 Konsekvenser av lekkasjer for omgivelsene .....	34
2.1.4 Spesielle funksjonskrav .....	39
2.1.5 Undersøkelser under planlegging, driving og drift .....	41
2.1.6 Byggherrens ansvar overfor omgivelsene .....	44

<b>2.2 BORING OG VANNTAPSMÅLING</b> .....	45
2.2.1 Bergarters oppsprekking og permeabilitet .....	45
2.2.2 Bormetoder og utstyr .....	53
2.2.3 Rengjøring av borhull .....	59
2.2.4 Vanntapsmålinger .....	61
2.2.5 Bruk av vanntapsmålinger .....	67
<b>2.3 INJEKSJON MED SUSPENSJONER</b> .....	69
2.3.1 Innledning .....	69
2.3.2 Suspensjoners rheologiske egenskaper .....	70
2.3.3 Materialer .....	73
2.3.3.1 Sementer .....	73
2.3.3.2 Silikastøv .....	74
2.3.3.3 Andre fyllstoffer .....	75
2.3.3.4 Tilsetningsstoffer .....	75
2.3.4 Injeksjonsmetoder .....	76
2.3.4.1 Injeksjonsprosedyrer .....	76
2.3.4.2 Forinjeksjon .....	78
2.3.4.3 Etterinjeksjon .....	79
2.3.4.4 Avslutning av injeksjon .....	80
2.3.5 Injeksjonsutstyr .....	81
2.3.6 Kontroll .....	83
<b>2.4 INJEKSJON MED KJEMISKE MIDLER</b> .....	85
2.4.1 Innledning .....	85
2.4.2 Kjemiske injeksjonsmidler .....	85
2.4.2.1 Herdeplaster .....	87
2.4.2.2 Geler .....	90
2.4.3 Helse, Miljø, Sikkerhet .....	93
2.4.4 Utstyr for kjemisk injeksjon .....	96
<b>2.5 SUPPLEMENT TIL INJEKSJON - ALTERNATIVE LØSNINGER</b> .....	99
2.5.1 Utstøpning og sprøytebetong - drenert/udrenert med og uten membraner .....	99
2.5.2 Vannavskjerming .....	100
2.5.3 Vanninfiltrasjon .....	100
<b>ORDLISTE</b> .....	103
<b>STIKKORDREGISTER</b> .....	107
<b>REFERANSER</b> .....	109

## English Summary

The Norwegian Tunnelling Society (NFF) in cooperation with Norwegian Group for Rock Mechanics (NBG) first issued this manual in 1995

This issue is a revision of the first manual based on new knowledge since 1995.

New knowledge is acquired in many ways. The use of high pressure grouting is one parameter which is now considered to be essential in achieving a watertight tunnel.

To improve the stability and penetration of cement grout, new additives such as micro-silica and lubricating polymers have been introduced together with new microcements.

The manual has its main focus on planning and design of rock grouting depending on the ground conditions, but also contains practical advises in connection with the execution of the works.

### **The manual is divided in two main parts:**

Part one is a short summary of the main parameters which has to be considered for choosing the right strategy depending on ground conditions and type of construction.

Part two goes deeper into the individual conditions which will influence the choice of pre-investigations, strategy, materials and procedure of grouting.

# Innledning

I takt med de senere års skjerpede krav til miljø og hensyn til omgivelsene har tetting av tunneler og bergrom fått en stadig større betydning.

Siden utgivelsen av Håndbok nr. 1 - Fjellinjeksjon i 1995 har det skjedd en utvikling både på materialsiden og rent injeksjonsteknisk. Det har blitt utført en rekke prosjekter som har gitt verdifull erfaring med både for- og etterinjeksjon. En oppdatering i form av en revisjon av håndboken har derfor vært ønskelig og nødvendig.

Revisjonen har i første rekke vektlagt å rette opp faktiske feil i førsteutgaven samt å oppdatere de deler som omhandler material- og injeksjonsteknikk.

## **Håndboken er delt i to hoveddeler:**

Del 1 gir en praktisk veiledning i valg av tettestrategi og injeksjonsopplegg. Videre gis en kortfattet beskrivelse av de parametere som inngår i en helhetlig vurdering for å fastlegge krav til tetthet og riktig strategi for tetting av det aktuelle anlegg.

Del 2 gir nødvendig bakgrunnsstoff og er en utdypning av de forhold som har betydning for valg av tettestrategi, materialer og injeksjonsprosedyrer.

Boken er først og fremst tenkt som et hjelpemiddel i arbeidet med å planlegge og følge opp prosjekter der injeksjon inngår som et viktig element. Boken inneholder praktiske råd som også vil være nyttig for den som skal utføre injeksjonsarbeidene.



## **I.1 BESTEMMELSE AV FUNKSJONSKRAV OG TETTESTRATEGI**

Funksjonskravene vil først og fremst være avhengig av anleggets funksjon.

Funksjonskravet kan deles i to:

1. Krav til inn- eller utlekkasje med tanke på anleggets funksjon over tid
2. Krav til innlekkasje med tanke på en optimal inndrift i anleggsperioden

For undergrunnsanlegg der kravene til inn- eller utlekkasje i en permanent driftssituasjon er lave vil injeksjonsomfanget for en stor del bestemmes av grunnforholdene slik at ikke inndriften hindres på grunn av vannulemper. Her vil en maksimal innlekkasje enten bestemmes ved en gitt maksimal pumpekapasitet for dykkede anlegg eller en gitt maksimal innlekkasje som vil hindre arbeider på eller bak stuff. Eksempler på anlegg som faller inn under denne kategori er vegtunneler og kraftverkstunneler der eventuelle grunnvannsendringer har liten betydning og der en, for vegtunnelenes del, velger drenering og avskjerming av innlekkasjene der disse påtreffes.

For samferdselstunneler i tettbygde strøk med stor løsmassemekktigheter, for gasslagre og undergrunnsanlegg for lagring av fuktighetsømfendtlige varer vil funksjonskravet være strengt. For disse eksempler vil det i de fleste tilfeller være åpenbart at injeksjon vil inngå som en del av tettestrategien.

Tettestrategien bør imidlertid også avveies mot de grunnforhold man har - eller tror man har. Selv undergrunnsanlegg der kravet til inn- eller utlekkasje er lavt vil man måtte ta høyde for injeksjon der grunnforholdene synes å bli dårlige - enten basert på erfaring fra tilsvarende grunnforhold eller ved å utføre grunnundersøkelser som boringer og/eller geofysiske undersøkelser.

På den neste siden er det vist et flytdiagram for beslutningsprosessen ved vurdering av injeksjon. Det vil kun være ved svært omfattende og kompliserte injeksjonsjobber at alle elementene i dette flytdiagrammet vil komme til anvendelse.

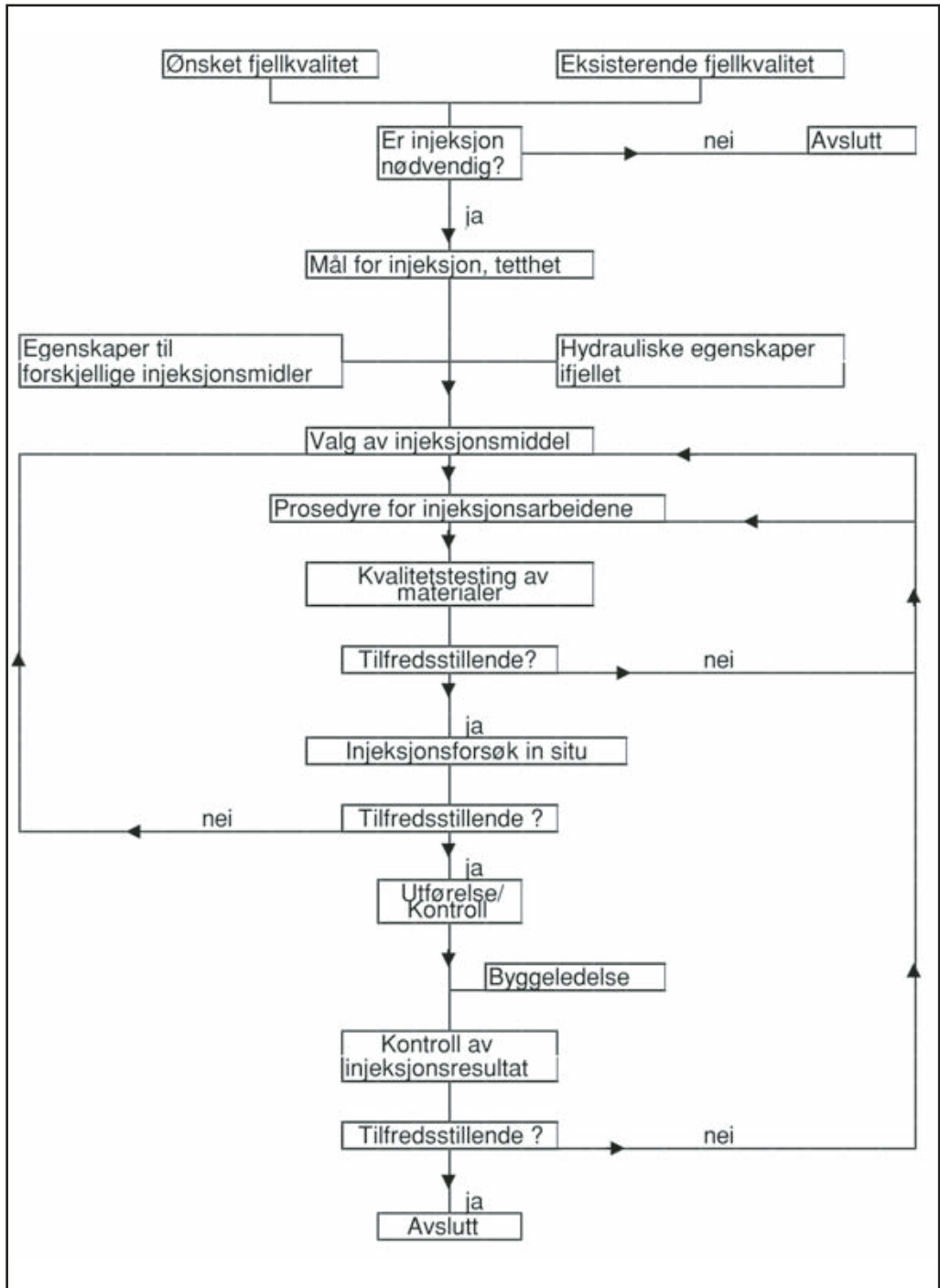


Fig. 1.1.1 Beslutningsprosess ved vurdering av injeksjon

### 1.1.1 Vurdering og fastsettelse av maksimalt tillatt inn- eller utlekkasje

Vurderingen må bl.a. baseres på følgende faktorer:

- Anleggets formål
- Anleggets plassering
- Anleggets overdekning og størrelse
- Lekkasje konsekvenser - økonomiske, miljømessige og sikkerhetsmessige forhold
- Permanent og midlertidig funksjonskrav
- Økonomi

Maksimal tillatt innlekkasje gis vanligvis som liter pr. minutt pr. 100 meter tunnel/bergrom.

Iskjøving kan en få i frostsone i trafikk tunneler ved drypplekkasjer (< 5 l/min/100 m)

Utlekkasje fra et gass- eller oljelager må vurderes på bakgrunn av sikkerhetsmessige og miljømessige forhold. Statens forurensningstilsyn (SFT) og Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern (DBE) må godkjenne/fastsette funksjonskravet.

Tabell 1.1.1 Vurdering av tillatt inn- eller utlekkasje

	Konsekvenser
Omgivelser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Drenering av og setninger i omkringliggende løsmasser</li> <li>- Fare for opprøtning av trepeler og treflåter</li> <li>- Svelling i alunskifer</li> <li>- Skader på skog og jordbruk</li> <li>- Reduksjon av grunnvannsmagasiner (brønner)</li> <li>- Forurensning fra utlekkende gasser og væsker</li> </ul>
Anleggsdrift	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problemer og kostnader forbundet med utpumping av vann</li> <li>- Redusert kvalitet på støpearbeider</li> <li>- Problemer med boring, ladning og sikring</li> <li>- Arbeidsmiljø</li> <li>- Stabilisering</li> </ul>
Permanent anlegg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Iskjøving</li> <li>- Overledning i elektriske anlegg</li> <li>- Korrosjon</li> <li>- Problemer og kostnader forbundet med utpumping av vann</li> <li>- Problemer og kostnader forbundet med gasslekkasjer</li> <li>- Miljø, luftfuktighet, erosjon etc.</li> </ul>

### **1.1.2 Vurdering og fastsettelse av maksimal tillatt grunnvannssenkning**

Følgende punkter må vurderes:

- Faren for setninger forbundet med poretrykksreduksjon i løsmasser (primært leire).
- Vurdering av miljømessige konsekvenser for grunnvannsuttak, overflatevann og plantevekst.

Det vises til Kap.2.1.

### **1.1.3 Vurdering og fastsettelse av maksimal tillatt innlekkasje m.h.t. anleggdriften**

Følgende punkter må vurderes:

- Spesifisering av maksimal pumpekapasitet (for dykkede anlegg)
- Bestemmelse av maksimal innlekkasje med tanke på utførelse av sikring ved bolting, sprøytebetong, utstøpninger etc.
- Bestemmelse av maksimal tillatt innlekkasje på stuff med tanke på boring av salver
- Bestemmelse av maksimal tillatt innlekkasje med tanke på utvasking av kjørebane
- Stabilitetsvurdering

### **1.1.4 Grunnforhold og forundersøkelser**

Grunnforholdene bør undersøkes slik at en har en rimelig sikkerhet om at forholdene som påtreffes kan predikteres. Omfanget av undersøkelsene vil være avhengig av tidligere erfaring med tilsvarende geologiske/geotekniske forhold og anleggets størrelse / funksjonskrav. Likeledes bør viktigheten av anleggets fastlagte fremdriftsplan være medvirkende på valg av forundersøkelsesomfang.

Grunnundersøkelsene bør omfatte følgende arbeider:

1. Geologisk beskrivelse basert på tidligere utførte undersøkelser og tilgjengelige flyfotos
2. Geologisk feltbeskrivelse

På basis av det ovenstående og anleggets viktighet/størrelse bør undersøkelsene utvides til å eventuelt å omfatte:

3. a) Geofysiske undersøkelser for bestemmelse av løsmassemektigheter og eventuell dagfjellsone
- b) Boringer med eller uten prøvetakinger/ etablering av grunnvannsbrønner for observasjon av grunnvannstandsfluktuasjoner
- c) Vanntapsmålinger i borhull for å bestemme hydrauliske parametere

Tabell 1.1.4. Grunnforhold/undersøkelser

Krav til tetthet	Forundersøkelser	Undersøkelser under driving	Målinger under drift
A. Moderate krav til tetthet	Geologisk kartlegging - oppsprekking - svakhetssoner - løsmasseoverdekning  Grunnvannstand/ poretrykk	Kartlegging i anlegget - bergarter - oppsprekking - svakhetssoner - sonderboring  Grunnvannstand/ poretrykk  Inn-/utlekkasje	Grunnvannstand/ poretrykk  Inn-/utlekkasje
B. Høyt krav til tetthet	Geologisk kartlegging - oppsprekking - svakhetssoner - løsmasseoverdekning - sonder-/kjerneboring - seismikk  Grunnvannstand/ poretrykk  Setninger  Vanntapsmålinger	Kartlegging i anlegget - bergarter - oppsprekking - svakhetssoner - sonder-/kjerneboring - seismikk  Grunnvannstand/ poretrykk  Setninger  Inn-/utlekkasje  Vanntapsmålinger	Grunnvannstand/ poretrykk  Setninger  Inn-/utlekkasjer

Det anbefales utarbeidet en geologisk rapport som beskriver de geologiske forhold med henvisninger til tilsvarende forhold fra utførte anlegg. Rapporten skal inneholde vurderinger om hva som kan påtreffes med tanke på "unormale" eller usikre forhold. Rapporten skal inneholde forslag til undersøkelser for å belyse eventuelle "unormale" eller usikre forhold. Om slike undersøkelser skal utføres før anleggarbeidet starter eller om disse undersøkelser skal inngå som en del av anleggarbeidene bestemmes av byggherre i samråd med rådgivende ingeniør.

### 1.1.5 Valg av tettstrategi

#### Gasslagre

a) Petrokjemiske produkter krever en kombinasjon av injeksjon (for å redusere innlekkasjen) og vanninfiltrasjon hvis strømningsforholdene rundt kammeret ikke gir høy nok gradient ( $>1$ ). Bruk av membran (stål el. (sprøyte-)betong/plast) vil være aktuelt hvis berget ikke er injiserbart og overdekningen er liten.

b) Luftputekamre injiseres eller det etableres en vanninjeksjonsskjerm hvis utlekkasje medfører høyere pumpekostnader (installasjon + drift) enn injeksjon/vanninjeksjonskostnad.

Samferdseltunneler. Strategien er basert på en vurdering av sikkerhet og kost/nytte av injeksjon sett i forhold til avskjerming/drenering. For anlegg i tettbygde strøk vil krav til grunnvannsendring i kombinasjon med middels til dårlig fjellkvalitet føre til at utstøpning vil måtte vurderes som supplerende tetningselementer.

Undersjøiske tunneler. I utgangspunktet vil undersjøiske tunneler ha et uendelig reservoar av vann rundt seg. Driftskostnader i forbindelse med utpumping av lekkasjevann må sees i forhold til investeringer i forbindelse med forinjeksjon.

Varelagre. Injeksjonsomfanget vil være bestemt av anleggtekniske forhold og vurdering av grunnvannsendring. Avskjerming/drenering vil være nødvendig for fuktighetsømfintlige produkter. Tettheten kan avveies mot nødvendig temperatur/friskluftsystem.

Kraftverkstunneler. Ved de aktuelle driftsvanntrykk må man vurdere lekkasje fra tunnel-systemet og beregne forventet tapt produksjon satt opp mot kostnad av injeksjon. Ved tom tunnel må man vurdere innlekkasjen til tunnelen sett i sammenheng med eventuelle miljømessige endringer langs tunneltraseen og innlekkasjemengde i forhold til heft forbundet med vedlikehold av tunnel eller installasjoner.

Tabell 1.1.5 Tettestrategi

Type anlegg	Krav til tetthet	Omgivelser	Omfang av injeksjon	Injeksjonsmiddel	Alternativ/supplement
Kraftverks-tunneler	Ikke tap av vann som gir økonomiske konsekvenser. Krav i drivefasen	Grunnvannsenkning	Sporadisk	Sementer	Utføring, (stål, betong)
Samferdsels-tunneler					Vanninfiltrasjon
\tettbebygd strøk	Unngå skade på omgivelsene Vann- isproblemer i tunnel	Grunnvannsenkning, setninger	Systematisk	Sementer Kjemiske midler	Avskjerming, drenering Vann tett utstøpning
\undersjøiske	Pumpekapasitet/ økonomi Vann- isproblemer i tunnel	Uavhengig	Ut fra systematisk sonderboring	Sementer Kjemiske midler	Avskjerming, drenering Vann tett utstøpning
\øvrige	Vann- isproblemer i tunnel Krav i drivefasen	Grunnvannsenkning	Etter sonderboring i på forhånd kartlagte soner	Sementer	
Olje- gasslagre Luftputekamre	Gasstett, hindre forurensning Driftskostnader	Forurensning	Etter sonderboring	Sementer Kjemiske midler	Vanninfiltrasjon Kledning (utstøpning)
Varelagre	Avhengig av type lager Driftskostnader	Grunnvannsenkning, setninger	Avhengig av type lager og varer Kjemiske midler	Sementer	Avskjerming, drenering

## I.2 BESTEMMELSE AV MATERIALER FOR INJEKSJON

Hvilke materialer som skal velges vil være en vurdering av en kombinasjon av ønsket inntrengningsevne (endelig tetthet), ønsket fasthet/bestandighet og de miljømessige krav som stilles ved injeksjonen og materialenes miljømessige innflytelse på omgivelsene.

Det har tradisjonelt vært vanlig å benytte sementbaserte suspensjoner der det ikke har vært satt spesielle strenge krav til tetthet, og kjemiske midler er blitt benyttet ved høye krav til tetthet, eller ved berg med tynne sprekker (for eksempel leirskifer). Dette bildet har endret seg på grunn av utvikling av nye spesialsementer og utstyr for injeksjon, bruk av generelt høyere injeksjonstrykk enn tidligere, samt en svært restriktiv holdning til bruk av kjemiske injeksjonsmidler.

### I.2.1 Inntrengningsevne

Partikkelsuspensjoner vil kunne penetrere sprekker med sprekkeåpning ned mot 25 - 30 mikrometer ( 0,025 - 0,030 mm). Inntrengningsevnen vil være, foruten sprekkeåpningen, avhengig av sprekkenes ruhet, suspensjonens maksimale kornstørrelse og injeksjonstrykket. Vann/sementforholdet vil ha mindre betydning om suspensjonen trenger inn på sprekken eller ikke, men vil ha betydning for spredningen av injeksjonsmaterialet. Som en tommelregel kan man anta at suspensjoner kan penetrere sprekker med åpning tre ganger suspensjonens maksimale kornstørrelse.

Grovt sett kan en anta at de vanlige injeksjonssementene (som for eksempel standardsement CEM I 42,5 RR) har en maksimal kornstørrelse på 30 – 100  $\mu\text{m}$  mens mikrosementer ligger i området 8 - 30  $\mu\text{m}$  og silikastøv har ca. 0,8  $\mu\text{m}$  som maksimal kornstørrelse. Her skal man være klar over at tommelregelen som er nevnt ovenfor ofte ikke gjelder i praksis for de mest firnkornige materialene på grunn av stor kjemisk aktivitet mellom kornene. Dette fører lett til aggregatdannelse. Det har derfor i den senere tid blitt reist tvil om injeksjon med mikrosementer alltid gir bedre resultat enn bruk av vanlige injeksjonssementer.

Kjemiske midler er i motsetning til suspensjoner uten faste partikler som vil være begrensende for inntrengningen. Det er kun væskens viskositet og injeksjonstrykk som bestemmer væskens inntrengningsevne og utbredelse i fjellet.

For de fleste kjemiske midler kan disse to parametrene styres innenfor relativt vide grenser. En del polyuretaner vil imidlertid reagere momentant ved kontakt med vann og brukes derfor kun til å stanse større vannlekkasjer.



Tabell 1.2.1 Valg av injeksjonsmateriale

Type og størrelse av sprekke/åpning (sprekkemateriale)	Typisk Lugeonverdi	Injeksjonsmateriale
Åpne kanaler Karst (stein/grus)	$\geq 50$	Standardsement CEM I 42,5 RR med tilslag av sand/grus. Vurder akselerator/eksp.tilsetninger Polyuretan for stopp av store lekkasjer/utganger
Større sprekker, $\geq 1$ cm åpning (grov grus)	10 - 50	Standardsement CEM I 42,5 RR med tilsetn. av silika eller P/eksp.-tilsetninger. Vurder Polyuretan for stopp av rennende vann.
Middels store sprekker, 0,3 - 1 cm (grus)	3 - 15	Standardsement CEM I 42,5 RR med SP-tils. og silika Vurder Polyuretan ved rennende vann.
Mindre sprekker, 0,01 - 0,1 cm (grov sand/mellomsand)	1 - 5	Vurder mikrosemeter med SP-tilsetning og silika Polyuretan, silikater
Svært små sprekker $\leq 0,01$ cm (fin-/mellomsand)	$\leq 1$	Fineste mikrosement med SP-tilsetning /silika og/eller silikater, epoxy, polyuretan.

## 1.2.2 Fasthet og bestandighet

Slutfastheten til **sementsuspensjoner** er omvendt proporsjonal med v/c-forholdet. En injeksjonsmørtel med v/c-forhold på ca. 1,0 har en fasthet som er 25-30 % av fastheten ved v/c = 0,4.

Slutfastheten er imidlertid av liten betydning for resultatet ved injeksjon; det er utviklingen av tidligfasthet som er av betydning i injeksjonssammenheng, og her er v/c-forhold, temperatur og tilsetningsstoffer helt avgjørende, samtidig som det er store variasjoner mellom de forskjellige sementtypene. I praksis har det vist seg at fasthetsutviklingen endres radikalt ved små endringer av v/c-forholdet omkring 1,0.

Bestandigheten av den ferdige mørtelen vil først og fremst være avhengig av i hvilken grad den hervede mørtelen kan angripes av sulfatholdig vann eller vann som kan løse opp den ikke hydratiserte kalken ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) i sementen.

Bestandigheten vil være avhengig av følgende faktorer:

1. Mørtelens fasthet
2. Grunnvannets aggressivitet
3. Injeksjonssementenes kjemiske sammensetning

Surt vann vil være aggressivt og grunnvann med pH lavere enn 4,5 vil kunne betegnes som meget aggressivt og vil oppløse kalken i sementen.

Sulfatholdig vann ( $\text{SO}_4$ -innhold  $\geq 1.500$  mg/liter) vil omdanne den frie kalken til etringitt i sementer med høye  $\text{C}_3\text{A}$ -innhold.

Aggressivt vann vil imidlertid i praksis sjelden være noe problem i forbindelse med injeksjon, men dersom man er bekymret for bestandigheten anbefales det at injeksjonssementen tilsettes min. 10 % silikastøv. SR-sement (sulfatresistent sement) er ikke egnet til berginjeksjon.

De kjemiske **injeksjonsmidlene** spenner over et vidt spekter når det gjelder fasthet og bestandighet. Fastheten variere fra 10 kPa for en gel basert på silikat til 50 MPa for en epoxy.

Geler er i utgangspunktet ikke frostbestandige pga. sitt høye vanninnhold. Fordi massen opptar vann vil en gel være mer ømfintlig for forurensninger i vannet enn andre midler. Tilleggsbelastninger kan også bringes inn i gelen sammen med vannet.

Det er spesielt de svake gelene (vannglass) som har liten stabilitet over tid. Disse gelene bør derfor fortrinnsvis brukes som midlertidig forinjeksjon ved tunneldrift, konsolidering og lignende.

Herdeplaster vil være lite påvirket av de fleste miljøene man finner i fjell. Enkelte polyuretaner har dokumentert langtidsstabilitet opp mot 100 år ut fra akselererte tester. Epoxy vil over tid bli sprø og vil, dersom det er bevegelse på de injiserte sprekkene, kunne spreke opp og gi lekkasjer.

### 1.2.3 Helse, miljø og sikkerhet

De fleste kjemiske midler vil enten være giftige, etsende, allergifremkallende eller kreftfremkallende i et eller flere stadier.

Helsefare er forbundet med akutte forgiftninger ved direkte inntak, hudkontakt eller innånding. Kroniske forgiftninger kan oppstå ved legeretids bruk og arte seg som allergi, astma, kreft osv. I tillegg vil de fleste kjemiske midler virke irriterende på hud, slimhinner og øyne. Det er også en viss fare for brann og eksplosjon forbundet med enkelte stoffer.

Miljøforurensningsfaren er knyttet til søl og spill av ureagerte delkomponenter og eventuelle nedbrytningsprodukter og ved feilkomponering av injeksjonsmiddelet som fører til at ureagerte komponenter sprer seg i grunnen. Vannløselige midler kan ved tilstrekkelig

uttynning ikke herdne og vil derved være en forurensningsfare.

Det samme krav til HMS må også gjelde ved bruk av sementer. Helsefare i denne sammenheng er i første rekke forbundet med allergi. Økt bruk av mikrosemter krever skjerpede krav til åndedrettsvern. Mikroementene inneholder mellom 5 og 20 % med partikler mindre enn 1 micron. Disse partiklene fanges vanskelig opp i bronkiene og vil avleires i lungeblærene. Dette kan føre til sykdommer som redusert lungekapasitet - sili-kose.

Som plastifiserende tilsetningsstoffer benyttes i dag bentonitter og naftalener/melaminer. Dette er stoffer uten spesiell helserisiko. Som akselerator til injeksjonsmørtler benyttes aluminater. Dette er aggressive stoffer som stiller strenge krav til verneutstyr.

Det er satt krav om at alle kjemikalier på det norske markedet skal være utstyrt med et produktdatablad. Dette databladet skal være på norsk og minst inneholde følgende hovedpunkter:

- |                             |                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1. Handelsnavn/Leverandør   | 9. Fysikalske og kjemiske egenskaper |
| 2. Kjemisk sammensetning    | 10. Stabilitet og reaktivitet        |
| 3. Faremomenter             | 11. Helsefareopplysninger            |
| 4. Førstehjelp              | 12. Miljøfareopplysninger            |
| 5. Tiltak ved brann         | 13. Avfallsdeponering                |
| 6. Tiltak ved søl/lekkasjer | 14. Transportopplysninger            |
| 7. Håndtering og lagring    | 15. Lover og forskrifter             |
| 8. Personvern               | 16. Annen informasjon                |

## I.3 BESTEMMELSE AV INJEKSJONSPARAMETERE

### I.3.1 Valg av boremetode og spyling av borhull

I de aller fleste tilfellene ved injeksjon i tunneler vil injeksjonsboringen bli utført ved bruk av tunnelriggen. Toppammerborede hull for injeksjon er utmerket for hullengder opptil ca. 25 - 30 meter. Lengre hull kan gi større avvik enn ønskelig. Imidlertid vil dette ha mindre betydning på injeksjonsresultatet hvis hullene avviker mot samme retning. Dette bør, der krav til tetthet er stort, undersøkes ved avviksmåling og ansett bør eventuelt justeres etter de avvik man registrerer, eller det kan settes supplerende hull.

Er fjellforholdene dårlige til svært dårlige bør andre boremetoder vurderes.

Tabell 1.3.1 Boremetoder

BOREMETODE	Hullengde	Fjellforhold	Borsynk	Hull-dia.	Anm.
	Avvik		m/min	mm	
TOPPHAMMER	< 5%: 30-40, maks.ca. 60 meter	Dårlig til gode	0,2-0,5	35 - 64	Ev. foringsrør ved dårlige fjellforhold
SENKBOR-HAMMER	< 5%: 100m, maks.ca. 150 meter	Dårlig til gode	0,1-0,3	75 - 150	
ROTASJONS-BORING	< 500m	Middels/gode	0,1-0,2	50 - 75	
	< 300m	Middels/dårlige	0,1-0,3	>75	m/foringsr.
	< 100m	Dårlige *)	0,1-0,3	>75	m/foringsr. vurder: «Tube-a-manchette»

\* Vurder også etappeinjeksjon; boring/injeksjon/opprømming- videre boring/injeksjon osv.

Spyling av hull utføres med topphammerutstyr under nedboring. Det er svært viktig at spyletrykket og vannmengden er stor nok slik at tetting av slepper unngås. Bruker man for lavt spyletrykk (bør være 15 bar) og for lite vann vil også mye av energien gå med til nedmaling av borkaks og inndriften reduseres, hullene har lettere for å bli urunde og gi større avvik.

Rengjøring av hull etter boring med en blanding av luft og er nødvendig.

I bløtere bergarter bør man vurdere og utføre en utvidet spyling av borhullsveggen med radielle dyser og høye vanntrykk (150 - 250 bar). Det er vist ved forsøk at Lugeon-verdien øker med 10 - 50% ved denne type spyling. Fra 0,5 til 30 kg ekstra borkaks ble spylt ut av hullet ved disse forsøkene.

### 1.3.2 Valg og tilpasning av boremønster og borhullslengder

I nedenstående tabell er gitt forslag til borhullsavstander for injeksjonsarbeider avhengig av hvilke tetthetskriterium som er valgt. Dette primære borhullsmønster bør det tas forbehold om skal endres etter at man får erfaring med fjellforholdene.

Ved forinjeksjon bør borhullslengder og avstand (vinkel) fra tunnelprofilen velges slik at størstedelen av injeksjonslengden ligger utenfor tunnelverrsnittet.

Injeksjonslengdene pr. pakkerplassering bør normalt ikke overstige ca. 20 meter. Ved hullslengder på 20 meter eller mer bør man velge en pakkeravstand på ca. 10 meter. Pakkeravstanden bør vurderes i sammenheng med stedlige forhold og vil også måtte vurderes med tanke på injeksjonspumpens kapasitet (trykk/mengde). Enkeltpakker er i dag nærmest enerådende i Norge og injeksjonslengden er derfor bestemt av borhullslengden.

Uansett krav til tetthet må overlapp av injeksjonsskjermangis og overlappens lengde vurderes.

Ekstra injeksjonshull i stoffen vurderes ut fra tunnelverrsnitt og tetthetskriterier.

Tabell 1.3.2 Primærbullavstander

Oppsprekking	Tetthetskriteriet		
	Strengt	Middels	Lavt 1)
Få, tildels åpne sprekker	1-3 m	3-5 m	4-8 m
Middels oppsprekking	1-3 m	2-4 m	3-6 m
Sterkt oppsprukket. Sprekker med silt, sand eller leire	1-2 m	1-3 m	2-4 m

1) Primært for å hindre driftsproblemer

### 1.3.3 Valg av injeksjonstrykk

Injeksjonsmiddelets inntrengning er direkte proporsjonal med anvendt injeksjonstrykk. En bør derfor benytte så høye trykk som forholdene tillater. Injeksjonstrykket må minst tilsvare eksisterende eller fremtidige vanntrykk.

I Norge benyttes maksimale trykk i bar på opp til 80 - 100 bar nærmest uavhengig av fjelloverdekning. Dette krever imidlertid at en ved liten fjelloverdekning må begrense innpumpet mengde og benytte suspensjoner med lavt v/c- forhold.

Ved ugunstige sprekkeforhold ved overflateinjeksjon og i tunneler ved pakkerplassering ytterst i hullet (spesielt ved etterinjeksjon) bør injeksjonstrykket begrenses. For øvrig bør man tilpasse injeksjonstrykket til den konstruksjon som man kommer i berøring med.

### 1.3.4 Valg og tilpasning av injeksjonsblandinger

Tabell 1.3.4 Tilpasning av injeksjonsblandinger

Krav til tetthet	Ikke trykkoppbygging	Trykkoppbygging
<p>A. Høyt krav til tetthet</p> <p><u>Primærhull</u> Mikrosement + SP, mikrosilika, v/c = 1,0</p> <p>Standardsement CEM I 42,5 RR + P/SP, mikrosilika, v/c = 1,0</p> <p><u>Sekundær/tertiærhull</u> som for primærhull</p> <p>Vurdere kjemiske midler</p>	<p>v/c reduseres ned mot 0,5</p> <p>v/c reduseres ned mot 0,5</p> <p>Juster v/c-forholdet. Tilsett kjemiske midler for å begrense spredning. Ved store lekkasjer /utganger vurderes bruk av polyuretan</p>	<p>Avslutt med maks. trykk ved inngang <math>\geq 100</math> kg/bm</p> <p>Avslutt ved maks. trykk ved inngang <math>\geq 200</math> kg/bm</p>
<p>Moderate krav til tetthet</p> <p>Primærhull Standardsement CEM I 42,5 RR + P/SP, mikrosilika, v/c = 1,0</p> <p><u>Sekundærhull</u> Vurdere split-hull på basis av inngang i primærhullene eller innlekkasje på stoff. For øvrig som for primærhullene.</p>	<p>Redusere v/c ned mot 0,6</p> <p>Juster v/c-forholdet. Ved store lekkasjer /utganger vur- deres bruk av polyuretan.</p>	<p>Avslutt ved maks. trykk ved inngang <math>\geq 100</math> kg/bm</p> <p>Avslutt ved maks. trykk ved inngang <math>\geq 150</math> kg/bm</p>

### **Kjemiske midler**

Bortsett fra polyuretaner som benyttes for å stoppe store lekkasjer, vil kjemiske midler benyttes i anlegg med strenge krav til inn-/utlekkasje hvor injeksjon med suspensjoner ikke gir tilstrekkelig tetthet. Polyuretaner brukes også for å begrense masseforbruket av sementer ved store innganger uten trykkoppbygging.

Spesielt ved etterinjeksjon vil kjemiske midler være aktuelle. Fordelen med kjemiske midler er at herdetiden kan reguleres fra sekunder til 1-2 timer. Ved lekkasjer i allerede utsprengte fjellrom vil utgang av injeksjonsmateriale være et problem. Ved først å pumpe farget vann inn i etterinjeksjonshullene og måle tiden til vannet kommer tilbake i tunnelen kan de kjemiske injeksjonsmidlenes herdetid tilpasses slik at de herder før utgang.

### **1.3.5 Valg av utstyr for injeksjon**

**Blandere** for sementsuspensjoner bør være en høyhastighet (> 1500 r.p.m) aktivator som er i stand til å skille de enkelte korn fra hverandre.

En mellomblender (agitator) som holder blandingen i suspensjon og som injeksjonsmørtelen pumpes fra bør være inkludert i det utstyret som vil kunne kreves for en høyverdig injeksjon. På denne måten vil injeksjonspumpingen foretas kontinuerlig uten stopp i påvente av en ny blanding.

**Injeksjonspumpene** bør ha rikelig kapasitet for det maksimale trykk som skal benyttes. En kapasitet på 100 liter pr. minutt ved ca. 80% av maksimalt tillatt trykk er ønskelig.

**Slanger, rør og pakkere** bør ha en innvendig diameter som gir minst mulig trykktap fra pumpen til mørtelen passerer pakkere. Trykktapet i systemet bør dokumenteres ved gjennomkjøring av mørtel.

Entreprenøren skal ved innlevering av anbudet opplyse om utstyrtyper og kapasiteter som vil bli benyttet i forbindelse med de injeksjonsarbeider som skal utføres. Ved større injeksjonsarbeider bør det kreves min. to komplette produksjonslinjer.

### 1.3.6 Valg av utførelse - splitt- og stoppkriterier

I utgangspunktet bør en legge opp utførelsen slik at en injeksjonsomgang gir den ønskede tettheten. Dersom en har strenge krav til tetthet, eller er i en fase der en er usikker på om krav til tetthet er oppnådd, kan det være nødvendig med splitthull (kontrollhull).

Splitthull bores og injiseres ved innganger større enn et gitt kriterium i kg eller liter pr. bormeter. Splittkriteriet i mengde pr. meter borhull bør anpasses etter forholdene, og kravet man har til tetthet. I utgangspunktet vil krav til splitt der en pumper inn en større mengde enn 15 - 25 kg/bormeter (mikrosement + Standardsement CEM I 42,5 RR) være et kriterium. Der en har lavere krav til tetthet kan 25 - 35 kg/bormeter (Standardsement CEM I 42,5 RR) være et passende kriterium.

Vanntapsmålinger bør vurderes som supplement der en har høyt krav til tetthet.

En annen metode for å vurdere splitthull kan være å måle utlekkasjen i primærhullene før injeksjon.

For å hindre utvasking av injiserte borhull bør ventetiden før boring av splitthull (og salvehull) være 1-2 timer etter at injeksjonen er ferdig der en har et stående vanntrykk på mer enn 2 - 3 bar. I "tørre" tunneler eller ved bruk av akselerator kan denne "ståtid" reduseres.

Det vanligste stoppkriterium er gitt ved et maksimalt trykk og en gitt maksimal mengde pr. pakkerplassering eller i kg/bormeter. Maksimalmengden bør være anpasset fjellets beskaffenhet slik at denne mengden er noe større for grovsleppet fjell enn for mer finsleppet fjell. En metode som blir mer og mer utbredt i Mellomeuropa er den såkalte GIN-metoden som er nærmere omtalt i bokens andre del (2.3.4.4). En har helt gått bort ifra det krav man hadde tidligere om at trykket skulle "stå på" en viss tid etter inngangen var stoppet opp for å presse ut overskuddsvannet i ustabile mørtler.



## **I.4 KONTROLL AV INJEKSJONSPROSEDYRE OG INJEKSJONSRESULTAT**

### **I.4.1 Kontroll av materialer**

Alle materialer bør leveres med et produktblad som dokumenterer materialenes egenskaper i tillegg til det som kreves under helse, miljø og sikkerhet (HMS).

Materialene skal lagres tørt og frostfritt. Åpnede sekker som har ligget i fuktig miljø skal ikke brukes. Krav til lagring og beskyttelse mot fuktighet bør være spesifisert i arbeidsbeskrivelsen.

### **I.4.2 Kontroll av boring og spyling**

Det bør oppgis krav til maksimalt boravvik. Ansett bør kontrolleres jevnlig.

Avviket bør kontrolleres av og til for borlengder over 15 - 20 meter. Hvis avvikene generelt går samme vei på grunn av geologiske strukturer bør boransettene justeres.

Spylingen bør kontrolleres ved jevne mellomrom.

For prosjekter med høye krav til tetthet og der en har bløtere bergarter bør det vurderes om også en utvidet spyling bør gjennomføres (se Kap. 2.2.3).

### **I.4.3 Kontroll av ferdig blandet injeksjonsmaterialer**

#### **Sementer**

For at injeksjonen skal utføres best mulig bør mørtlene undersøkes ved enkle forsøk. I tabell 1.4.3.1 er foreslått 4 tester som kan gjøres på anlegget uten store investeringer. To av de anbefalte tester er beskrevet i American Petroleum Institute (API) standard for testing av "drilling fluids".

#### **Kjemiske midler**

De fleste kjemiske midler vil være temperaturavhengige når det gjelder viskositet, størkningstid og herdetid. Det er derfor viktig å kontrollere disse parametrene under de samme forhold som injeksjonsarbeidene skal foregå.

Tabell 1.4.3.1 Kontroll av suspensjoner

Egenskap	Test	Type suspensjon	Anbefalte kriterier
Viskositet	Marsh-funnel	Mikrosementer	28 - 38 sek.
		Rapid o.a.	32 - 45 sek.
		Mauringsusp.	≥ 45 sek.
Fritt vann	Fritt vann	Stabile susp.	≤ 2 %
Filtrert vann	Filterpresse	Stabile susp. Ustabile susp.	≤ 100 cm <sup>3</sup> (ca. 30 min.) ≥ 100 cm <sup>3</sup> (≤ 30 min.)
v/c-forhold	Mud balance	Alle typer	Romvekt kalibreres mot kjente v/c-forhold

Tabell 1.4.3.2 Kontroll av kjemiske midler

Egenskap	Test	Type middel	Typiske verdier
Viskositet	Brookfield viskosimeter	Silikater	3 - 5 cP
		Akrylamid	4 - 5 cP
		Polyuretan	20 - 800 cP
		Epoxy	20 - 400 cP
		Lignokrom	2 - 10 cP
Størkningstid	Brookfield viskosimeter	Alle	Måler tid til viskositeten øker til 200 cP

## 1.4.4 Etterkontroll

Kravet til etterkontroll av injeksjonsarbeidene vil variere etter type anlegg. For et anlegg i setningsømfintlig område, vil etterkontrollen omfatte lekkasjemålinger i tunnel kombinert med poretrykks- og setningsmålinger. For undersjøiske tunneler er det nødvendig å følge innlekkasjene over tid for å sikre at pumpekapasiteten er tilstrekkelig stor. I andre anlegg vil ofte en visuell kartlegging av lekkasjene være nok.

### 1.4.5 Sjekkliste

For å sikre et godt injeksjonsresultat bør følgende punkter kontrolleres under utførelse av injeksjonsarbeidet:

1. Helse, miljø, sikkerhet
2. Ansett, retning og borhullsavvik
3. Materialblanding inkl. tilsetninger/fyllstoffer
4. Brukstid
5. Injeksjonstrykk
6. Masseinngang
7. Utganger - på stuff, i andre hull, i dagen
8. Rengjøring av utstyr
9. Oppnådd tetthet, injeksjonsomfang



## 2.1 FUNKSJONSKRAV

### 2.1.1 Innledning

Når det skal settes funksjonskrav til et tunnelanlegg eller bergrom m.h.t. tetthet av fjellet eller hva man kan tolerere av inn- eller utlekkasjer i anlegget så er det en rekke forskjellige forhold som kommer i betraktning. Disse kan deles i tre hovedgrupper:

A) Konsekvenser av lekkasjer for omgivelsene:

- Mulighet for drenering av og setning i omkringliggende løsmasser.
- Fare for opprætning av trepeler og treflåter.
- Svelling i alunskifer.
- Skader på skog og jordbruk ved endret grunnvannstand.
- Reduksjon av grunnvannsmagasiner (brønner).
- Mulighet for forurensning fra utlekkende gasser og væsker.

B) Konsekvenser for selve anleggsdriften:

- Problemer og kostnader forbundet med utpumping av vann.
- Redusert kvalitet på støpearbeider.
- Arbeidsmiljø.
- Stabilitet av fjellrommet

C) Konsekvenser for det permanente anlegg:

- Iskjøving.
- Overledning i elektriske anlegg.
- Korrosjon.
- Problemer og kostnader forbundet med utpumping av vann.
- Miljø.

Å gjøre et tunnelanlegg så tett ved hjelp av injeksjon at ingen skader eller ulemper oppstår er i mange tilfelle nesten umulig. En byggherre kan eller må derfor ganske nøkternt vurdere kravet til tetthet og tetningsarbeider for anlegget, og de kostnader det innebærer, opp mot de økonomiske konsekvenser og andre ulemper lekkasjene egentlig innebærer. Nå er ikke alltid skadekonsekvensene direkte økonomiske målbare, og det kan selvfølgelig oppstå skader og ulemper som følge av drenasje som man på forhånd ikke har full oversikt over. Dette kan illustreres ved at man f.eks. i byer og tettsteder ikke kan se på et enkelt tunnelanlegg isolert sett, men må ta med i vurderingen allerede eksisterende, og kanskje også fremtidige tunnelanlegg i det samme området. Dette har, blant annet i Oslo, ført til at kravene til innlekkasje i nye tunnelanlegg stadig har blitt skjerpet.

På grunn av konsekvensene er derfor kravene til tetthet i tunnelanlegg i byområder svært strenge. I praksis kan det på de mest ømfintlige områder ikke tolereres synlige lekkasjer i det hele tatt. Dette er et krav som er helt på grensen av hva man kan oppnå med dagens injeksjonsteknikk, selv med et helt systematisk opplegg for skjerminjeksjon. I disse tilfellene bør også andre metoder vurderes som for eksempel vanntett utstøpning.

Det sier seg selv at kravet til tetthet i forbindelse med f.eks. kraftverkstunneler i ubebodde strøk er et ganske annet. Hele opplegget for sonderboringer og injeksjon blir da også helt annerledes, og vil i første rekke ta sikte på å unngå større vanninnbrudd.

Et vesentlig spørsmål er videre hvorledes et funksjonskrav skal/bør utformes og hvilke muligheter/ metoder man har for å følge opp at funksjonskrav blir oppfylt. I dag blir funksjonskrav hovedsakelig knyttet til følgende parametere:

- Vanntapsmålinger i fjellet før og etter injeksjon.
- Innlekkasje (utlekkasje) i anlegget.
- Poretrykk- og grunnvannstandsmålinger i fjell og løsmasser rundt anlegget samt setningsmålinger på omkringliggende bebyggelse.

Ingen av disse metodene kan benyttes alene, og hvilke metoder man bør velge avhenger helt av problemets art. Dette vil bli belyst nærmere i etterfølgende avsnitt.

### **2.1.2 Sammenheng mellom endring av poretrykk og lekkasjer i et anlegg**

Hvis lekkasje i et tunnelanlegg skal være et funksjonskrav, må det påvises at det er en sammenheng mellom lekkasjenes størrelse, graden av tetting av anlegget og virkningene på poretrykk/grunnvannstand.

Dette forutsetter at man kan modellere det totale tredimensjonale vannstrømningsbilde i omgivelsene rundt tunnelen. Pr. i dag finnes det ingen regnmodell som i praksis kan gi oss en slik oversikt. Det er samtidig svært vanskelig å skaffe til veie alle relevante parametere som eventuelt måtte legges inn i en slik regnmodell. Man er derfor henvist til mer kvalitative betraktninger. Først kan det likevel være nyttig å se på en del begreper.

Den naturlige vannbalanse/grunnvannstrøm i et område er bestemt av en rekke forhold som vist her:

- Nedbør
- Størrelse på nedslagsfelt
- Hvor mye av nedbøren som fordampes
- Hvor mye av nedbøren som renner av på overflaten

Disse parametrene bestemmer hvor mye vann som virkelig infiltreres ned i grunnen. I tillegg vil følgende parametere bestemme vannets oppførsel i grunnen:

- Permeabilitet i jord og berggrunn
- Jord- og fjellmassenes magasinerende evne
- Tilstedeværelse av og infiltrasjon fra åpne grunnvannsmagasiner (vann, elver, bekker)

Virkningen av en tunnellekkasje for grunnvannsbalansen vil likeledes være avhengig av de samme faktorer. Tunnelens påvirkning på poretrykk og grunnvannstand vil også være avhengig av tunnelens dybde under grunnvannstand. Et sentralt begrep i denne sammenheng er influenssonen, d.v.s. det området omkring tunnelen hvor poretrykk/grunnvannstand blir påvirket.

Karlsruud (1987) har gjort en del teoretiske betraktninger om disse forhold og sett dette i forhold til de praktiske erfaringer man har fra tidligere tunnelanlegg i Oslo. Dette vil bli kort referert her.

For en tunnel beliggende i et ideelt isotropt homogent fjellmassiv med konstant permeabilitet,  $K$ , i en viss dybde under grunnvannsnivå, er det forholdsvis enkelt å beregne innstrømning til tunnelen ut i fra:

$$Q = \pi k h \frac{2}{\ln(2 h/r - 1)}$$

$h$  = dybde under grunnvannstand  
 $r$  = tunnelens radius  
 $k$  = fjellets permeabilitet

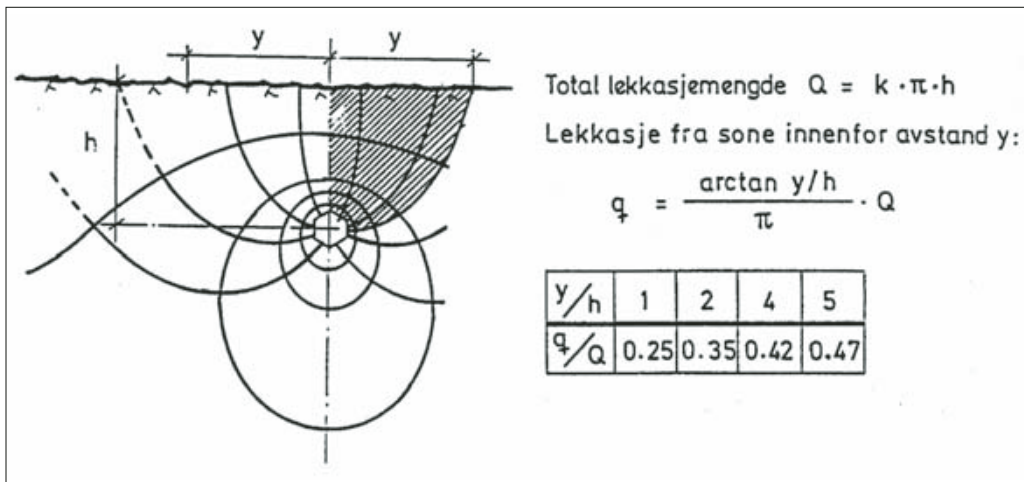


Fig. 2.1.1 Strømningsbilde til tunnel med isotrop og homogen permeabilitet i fjell.

Det er her forutsatt at øvre grunnvannstand ikke blir påvirket. Fig. 2.1.1 viser hvordan lekkasjen relativt sett fordeler seg med avstand fra tunnelen og vil gi et inntrykk av influenssonens utbredelse.

I de aller fleste tilfelle er fjellets permeabilitet i virkeligheten sterkt inhomogen. Store deler av vannstrømningen vil foregå langs definerte sprekkesoner, sletter og kanaler. Hvis slike vannførende soner gir kommunikasjon mellom tunnel og grunnvannsmagasinene med liten ytre tilgang på vann kan resultatet bli dramatisk. I verste fall kan grunnvannsmagasinet og de vannførende sonene bli helt tørrlagt.

Fig. 2.1.2 viser et eksempel på beregnet strømningsintensitet (lekkasje) gjennom overflaten som funksjon av horisontal avstand fra tunnelaksen. Beregningen er utført for en enkelt tunnel med 8 m diameter og i 35 m dybde under grunnvannsstanden.

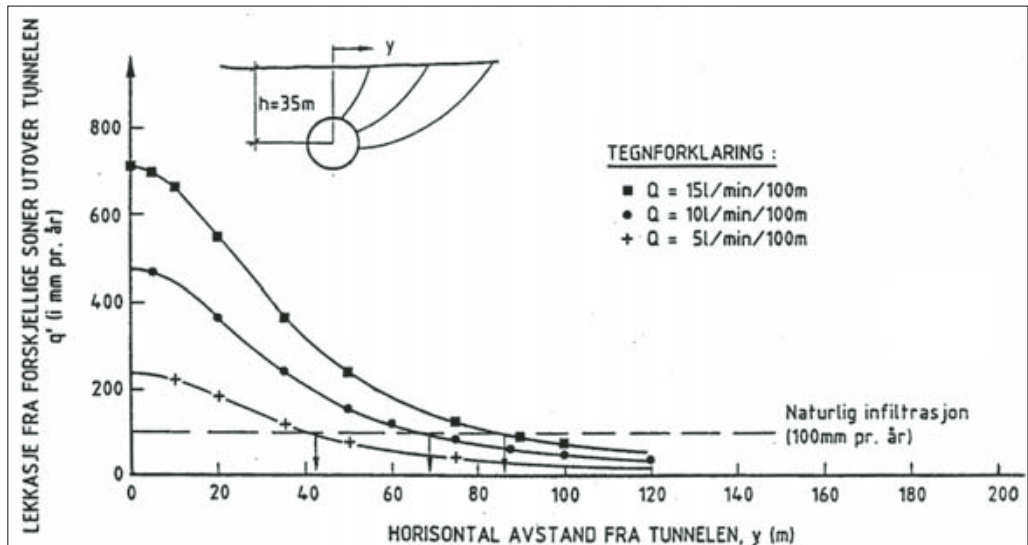


Fig. 2.1.2 Strømningsintensitet gjennom overflaten i relasjon til avstand fra tunnelaksen for forskjellige innlekkasjer (permeabilitet)

Hvis grunnvannstanden skal forbli upåvirket må tilførselen av overflatevann lokalt tilsvare den beregnede strømningsintensiteten gjennom fjelloverflaten.

Den naturlige effektive tilførsel av overflatevann i form av nedbør er vesentlig mindre enn middelnedbøren sett på årsbasis. Den effektive infiltrasjonskoeffesienten avhenger av en lang rekke faktorer slik som topografi, overflatens natur, jordsmonn og fordampning. Det foreligger liten informasjon om dette for bystrøk, men det er antatt at det i Oslo kan være bare 15% av nedbøren som kommer grunnvannet til gode. Dette er vist i fig. 2.1.3. Med referanse til fig. 2.1.3 kan vi på forenklet vis vurdere utstrekningen av influenssonen for mulig grunnvannsendring ut i fra to kriterier:

- A) Det skjer innenfor avstand y, der lokal strømningsintensitet er større enn naturlig infiltrasjon.
- B) Det skjer innenfor avstand y, der summen av strømmingen er større enn summen av infiltrasjonen.

Figur 2.1.3 viser hvorledes influensavstanden ut i fra dette vil variere med avstanden fra tunnelen. I virkeligheten kan man anta at gjennomsnittet av A og B gir det beste bilde av den reelle influensavstanden mht. endring av øvre grunnvannstand. Influensavstanden blir da som angitt i tabell 2.1.1.



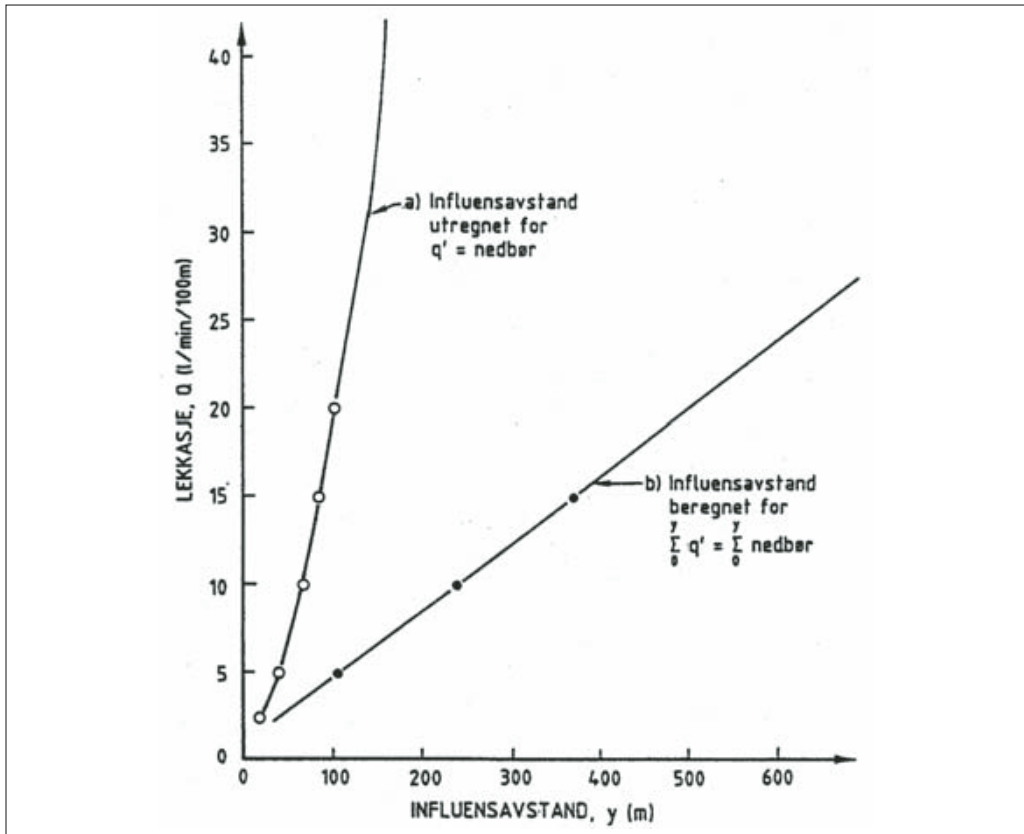


Fig. 2.1.3 Sammenheng mellom innlekkasje og influensavstand mht. grunnvannstands- endring (beregnet på grunnlag av fig. 2.1.2)

Hvis man antar at det rundt tunnelen er utført skjerminjeksjon og derved fått sterkt redusert permeabilitet i forhold til omkringliggende fjell (fig.2.1. 4), kan innlekkasjen beregnes ut fra følgende formel:

$$Q = \pi k h \frac{2}{\ln [(r+t)/r]}$$

Permeabiliteten  $k$ , i dette tilfellet gjelder for den injiserte sonen, og forutsetter at denne er isotrop og homogen. Det er videre antatt at poretrykket i ytterkant av den injiserte sonen er upåvirket og har en stighøyde  $h$ .

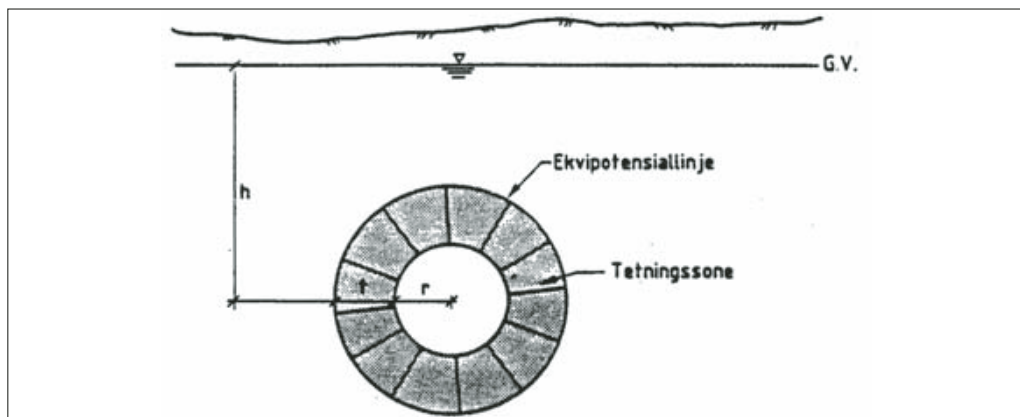


Fig. 2.1.4 Innstrømning til injisert tunnel

Det er begrenset med erfaringsdata å støtte seg til i denne sammenheng, men data fra NSB- OTB- anleggene og Fjellinjen i Oslo synes å vise at det ikke er grunnvannsendringer mer enn maksimalt 150-200 m fra tunnelene. Lekkasje har her trolig ligget på 10-15 l/min pr. 100 m tunnel samlet for anleggene, hvilket synes å bekrefte tallene i tabell 2.1.11.

Tabell 2.1.1 Sammenheng mellom lekkasje og influensavstand med hensyn til grunnvannsendringer i områder med liten løsmasseoverdekning (tunneldybde under grunnvannstand = 35 m)

Antatt lekkasje (l/min/100 m)	Influensavstand (m)
5	75
10	150
20	300
40	600

Hvis fjelloverflaten er dekket av leire av en viss mektighet (mer enn ca. 5 m) blir vanntilførselen ovenfra sterkt redusert. Hvis man f.eks. antar et leirlag med mektighet 10 m vil man med et poreundertrykk på 10 m i overgangen leire/fjell bare få gjennom en vannmengde tilsvarende 30 mm/år. Mulig påvirkning av poretrykket i overgangen leire/fjell,  $\Delta u_f$ , blir derfor vesentlig større. På den annen side, med så liten gjennomstrømning i leira sett i forhold til overflateinfiltrasjonen, er faren for påvirkning av øvre grunnvannstand sterkt redusert.

Kompliserte topografi og utstrekning av leirfylte dyprenner gjør mer detaljerte, rent teoretiske betraktninger svært kompliserte. Man har imidlertid en god del erfaringsdata å holde seg til når det gjelder sammenheng mellom tunnellekkasje og påvirkning av poretrykk i overgang leire/fjell rett over tunnelanlegget. Tabell 2.1.2 angir hva man på dette grunnlag kan anta av sammenheng mellom  $\Delta u_f$  og lekkasje.

Tabell 2.1.2 Sammenheng mellom lekkasje i tunnel,  $q$ , og påvirkning på poretrykk i dypprenne rett over tunnelen,  $\Delta u_f$ , basert på erfaringer fra tunneler i Osloområdet (Karlsruud, 1982 og 1987)

Lekkasje (l/min/100 m) $q$	Poretrykksreduksjon ved fjell $\Delta u_f$ (m)	Maksimal influenstavstand (m)
$\leq 1$	0	0
1-3	0-2	0-200
3-5	2-4	100-400
5-10	4-6	200-600
10-20	6-8	300-800
20-40	8-10	400-1000
>40	10	>500-1000

For å sette disse tallene litt i perspektiv kan det nevnes at under de geologiske forhold man har i Osloområdet vil lekkasjen inn i en trafikk tunnel på ca. 30 m dybde, og som ikke er tettet på noe vis, i gjennomsnitt utgjøre fra 10-40 l/min. pr. 100 m tunnel. Den potensielle påvirkningen av poretrykket i bunn av dypprenner er mao. meget stor. Til sammenligning har den delen av Oslotunnelen (Fjellinjen) som ble tettet med permanent forinjeksjon en innlekkasje på ca. 2 l/min/100 m.

I forbindelse med flere kraftverkstunneler har det oppstått betydelige lekkasje problemer med lekkasjemengder på opp til 50 m<sup>3</sup>/min. Dette har ført til at tunneldrivingen har blitt stanset. I de fleste tilfellene har innlekkasjen minket over tid på grunn av senket grunnvannstand over tunnelene slik at videre tunneldrift har kunnet fortsette. I de mest alvorlige tilfellene har det imidlertid vært nødvendig å støpe igjen tunnelen og drive tunnelen rundt.

Stort sett har større lekkasje problemer oppstått i forbindelse med dypforvitrede karbonatførende slepper i sur grunnfjellsgneis eller granitt med samme geologiske bakgrunn.

## 2.1.3 Konsekvenser av lekkasje for omgivelsene

### 2.1.3.1 Setninger i leirfylte dypprenner

Når man i en leirfylt dypprenne får redusert poretrykk ved fjelloverflaten vil en konsolideringsprosess settes i gang hvorved poretrykket oppover i leira gradvis vil synke. Hvis leirlaget er av en viss mektighet, og det er en viss tilgang på overflatevann, vil som foran nevnt øvre grunnvannstand bli lite influert. Likevektsporetrykket ved stasjonær strømning er da bestemt av permeabilitetsvariasjonene gjennom leirlaget, og blir lineært hvis permeabiliteten er konstant med dybden.

Karlsruud (1982) har gjort et parameterstudie av konsolideringssetninger som resultat av et visst poretrykksfall ved fjell,  $\Delta u_f$ , avhengig av dybden til fjell D, for et leirprofil typisk for Osloområdet. Fig. 2.1.5 viser profilet og de antatte parametere. Merk at det er regnet med en meget beskjeden tørrskorpe/forvitringssone i toppen (kun 4 m) og at denne sonen har et forkonsolideringstrykk på  $50 \text{ kN/m}^2$ . Under denne sonen er leiren forutsatt helt normalkonsolidert.

EFFEKTIV VERTIKALBELASTNING  $\text{kN/m}^2$

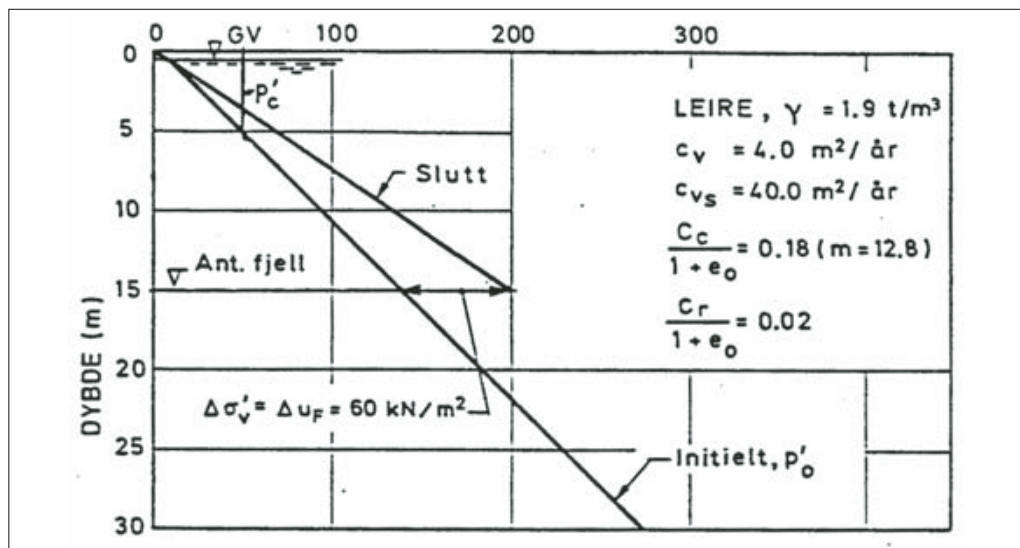


Fig. 2.1.5 Antatt jordprofil ved setningsberegning.

Figur 2.1.6 viser beregnet setning etter at konsolideringen er avsluttet. Merk spesielt at setningene ikke øker proporsjonalt med dybden til fjell (mektigheten av leirlaget).

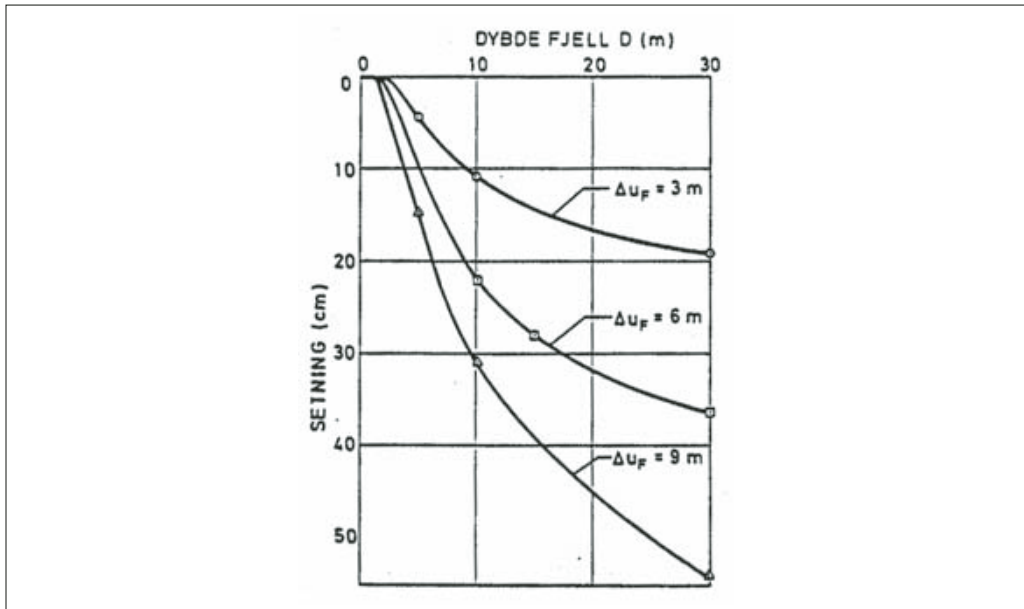


Fig. 2.1.6 Total konsolideringssetning som funksjon av poretrykkssendring,  $\Delta u_f$ , og dybde til fjell,  $D$

Setningenes tidsforløp (i log-skala) er fremstilt i fig 2.1.7 for tilfellet  $\Delta u = 6$  m. I samsvar med konsolideringsteorien øker tiden til avsluttet setning med kvadratet av mektigheten på leira. Merk ellers at det første året er setningene størst for de minste dybdene til fjell. Det er også relativt liten spredning på totalsetningene etter 1 år. Dette er i samsvar med erfaringsdata.

Fig. 2.1.8 sammenstiller setningsobservasjoner fra Oslo i løpet av 1 år etter et poretrykkfall ved fjell.

For  $\Delta u_f = 6$  m er spredningen i fig. 2.1.8 i god overensstemmelse med fig. 2.1.7. Det er også god overensstemmelse mellom setningen som funksjon av poretrykkfallet.

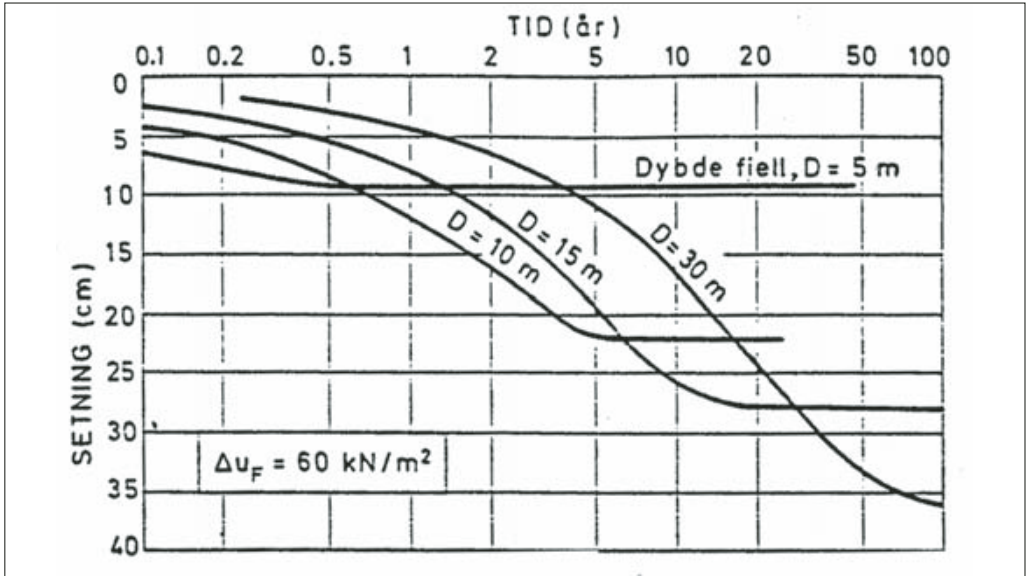


Fig. 2.1.7 Beregnet setningsforløp for  $\Delta u_f = 6 \text{ m}$

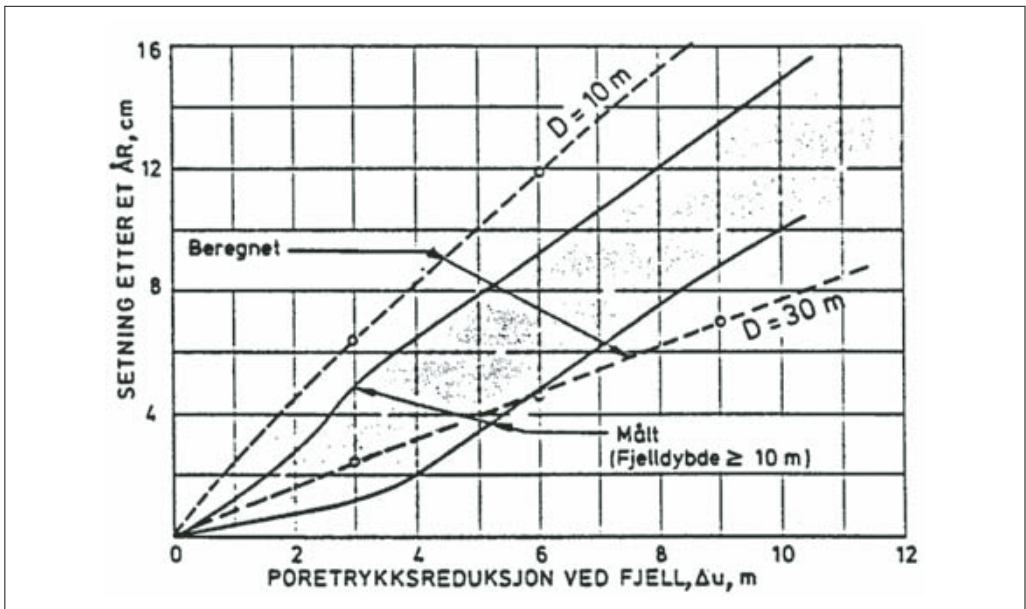


Fig. 2.1.8 Observerte setninger i Oslo i løpet av det første året etter poretrykksfall,  $\Delta u_f$  ved fjell i dyppenne

Målingene viser likevel stort sett mindre setninger enn beregnet for små poretrykksfall. Dette har sammenheng med at selv tilsynelatende normalkonsolidert leire utviser et forkonsolideringstrykk,  $p_c'$ , som er noe større enn in situ effektivt overlageringstrykk,  $p_0'$ . Selv for bløte kvikkleirer er det konstatert at  $p_c' - p_0'$  kan utgjøre størrelsesorden 10 kN/m<sup>2</sup>. Videre er det i fig. 2.1.5 antatt en tynn tørrskorpe. Med grunnvannstand mer typisk i 2-4 m dybde, vil tørrskorpen og forvitringssonen gjerne gå ned til 6-8 m dybde. Av disse grunner viser erfaringene at setningene oftest blir små og vesentlig mindre enn her beregnet hvis poretrykksfallet ved fjell er mindre enn 1-2 m.

### 2.1.3.2 Setninger under andre grunnforhold

I mer permeable jordarter hvor permeabiliteten helt fra fjelloverflaten og opp til terreng er av samme størrelsesorden, vil poretrykksreduksjonen kanskje bli omtrent den samme gjennom hele jordprofilen. Nå vil grovere jordarter være mindre setningsømfindtlige. Lekkasjene skal vel også være særdeles store for at poretrykksreduksjonen og grunnvanns- senkningen skal bli så stor som for leire.

### 2.1.3.3 Fare for forråtnelse av trekonstruksjoner

Det foreligger lang tids erfaring for at treverk i grunnen holder seg friskt dersom treverket i sin helhet ligger under grunnvannstanden.

Tilsvarende foreligger det erfaringer for at treverk i grunnen som ligger over grunnvannstanden utsettes for en nedbrytningsprosess.

Treverk som ligger i sonen mellom høyeste og laveste grunnvannstand når grunnvannstanden varierer, er vanligvis utsatt for raskere nedbrytning enn treverk som ligger høyere enn høyeste grunnvannstand.

I henhold til god konstruksjonspraksis plasseres derfor ikke uimpregnert treverk høyere i konstruksjonen/grunnen enn nedre grense for årtidsvariasjonen for grunnvannstanden. Dette er hovedregelen, selv om vurdering av kappilær stighøyde i spesielle tilfeller kan rettferdiggjøre andre nivåer.

Tilsvarende må en vente at treverk som allerede finnes i grunnen vil brytes ned når en tidligere stabil grunnvannstand blir senket slik at treverket kommer til å bli liggende over nedre grense for årtidsvariasjonene for grunnvannstanden.

Det antas imidlertid at temporære senkninger av grunnvannstanden av få års varighet ikke vil ha noen skadelig virkning. Treverk som ligger i tett leire vil tåle lengre tids grunnvannsenkning bedre enn treverk som ligger i mer permeable løsmasser (silt, sand, grus).

Mye av den gamle bebyggelsen i Oslo er fundamentert på treflåter, og har fått setningskader på grunn av at treflåtene har råtnet. Foreløpig har det riktignok ikke direkte vært konstatert at dette har vært forårsaket av grunnvannsendringer som følge av tunnelanlegg, men den generelle urbaniseringen og bortledning/drenering av overflatevann kan nok sterkt ha medvirket til dette. Imidlertid bør det være et ufravikelig krav at grunnvannstanden registreres nøye i områder der en på grunn av anleggsarbeider kan forvente at grunnvannstanden vil kunne endres. Det er i den sammenheng viktig at registreringene bli startet i god tid før anleggsarbeidene slik at man har mulighet til å fange opp årstidsvariasjoner i grunnvannstanden.

#### **2.1.3.4 Spesielle problemer knyttet til anlegg i alunskifer**

Alunskiferens deformasjonsegenskaper er i prinsippet analoge med andre sedimenters deformasjonsegenskaper, de sveller ved tilførsel av vann og de krymper når vann trekkes ut av systemet.

Ved grunnvannsenkning vil alunskiferen få tilgang på oksygen og en oksidasjon av sulfider til sulfater vil finne sted. Samtidig vil den tørke ut og en knapt målbar sammentrykning finne sted. Under sammentrykningen, på grunn av kapillærspenningsforhold, brytes såkalte interne bånd i alunskiferstrukturen ned. Den oksiderte og nedbrutte skiferen har andre svellings-egenskaper enn den opprinnelige alunskiferen. Det er først ved ny oppfukning etter en uttørking at svellingsprosessen kommer i gang, og da skjer den så raskt at det fortoner seg som en momentan svelling.

Den nye oppfukningen kan skje generelt ved at grunnvannspeilet igjen stiger, eller ved vannledningsbrudd, endret drenasjeforhold i grunnen mm.

Grunnvannsenkninger av noen ukers varighet er neppe farlig, mens senkninger av et år eller mer må antas å kunne forårsake en oksidasjons- og nedbrytningseffekt med tilhørende svelling til følge dersom ny oppfukning finner sted.

Uforvitret alunskifer kan dessuten svulle av en mer kjemisk betinget mekanisme ved langsom oksidasjon av skiferens sulfidminerale på grunn av tilførsel av oksygenrikt vann. Svelling av sistnevnte type vil gi opphav til en jevn svelling som kan pågå i titalls år.

Tunnelanlegg kan gi opphav til begge former for svelling, dels ved temporær eller varig grunnvannsenkning med senere tilførsel av vann igjen, dels ved at tunnelanlegget forandrer strømningsgradienter og derved vannhastigheter og mengder som igjen kan gi større oksygentilførsel enn tidligere.

Svelleretningen er for begge mekanismers vedkommende normalt på skifrihetsplanet. Svellertrykkene går sjeldent opp i mer enn 1,5-2,0 Mpa og belastninger fra konstruksjoner av samme størrelsesorden som svelletrykket vil motvirke svelling.



Uforvitret alunskifer inneholder større eller mindre mengder med finfordelt sulfid i form av pyritt og en spesiell form for magnetkis. Ved forvitring går sulfidene over til sulfater. Dersom sulfatkonsentrasjonen i grunnvannet blir høyt nok, opptrer de typiske sulfatan-grep på betong fremstilt med Standard Portlandsement. Dessuten er det sure vannet svært aggressivt overfor armering og andre metallkonstruksjoner.

## 2.1.4. Spesielle funksjonskrav

### 2.1.4.1 Utlekkasje trykktunneler

Uforede vanntunneler benyttes i stor utstrekning her i landet. Spesielt gjelder dette for overføringstunneler og driftstunneler ved vannkraftanlegg. I mange tilfelle har man også Uforede trykksjaker.

Utlekkasje fra trykktunneler kan oppstå der fjellets overlagringshøyde er mindre enn vannets trykkehøyde. Man kjenner eksempler på utlekkasje fra slike anlegg med tildels betydelige skader og store reparasjonsutgifter som følge.

I forbindelse med prosjektering av denne type anlegg må det foretas en nøye geologisk kartlegging hvor bl.a. sprekker og slepper bør vurderes med henblikk på lekkasjefare og videre om sleppematerialet er av en slik type at en tetting ved injeksjon kan være en aktuell løsning.

Det bør ikke stilles for store forventninger til en injeksjonsløsning alene. Selv om man ved en injeksjon vil kunne redusere lekkasjen i sprekkesystemet, vil det fortsatt være fare for utvasking av sleppematerialet og derved tiltakende lekkasje.

### 2.1.4.2 Gasslagre og luftputekamre

Ved vurdering av utlekkasje fra gasslagre og luftputekamre, dvs. fjellrom hvor luft eller gass står under trykk, må man ta hensyn til at luft/gass lettere slipper gjennom slepper og sprekker enn vann. Som en tilnærmet regel kan man regne med at forholdet luft-/vannlekkasje er 100. Dette vil i praksis si at tettarbeidene kan bli en betydelig økonomisk faktor.

Hvis man ser bort fra forurensningsproblematikk som kan være avgjørende ved gasslagre, så vil en lekkasje være begrenset til et økonomisk spørsmål. Dette lar seg enklest belyse ved vurdering av luftputekamre. Luftputen opprettholdes her ved luftkompressorer. Dersom luftlekkasjen gjennom fjell er stor, må man disponere tilsvarende stor kompressorkapasitet. Dette betyr vesentlige investeringer i utstyr samt utgifter til drift og vedlikehold. Disse utgiftene må derfor vurderes opp mot injeksjonskostnader.

I de fleste tilfeller hvor man har gasslagre eller luftputekamre er kravet til tetthet så stort at man må regne med å benytte kjemiske injeksjonsmidler. Det skal tilføyes at plassering av denne type anlegg betinger særdeles grundige geologiske undersøkelser.

### 2.1.4.3 Propper i trykktunneler mm.

Propper i trykktunneler gis vanligvis en lengde som tilsvarer 1/10 av vanntrykket målt i meter. For store trykkehøyder reduseres lengden, slik at den sjelden blir mer enn 25-30 m.

Ved godt fjell blir vanligvis lekkasjene minimale, og det kan være helt tørt på luftsidene. Ved å optimalisere betongresepten og støpeprosedyrer mht. temperatur og støpelighet er det mulig å oppnå tett kontakt mellom betong og fjell.

Kravet til tetthet vil variere, avhengig av drenasjeforhold. Dersom lekkasjevannet må pumpes ut, som f.eks. i en kraftstasjon, vil ca. 10 l/min være et rimelig krav. Dersom det er en tverrslagspropp, vil ca. 30 l/min være akseptabelt.

I fjell hvor det er fare for utvasking av sleppemateriale, må det foretas målinger, slik at en eventuell økning av lekkasjen blir registrert.

### 2.1.4.4 Nødvendig pumpekapasitet i anleggsfasen

Krav til pumpekapasitet bør nødvendigvis være forskjellig avhengig av drift på synk eller flat såle. Vanlig praksis er at entreprenøren i sine enhetspriser for tunnelarbeider inkluderer en pumpekapasitet på 500 - 1000 l/min. Lekkasje utover dette betinger tillegg. Det vil således være økonomiske forhold som setter grense for pumpekapasiteten.

Ved driving på synk vil pumpehøyde være avgjørende. Hvis man legger til grunnen anleggspumpe i mellomklasse vil vanlig kapasitet kunne være 500 l/min ved 50 m mottrykk og 2000 l/min ved 15 m mottrykk.

Grenseverdien for hvor stor lekkasje som kan tillates med hensyn til tunneldriften vil, noe avhengig av forholdene, kunne være i størrelsesorden 1000 - 2000 l/min. Det skal imidlertid bemerkes at en slik grenseverdi vil variere fra anlegg til anlegg og vil avhenge av så vel geologiske som anleggsmessige forhold.

Med hensyn til tunneldrift på flat såle kan drengrøftenes kapasitet bli for liten slik at det kan bli nødvendig med rørledning og pumper for å holde veibanen i orden.

### 2.1.4.5 Betongarbeider

De lekkasjer som kan tolereres ved påføring av sprøytebetong og støpearbeider er noe avhengig av lekkasjens art. Lekkasjer på større flater er vanskeligere å håndtere enn konsentrerte lekkasjer på hull eller sprekker.

Som regel vil det være mulig å avlede de fleste lekkasjer ved hjelp av dren som sprøytes inn med sprøytebetong tilsatt effektiv akselerator.

Å angi hvilke lekkasjer som kan tolereres er neppe riktig da lekkasjens art og entreprenørens erfaring med slike problemer er av avgjørende betydning.

#### **2.1.4.6 Spesielle krav ved permanente anlegg**

Det tenkes her i første rekke på spesielle funksjonskrav knyttet til bruken av det permanente anlegg. Av problemer som har forekommet kan nevnes:

- Iskjøving i veg og jernbanetunneler. Kravene til tetthet hvis iskjøving skal unngås er i praksis meget strengt. Selv lekkasjer som bare arter seg som fukt eller svette er nok til å skape iskjøving. Det er tvilsomt om man ved injeksjon fullt ut kan takle dette problemet uten å ty til andre løsninger.
- Elektriske anlegg og andre spesielle tekniske anlegg eller konstruksjoner (f.eks. skinne-gang i jernbanetunneler) kan gjøre at drypplekkasjer ikke tolereres eller det stilles krav til begrensning av den generelle fuktighet i anlegget.

Senere års erfaringer med råsprengte fjellhaller for lagring av petrokjemiske produkter har gitt nye problemtyper med tilknytning til fjellets tetthet. F.eks. kan nevnes oppsprekking som følge termospenninger forårsaket av at nedkjølt gass trenger inn i eksisterende sprekker.

### **2.1.5 Undersøkelser under planlegging, driving og drift**

#### **2.1.5.1 Generelle forundersøkelser**

For å kunne planlegge tunneler og bergrom må det utføres forundersøkelser, slik at prosjektet kan tilpasses de geologiske forhold. Summarisk kan forundersøkelsene deles opp i følgende trinn:

- Innsamling av eksisterende geologiske data, kart, rapporter, artikler mm.
- Tolking av flyfotografier for kartlegging av slepper og svakhetssoner
- Seismiske målinger for kartlegging av løsmasseoverdekning og svakhetssoner
- Sonder- og kjerneboringer for kartlegging av løsmasser, bergarter, slepper og svakhetssoner
- Vannlekkasjemålinger ved innpressing av vann i borhull, alternativt ved tilstrømming av vann til borhull

Det forutsettes at man går skrittvis frem slik at undersøkelsene hele tiden tilpasses de aktuelle forhold. I mange tilfeller vil ovennevnte undersøkelser gi et tilstrekkelig grunnlag for å bedømme forholdene med henblikk på nødvendig injeksjon. I andre tilfeller er supplerende undersøkelser under selve drivingen nødvendig.

#### **2.1.5.2 Måling av poretrykk, grunnvannstand og setninger**

Måling av poretrykk, grunnvannstand og setninger på kritiske og/eller karakteristiske steder langs tunneltraseen er av stor betydning. Slike målinger tjener primært to formål:

- Å få et tidlig varsel om mulig skadelige konsekvenser av lekkasje i et tunnelanlegg
- I tilfelle senere erstatningskrav virkelig å kunne dokumentere hvorledes tunnelanlegget har virket inn på omgivelsene.

På grunn av de naturlige variasjoner man kan ha i poretrykk og grunnvannstand gjennom året og over flere år, avhengig av blant annet nedbørsforhold og temperatur, er det viktig at målingene kommer i gang i god tid før tunnelarbeidene igangsettes. Ett år før anleggstart er et minimum, og i mange tilfeller kunne det vært ønskelig med flere års registreringer. Tilsvarende kan det være både ønskelig og nødvendig å fortsette målingene i lang tid etter at tunnelarbeidene er avsluttet.

Antall og plassering av målere må vurderes ut fra en rekke forhold slik som anleggets karakter, vurdering av tunnelens maksimale influenssone og mulige skadevirkninger av lekkasjer og redusert poretrykk/grunnvannstand. På tilsvarende grunnlag må det nøye vurderes hvilken type målinger som er mest hensiktsmessige i de enkelte tilfeller. Noen generelle synspunkter er gitt i det etterfølgende:

### **Måling av poretrykk/grunnvannstand i løsmasser**

Ved relativt mektige løsmasseavsetninger (mer enn 5-10 m) hvor man frykter skadelige setninger, er det aller viktigste å få plassert poretrykksmålere helt nede ved fjelloverflaten. Dette fordi man her generelt kan vente de første og største reaksjonene på lekkasjer som brer seg gjennom sprekkesoner/slepper i fjellet og opp mot fjelloverflaten, mens det tar lengre tid i slike tilfeller før poretrykkreduksjon ved fjelloverflaten brer seg opp gjennom løsmassene og fører til endringer i øvre grunnvannstand. Dette gjelder spesielt ved leiravsetninger. Selv om de fleste målepunkter i slike områder bør etableres ved fjelloverflaten, bør det også plasseres enkelte målere opp gjennom avsetningen, spesielt for å måle øvre grunnvannstand.

Er løsmassene av mer begrenset mektighet og/eller utbredelse og har relativt ensartet og stor permeabilitet er det ofte tilstrekkelig bare å måle midlere grunnvannstand i et perforert vannstandsør. Røret må selvfølgelig settes så dypt at man er sikker på å dekke det maksimale variasjonsområde for grunnvannstanden.

I tillegg til å sette ned særskilte rør for måling av grunnvannstanden, bør det foretas direkte registrering av vannstanden i alle åpne brønner som kan tenkes å bli influert av tunnel-anlegget.

### **Måling av poretrykk/grunnvannstand i fjell**

Hensikten med slike målinger er både å kunne si noe om hvorledes grunnvannsmagasinet i selve fjellet blir påvirket, og å gi tidligere varsel om eventuell drenering mot tunnelanlegget som etter hvert kan bre seg utover mot tilstøtende løsmasseområder.

Fordi overflatefjellet generelt er mer oppsprukket og permeabelt enn dypereliggende lag, er det usikkert hva man måler i et åpent fjellhull der vann fritt kan strømme inn fra alle deler av hullet. Generelt bør man derfor dele registreringsområdet i minst to deler ved å sette en pakning e.l. rett i underkant av dagfjellsonen og måle poretrykk/vannstand i hver del av hullet særskilt. Eventuelt kan man sette ned flere piezometre i forskjellige nivåer i hullet og atskille dem med propper.

Vanntapsmålinger kan være nyttige for å vurdere hvilke soner av et fjellhull det er mest hensiktsmessig å registrere poretrykk i. Her er det f.eks. av spesiell interesse å måle reaksjonen i sprekkesoner som forventes å kommunisere godt med tunnelanlegget. Hullene bør også plasseres nettopp med henblikk på å avskjære slike sprekkesoner.

I forbindelse med dyptliggende luftpute kamre, gasslagre etc. er man ofte henvist til å bore hull for kontroll av poretrykk i fjellet fra tunnelen. Slike målinger fra tunnelen kan være meget nyttige også i andre tilfeller for å vurdere effekten av tetningsarbeidene, og spesielt dersom det skal utføres ettertetting av lekkasjer i det ferdig utsprengte anlegget. I tilknytning til dette kan det også nevnes at for tunnelanlegg som støpes ut i vanntett betong er det meget verdifullt å måle poretrykkoppbyggingen bak den støpte konstruksjonen.

### Setningsmålinger

Setningsmålinger må først og fremst utføres direkte på bygninger som er fundamentert på løsmasser innenfor den aktuelle influenssonen. Det vanligste er å foreta nivellement på innstøpte bolter i grunnmuren. Det bør være minst en bolt i hvert av hjørne av bygget, men er det ujevne fjelldybder eller andre grunner til å vente skjevsetninger, kan det være nødvendig med et større antall. Dette avhenger selvfølgelig også av byggets størrelse og utforming.

Nivellementer er alltid beheftet med en viss nøyaktighet og er både tid- og resurskrevende. På en del karakteristiske steder bør det derfor også monteres presisjonssetningsmålere som gjør det mulig ved hjelp av et måleur å foreta direkte avlesning av setningens størrelse med stor nøyaktighet. Slike presisjonssetningsmålinger har derfor den fordel at de meget raskt kan varsle om endringer i setningsforløp, f.eks. ved nye lekkasjer til et tunnelanlegg. Derved kan man på et tidlig tidspunkt få tatt de nødvendige skritt til å hindre eller begrense videre setninger. Slike presisjonssetningsmålere kan selvfølgelig ikke erstatte nivellementsbolter pga. de høye installasjonskostnadene, men tjener mer en varslingsfunksjon, og kan gjøre at antall nivellementer i et område kan reduseres vesentlig.

#### 2.1.5.3 Undersøkelser og målinger under driving

Under driving av tunneler og bergrom kan det være påkrevet med kontinuerlig oppfølging og kartlegging av bergarter, sprekker, slepper, lekkasje mm. Dette må skje før fjellflaten eventuelt dekkes med betong.

I enkelte tilfeller er det nødvendig å kjenne til forholdene foran stoffen i detalj, f.eks. når man nærmer seg utslag under vann, driver med liten overdekning eller nærmer seg en knusningssone. Da kan det benyttes sonderboring foran stoff.

Ved sonderboring kan soner med vannlekkasjer oppdages foran stoffen slik at nødvendige forholdsregler med hensyn på injeksjon av disse kan foretas på et riktig tidspunkt. For å kvantifisere lekkasjene utføres lekkasjemålinger, enten som vanntapsmålinger eller ved å måle vann som renner fritt ut av sonderhullene. Disse målingene vil være et godt grunnlag for vurdering av om injeksjon er nødvendig og ved valg av type injeksjonsmiddel.

Er kravet til tetthet meget strengt, som for eksempel ved tettbebyggelse på setningsømfintlig grunn, bør man i utgangspunktet ikke basere seg på sonderboringer, men bore systematiske injeksjonsskjermer med tett hullavstand og skikkelig overlapp uten forutgående vurderinger ut i fra sonderboringer. Vanntapsmålinger vil her kun brukes til vurdering av type injeksjons-middel som skal benyttes.

#### **2.1.5.4 Målinger under drift**

En grundig inspeksjon bør utføres med jevne mellomrom, slik at man får et helhetlig bilde av hele anlegget. Hyppigheten må tilpasses forholdene og typen anlegg, slik at frekvensen kan variere fra flere ganger i året til en gang pr. 10. år.

For løpende kontroll er målinger av vannlekkasje et godt hjelpemiddel for å bedømme tilstanden. De lekkasjestedene som ble registrert under drivingen, bør holdes under observasjon, slik at endringer i lekkasjemengden blir registrert. Likeledes skal eventuelt nye lekkasjer registreres og følges opp.

Selve målingen av lekkasjene kan foretas på flere vis:

- Direkte måling ved å benytte målekar og stoppeklokke
- Registrering av utpumpet vannmengde fra pumpeump, sandfang etc.

#### **2.1.6 Byggherrens ansvar overfor omgivelsene**

Enhver byggherre og hans representanter vil ha som mål å gjennomføre sitt prosjekt så billig som mulig.

Tunneler er generelt en type prosjekt som kan ha store, langsiktige virkninger på omgivelsene og for tredjemann. Det er ikke alltid lett å bedømme kostnadene på forhånd. Tvert imot er det ofte slik at problemer oppstår og må takles underveis. De valgmuligheter man da står overfor krever grundig analyse av forholdet mellom engangskostnadene i anleggsfasen og de langsiktige virkningene med påfølgende kostnader. Det optimale er at byggherren har utført tilstrekkelige undersøkelser på forhånd, at han ut fra dette har tenkt gjennom de problemer som kan oppstå, samt velger, og blir stående ved den strategi han finner mest hensiktsmessig.

I den daglige fremdrift av et tunnelprosjekt har press for å overholde fremdriftsplanen, press fra entreprenør og kortsiktige økonomiske vurderinger altfor lett for å overskygge langsiktige virkninger med derpå følgende kostnader forbundet med løsninger med lave engangskostnader.

## 2.2 BORING OG VANNTAPSMÅLINGER

### 2.2.1 Bergarters oppsprekking og permeabilitet

Permeabilitet betegner et materiales evne til å overføre væske eller gass. Antar vi laminær strømning og at væsken vi bruker er inkompressibel vil permeabiliteten være en materialkonstant for den gitte væske (viskositet) som er definert ved Darcy's lov:

$$v = k i$$

der

- v = strømningshastighet
- k = permeabilitetskoeffisienten
- i = hydraulisk gradient

Darcy's lov antar et homogent materiale. Imidlertid vil permeabiliteten av en bergmasse for en stor del være bestemt av permeabiliteten på sprekker og riss. Det bør av den grunn skilles mellom begrepene *massepermeabilitet* og *sprekkepermeabilitet* (-konduktivitet).

*Massepermeabilitet* betegner permeabiliteten i et antatt homogent materiale. Den kan også betegnes som ekvivalent permeabilitet eller gjennomsnittspereabilitet.

*Sprekkepermeabilitet* gir konduktiviteten for en fysisk begrenset vannvei. Ved praktisk utførelse av f.eks. en vanntapsmåling (Lugeon-test) vil denne utføres i berg i en målestokk som gjør at det som måles er en form for *sprekkepermeabilitet* mens resultatet med få unntak utgis for å være en *massepermeabilitet*.

#### Enheter

Enheter for permeabilitet i berg er for en stor del de samme som for løsmasser, men med unntak av Lugeon-verdien. Alle enhetene antar homogene forhold.

#### Lugeon

Lugeon (L) defineres som den vannmengde i liter som presses inn et borhull pr. minutt og pr. løpemeter borhull ved 10 bar overtrykk.

Lugeon:  $Q(\text{liter}) / 10(\text{bar}) / \text{tid}(\text{min}) \cdot \text{målelengde}(\text{m}) \cdot \text{overtrykk}(\text{bar})$

#### Permeabilitetskoeffisienten, k

Permeabilitetskoeffisienten, k, måles i laboratorium ved å benytte Darcy's formel:

$$q = k A i$$

hvor

- q = m<sup>3</sup>/sek
- k = perm.koeffisient (m/sek)
- A = areal av prøve (m<sup>2</sup>)
- i = hydraulisk gradient

Absolutt permeabilitet,  $K$ 

Den absolutte permeabilitet er en materialkonstant der en har tatt hensyn til strømningsmediets viskositet.

$$K = k \frac{\mu}{\gamma} = k \frac{v}{g}$$

hvor  $K$  = absolutt permeabilitet ( $m^2$ )  
 $k$  = perm. koeffisient ( $m/s$ )  
 $\mu$  = dynamisk viskositet  
 ( $mPa \bullet s$  = milliPascalsekund)  
 (for vann +  $10^0$  C:  $1,3 mPa \bullet s = 1,3 cP$ )  
 $v$  = kinematisk viskositet ( $m^2/s$ ) (for vann, +  $10^0$  C:  
 $1,3 \times 10^{-6} m^2/s$ )  
 $g$  =  $9,81 m/sek^2$   
 $\gamma$  = romvekt ( $N/m^3$ )

Darcy

$$1 \text{ Darcy} = \frac{\mu (Q/A)}{dp/dl} = 1,0 \times 10^{-12} m^2$$

hvor  $\mu$  = viskositetskoeff. ( $mPa \bullet s$ )  
 $Q$  = vannmengde ( $m^3/s$ )  
 $A$  = areal ( $m^2$ )  
 $dp/dl$  = trykkfall/lengde (atmosfære/cm)

Eksempel

	<b>L</b> <b>Lugeon</b>	<b>k</b> <b>m/s</b>	<b>K</b> <b>m<sup>2</sup></b>	<b>d</b> <b>Darcy</b>
<b>Finsand</b>	100	10-5	10-12	1
<b>Lite oppsprukket granitt</b>	0,1	10-8	10-15	10-3

Permeabilitet/konduktivitet av sprekker

Med tanke på forholdet mellom permeabilitet og injisert mengde er det spesielt interessant **hvordan** lekkasjen opptrer på sprekkenes. For å undersøke dette ble det foretatt undersøkelser på tidlig åttitallet av fullprofilborete tunneler, der man så å si kan "spasere inne i et borhull".



Det foretatt en grundig befarings i den dels sprengte, dels borete overføringstunnel til Floskefonn (Eidfjordanleggene). Her ble alle innlekkasjer registrert (NGI-rapport 54406-1).

Videre ble tappetunnelen ved Holsfjorden befart. Denne tunnelen er også dels sprengt og dels fullprofilboret. Tunnelen går i kalkstein og i rød sandstein.

Resultatet av disse befaringer bekreftet i stor grad det som tidligere var observert i VEAS/OVK/NSB-tunneler i Oslo-området og div. kraftverkstunneler flere steder i landet. Dette er også beskrevet av Wolters et al. og Londe et al., nemlig at lekkasjene er bundet til mer eller mindre uregelmessige kanaler langs sprekkene.

I fullprofilborede tunneler gir dette seg utslag i punktformige lekkasjesteder. Dette observeres sjelden i sprengte tunneler der lekkasjene fordeler seg på riss og sprekker, som på grunn av sprengningen og spenningsomlagringen, har åpnet seg nær tunnelflatene.

### Parallellplateteorien

Laminær strømning av vann mellom glatte, parallelle plater kan uttrykkes:

$$v = \frac{\gamma_w}{12\mu_w} d^2 i = \frac{g}{12\nu_w} d^2 i; \quad \text{eller, } q = \frac{\gamma_w}{12\mu_w} d^3 i = \frac{g}{12\nu_w} d^3 i$$

der

- v = vannhastighet
- q = vannmengde/breddeenhet
- $\gamma_w$  = romvekt av vann
- $\mu_w$  = dynamisk viskositet av vann
- d = åpning mellom platene
- i = gradienten
- $\nu_w$  = kinematisk viskositet av vann

Formlene bygger på Darcy's:  $v = k i$

Louis (1969) introduserte en ruhetsparameter

$$s = \frac{Y}{2a}$$

der

- s = ruhetsindeks
- Y = gjennomsnittlig ruhetshøyde
- a = gjennomsnittlig sprekkåpning

Louis og senere Sharp, viste at parallellplateformelene også var avhengig av Reynolds tall. Reynolds tall for parallelle plater er:

$$R_e = \frac{2dv}{\nu_w}$$

hvor  $d$  = åpning mellom platene  
 $v$  = vannhastighet  
 $\nu_w$  = kinematisk viskositet

Avhengig av ruhetsindeksen,  $S$ , og Reynolds tall,  $R_e$ , kan man sette opp følgende figur der formlene som gjelder er gitt i tabell 2.2.1:

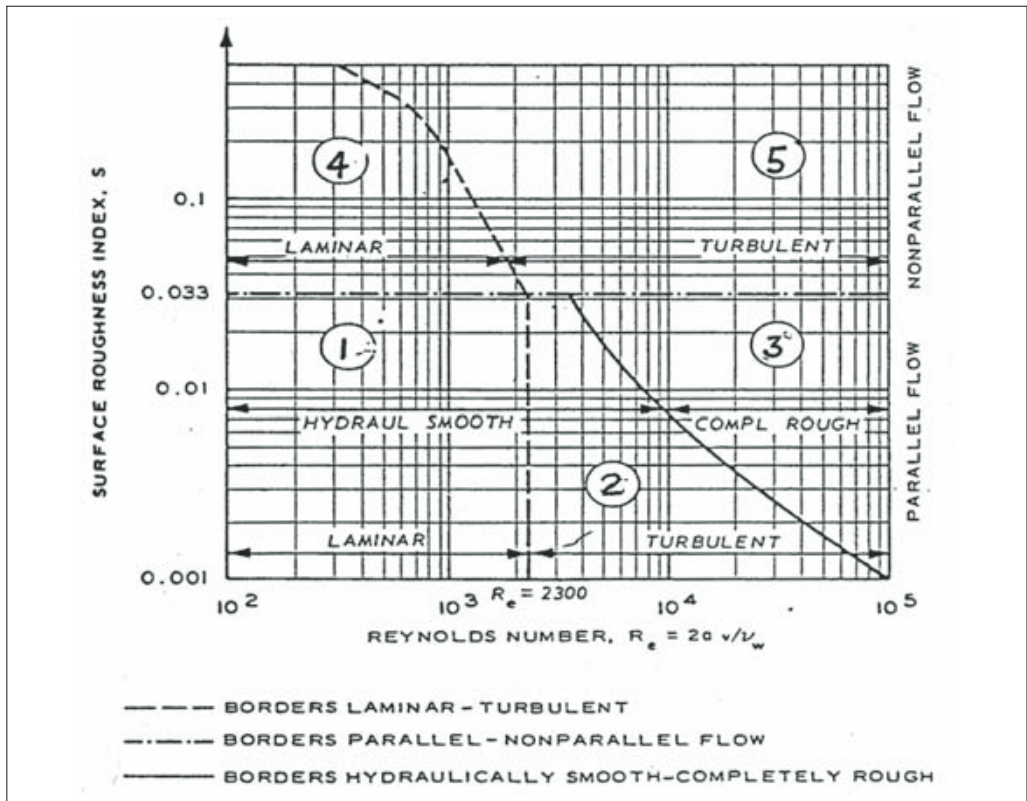


Fig.2.2.1 Strømningslover avhengig av ruhet og Reynolds tall

Tabell 2.2.1 Strømningsformler

Nr. Strømningslov	Vannmengde/breddeenhet
[1] $v = kj i$	$q = \frac{g}{12v_w} d^3 i$
[2] $v^{1.75} = kj i$	$q = \left[ \frac{g}{0,079} \left( \frac{2}{v_w} \right) 0,25 d^3 i \right]^{0.57}$
[3] $v^2 = kj i$	$q = 4(g) \frac{1}{2} \left( \log \frac{3,7}{S} \right) d^{1.5} i^{0.5}$
[4] $v = kj i$	$q = \frac{g}{12v_w} \left[ \frac{1}{1+8,8(S)^{1.5}} \right] d^3 i$
[5] $v^2 = kj i$	$q = 4(g) \frac{1}{2} \left( \log \frac{1,9}{S} \right) d^{1.5} i^{0.5}$

### Kanalstrømning

Formel 1 kan omarbeides til å gjelde strømning i en kanal/rør med gjennomsnittlig

$$[1b] \quad q = \frac{g}{8v_w} \pi r^4 i$$

radius = r.

### Permeabilitet av bergmassivet

Ved vanntapsmålinger kan permeabiliteten av bergmassivet beregnes ut i fra følgende formler (antatt laminær strømning).

Antatt homogent, isotropt og porøst media:

$$[6] \quad k = \frac{Q \ln \frac{l}{r_0}}{l H_0 2\pi} \quad (\text{USBR})$$

eller

$$[7] \quad k = \frac{Q \ln \left( \frac{R}{r_0} \right)}{l H_0 2\pi} \quad (\text{Hvorslev})$$

Q = volum/tidsenhet

l = testlengde

R = influenslengde

r<sub>0</sub> = radius av borhull

H<sub>0</sub> = gjennomsnittlig overtrykk over testlengde 1 (m vannsøyle)

Hvis man kjenner antall vannførende sprekker (n) og gjennomsnittlig sprekkeåpning (d) kan formel [7] omskrives (antar laminær strømning på parallelle flater):

$$[7a] \quad k = \frac{Q \ln \left( \frac{R}{r_0} \right)}{H_0 2\pi n d}$$

### Influensområdet

R, er vist på figur 2.2.2. Det skal her bemerkes at en antar homogene forhold og at influensområdet øker hvis en har deformerbare sprekker.

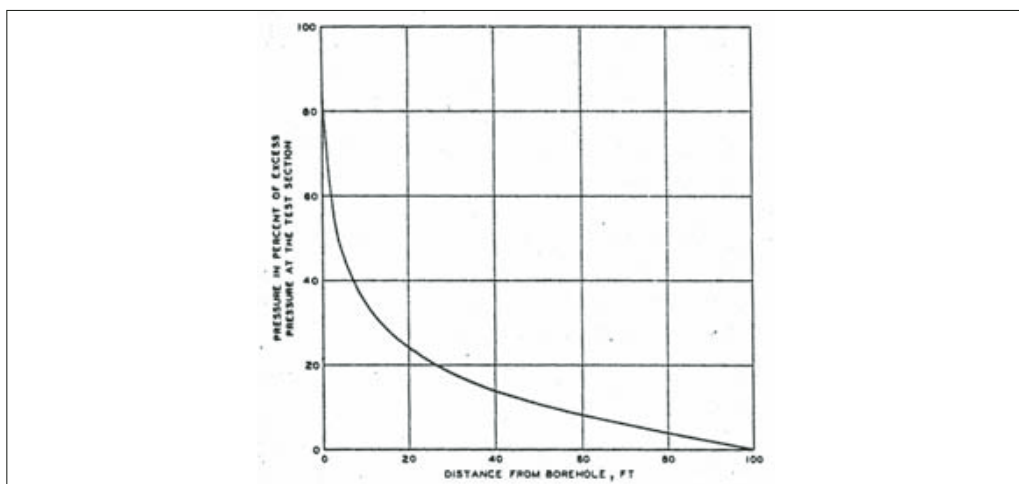


Fig. 2.2.22 Trykkfall som funksjon av avstand fra borhull

### Spenningsavhengigheten

Permeabiliteten vil være mer spenningsavhengig ved økende oppsprekningsgrad. Ved vanntapsmålinger bør en kartlegge permeabiliteten ved å måle vanntapet ved forskjellige trykk for derved å kartlegge permeabilitetens avhengighet av spenningsnivået.

Det er målt en generelt høyere permeabilitet umiddelbart rundt en sprengt tunnel - noe som i tillegg til øket oppsprekking forårsaket av sprengningen skyldes en lavere spenning ved en spenningsomlagring rundt tunnelen. Ved de samme undersøkelsene er det konstatert en lavere permeabilitet enn den opprinnelige innenfor denne mer permeable, ytre sonen. Igjen synes grunnen til dette å være den spenningsomlagring som skjer rundt en tunnel.

Børgesson et al målte permeabiliteten rundt en sprengt tunnel, bredde 5 meter, i forbindelse med Stripa-prosjektet. Før sprengningsarbeidene var gjennomsnittlig permeabilitet målt til  $1 \cdot 10^{-10}$  m/sek. Den forstyrrede sonen rundt tunnelen var mellom 0,5 og 1,0 meter og med en gjennomsnittlig permeabilitetsverdi på  $5 \cdot 10^{-8}$  m/sek. Utenfor denne sonen ble permeabiliteten redusert til  $4 \cdot 10^{-11}$  m/sek inntil 3 - 4 meter fra tunnelveggen.

### Lugeon

En Lugeon-enhet som beregnes ved målinger av vanntapet i et borhull vil, ved antatt homogene forhold, tilsvare en gjennomsnittspereabilitet,  $k$ , på  $\sim 1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Variasjoner i borhulldiameteren har liten betydning ved beregning av permeabiliteten ved vannpressningsforsøk.

Det er under avsnittet om parallellplateteorien nevnt 2 forhold som influerer på permeabiliteten av en enkelt sprekk.

- 1) Sprekkeåpningen ( $d$ )
- 2) Ruhet

Andre faktorer som bestemmer permeabiliteten av en bergmasse er:

- 3) Geologi
- 4) Spenningstilstand
- 5) Oppsprekking
  - a) oppsprekningsgrad
  - b) sprekkorientering
  - c) gjennomsettbarhet
  - d) kommunikasjon mellom vannførende sprekker

Man kan måle permeabiliteten av *uoppsprukket bergart* i laboratoriet.

Nedenstående tabell er utarbeidet av W.F. Brace.

Lugeon	k (m/s)	K (m <sup>2</sup> )	d, Darcy	Sandstein	Vulkansk	Siltstein	Skifer	Kalkstein	Granitt	Gneis	Glimmerskifer	Kvartsitt	Diabas
5	-2	-9	3										
4	-3	-10	2										
3	-4	-11	1										
2	-5	-12	0										
1	-6	-13	-1										
0	-7	-14	-2										
-1	-8	-15	-3										
-2	-9	-16	-4										
-3	-10	-17	-5										
-4	-11	-18	-6										
-5	-12	-19	-7										
-6	-13	-20	-8										
-7	-14	-21	-9										
-8	-15	-22	-10										
-9	-16	-23	-11										
-10	-17	-24	-12										

Tabellen viser at det bare er i spesielle tilfelle der kravet til tetthet er meget høyt, at bergartens primære permeabilitet vil være så høy at den kan tenkes å ha betydning for praktiske ingeniørgeologiske spørsmål.

### Oppsprekningen

Man kan uttrykke permeabiliteten, K, ved å innføre sprekkeavstanden, s, og en konstant, a, som er avhengig av oppsprekningen. En antar her glatte sprekker i et paral-

$$K = a \frac{d^3}{12s}$$

lellplatesystem.

hvor

K = absolutt permeabilitet (m<sup>2</sup>)

a = konstant avhengig av oppsprekningen

= 2 (3 sprekkesystemer)

= 1 (1 sprekkesystem)

s = midlere sprekkeavstand

d = midlere sprekkepenning.

## 2.2.2 Boremetoder og utstyr

For boring av injeksjonshull i fjell vil man ha valget mellom slående og roterende boring.

Ved roterende boring vil man, i de vanlige bergarter, kunne anvende skjærende (“diamantboring”) eller knusende boring (rulleborkroner). På grunn av de store dimetra den sist-nevnte metode krever faller den bort ved injeksjon i fjell.

### 2.2.2.1 Rotasjonsboring

Ved en rotasjonsboring blir en dreierende og trykkende bevegelse overført til et egnet verktøy som skjærer seg inn i fjellet.

Vanligvis vil dette verktøy være en diamantbesatt borkrone som får rotasjon og mating overført gjennom kjernerør og borrhør fra en egnet maskin.

Bormaskinene bør i tunneler og bergrom være elektrisk drevet. Rotasjon og mating kan overføres mekanisk eller hydraulisk. Det siste ser etter hvert ut til å bli enerådende, idet hydraulikktrykket kan benyttes til å mekanisere rørhåndteringen.

Vanlig diameter ved rotasjonsboring er 46 mm. Om ønskes kan utstyr med 56 - 66 - 76 eller 86 mm benyttes.

#### Fordeler

##### Kjernetaking:

Rotasjonsboring med skjærende kroner gir mulighet for å få opp kjerner av fjellet. Den roterende, hule borkrone skjærer ut en sylindrisk kerne som vokser opp i kjernerøret etter hvert som maskinen mater kronen inn i fjellet. For å kjøle kroner og for å fjerne borslammet fra borhullet benyttes vanligvis vannspyling.

Når kjernerøret er fullt, eller andre årsaker gjør det nødvendig, må hele rørstrengen trekkes ut av hullet og kjernen tas ut av kjernerøret. På denne måte kan en få et godt bilde av de forholdene med hensyn til slepper m.v. i fjellet.

##### Hulldybder:

Rotasjonsboring kan utføres til vesentlig større dyp enn slagboring. Med de lette hydrauliske maskinene som overveiende brukes ved boring under dagen er dybder på 300-500 m oppnåelig.

Boremetoden har derfor hovedsakelig sin berettigelse ved sonderingsboringer hvor fjellforhold og permeabilitet skal undersøkes. Ellers har lange rotasjonsborede hull vært brukt ved forinjeksjon til full dybde i forbindelse med driving av sjakter.

Gjensetting av slepper:

Borslammet (kakset) ved skjærende rotasjonsboring er vesentlig finere og mer enskornig enn ved slagboring.

Da forskjellen mellom borhullets og borstrengens diameter er liten, oppnår man stor hastighet på spylevannet. (Forutsatt pumpe med stor nok ytelse og trykk). Borslammet bringes derved lettere ut av borhullet.

Det er alminnelig oppfatning at skjærende rotasjonsboring gir mindre gjensetting av slepper enn slagboring. Dette tilskrives at man ikke har borkroner, skjøtehylder m.v. som slår kakset inn i slepper og slag.

De rundere og glattere hull gjør også utspyling av hullene lettere.

Forsøk bør utføres for å få verifisert ovenstående påstand, spesielt i bløte bergarter.

Avvik:

Årsakene til avvik ved skjærende rotasjonsboring er.

- a) Matetrykk
- b) Skifting i fjellets hardhet
- c) Slepper og slag
- d) Strøk og fall
- e) Forskjell mellom borhullets og borstrengens diameter
- f) Rotasjonen

Det er ikke mulig å motvirke alle disse faktorer slik at et helt rett hull oppnås. Mye kan imidlertid gjøres ved følgende forholdsregler:

- a) Skarpe borkroner
- b) Lange og ikke slitte kjerneør
- c) Sidestensring og kjerneørshode med riktig diameter (ikke slitt)
- d) Borstrengdiameter tilpasset borhullet
- e) Lav rotasjon
- f) Forsiktig mating

Stort sett må man regne med et avvik på 2-3% av borhullslengden ved kortere hull. Ved dypere hull må man regne med avvik på 5%.

Det kan selvfølgelig ikke gis faste tall for avviket idet det er avhengig av så mange faktorer.



Pakningsplassering:

Hull boret med diamantborkroner blir som oftest helt sirkulære. Hvis sidestensringens diameter kontrolleres ofte, vil man også få hulldiameter med liten forskjell fra topp til bunn.

Har man ikke knusningssone e.l. i borhullet, er pakningsplassering for vanntapsmåling og injeksjon lett. I bergarter som ikke gir glatte borhullsvegger sitter også pakkerne godt. Vanligvis kan pakkere med et rør og lærmansjetter brukes.

Lett utstyr:

De nyere elektrisk/hydrauliske rotasjonsbormaskinene er vesentlig lettere enn en tunnel-borerigg. De enkelte deler kan håndteres av bormannskapet.

Utstyret kan bore i alle retninger og omstilling ved samme borplass er forholdsvis rask.

## Ulemper

Borkapasitet:

Riktignok kan man bore med diamantborkroner i alle bergarter, men borkapasiteten er sterkt avhengig av fjellsort og oppsprekking.

Økende kvartsinnhold gir minkende inndrift. Det samme vil sprukket fjell og ugunstig slepperetning i forhold til borretningen gi. Dette fordi småfallene kjerner lett gir forkiling i kjernerøret og derved hindrer videre boring.

Borkapasiteten kan derfor variere fra noen få til 30 m eller mer pr. skift ved hulldybder inntil 100 m.

Kostnader:

Roterende boring med diamantborkroner vil være dyrere enn slagboring til den dybde denne kan utføres i fjell, d.v.s. vanligvis til 40-50 m dybde.

Borkronekostnadene øker med fjellets hardhet (kvartsinnhold). Samtidig minker inndriften. Er forholdene ugunstige, må man regne med at roterende boring kan bli fra 3 til 5 ganger så kostbar som slagboring.

### 2.2.2.2 Slagboring

#### Innledning

Med slagboring forstår man en boremetode der et stempel slår på borstålets nakke med en frem- og tilbakegående bevegelse.

En boremaskin som er bygget over dette prinsippet, kan være elektrisk, pneumatisk eller hydraulisk drevet. I tillegg til en slagbevegelse sørger også maskinen for en rotasjon av borstålet.

Denne boremetode er den mest vanlige ved bergboring, og det er hovedsakelig pneumatiske og hydrauliske maskiner som benyttes.

For boring av injeksjonshull er det vanlig å benytte borhullsdiametre fra 32 til 51 mm, men også større hulldiametre forekommer.

#### Fordeler

##### Kapasitet:

Meget arbeid er blitt gjort for å utvikle og forbedre slagboreutstyret. Helt ut til midten av 70-årene var pneumatisk utstyr enerådende. I de senere år har vi fått hydrauliske maskiner som med stort kraftpotensial og høye spylevannstrykk borer med borsynk mellom 1,5 m og 2,0 m pr. min. De kraftigste pneumatiske maskiner har en borsynk opptil ca. 1 m. De hydrauliske maskinene er derfor i dag stort sett enerådende ved nyanskaffelser i langhulls boring etter slagboreprinsippet.

Borkapasiteten varierer noe etter bergartene, kronediameter og borlengde. Ved boring av injeksjonshull viser det seg at kravene til hullavvik begrenser borlengden og altså ikke maskinkapasiteten. Med andre ord synes det som om man ikke får utnyttet maskinkapasiteten fullt ut ved vanlig boring av injeksjonshull uten å ta i bruk hjelpemidler for å tilfredsstille kravene til hullavvik.

##### Utstyr og økonomi:

Selve borutstyret er forholdsvis lett og kraftkilden kan fjernmanøvreres og plasseres fra øvrig borutstyr. Dette kan være praktisk ved en kombinasjon av fullprofilboring og injeksjonsboring. Men i kombinasjonen konvensjonell tunneldrift og injeksjonsboring er slagboreutstyret skreddersydd da samme utstyr brukes til begge arbeidsoppgaver.

Kostnadsnivået pr. bormeter ved slagboring ligger langt lavere enn ved rotasjonsboring. Investeringene er riktignok høye, men kapasiteten og kombinasjon av tunneldrift og injeksjonsboring senker bormeterkostnaden. Man kan derfor konkurrere med rotasjonsboring i pris selv med et langt høyere antall injeksjonshull pr. volumenhet.

## Ulempes

### Gjensetting av slepper:

Ved slagboring dannes det borkaks i flere fraksjoner.

Ved sikting av borkaks fra Vinterbro er ca. 5% mindre enn 5 mm, ca. 10% mindre enn 10 mm og ca 20% mindre enn 30 mm. Med andre ord vil det være tilstrekkelige mengder fint borkaks til stede for å tette igjen fine slepper og stikk. Virkningen av injeksjonen kan derfor bli redusert i nokså stor grad.

Gjensetting av slepper vil avhenge av:

- a) Hvor store mengder fine partikler som dannes i forhold til borhulloverflaten.
- b) Hvordan borkrone, hylse og stenger skyver disse partiklene inn i slepper og stikk.
- c) Hvor effektivt partiklene kan transporteres vekk med spyling.

Mengden av fine partikler kan være bestemt av flere forhold som bergartstype, sprøhet, størrelse på mineraler, matetrykk, borkronens skarphet og den sekundærknusing som utføres av krone, hylse og stenger.

I hvilken utstrekning de fine partiklene blir skjøvet inn i sleppene vil være avhenger av borkronens utseende, dvs. hvilken avrunding skjæret har i kantene, eventuell bruk av styrerør, og effekten på spylingen. Hylsene kan også gni fine partikler inn i borhullsveggen, særlig dersom man har stort avvik i boringen. Da ligger hylsene og presser mot borhullsveggen, og dette forholdet forsterkes med en relativt stor ytre diameter på hylsene i forhold til borhulldiameteren.

Dersom partiklene meget hurtig og effektivt blir transportert ut med spylevannet, vil sekundærknusingen bli mindre. Dessuten vil stor spylevannsmengde i forhold til borkaksmengden gi partiklene så stor hastighet at de vil oppholde seg svært kort tid ved de kritiske stedene der de lettest blir skjøvet inn i slepper og stikk.

### Avvik:

Boravvik defineres som avbøyning av hullet i forhold til utgangsretningen. Siktemålet med et injeksjonshull er å kunne tette vannveier i en på forhånd bestemt del av fjellet. Ved injeksjon bør derfor hullene ha ubetydelig avvik.

Boravvik ved slagboring er en kjent sak. En rekke faktorer gir avvik hver for seg eller i kombinasjon. Disse faktorer synes å være:

- a) Fjellmassens egenskaper (orientering av sprekker og lagdeling).
- b) Bormaskinens matetrykk (for hydrauliske maskiner 60-90 bar).
- c) Borstålets lengde og dimensjoner (stanglengde, forhold mellom krone- og hylsediameter).
- d) Rotasjonsretning (mest avgang på venstre side presser borstålet over mot høyre side?)

Avviket øker i forhold til lengden og er større i horisontale enn vertikale hull.

Avviket ved slagboring kan reduseres ved at første stang eller borkronen utstyres med et styrerør. Det er et stjerneformet rør med ytterdiameter som er ubetydelig mindre enn borhullets diameter. Da styrerøret er stivt og fyller nesten hele borhulldiameteren vil den første borstangen bli stivet av slik at boravviket blir redusert betydelig.

#### Pakningsplassering:

For å oppnå det ønskede injeksjonstrykk, er det avgjørende at pakningen gir god tetning mot borhullsveggen.

Dersom hullene er usirkulære, kan dette være vanskelig å oppnå. Ved slagboring kan det være en tendens til usirkulære hull, og det later til at denne tendens er mest fremtredende i begynnelsen av hullet. Ved pakningsplassering i dette området, kan det i mange tilfeller ikke være mulig å få pakningene til å motstå et høyere injeksjonstrykk enn 15 bar.

Usirkulære hull får man når det foretas retningsjusteringer etter at man har boret mer enn noen ganske få cm inn. Hullene kan imidlertid være usirkulære også lenger inn i hullet, og det ser ut til at det da er borkronens type og utseende som er avgjørende.

Borkroner med krysskjær (+) gir som regel bedre sirkularitet enn x-skjær og stiftborkroner.

Dersom diameterslitasjen er ujevn, blir borkronene usirkulære, og dette overføres tilbake på borhullets form. Kronens diameter kan rettes med sliping, men dette kan raskt føre til at kronediameteren reduseres for meget.

Pakningens evne til å tette mot borhullsveggen er også avhengig av veggens ruhet. Slagboring knuser og bryter ut mineralkorn og bergartsstykker etter grenser som er naturlige for mineralene og bergarten. Resultatet er en relativt ru og ujevn borhullsvegg. I ugunstige tilfeller blir større eller mindre steinfliser og bergartsstykker brutt ut av veggen og skaper derved en særlig ujevn form på borhullet. Dette kan forekomme relativt hyppig ved slagboring, og pakningsplassering på et slikt sted vil gjøre det svært vanskelig å oppnå særlig høye injeksjonstrykk.

Et annet problem som kan oppstå ved slagboring, er at diameterslitasjen på borkronene etter hvert reduserer hulldiameteren for meget. Standard pakningsstørrelser har relativt lite spillerom med hensyn til borhulldiameteren. Således er det vanlig å benytte 51 mm borkroner til 48 mm pakninger. En vanlig jevn diameterslitasje på borkronen kan føre til at borhulldiameteren blir for liten lenge før borkronen er utslitt på vanlig måte.

Stiftborkroner har en tendens til å være mer utsatt for diameterslitasje enn krysskjærkroner. Også av denne grunn blir de derfor lite benyttet ved injeksjonsboring.

### 2.2.3 Rengjøring av borhull

#### Spylemedium

- a) Vann
- b) Luft
- c) Skum
- d) Mud

For injeksjonsboring er vann det best egnede spylemedium, og det som vanligvis forlanges brukt.

Ved dårlig fjell, med igjenrasing av hull kan det i blant være aktuelt med luftspyling. Mens vannspyling vasker ut og renser, slette -og sprekkåpninger virker luftspyling motsatt, idet borkakset sitter igjen sprekkene, men samtidig stabiliserer hullet noe.

Det er da enda viktigere med renspyling av hullet etterpå. Skum kan være aktuelt ved løsmasseboring eller dårlig fjell. Det transporterer partiklene lettere ut av hullet. Mud spyling er også bare aktuelt når det er problemer med stabiliteten av hullet, og kommer vel neppe til anvendelse ved horisontalboring på en tunnelstueff.

#### Hensikt

- a) Hensikten med spylingen er å transportere ut borkakset under selve boringen.
- b) Spyle hullet og sprekkene i tilknytning til hullet rent for løse masser og gjøre hullet klart for injeksjon.

#### Spyleteknikk

Spylingen av hullet foregår som nevnt foran, delvis under selve nedboringen, og delvis etter boringen.

Etter at hullet er ferdigboret skal det spyles grundig rent med vann, evt. en kombinasjon med vann og luft. Normalt foregår dette ved at en stiv plastslange, med dimensjon tilpasset borhullets dimensjon, føres ned, eller inn i borhullet. Spylevæsken, vanligvis vann, vil føre de løse partiklene ut og opp av hullet. Spylingen skal fortsette ved å føre vannslangen ut og inn av hullet til vannet er helt rent.

Trykket som brukes bør være så høyt som det er praktisk mulig å benytte uten at slangen kommer ut av borhullet av seg selv. Ved dype hull tar spylingen lengre tid da det kan by på problemer å få transportert alle løse partikler opp av hullet. Her kan det være aktuelt å bytte ut plastslangen med stålrør som kan skrues sammen i passende lengder.

Ved bruk av stålrør kan en benytte trykkluft og blåse hullet rent. Et vekselbruk av vann og luft gir en god vaskeeffekt. Ved horisontale hull kan det by på problemer å få ut alt løst materiale da tyngre partikler vil legge seg langs hullet utover. Stor vannhastighet er også her viktig.

Dessuten har en det problemet med horisontale hull, at sprekke på undersiden av hullet lettere vil fylles med fine partikler og slamme igjen. Dette skjer naturligvis både under selve boringen og under den senere spylebehandling av hullet. Hvorvidt dette har noen stor betydning for injeksjonsresultatet avhenger en del av sprekkeorienteringen i forhold til hullretningen.

Det bør benyttes rikelig med vann under spylingen.

### Utvidet spyling

Ved ekstra vanskelige hull hvor det er viktig å få spylt ut leire og lignende, for i karstifiserte kalksteiner, bør spylehodet utformes noe annerledes. Her bør en bruke et spylehode med radielle dyser. Trykk og volum bør anpasses fastheten av sleppe-/hulrommaterialet og i utenlandsk litteratur anbefales en spylepumpe som gir 3 liter pr. sek ved 50 bar for spyling i karstifisert fjell.

Spylerøret må føres fram og tilbake i borhullet flere ganger, og til slutt kan det være behov for en utspyling av løsnet materiale med en slange der en benytter en blanding av vann og luft.

Det kan være aktuelt å utvide spylingen av borhull ved å sette hele borhullet under vanntrykk. Dette gjøres helst hvor man borer en rekke hull relativt tett i soner hvor det er mye løsmasser i sprekke.

Annet hvert hull settes under vanntrykk og transporter løsmassene mot de åpne hullene hvor de spyles ut på vanlig måte. Dette skjer vekselvis ved å flytte pakningene mellom hullene. Her kan en også benytte lufttrykk for å få øket vaskeeffekt. Bruk av høyt vanntrykk, eller evt. høyt injeksjonstrykk for derved å sprengne borhullet slik at en kan få inn mer injeksjonsmasse og dermed øke mulighetene for senere vellykket injeksjonsresultat må vurderes ut i fra forholdene på stedet. Fare for skade på omgivende fjellpartier eller bygninger må vurderes. Generelt er vel tendensen i dag at trykkene økes i forhold til tidligere kriterier.

Videre vurdering av spyling må evt. utføres som forsøk med henblikk på høyt trykk, og forskjellig utforming av spylerør etc.

### Hydraulisk splitting/jekking

Injeksjonskomiteen utførte i 1982 et prøveprogram med utvidet spyling og hydraulisk splitting på fire prøvelokaliteter; Skøyen (leirskifer), Kårstø (gneis og fyllitt) og Mesna (leirskifer/sandstein). Man målte vanntapet etter en ordinær spyling, etter en utvidet spyling med radielle dyser ved 250 bar og 50 l/min og etter en hydraulisk splitting av borhullet. Prøvehullenes lengde var 12 - 18 meter og det ble boret ca. 10 hull på hvert sted.

Ved den utvidete spylingen fikk man ut fra 0,5 til over 30 kg borkaks ut av hullet. Vanntapet (Lugeon-verdien) øket med fra 10 til 50% etter den utvidete spylingen. Der en fremdeles hadde tette hull ble disse splittet og gjennomsnittlig Lugeon-verdi etter splitting var 3 Lugeon.

Komiteens konklusjon etter disse forsøk var at utvidet spyling av injeksjonshullet med meget høye trykk ble anbefalt vurdert ved alle større injeksjonsarbeider og at splitting av tette hull bør vurderes for å øke effektiviteten av de borede hull.

## 2.2.4 Vanntapsmålinger

### Lugeon-test:

Dette er den mest brukte test i Norge og dels i utlandet i dag. Opprinnelig ble testen utført etter følgende kriterier:

- 1) Hulldiameter: 46-76 mm
- 2) Max. trykk: 10 bar
- 3) Målelengde: 1-2 m

Lugeon-verdien beregnes så på grunnlag av å måle volumet av vann som pumpes inn i borhullet i en 5 min. periode ved konstant overtrykk. Målingene skal foretas inntil to påfølgende måleperioder gir samme innpumpet volum.

Lugeon-verdien defineres som:

Den vannmengde i liter pr. minutt som kan presses inn i et borhull pr. løpemeter ved et overtrykk på 10 bar.

Testen kan utføres både med enkeltpakker og dobbeltpakker. I Norge er enkeltpakker mest brukt.

### Hulldiameteren

Den som benyttes i dag er vanligvis 50 mm. Vi kan ikke se det har noen større betydning på resultatet av injeksjonen om diameteren er f.eks. 40 mm eller 70 mm.

### Trykket

Pr. definisjon skal Lugeon-verdien beregnes ved 10 bar overtrykk. Det betyr at man må kjenne det sprekkevannstrykk (mottrykk) en har omkring borhullet.

I permeable bergarter kan dette måles i borhullet før eller etter test. Der tilsiget er lite foreslås det at hullet “pumpes opp” og at trykkfall mot tid registreres - se figur 2.2.1.

En annen metode å bestemme sprekkevannstrykket på er å utføre målingene ved varierende trykk ved å måle vanninngangen både ved økende og minkende trykk.

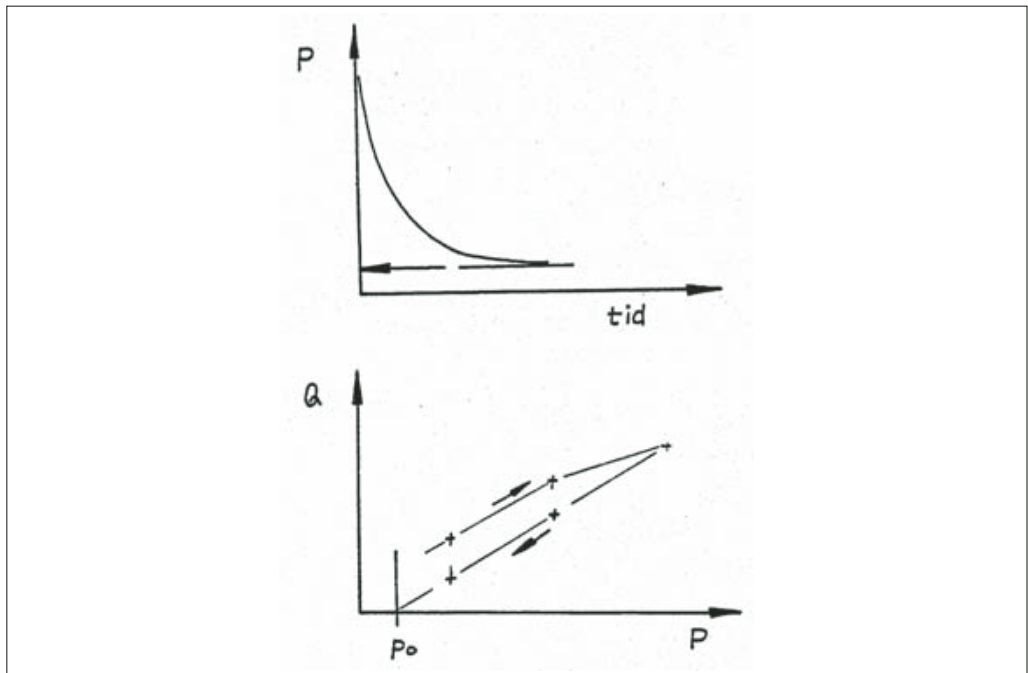


Fig.2.2.1 Måling av sprekkevannstrykket,  $p_0$

- a) “Oppumping” av hull
- b) Måling av vanninngang ved varierende trykk

### Tid

Lugeon-testen baseres på at to etterfølgende målinger på hver 5 minutter skal være like.

Ved målinger i berg med lave permeabiliteter vil man trenge lengre tid før “stasjonærtilstanden” (“steady state”) oppnås.



Måling av vannmengden

Måling av Q, i liter, gjøres vanligvis med hjelp av en mekanisk vannmengdemåler. Telleverket i en vannmengdemåler har en "hvilekoeffisient" på ca. 0,12 1/min. før dette begynner å registrere vannvolumet. Dette tilsvarer en Lugeon-verdi på 0,12 ved 1 bar overtrykk og 10 m testlengde. Ønsker man mer nøyaktige målinger bør man bruke målekar som man pumper ifra. Vannmåler må kontrolleres med jevne mellomrom.

Målelengde - beregningslengde

Vanligvis blir vanntapsmålingene utført i 5 - 10 meters intervaller og denne intervalllengden blir brukt i beregningen av Lugeon-verdien. Imidlertid vil en da ved bergforhold med få lekkasjer fordele vannet over en så stor lengde at verdien blir lavere enn det som for eks. er kravet selv om enkeltsprekker i hullet er injiserbare. Det er derfor, i mange prosjekter, innført en standard utregningslengde på for eks. 3 eller 5 meter. En antar derved at lekkasjen fordeler seg over denne lengden istedenfor hele testlengden. Hvilken Lugeon-verdi som er mest riktig er mer et akademisk spørsmål, men for moderate til lite oppsprukne grunnfjellsgneiser er det å anbefale at en benytter beregningslengde på 3 - 5 meter.

**Utpumping - konstant volum**

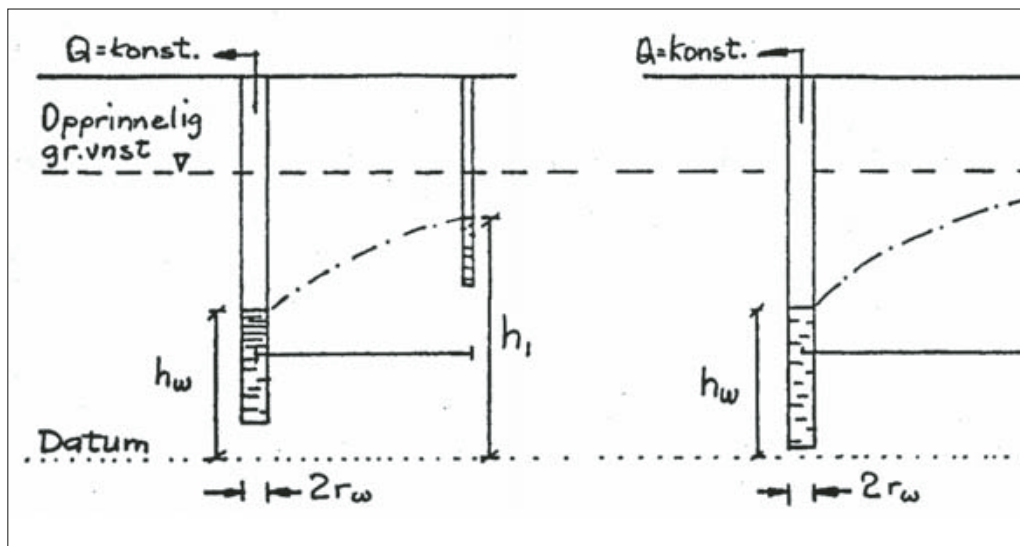
Denne testen kan benyttes fra overflaten i bergarten med relativ høy permeabilitet.

Vanlig framgangsmåte er å bore et pumpehull og et eller flere observasjonshull. Ved å anta radiell strømming i et homogent media kan permeabiliteten beregnes etter følgende formel:

$$k = \frac{Q}{\pi(h_1^2 - h_w^2)} \log_e \frac{r_1}{r_w}$$

- der
- k = permeabilitetskoeffisient (m/s)
  - Q = konstant utpumpet vannmengde, m<sup>3</sup>/s
  - r<sub>w</sub> = radius i pumpeborhull, m
  - r<sub>1</sub> = radius til observasjonshull, m
  - h<sub>1</sub> = vannstand (over gitt datum) i observasjonsborhull, m
  - h<sub>w</sub> = vannstand (over gitt datum) i pumpehull, m

Istedenfor å bore et eller flere observasjonsborhull, kan man anta en influensradius, r<sub>1</sub>, til de opprinnelig observerte grunnvannstand (h<sub>1</sub>). En generell regel er å anta influensradiusen lik lengden av pumpehullet under grunnvannstanden.



Ved å bruke relativt lange pumpeborhull kan en beregne gjennomsnittspereabiliteten over relativt store områder og dette er en av testens fordeler.

### Innlekkasje

Ved registrering av innlekkasje i et borhull, tunnel eller bergrom kan permeabiliteten beregnes etter Janbu/Tokheims formel:

$$K = \frac{Q_w \mu_w G}{2\pi L p}$$

hvor

$K$  = absolutt permeabilitet ( $m^2$ )

$\mu_w$  = viskositetskoeffisient for vann ( $mPa \cdot s$ )

$Q_w$  = vannlekkasje ( $m^3/s$ )

$L$  = lengde av borhull, tunnel eller bergrom (m)

$p$  =  $G - \ln \frac{(2D-r)(L+2r)}{(L+2(D-r))r}$  vanntrykk i Pa

$G$  =

$D$  = avstanden til ekvipotensial

$r$  = radius av borhull, tunnel, kammer

Eksempel:

Lekkasjen fra et borhull med lengde = 20 m er 0,01 dl/s. Det antas hydrostatisk trykkfordeling.

Grunnvannstanden ligger i gjennomsnitt 20 m over borhullet. Det vil si at avstanden til ekvipotensialet er 20 m (D) og trykket er 2 bar ( $=2 \cdot 10^5$  Pa). Borhullets diameter er 60 mm. Geometrifaktoren G er da:

$$\ln \frac{(40 - 0,03)(20 + 0,06)}{(20 \cdot 2(40 - 0,03))0,03} = \ln 267,4$$

$$G = 5,59$$

Permeabiliteten, K ( $m^2$ ) er:

$$K = \frac{1 \times 10^{-5} \times 1 \times 10^{-3} \times 5,59}{2\pi \cdot 20 \cdot 2 \times 10^5} = 2,22 \times 10^{-15} m^2$$

$$\frac{2,22 \cdot 10^{-8} m/s}{0,22 \text{ Lugeon}}$$

Erfaringer fra måling av permeabilitet i norske luftputekamre viser at den beregnede permeabilitet basert på vannpresningsforsøk er høyere enn permeabiliteten kalkulert ved bruk av data ved innlekkasje.

**Andre tester**

Av andre tester som bør nevnes er trykkfalltesten (slug test) og sportest (tracer test). Trykkfallstesten går i all enkelhet ut på å registrere trykkfallet mot tid etter at man har gitt borhullet en trykkimpuls. Permeabiliteten kan beregnes etter følgende formel (homogene forhold):

$$k = \frac{r_0 \ln(H_{01}/H_{02}) \ln(R/r_0)}{2 \times l \times (t_{drop})}$$

hvor	$r_0$	= radius av borhull
	$H_{01}$	= overtrykk i borhull (ved start)
	$H_{02}$	= overtrykk i borhull (ved avslutning)
	R	= influensradius (antatt)
	l	= testlengde
	$t_{drop}$	= testtid

Kjenner man antallet vannførende sprekker over testlengde, 1, kan denne testlengden erstattes med;  $1 = ne$  der  $n$  = antall vannførende sprekker og  $e$  = sprekkeåpning.

Videre hvis man antar parallellplateteorien, kan sprekkeåpningen uttrykkes i følgende formel:

$$k_s = \frac{e^2 \gamma_w}{12 \mu_w}$$

hvor  $k_s$  = permeabilitet av sprekken ( $e$ )  
 $e$  = sprekkeåpning  
 $\gamma_w$  = romvekt av vann  
 $\mu_w$  = viskositet av vann

Sportester (tracer tests) kan utføres på to måter:

- 1) Måle tiden sporstoffet bruker fra et borhull til et annet.
- 2) Måle forandringen i konsentrasjonen over en viss tid.

Fordelene med sportester er at de blir utført under de naturlige eksisterende gradienter og videre at man får gjennomsnittspemeabiliteten fra et hull til et annet (metode 1).

For metode 2 benyttes følgende formel:

$$v = \frac{\pi d \ln(Cr)}{8t}$$

hvor  $v$  = strømningshastighet  
 $d$  = hulldiameter  
 $Cr$  = konsentrasjonsforholdet:  $\frac{C\text{-etter}}{C\text{-før}}$   
 $t$  = test-tid

For å beregne permeabiliteten må man kjenne til gradienten man har og antar man lam-inær strømming brukes Darcy's lov:

$$v = k i$$

## 2.2.5 Bruk av vanntapsmålinger.

### Forprosjektstadiet

På forprosjektstadiet vil man for større prosjekter utføres kjerneboringer for å undersøke fjellkvaliteten. Disse hull bør vanntapsmåles.

I tillegg til vanntapsmålingene er det viktig å observere:

- a) oppsprekningsgrad
- b) om sprekkene er åpne eller har fyllingsmateriale
- c) grunnvannstand

### Oppsprekningsgraden

Den kan observeres både i dagen og på kjerner fra diamantborhull. Det er viktig å observere eventuelle kjernetap og om sprekkene har fyllmateriale.

### Grunnvannstanden

Den bør følges nøye i forprosjektstadiet for å registrere svingningene på grunn av nedbør og klima.

### Vanntapsmålingene

De kan utføres både under nedboringen og seksjonsvis etter at hele hullet er boret. Kostnadene ved måling under nedboring er normalt høyere enn måling etter at hullet er boret. Nytteverdien av målingene ved nedboring bør derfor vurderes.

Avhengig av hvor variable forholdene er, bør seksjonene være på mellom 5 og 20 meter.

På bakgrunn av de ovenstående observasjoner kan man grovt forutsi hvilke injeksjonsarbeider som synes nødvendig for det aktuelle prosjektet, og om injeksjon bør kombineres med f.eks. infiltrasjon for å holde grunnvannstanden oppe.

### Under arbeidets gang

Ved drivingen av en tunnel kan det være aktuelt med vanntapsmålinger på eller ved stoff for prosjekter med:

- a) tunneldrift der grunnvannsenkning må være minimal (forinjeksjon)
- b) plassering av bergrom med høyt krav til tetthet
- c) for å kartlegge vannførende sprekkesoner som kan gi driftsproblemer

For tunneldrift der grunnvannsenkningen må være minimal, er ofte vanntapsmålinger på stoff beskrevet i anbudspapirene. Slike vanntapsmålinger er ment å ha to funksjoner:

- i) behovet for forinjeksjon
- ii) sementinjeksjon eller kjemisk injeksjon

De senere års praksis viser imidlertid at slike vanntapsmålinger, ofte i et fåtalls hull, har liten nytteverdi. Det er i de senere år en erkjennelse at det først og fremst er tunnelens funksjonskrav som alene bestemmer hvorvidt boring for forinjeksjon er nødvendig eller ikke.

Det utarbeides således et fast opplegg med boring for forinjeksjon. En tetningsskjerm med hullavstand 2-3 m langs periferien kan for eksempel være brukbart utgangspunkt. Avgjørelsen om injeksjon/ikke injeksjon eller sement/kjemisk injeksjon kan baseres på den utlekkasjen man registrerer fra hullene.

### **Kontroll**

Som kontroll for utført injeksjon kan benyttes vanntapsmålinger i borhull eller innlekkasje i borhull/tunnel. For mange prosjekter settes det krav til at Lugeon-verdien ikke skal overstige en viss verdi.

## 2.3 INJEKSJON MED SUSPENSJONER

### 2.3.1 Innledning

Størstedelen av injeksjonsarbeidene i Norge som i utlandet utføres med sementbaserte injeksjonsmasser. For de fleste forhold vil en godt utført injeksjon med sementbaserte midler være tilstrekkelig for å oppnå tilfredsstillende tetthet.

En vellykket injeksjon av bergmasser vil avhenge av en kombinasjon av følgende faktorer:

1. Bergmasseforhold
  - permeabilitet av bergarten
  - sprekkeåpninger/ sprekkefyllinger
  - sprekkeavstand/ utholdenhet og sprekkeretning
  - spenningsforhold
2. Injeksjonsmassens materialeegenskaper
  - partikkelstørrelse
  - rheologiske egenskaper
  - størkningstid
  - styrke og permeabilitet av herdet masse
3. Injeksjonsmetode, utstyr og personell
  - valg av injeksjonsmetode
  - injeksjonstrykk og borhullsavstand
  - utstyrkapasiteter
  - personellerfaring

Det er viktig at injeksjonsprosedyrene er tilpasset de bergmasseforhold en har og at en kan tilpasse metoder og prosedyrer etter hvert som man får bedre kjennskap til de lokale forhold.

Injeksjonsarbeider utført på 60 og 70-tallet var inspirert av de store arbeidene utført på større damprosjekter. Man brukte split-spacing teknikker og startet med sementsuspensjoner med meget høyt vanninnhold. Selv om suspensjonene var tilsatt bentonitt var injeksjonsmørtelene ustabile. For å få en tilfredsstillende kvalitet måtte injeksjonstrykket “stå på” en stund for å presse fritt vann ut av injeksjonsmørtelen.

I dag brukes generelt lavere vann/mentforhold og tilsetningsmidler (P- og SP-stoffer) gir den samme lave (eller lavere) viskositet som man har ved å bruke mye vann i mørtelen.

En annen trend i norsk og internasjonal injeksjon er bruk av finere sementer (mikrosementer) som har erstattet de kjemiske midler for prosjekter med middels til høye krav til tetthet.

Det ideelle injeksjonsmiddel ville ha følgende egenskaper:

- Lav viskositet og meget høy inntregningsevne
- Ingen separasjon (bleeding)
- Kontrollerbar størkningstid (pumpbarhet)
- Regulerbar herdetid
- God heft til fjell og betong
- God bestandighet og motstand mot kjemiske angrep
- Uttørking må tåles
- Frostbestandig
- Giftfritt
- Lav pris

Det finnes ikke på markedet i dag et middel som tilfredsstillende alle disse krav og en må derfor velge injeksjonsmiddel etter de krav som er viktigst for den enkelte injeksjonsjobb.

### 2.3.2 Suspensjoners rheologiske egenskaper

Den mest vanlige suspensjon som er brukt i Norge er en blanding av Portlandsement pluss vann, mikrosilica og et tilsetningsstoff, vanligvis med vannreducerende effekt.

De rheologiske egenskaper av en suspensjon følger Bingham's lov i motsetning til vann som følger Newton's lov - se Fig. 2.3.1

(1) Newton's væskelov:

$$\tau = \eta \, dv/dx$$

hvor  $\tau$  = skjærstyrke (Pa)  
 $\eta$  = viskositet (Pa sek)  
 $dv/dx$  = skjærhastighet ( $\text{sek}^{-1}$ )

(2) Bingham's væskelov:

$$\tau = c + \eta \, dv/dx$$

hvor  $c$  = kohesjon (Pa) for øvrig som ovenfor



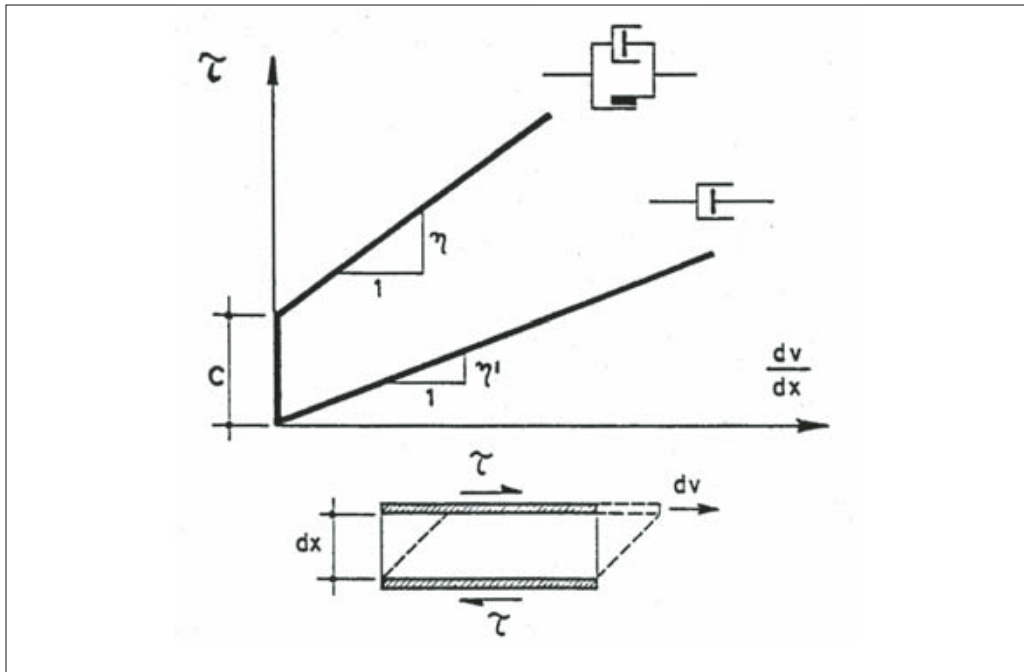


Fig.2.3.1 Rheologiske lover for Newton og Bingham væsker

Stabile suspensjoner vil følge Bingham's lov og ustabile suspensjoner vil oppføre seg som en mellomting mellom Newton og Bingham's væske.

Tykkere suspensjoner vil ved reduserte vanninnhold oppføre seg som en Bingham væske med intern friksjon. Lombardi har foreslått følgende rheologiske formel:

$$\tau = c + \eta dv/dx + p \tan \phi$$

hvor  $c$  = kohesjon (Pa)  
 $p$  = internt trykk i suspensjonen  
 $\phi$  = intern friksjonsvinkel

Selv om kohesjonen og den interne friksjonsvinkel er lave vil denne type suspensjon ha en mindre potensiell utløpsdistanse enn en ren Bingham eller Newton væske ved en gitt sprekkåpning og injeksjonstrykk. Trykkgradienten fra pumpen til ut i hullet og fjellet vil etter en viss utløpsdistanse gjøre at det dannes en plugg i sprekken og injeksjonsmassen vil stoppe. Utløpsgradienten vil redusere vanninnholdet i injeksjonsmassen ytterligere og man får en "filtrering" på samme måte som man får ved benyttelse av tynnere suspensjoner.

For tynnere suspensjoner vil imidlertid en slik filtrering vanligvis først skje der suspensjonens maksimale kornstørrelse blir blokkert av størrelsen av sprekkenes åpning.

Laboratorieforsøk har vist at det synes å være en sammenheng mellom største kornstørrelse og den sprekkeåpning som kan injiseres. En inntregning i sprekker med åpninger på 2 til 3 ganger suspensjonens maksimale kornstørrelse er hva som kan oppnås med en suspensjon med lav viskositet og lav intern friksjon. Viskositeten og den interne friksjon kan reduseres enten ved å øke vanninnholdet eller ved å tilsette et (super)plastifiserende middel som for en stor grad virker som en dispergeringsmiddel ved at kornene i suspensjonen holdes fra hverandre og derved reduserer den interne friksjon. Derved får man en suspensjon som først og fremst har en potensiell større utløpsdistanse uten at man nedsetter den herdede injeksjonens fasthet og tetthet som man gjør ved å øke vann/sementforholdet. Det er imidlertid indikasjoner på at sammenhengen mellom kornstørrelse og minste sprekkeåpning som det er mulig å injisere, er mer komplisert ved bruk av mikrosemeter enn for standardsement CEM I 42,5 RR. Dette skyldes antakelig større kjemisk aktivitet, særlig for de mikrosemeter som har en høy andel av partikler som er mindre enn ca. 1mm. Det foreligger rapporter fra forsøk i utlandet som hevder at det ikke er mulig å injisere tynnere sprekker med mikrosement enn med vanlig injeksjonssement. Det forskes videre på disse forholdene, bl.a. her i landet.

Ved bruk av ustabile mørtler vil det endelige vann/sementforhold ved herding være noe lavere enn i blandekaret - spesielt ved injeksjonsfronten. Prøvekjerner tatt på stuff (Ulla-Førre) har vist at vann/sementforholdet kan reduseres fra opprinnelig 1,5-2,0 til 0,6-0,8 ved bruk av høye injeksjonstrykk der en presser ut overskuddsvannet i injeksjonsprosessen.

De rheologiske egenskapene og forholdet til det mediet som injiseres kan oppsummeres som følger:

- \* Den maksimale kornstørrelse av suspensjonen vil være avgjørende for hvilken minimum sprekkeåpning som kan penetreres. Forholdet mellom største korn og sprekkeåpning synes å ligge på ca. 3 ved bruk av normale injeksjonssemeter.
- \* Sprekkens ruhet vil influere på penetrasjonsmulighet og injeksjonslengde. En glattere sprekk gir mindre injeksjonsmotstand enn en ru sprekk.
- \* Injeksjonstrykket vil influere både på inntregningsevnen og injeksjonsdistanse.
- \* Bruk av finmalte tilsetninger vil redusere faren for separasjon og utlaking av den herdede injeksjonsmørtel.
- \* Bruk av dispergeringsmidler (P og SP-stoffer) vil redusere mørtelens interne friksjon, viskositet og faren for fnokking.

Fordelen ved å bruke **stabile mørtler** i forhold til ustabile vil være:

- \* De injiserbare sprekker vil få en mer komplett fylling. Dette vil kunne føre til færre injeksjonsomganger.
- \* Den herdede mørtel har en høyere fasthet og lavere permeabilitet.
- \* Den herdede mørtel har en større motstandsevne mot kjemisk forvitring.

### 2.3.3 Materialer

Det vanligste injeksjonsmateriale som blir benyttet er sement. Tidligere var Rapidsementen nærmest enerådende, men i de senere år har spesialsementer og mikrosementer vært brukt på anlegg med stort krav til tetthet. Det har likeledes vært en utvikling på tilsetningsstoffer som har gjort det mulig å oppnå en suspensjon som har nærmet seg det ideelle injeksjonsmaterialet. Likevel er det fortsatt et stykke til at sementsuspensjoner har en inntregningsevne og valgt herdetid som er god og fleksibel nok til at de kjemiske midlene helt kan erstattes.

#### 2.3.3.1 Sementer

De sementer som benyttes i Norge i dag kan grovt sett deles i Portlandsementer og slaggsementer.

Av Portlandsementene er det Standardsement CEM I 42,5 RR som er mest brukt. Andre Portlandsementer som er brukt til injeksjonsformål er finmalte sementer (mikrosementer). Mikrosementene kan også leveres som slaggsementer. I følgende tabell er mineral-sammensetningen for Portland og en typisk slaggsement vist.

#### *Mineral-sammensetning*

	Portlandsement	Slaggsement
SiO <sub>2</sub>	ca. 22%	ca. 30%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ca. 4%	ca. 10%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ca. 5%	ca. 2%
CaO	ca. 63%	ca. 46%
SO <sub>3</sub>	ca. 2%	ca. 2%
S <sub>2</sub> -	0	ca. 1%

Kjemiske angrep på injeksjonsmasse i bergsprekker pga. høyt sulfatinnhold i grunnvannet vil sjeldent være noe problem. Dersom man likevel vil forsikre seg mot at nedbrytende reaksjoner kan oppstå, tilsettes ca. 10 – 15 % mikrosilika i suspensjonen. Dette gir en like god eller bedre motstand mot sulfatangrep som bruk av SR-sement, samtidig som en beholder de gode injeksjonsegenskapene.

Andre blandingsforhold, temperaturer etc. enn spesifisert i standarden vil gi andre verdier. Sementen fra den enkelte fabrikk kan avvike noe fra de angitte verdier.

Injeksjonsmørtelens fasthet vil ikke spesifikt ha særlig stor betydning for hvor effektiv tettheten vil bli. Imidlertid er fastheten et generelt kvalitetskriterium på sementmørtler, d.v.s at andre mer viktige fysiske egenskaper som for eks. permeabilitet, hefteegenskaper, erosjonsmotstand etc. er direkte proporsjonal med styrken.

Trykkfastheten vil være avhengig av w/c-forholdet; for en P 30 vil 28 dagers trykkfasthet variere fra 90 MPa med v/c = 0,3 til 35 MPa med v/c = 0,6. Trykkfastheten av mikroementer synes å være noe høyere enn for P eller RP-sementene ved samme vann/semnt-forhold.

Permeabiliteten vil øke fra  $1 \times 10^{-12}$  m/s til  $3 \times 10^{-11}$  m/s med v/c-tall på henholdsvis 0,3 og 0,6 (ref. G.S.Littlejohn).

Viskositeten av en sement/vann-blanding vil drastisk øke med lavere v/c-forhold enn 0,7 - 0,9 (avhengig av sementtype). Separasjonen (bleed) og volumreduksjon ved størkning vil drastisk øke ved høyere v/c-forhold enn 0,5 - 0,6. For å avhjelpe disse forhold vil det være nødvendig med tilsetningsstoffer hvis man ønsker en injeksjonsmasse med tilstrekkelig styrke og samtidig med god pumpbarhet (lav viskositet) og god inntrengningsevne i tynne sprekker.

Mikrosmentene gir generelt lavere viskositet og blødning ved tilsvarende vann/semnt-forhold.

### 2.3.3.2 Silikastøv

Silikastøv er biprodukt fra produksjon av ferrosilisium legeringer og silisium metall. Silikastøv består i hovedsak av amorf silisium dioksid karakterisert ved at partikkelstørrelsen er svært liten. Primærpartiklene har en midlere diameter på ca. 0,15 micron, mens primæragglomeratene som ofte forekommer har en midlere diameter på 0,3 til 0,4 micron.

Silikastøv benyttes i flere sammenhenger sammen med sement, bl. a. i betong for å bedre fasthet, tetthet og bestandighet. I Norge har en viktig anvendelse vært å forbedre betongens ferske egenskaper. Årsaken er at den store spesifikke overflaten i silika gjør betong med silika mer kohesiv og binder vannet.

Den store spesifikke overflaten og den medfølgende evnen til å binde vann gjør at silika forhindrer vannutskilling og annen separasjon i en injeksjonsmasse. Dette kan utnyttes til å fremstille stabile injeksjonsmasser ved vann/pulvertall høyere enn det som konvensjonelt er mulig.

I tillegg vil silikastøv gi forbedring av den herdede injeksjonsmasses egenskaper på linje med hva man finner ved bruk i betong: dvs. bedret heft, fasthet, tetthet og generell bestandighet.

### **2.3.3.3 Andre fyllstoffer**

Sand benyttes der en først og fremst skal fylle større eller mindre hulrom (for eks.karst). Ofte vil en ved disse prosjekter spyle ned enda grovere materialer (grus eller puk) før en injiserer med en finere mørtel.

Sagflis kan benyttes der en skal tette større hulrom. Sagflisen (< 2mm) tilsettes i blanderen/agitatoren rett før den skal pumpes slik at en benytter sagflisens ekspansjon ved opptak av vann der det behøves mest.

Andre fyllstoffer har vært benyttet i norsk injeksjonspraksis (opprevete madrasser, skumgummi etc.) og det er bare fantasien som stopper utprøving av nye fyllstoffer når "kokeboken" ikke hjelper.

### **2.3.3.4 Tilsetningsstoffer**

Til forskjell fra fyllstoffene har tilsetningsstoffene den kjemiske virkning at de endrer mørtelens konsistens i før og/eller etter herdeprosessen starter. I dag finnes det mange tilsetningsstoffer på markedet:

- luftinnførende
- dispergerende/plastifiserende (P/SP)
- akselererende
- retarderende
- ekspanderende

Generelt benytter man disse tilsetningsstoffene i suspensjoner med lavere vann/semmentall enn ca. 1.

Det anbefales å benytte ekspanderende tilsetning ved oppfylling og etterfylling av tette eller injiserte hull.

Det finnes spesielle injeksjonstilsetninger som har en kombinasjonseffekt av en eller flere av de ovennevnte egenskaper.

Det er i alle tilfelle viktig at man utprøver tilsetningsstoffet til den sementen som er valgt. Det har vist seg at et produkt har en bedre virkning på en sementtype enn et annet.

Ved bruk av stabile mørtler anbefales bruk av P eller SP-stoffer. Det er spesielt viktig at en også benytter hurtigmiksere for å få full utnyttelse av de materialer og tilsetningsstoffer man velger - den mekaniske blandeprosess er avgjørende for at suspensjonen skal få den optimale konsistens som er tilsiktet.

## 2.3.4 Injeksjonsmetoder

### 2.3.4.1 Injeksjonsprosedyrer

Injeksjonsprosedyrene vil legge rammene for den injeksjonsmetode man vil benytte. Er tetthetskriteriet oppgitt som eneste rammevilkår er selvfølgelig utførende entreprenør fri til å velge materialer, utstyr og metoder som han mener vil tilfredsstille tetthetskriteriet.

Nesten uansett hvilken injeksjonsstrategi en velger vil en eller annen form for “split-spacing” eller for- og etterinjeksjon være påkrevet. I tunnelarbeid og spesielt ved forinjeksjon er det likevel viktigere å velge en primær hullavstand, injeksjonstrykk og injeksjonsmateriale som gir den ønskede tetthet etter første injeksjonsrunde enn ved å basere seg på at kriteriet vil bli oppfylt ved etterinjeksjon. For mer generelle injeksjonsarbeider og arbeider i dagen for byggegrøper, dammer etc. der arbeidene ikke i den grad ligger på kritisk fremdriftlinje vil split-spacing metoden være mest aktuell.

Det vil være forholdet mellom krav til tetthet og beskrivelsen av forholdene som bestemmer hvilke injeksjonsprosedyrer man velger.

**Borhullsavstanden** bør velges på bakgrunn av hvilke tetthetskrav som er satt, vurdering av de stedlige forhold og hvilke injeksjonsmidler som skal brukes.

Hvis utgangspunktet er at tetthetskriteriet er strengt, oppsprekking er stor, men sprekkeåpningen liten vil antall bormeter pr. m<sup>3</sup> berg bli høyt.

En “lettinjisert” bergmasse er en bergmasse med få og åpne sprekkesett og borhullsavstanden kan velges betydelig større enn det umiddelbart ovenstående tilfelle. Et forslag til hullavstand avhengig av de geologiske forhold og tetthetskriteriet er vist i tabell 2.3.4.1. For å få en mest mulig effektiv injeksjon er det i utgangspunktet ønskelig å oppnå tetthetskriteriet i første injeksjonsomgang. Dette medfører at hullavstand i injeksjonsskjerm i dag velges tettere en tidligere.

Tabell 2.3.4.1 Hullavstander

Oppsprekking	Tetthetskriteriet		
	Strengt	Middels	Lavt 1)
Få, tildels åpne sprekker	1 - 3 m	3 - 5 m	4 - 8 m
Middels oppsprekking	1 - 3 m	2 - 4 m	3 - 6 m
Sterkt oppsprukket. Sprekker med silt, sand eller leire	1 - 2 m	1 - 3 m	2 - 4 m

1) Primært for å hindre driftsproblemer

**Borhulldiameteren** vil generelt ha liten betydning på injeksjonsresultatet i “normale” bergarter. Imidlertid bør man benytte større borhulldiameterer ved forhold som krever mye spyling og rengjøring før injeksjon. Vanligvis benyttes diametre på 38 - 64 mm. Ved senkboring vil diameteren øke til over 75 mm.

**Injeksjonstrykket** vil ha betydning for injeksjonsresultatet. Ved å bruke så høye trykk som forholdene tillater vil penetrasjonseffekten og injeksjonsdistansen i de enkelte sprekker øke. Ved bruk av ustabile mørtler vil filtreringseffekten (utpressing av fritt vann) øke og man får en mørtel med høyere fasthet og lavere permeabilitet. Normalt benyttes injeksjonstrykk som i bar er 1 til 2 ganger overdekningen i meter.

Det er derved flere forhold som tilsier at man benytter høye injeksjonstrykk. Imidlertid bør man være forsiktig med å bruke så høye trykk at en får en hydraulisk splitting eller jekking. Hvis en “åpner” fjellet ved et visst injeksjonstrykk vil det hull man injiserer i få en bedre effekt ved at massen blir presset lengre ut fra hullet og sannsynligvis vil kommunisere med andre sprekkesett. Man må imidlertid være oppmerksom på at man vanligvis ikke vil fylle den åpnede sprekken 100% - særlig ikke hvis man har et stoppkriterium som går på en maksimal injisert mengde. Ved trykkavlastning kan det derfor gjenstå en “restpermeabilitet” som i enkelte tilfelle kan være like høy eller høyere enn den opprinnelige permeabilitet. Det er derfor meget viktig at man benytter “normale” trykk ved den eller de siste runders injeksjon som da komplimenterer de innledende injeksjonsrunder der en har “jekket” enkeltsprekker.

Pakningsplasseringen blir ofte valgt på bakgrunn av vanntapsmålingene der disse er foretatt i borhullet. Det er imidlertid en trend, både for injeksjonsarbeider i tunneler og i dagen, at en setter andre kriterier for injeksjon/ikke injeksjon eller om en skal bore splitthull eller ikke enn å basere seg på vanntapsmålinger. Derved blir den mest benyttede fremgangsmåte å begynne injeksjonen ved dypeste/innerste pakningsplassering og injisere oppover/utover i hullet i lengder på 5 til 10 meter. Hvor injeksjonen vil ha spesiell stor

betydning for fremdrift/økonomi vil injeksjonslengder på ca. 24 m være aktuelt. Dette er nå vanlig lengde i f. eks. trafikk tunneler.

Det er viktig at når man får kommunikasjon fra et hull til et eller flere av de hullene som er boret at disse injiseres samtidig. Det er ikke effektivt bruk av ressurser bare å sette en pakke øverst i det hullet en får masse ut av uten å sette på injeksjonstrykket også i dette hullet. Derfor bør entreprenøren ha utstyr (manifold og høy kapasitet på injeksjonspumpa) som kan klare en slik injeksjon. Alternativt kan en vekselvis injeksjon av flere hull utføres.

En viktig beskrivende tekst er “at injeksjonsprosedyren skal forandres etter de rådende forhold”. Erfaring har vist, gang på gang, at det som er “god latin” på et sted ikke nødvendigvis er optimalt på et annet. Derfor er det viktig at borhullsavstander og -lengder, injeksjonstrykk og pakningsplasseringer justeres etter hvert som man får erfaring fra de bergforhold man har i det aktuelle prosjekt.

#### **2.3.4.2 Forinjeksjon**

Der tetthetskriteriet er gitt som en maksimal innlekkasje pr. meter tunnel bør forinjeksjon vurderes. Ved strenge kriterier, som i tettbygde strøk, er systematisk forinjeksjon sterkt å anbefale. Hullengder, overlappingslengder og borhullsavstand må bestemmes på bakgrunn av tunneldimensjoner og de geologiske forhold sammenliknet med det tetthetskriteriet man har.

Forinjeksjon, eventuelt sonderinger foran stuff, bør også vurderes der en har varierende geologiske forhold eller der en har mangelfulle forundersøkelser.

Hvis man velger et opplegg for forinjeksjon vil for eks. en hullavstand på 2 - 3 m være “et midt på treet”-valg. Hvis man ikke velger å gå med en full forinjeksjonsskjerm med en gang vil 2 - 4 sonderhull på stuff være et alternativ. Lengden av disse velges gjerne på basis av en til en halv ukes inndrift 15 - 30 meter med en overlapp på for eks. to salvelengder. Det har imidlertid vist seg ved flere anledninger at sonderboring ikke gir et riktig bilde av lekkasjene foran stuff, selv med inn til 10 sonderhull. De mest omfattende forinjeksjonene har dobbel skjerm, dvs. at forinjeksjonsintervallet er det halve av borhullslengden.

Innlekkasjen etter en forinjeksjon vil variere avhengig av det opprinnelige tetthetskravet sett i sammenheng med antall injeksjonsomganger. En innlekkasje på fra 1 (Baneheia) til 38 (Vardø) liter pr. minutt pr. 100 m tunnel er den variasjon som er rapportert i Norge for forinjiserte tunneler (hovedsakelig tunneler i tettbygde strøk og undersjøiske tunneler).



Forinjeksjon vil også virke stabiliserende der en har følgende forhold:

Lav innspenning av sterkt oppsprukket fjell (overdekning inntil ca. 20 m)

Reduser innlekkasje der store vannmengder kan bety erosjon og instabilitet

### 2.3.4.3 Etterinjeksjon

Det synes å være en hovedregel at det kan være en tidkrevende og møysommelig arbeid å ettertette mindre lekkasjer i en tunnel. Det er derfor viktig at en bruker den tid som er nødvendig for å oppnå et best mulig resultat under forinjeksjonen der kravet til tetthet er stort.

Imidlertid vil det være behov for en viss ettertetning av forinjiserte tunneler og ettertetning av tunnelkonstruksjoner og deler av tunneler for andre typer tunneler og bergrom.

I utgangspunktet er det å anbefale at man tetter tunnelen noe utenfor den forstyrrede sonen som oppstår ved sprengning. Erfaringer og undersøkelser som er gjort for eks. i Stripa-prosjektet har vist at en øker permeabiliteten inntil 0,5 til 1,5 meter utenfor tunnelveggen. Utenfor denne sonen har man vanligvis en spenningsomlagring som gjør at sprekker og stikk har lukket seg (øket normalspenning) og etterinjeksjonen bør foretas utenfor denne sonen som kan være fra en halv til en tunneldiameter utenfor tunnelprofilen.

Etter en kartlegging av de vannførende sprekkenes bør borhullene krysse disse sprekkenes anslagsvis 5 - 10 meter utenfor profilen. Det hull der man påtreffer den største lekkasje bør brukes som avlastningshull. Injeksjonen bør derfor utføres etter at alle hullene er boret og injeksjonen foretas først i hull som ligger lengst unna de eller det hull som gir størst utlekkasje. Under denne injeksjonen bør utganger i tunnelen i størst mulig grad tettes med tjæredrev eller lignende. Før man avslutter injeksjonen i de eller det hull som gir mest utlekkasjevann bør den øvrige injeksjonen være herdet i minimum 24 timer slik at ikke denne injeksjonsmassen eroderer bort når man "plugger" det siste hullet.

Man opplever ofte ved denne injeksjonsfremgangsmåte at innlekkasjen flytter på seg. Igjen er det å gå på med boring på de sprekker man mener er de vannførende og prøve på nytt.

Det er lettere å utføre en etterinjeksjon der man har en utstøpning eller sprøytebetong som tåler litt injeksjonstrykk (en bar eller to). Imidlertid bør prinsippet med injeksjonene følge det ovenstående eksempel ved at man injiserer den innerste delen av hullet først (pakkingsplassering på 5 meter eller dypere) og derved kan man benytte et høyere trykk samtidig som hovedlekkasjeveien blir injisert først.

**2.3.4.4 Avslutning av injeksjonen**

Ved de fleste arbeider er det spesifisert et maksimalt avsluttende trykk og en eventuell maksimal sementinnngang pr. pakningsplassering. Dette er en tilfredsstillende ordning for kanskje de fleste injeksjonsarbeider i tunneler og bergrom. Imidlertid kan det være mer korrekt å kombinere inngang pr. bormeter og trykk ved å angi en dette som en “injeksjonsintensitet”. Dette begrep er innført i internasjonal injeksjonsarbeider av Lombardi (1993) og kalles GIN-metoden. GIN står for Grout Intensity Number og er produktet av trykket (i bar) og injeksjonsinngang (i liter pr. bormeter). På Fig. 2.3.4.4 er vist eksempler på injeksjons-stier (øvre diagram) og forslag til GIN-tall (nedre diagram) for forskjellige krav til tetthet.

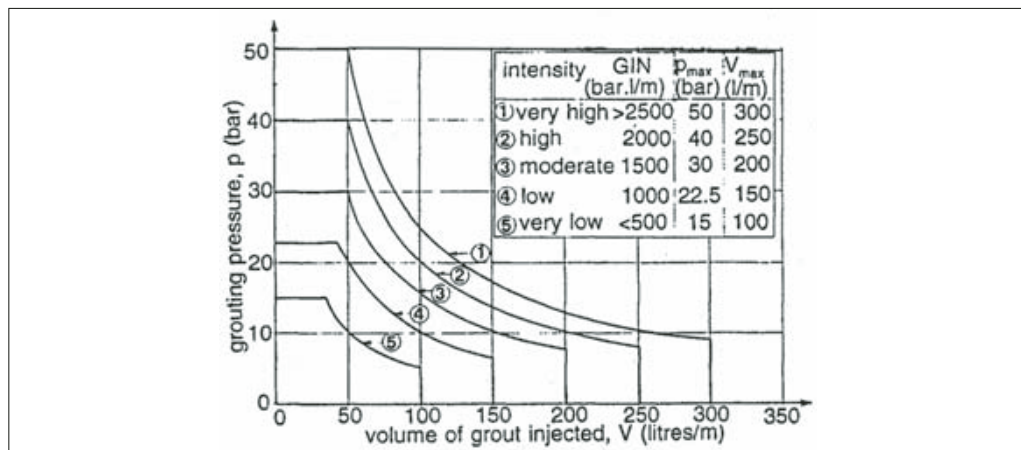
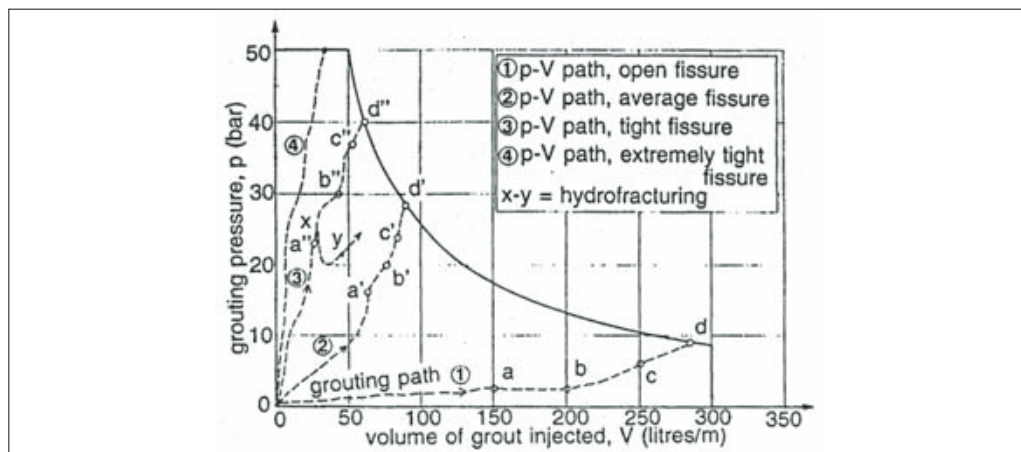


Fig.2.3.4.4 GIN - metoden (Lombardi, 1993). Øvre diagram.

Fig.2.3.4.4 GIN - metoden (Lombardi,1993). Øvre diagram viser injeksjonstier for forskjellige forhold og nedre diagram viser forslag til grenser for GIN-tallet.

Hensikten med GIN-systemet er ikke å injisere mer enn nødvendig eller sagt på en annen måte å tilpasse influensradiusen av injeksjonen til borhullsmønsteret man bruker. For norske anlegg ville det valgte GIN-tallet variere avhengig av geologiske og hydrogeologiske forhold, av tetthetskrav og injeksjonsmetode. Hvis man har valgt en forinjeksjon med et bestemt antall hull ville det være fornuftig å velge et høyere GIN-tall enn en ordinær split-spacing injeksjon under de samme geologiske forhold.

### 2.3.5 Injeksjonsutstyr

Pakkere leveres som mekaniske eller hydrauliske pakkere, som engangspakkere eller flergangspakkere. De dyreste hydrauliske pakkere som er beregnet på meget høye trykk er svært dyre mens de enkleste mekaniske eller "selvtettende" er svært billige. De kan begge gjøre nytten - å hindre injeksjonsmørtelen å trenge forbi pakkeren.

Der er fra entreprenørs side ønske om å gjøre utstyret så letthåndterlig som mulig og derfor ser man flere og flere utstyr med pakkeren festet i et fleksibeltlastrør tilpasset det lengste hullet. Hvis hullet er stabilt er det ingen problem, men en kan oppleve ikke å få ned pakkeren eller miste hele utstyret ved at man ikke kan få satt på noen særlig kraft i det fleksible systemet.

**Blandere** leveres som vanlige lavhastighetsblandere (< 1500 r.p.m.) og som høyhastighets kolloidkverner. Et blandeverk bør bestå av en av hver av de ovenstående. Aktivatoren bør brukes først for at blandingen blir mest mulig homogen slik at alle enkeltkornene i sementen er i suspensjon. Etter å ha kjørt blandingen i aktivatoren i et par minutter pumpes den over i omrøreren. Omrøreren holder injeksjonsmørtelen i suspensjon.

På fig.2.3.5.1 er vist inntrengningspotensialet til forskjellige mikrosementer. S 1000 og Alofix er blandet med to forskjellige mixere - en lavhastighet og en høyhastighets-mixer. Ved bruk av lavhastighetsmikseren er inntregningen omtrent på høyde med vanlig Rapidement. Ved å benytte høyhastighetsmikser ble inntrengningspotensialet sterkt forbedret.

**Injeksjonspumpens** kapasitet er viktig for at injeksjonen skal kunne utføres tilfredsstillende. Av pumpetyper kan nevnes trykklufttank, stempelpumper (hydrauliske eller luftdrevne), membranpumper og eksenterskrupumper.

I dag benyttes de hydrauliske dobbelvirkende stempelpumpene mest. De er lette å innstille har en akseptabel kapasitet (trykk/mengde) og gir en tilnærmet kontinuerlig trykkgradient. Enkeltvirkende pumper har de samme egenskaper som de dobbelvirkende bortsett fra at de ikke gir den samme kontinuitet i trykket og derved injeksjonsmengde pr. tidshet.

Membranpumper og eksenterpumper brukes i mindre grad i Norge. De har vanligvis litt mindre kapasitet enn stempelpumpene. Fordelen med eksenterpumpen er at den gir et kontinuerlig trykk under pumpingen.

Trykklufttanken (Berg-Jet) var svært vanlig tidligere, men den er ikke like kontrollerbar som de andre pumpetyperne og er mer eller mindre ikke i bruk som injeksjonspumpe. I dag brukes den ofte bare til oppfylling av hull i forbindelse med innstøpte bolter.

For alle pumpetyper er det viktig med godt renhold. Sementsuspensjonen er et sterkt slipende medium og grove sementkorn fort slipe spor i ventilseter etc. Disse må være av herdet stål med størst mulig hardhet.

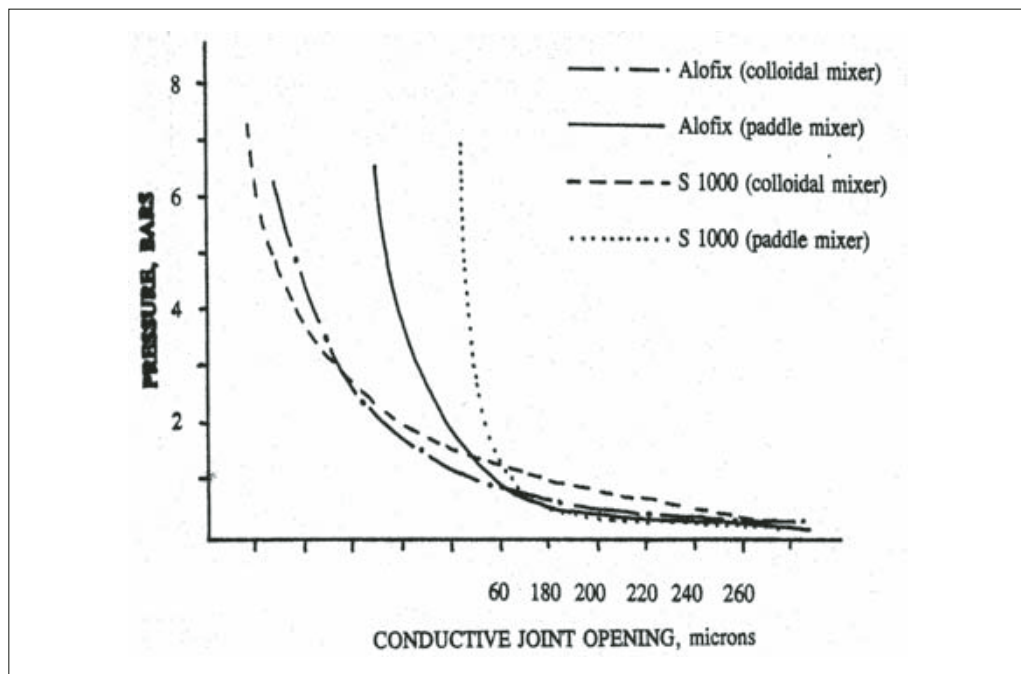


Fig. 2.3.5.1 Suspensjoners inntrengning på fine sprekker avhengig av injeksjonstrykket og blander.

**Måleutstyr** for registrering av trykk og mengde kan leveres av forskjellige leverandører. I Norge er det bare på enkelte større anlegg slikt utstyr har vært i bruk. Fordelen ved dette utstyret er at man lettere kan bedømme når for eksempel man skal forandre vann/sementforholdet i mørtelen. Ved flerhullsinjeksjoner kan man også registrere den individuelle inngang på hvert enkelt hull hvis registreringsutstyret har flere registreringskanaler.

**Manometre, slanger og koblinger** skal anpasses det maksimale trykk en vil benytte og ha store nok dimensjoner slik at trykktapet blir minst mulig. Spesielt ved vanntapsforsøk bør man teste hele systemet (pumpe, koblinger, slanger og pakker) for å måle eventuelt trykktap. Det har vært eksempler på at trykkfallet i systemet har vært vesentlig og derved ble den beregnede permeabiliteten noe annerledes enn hva den virkelig var.

### 2.3.6 Kontroll

Det har i Norge generelt vært liten oppfølging og kontroll under selve injeksjonsarbeidet bortsett fra kontroll av masseinnfang og tetthet. Kontroll av suspensjonen og utførelsen av injeksjonen i de enkelte hull har vært mer eller mindre overlatt til entreprenøren. Dette system går utmerket der en har kvalifiserte og erfarne injeksjonslag. Ved øket bruk av mikrosemeter og tilsetningsstoffer er det imidlertid berettiget at byggherre også utfører en kontroll av suspensjonen som brukes. Kostnadene for mikrosementene er såpass mye høyere enn for Standardsement CEM I 42,5 RR (2 - 4 ganger) at en rutinemessig kontroll bør utføres.

En ny norsk standard, "NS-EN 12715 Utførelse av spesielle geotekniske arbeider – Injisering" inneholder bl.a. et informativt tillegg hvor forskjellige metoder for måling av injeksjonsmassens viktigste parametere er vist.

Å måle **Marsh-viskositet** er den enkleste form for kontroll. Man fyller ca. 1,5 liter og måler tiden for en gitt mengde mørtel (946 ml) til å passere. Vann passerer på ca. 26 sek. Mørteler med en passeringstid på 27- 30 sek. må anses som tyntflytende mørtler. Dette tall får man ved bruk av mikrosemeter med v/s-tall på 1,0 (tilsatt SP-stoff) eller standard- sementblandinger med høyere v/s-tall enn ca. 2.

Injeksjonsmørtler bør typisk ligge på 28 - 40 sek; oppfyllingsmørtler på 40 - 60 sek.

Å måle **fritt vann** i mørtelen bør også inngå som en test i en utvidet kontroll. Det frie vann i en suspensjon kan måles enkelt i et beger. Den frie vannsøyle over mørtelen måles etter 2 og 4 timer og presenteres som forholdstallet mellom høyden av det frie vann og den opprinnelige mørtelhøyden. Hvis en skal anse mørtelen som stabil bør det ikke være mer enn 1 - 2 % fritt vann.

Selv om innholdet av det frie vannet i mørtelen er lavt kan man presse vann ut av mørtelen. En måling av **utpresset vann** vil gi svaret på hvor stabil mørtelen er ved den gitte trykkgradient. Utpresset vann kan måles i en trykkcelle der mørtelen plasseres over et papirfilter og et gasstrykk på 3 bar settes på. Volumet av det utpressede vannet måles i tillegg til tiden det tar inntil vannmengden som kommer ut av prøven er tilnærmet null. Maksimal tid settes til 30 minutter. Selv ved samme mørtelinnhold (v/s-tall, type sement og eventuell tilsetning) måler man ulike utpressede vannmengder ved dette forsøk. Forklaringen på denne forskjellen er vanligvis en av følgende årsaker; sementens eventuelle opptak av fuktighet før bruk vil øke faren for fnokking/ separasjon og en øket tid i blander/aktivator (> 30 minutter) vil nedsette P- eller SP-stoffenes effektivitet.

En annen, enklere metode for å finne ut om en fnokking har funnet sted er å våtsikte en mørtel over et sikt med åpning tilsvarende sementens maksimale kornstørrelse pluss 5 - 10 micron. Sikteresten bør være mindre enn 2 - 5 % av mørtelens tørrstoffinnhold. Finner man høyere sikterester enn de ovenstående tall er sementen mest sannsynlig klumpet og har mistet mye av sin opprinnelige inntregningsevne.

Suspensjonens **romvekt** kan enkelt måles med en kalibrert balansestang der en heller suspensjonen i en skål med kjent volum.

De ovenstående målingene kan alle måles i felt ved å bruke et bærbart Baroid mudlaboratorium som leveres i et aluminiumsskap med alt utstyr (ex. gassflaske for filtreringsforsk) og som veier i underkant av 20 kg.

I tillegg til kontroll av suspensjonen som brukes bør kontrollen undersøke:

1. Boring for injeksjon
  - ansett av hull
  - eventuell avviksmåling
  - undersøke spyletrykk/vannmengde under nedboring
2. Kontroll av injeksjonstrykk
3. Kontroll av oppbevaringsrutiner for sementen
4. Kontrollere sementforbruk i forhold til de gitte tetthetskriterier

## 2.4 INJEKSJON MED KJEMISKE MIDLER

### 2.4.1 Innledning

Helt fra starten av, i begynnelsen av det 19. århundrede, har injeksjon med partikulære injeksjonsmidler vært dominerende. Først i midten av 1950- årene kom det kjemiske midler på markede som hadde noen større praktisk anvendelse. Helt opp til i dag har fortsatt sementbaserte midler hatt den overveiende delen av markede.

I de senere år har i tillegg mikrosementer tatt over en del av det tradisjonelle markede for kjemiske injeksjonsmidler.

Mange kjemiske midler har kommet på markede og flesteparten har forsvunnet igjen etter ganske kort tid pga. sviktende langtidsstabilitet, miljøskadelighet for brukere og omgivelser eller på grunn av pris.

Imidlertid har fortsatt kjemiske injeksjonsmidler sin berettigelse i et komplett injeksjonsprogram. Selv om kjemiske midler i pris pr. volumenhet ligger i størrelsesordenen 2-10 ganger høyere enn for sement, vil en riktig bruk av kjemiske midler i mange tilfeller likevel være lønnsom.

De viktigste anvendelsesområder for kjemiske injeksjonsmidler i dag er som følger:

- I anlegg med svært strenge krav til tetthet
- Ved større lekkasjer hvor en momentan tetting er nødvendig
- I anlegg hvor en begrensning av spredning på injeksjonsmaterialet er ønskelig/nødvendig ut i fra økonomiske eller miljømessige årsaker
- I anlegg hvor tidsaspektet ved injeksjon er kritisk
- I anlegg der det i tillegg til vanntetting er ønskelig med en forstekning av bergmassen

I de fleste av de ovennevnte forhold vil kjemiske injeksjonsmidler benyttes i kombinasjon med sementbaserte midler og i volum kun utgjøre en liten del.

På bakgrunn av den erfaring man sitter inne med i dag kan man ganske klart trekke den konklusjonen at for å oppnå noen særlig tettingseffekt i fjellanlegg må injeksjonsopplegget baseres på forinjeksjon. I den grad etterinjeksjon har vært vellykket, har injeksjonsopplegget basert seg på kjemisk injeksjon.

### 2.4.2 Kjemiske injeksjonsmidler

Kjemiske injeksjonsmidler er løsninger uten partikler i motsetning til sementbaserte midler. Inntrengningsevnen og utbredelse i berget fra borhull avhenger kun av væskens viskositet og injeksjonstrykket.

De kjemiske injeksjonsmidlene kan deles i to hovedgrupper:

- Herdeplaster
- Geldannende i vann

Herdeplastene er lettflytende polymerer eller monomerer. De er ofte tokomponenter som blandes og pumpes inn. De er ikke blandbare med vann og ved injeksjon kan således materialet presse vannet foran seg eller reagere med vann. Det er spesielt viktig at herdeplaster med to eller flere komponenter benyttes i riktig blandingsforhold for å oppnå de spesifikasjoner som oppgis av produsent/leverandør.

De geldannede stoffene løses i vann i relativt lave konsentrasjoner. Oppløsningene er meget lettflytende og herding skjer ved at vannmassene bindes sammen til en gel.

Før vi går inn på en nærmere beskrivelse av de forskjellige injeksjonsmidlene kan det være nyttig å se på en del definisjoner som er brukt i forbindelse med kjemisk injeksjon:

**Brukstid:** Tiden fra komponentene eller herder og harpiks blandes sammen - eller etter tilsetning av initiator - til materialet begynner å stivne eller blir for tykt til å kunne injiseres.

**Viskositet:** Et mål på hvor lett materialet flyter. Et lavviskøst materiale flyter lett, mens et høyviskøst materiale er tykkere. Viskositet benevnes i cP eller Ns/m<sup>2</sup>. Vann har viskositet lik 1 cP eller 0,001 Ns/m<sup>2</sup> ved 20<sup>0</sup> C.

**Polymer:** Ved fremstilling av polymerer starter man fra råvarer som kalles monomerer (mono=enkel, poly=mange, mer=enhet). Monomerene har mulighet til å kobles sammen til betydelig større molekyler ved en prosess som kalles polymerisasjon. De produktene som dannes kalles polymerer.

**Plast:** Plast er polymerer, men inneholder i tillegg oftest bl. a. mykgjørere og fyllstoff.

**Herdeplast:** Herdeplast er en polymer som er tverrbundet til et tredimensjonalt nettverk der molekylstørrelsen blir uendelig stor. En herdeplast kan ikke smeltes eller omformes.

**Termoplast:** Termoplast er en polymer som består av en kjede som kan være rett eller forgrenet. Molekylene er bundet sammen på samme måte som for herdeplaster. En termoplast kan smeltes og omformes.

Epoxy og Polyuretan er begge herdeplaster der monomerer reagerer kjemisk sammen til et tredimensjonalt molekylært nettverk. Akryl regnes som termoplast men tverrbinder opp til 20 - 30% og blir derfor en slags herdeplast. Variasjonsmulighetene innenfor hver gruppe er stor og mulighetene er mange. I det videre skal det gis et kort innblikk i de ulike materialenes fordeler og ulemper betraktet som injeksjonsmaterialer.



### 2.4.2.1 Herdeplaster

Herdeplaster er oftest to komponenter som blandes på stedet og herder ved en eller flere kjemiske reaksjoner. Etter utherdning er disse like mye plast som de mer kjente plaster som polyvinylklorid, polyetylen mm. Forskjellen ligger i at de kjemiske reaksjoner ikke finner sted i en fabrikk men på injeksjonsstedet. Den praktiske bruker har med andre ord plastfabrikken på injeksjonsstedet, i sprekken eller sleppen over eller under vann.

De kjemiske reaksjonene er her kjente og klarlagte på samme måte som avbindingen av sement er kjent. En viss minimumskunnskap om de enkelte herdeprinsipper og mekanismer er avgjørende for riktig materialvalg og anvendelse. Med denne kunnskapen kan man lettere stille de riktige spørsmål og derved få utnyttet disse materialene maksimalt i injeksjonssammenheng.

Vann i riktig mengde er en nødvendig del av bindemiddelet sement, i hvert fall når det gjelder proporsjonering av betong. Vann i forbindelse med herdeplaster må i de fleste tilfeller anses som uønsket forurensning. De kjemiske reaksjonene for dannelse av herdeplaster er helt forskjellig fra herding av sement, men det må også poengteres at reaksjonskjemien for de ulike herdeplaster kan være høyst forskjellig.

Det er helt klart at material- og kjemikunnskap gir brukeren et utmerket verktøy til å gripe inn der hvor sementinjeksjon ikke er tilstrekkelig eller ikke fungerer. Dette kan illustreres ved at en epoxyfilm på 1 mm tykkelse har samme motstand mot gjennomgang av vanddamp som 2 m betong. Dette gir muligheter til den som er villig til å utnytte materialene maksimalt.

### Polyuretan

Polyuretan dannes gjennom polymerisasjonsreaksjon mellom isocyanater og hydroksylgrupper til et høymolekylært materiale. Isocyanater kan også reagere med hydroksylgruppene i vann under dannelsen av polyurea og karbondioksyd som unnviker som gass og dermed får massen til å skumme.

Hovedfordelen med polyuretan som injeksjonsmiddel er det usedvanlige brede spekter av egenskaper som kan tilpasses. Harde, myke, elastiske, porøse, seige og tette forbindelser kan fremstilles. Den relative tettheten kan varieres mellom ca. 0,9 og 1,5 og ekspansjon kan varieres fra 0 til omtrent 25 ganger det opprinnelige volum.

Polyuretaner kan produseres som enkomponent og tokomponente injeksjonsmaterialer. Om injeksjonsmaterialet inneholder et ekvivalent forhold mellom isocyanat og polyol (tokomponent), oppstår et fast stoff uten kontakt med vann og et skum ved kontakt med vann. Om injeksjonsmaterialet inneholder et overskudd av isocyanater (enkomponent), reagerer materialet kun med vann og forblir ureagert uten kontakt med vann.

Som herdeplast stiller polyuretanene i en spesiell klasse ved at de reagerer med lett med vann og danner skum. I de fleste tilfeller ved belegning er dette en stor svakhet, men i tilfeller ved tetting av vannlekkasjer kan det utnyttes ved at skummingen raskt virker tettende. Skummende injeksjonsmidler gir ingen kraftoverføring og heftfastheten blir uvesentlig på grunn av den dårlige strekkfastheten i skummet.

Egenskaper til det skummet som oppstår ved reaksjon mellom vann og isocyanat er svært avhengig av temperaturen i omgivelsene og injeksjonstrykket. For at skumming skal starte, trengs en viss initieringstemperatur. Er det for kaldt, skjer det ingen skumming-reaksjon. I kalde omgivelser kan herdereaksjonen startes ved å varme blandingen, hvoretter prosessen fortsetter selv om massen kjøles ned til 15-20 minusgrader. Reaksjonen er for øvrig svakt eksoterm.

Polyuretanskum har en meget god inntrengningsevne i riss, sprekker og slepper takket være sin selvinjiserende evne. Gasstrykket som dannes ved skumreaksjonen er med på å drive materialet inn i sprekken. Ekspansjonstrykket kan variere fra tilnærmet 0 ved fri ekspansjon til opp i mot 50 bar ved full innspenning. Viskositeten vil derfor ikke automatisk bli et mål for materialets inntrengningsevne.

Tettheten på skummet vil også være avhengig av ekspansjonstrykket. Ved høye trykk hvor utvidelsesfaktoren er mindre enn 4-5 vil det stort sett dannes lukkede celler og massen er lite permeabel. Ved fri ekspansjon dvs. volumøkninger på 20-25 ganger vil det stort sett dannes åpne celler og massen blir permeabel og lite egnet til permanent tetting. Massen vil i dette tilfellet allikevel fremdeles ha meget nyttige mauringsegenskaper. Polyuretaner kan altså utvikle seg til alt fra betonglignende masser til bløte, plastiske materialer eller til lett, skjørt skum. Det er svært vanskelig å styre skumkvaliteten på grunn av at man oftest ikke vet hvordan sprekken ser ut.

Polyuretaner har fortsatt relativt høy viskositet, med en nedre grense uten fortynningsmiddel på ca. 100 cP. Ved hjelp av fortynnere kan dette bringes ned til rundt 20 cP. Ved øket trykk og gassutvikling, bidrar gassen til å senke viskositeten drastisk.

Herdetiden for polyuretaner kan i praksis reguleres fra sekunder til 2-3 timer.

Polyuretaner anvendes i injeksjonssammenheng i fjellmasser mest som et middel for å stoppe store lekkasjer og er det eneste lett tilgjengelige middelet som kan reagere hurtig med vann. De brukes også i kombinasjon med sementer for å sikre ekspansjon og derved større grad av oppfylling og penetrasjon under selve injeksjonsprosessen, f.eks. ved kontaktinjeksjon i tunneler. Polyuretanenes selvinjiserende evne gjør de også til et svært effektivt middel til å tette sprekker og riss med sprekkeåpninger ned til 0,1 mm.

Isocyanaten i polyuretansystemene kan være en av følgende 4 typer:

- Toluen di isocyanat (TDI)
- 1.6 Hexametylen di isocyanat (HDI)
- Isoforon di-isocyanat (IPDI)
- 4.4 Difenylmetan di-isocyanat (MDI)

Av disse er MDI den minst farlige og injeksjonsmiddelet bør derfor baseres kun på denne. Forskriftene tilsier ellers at innhold av fri monomerisk isocyanat i f.eks. malinger, ikke skal overstige 0,7%. Dette bør også gjøres gjeldende for injeksjonsmidler. Ellers gjelder de vanlige vernekravene med vernetøy, briller, egnet maske i trange rom osv.

Polyuretaner er ekstremt klebrige under herding og hudkontakt bør av denne grunn alene unngås. Søl på huden bør tørkes av med ren klut og deretter gnis inn med flytende såpe etterfulgt av rikelig vannskylling. Etter at produktet er herdet bør man ikke forsøke å fjerne det, men la det forsvinne av seg selv.

Foruten isocyanatene kan eventuelle akselleratorer være giftige, idet disse ofte er amider eller salter av transisjonsmetaller så som f.eks. kobolt eller tinn. Disse saltene må behandles me omhu.

### Epoxy

Epoxyharpiksene er en viktig gruppe injeksjonsstoffer pga. deres høye limvirkning og gode mekaniske egenskaper, som først og fremst gjør dem egnet til reparasjon og forsterkning av betongkonstruksjoner. De har av samme grunn vært brukt til forsterkning av oppsprukket fjell.

Epoxy består av to komponenter som er herder og harpiks. Herderen og harpiksen reagerer gjennom en eksoterm reaksjon. Reaksjonen utvikler med andre ord varme ved dannelsen av det tredimensjonale molekyllære nettverk. Den optimale utherdingen skjer ved sammenblanding av ekvivalente mengder. Mengdene er beregnet og oppveid fra produsentens side, og overskudd av herder eller harpiks vil forringe kvaliteten på sluttproduktet.

Sprekker egnet for injeksjon med ren epoxy er i størrelsesorden 0,1 til 4 mm. I grovere sprekker bør epoxyen tilsettes sand, kvartsmel eller tillempes på annen måte. Det samme gjelder også om hulrommene blir for store. Blir volumene for store kan materialet koke på grunn av at varmen ikke forsvinner fort nok ut av systemet. Materiale som har kookt har ikke de tiltenkte egenskaper. Tillempningene som er nevnt ovenfor er med på forhindre temperaturøkning.

Reaksjonsforløpet for epoxy er vanskelig å regulere nøyaktig, og er først og fremst avhengig av herdetypen. For alle herdetyper er reaksjonsforløpet sterkt avhengig av temperatur, men avhengigheten er ikke lineær. Reaksjonsforløpet fremskyndes sterkt av varme, mens nedkjøling til rundt 0° C gjør at prosessen nesten stanser opp. Epoxy bør derfor ikke brukes i kalde omgivelser. Ellers fortsetter herdeprosessen i lange tider etter størkning, hvilket er grunnen til at epoxy blir sprøere ved aldring.

Viskositeten hos epoxyharpikser er høy, med verdier på 400 cP som nedre grense. Viskositeten kan reduseres til rundt 100 cP ved riktig valg av herder og ytterligere reduksjon til rundt 20 cP er mulig ved fortykning med reaktive væsker, så som forskjellige glysidyl-eterer.

Epoxy herder med svært lavt svinn som medføre mindre risiko for innebygde spenninger. Epoxy har svært høy trykkstyrke i forhold til andre midler og har også den egenskap at den hefter godt til de fleste underlag.

Selv om epoxyene og herderne er giftige ved inntak, er i praksis den største faren forbundet med deres allergifremkallende egenskaper. Utslaget kan variere fra utslett til astmalidelser. Ved arbeid med epoxy må all kontakt reduseres til et absolutt minimum, og innånding av damper unngås.

For å unngå miljøforurensninger må korrekt komponering tilstrebnes. Imidlertid er prisnivået til epoxymidlene så høyt, og deres anvendelsesområde så spesialisert at forurensningsfaren er minimal pga. de små volumene som involveres.

### Akryl

Polymetylakrylat kan brukes som injeksjonsmiddel og har fordelen av å være meget raskt herdende og har lav viskositet. I Norge brukes akryl først og fremst i form av gel.

#### 2.4.2.2 Geler

Gel er stoffer i vann i en relativt lav konsentrasjon som tilsettes en herder eller akselerator. Oppløsningene er meget lettflytende. De pumpes inn i sprekker der herdingen skjer ved at vannmassen bindes sammen til en gel. På denne måten stoppes lekkasjer og sprekker tettes. Vannet er ikke kjemisk bundet, men holdes på plass av polare krefter. Disse kreftene er imidlertid ikke sterkere enn at om man legger gelen på f.eks. skrivebordet så fordamper vannet relativt raskt.

En gel er et tredimensjonalt nettverk hvor vann er mekanisk presset inn i systemet. Forståelsen for hva en gel er kan lettere anskueliggjøres ved å vise hvordan en gel kan dannes.

Et gelbasert injeksjonsmateriale kan sees på som en emulsjon. En emulsjon er i dette tilfellet en olje (injeksjonsmaterialet) finfordelt som dråper i vann. Dråpene er tyngre enn vann og kan derfor falle mot bunnen. Hastigheten på utfellingen og volumet som dannes avhenger av flere faktorer. Utfellingen som vist i fig. 1 A er vanskeligere å emulgere til sitt opprinnelige enn i tilfelle B. Dette betyr at dråpene i A holdes bedre sammen enn dråpene i B. Volumet av utfellingen kan bli like stort som hele væsken.

Når utfellingen danner et kontinuerlig nettverk og omslutter væsken, er det semi-faste systemet en gel. Hvor sterk denne gelen er avhenger av antall angrepspunkter på dråpene og bindingsstyrken mellom partiklene.

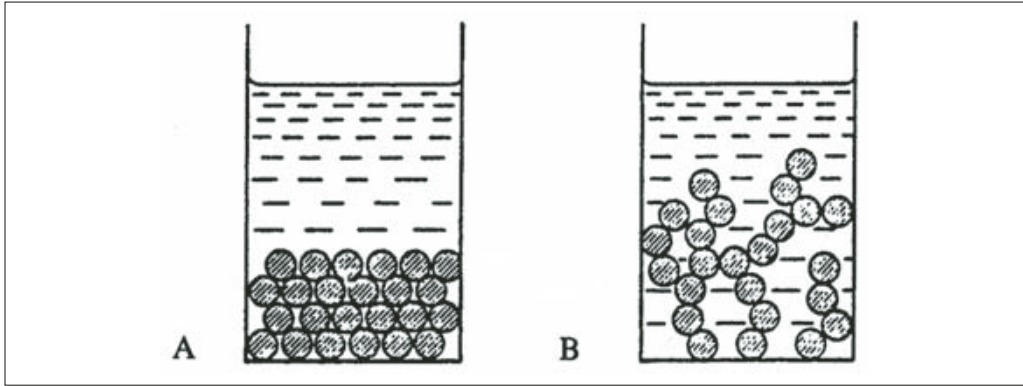


Fig. 2.4.1 Prinsipp for dannelse av gel.

Geler kan være basert på organiske plaststoffer som akryler, paraformaldehydharpiks, lignin eller uorganisk silikat.

For tetting kan det være svært effektivt å benytte geler hvor sprekkeåpningene er så fine at sement er uegnet. Man kan arbeide mot vanntrykket og stoffene blander seg med vannet og danner gel. I prinsippet kan man få så hurtig geldannelse med enkelte typer at man kan gå direkte på lekkasjer hvor vannet strømmer ut av en sprekk. Ved først å bore hull og pumpe farget vann inn kan man finne tiden før det fargede vannet kommer til overflaten igjen sammen med lekkasjevannet. Når man kjenner denne tiden, kan man tilsette herder (akselerator) slik at geldannelsen skjer innenfor denne tiden. På denne måten fylles sprekken ved å pumpe inn masse med passende herdetid.

Geldannende stoffer kan lide av synerese. Synerese er at produktet eller massen blir mindre over tid på grunn av stadig opptørking og fukting. Det vil med andre ord si at produktet ikke gjeninntar det volumet som det hadde rett etter injeksjon.

Bestandigheten av en gel kan trekkes i tvil i forhold til andre kjemiske injeksjonsmidler ut fra en gels kjemiske oppbygning. Materialet er utsatt for langt større kjemiske belastninger, fordi massen angripes både utenfra og innenfra i og med at massen opptar vann. Tilleggsbelastninger kan også bringes inn i gelen sammen med vannet.

Generelt kan man ikke regne med at man har en frostbestandig gel. Effekten avhenger av vannmengden i gelen, type gel og sprekk.

Stoffer med lang brukstid kan blandes og pumpes inn som en komponent, mens stoffer med kort brukstid må pumpes inn ved hjelp av mer avanserte tokomponentpumper.

### Vannglass (natriumsilikat)

Natriumsilikat lages ved reaksjon mellom soda og ren kvarts ved høy temperatur hvorved flytende natriumsilikat dannes.

Forholdet silika/natriumoksyd bestemmer egenskapene til vannglassløsningen. Forhold på omkring 2 gir løsninger med vaske- og dispergerende egenskaper, mens forhold mellom 3 og 4 gir løsninger med adhesjons- og limeegenskaper. Det er de sistnevnte som brukes til injeksjonsformål.

Natriumsilikatløsninger stivner til en gel ved tilsetning av herdemidler, som vanligvis inneholder syrer, flerverdige kationer eller organiske stoffer som estere eller formamid.

Her i landet foretas nesten all injeksjon med ferdige esterblandinger som markedsføres spesielt for formålet.

Viskositeten hos vannglassløsninger er avhengig av silikatkonsentrasjon, temperatur og forholdet silika/natriumoksyd. For injeksjonsformål fortynnes det konsentrerte silikatet med 30-60% vann for sterkere geler til grunnforsterkning, og med 60-90% vann for svakere geler til vanntettingsformål. Silikatløsninger til injeksjon har sjelden høyere viskositet enn 20 cP selv for de sterkeste gelene. Løsninger for de svake gelene har viskositeter rundt 3-5 cP.

Etter tilsetning av esterherdner, som vanligvis tilsettes i mengder tilsvarende 5% av den ferdige blandingens volum for svake geler, begynner reaksjonen.

Herdetiden til en silikatløsning av gitt konsentrasjon kan varieres innen nokså vide grenser, dvs. minutter til timer, ved valg av estertype og dens doseringsmengde. Ved regulering av herdetiden må hensyn tas til de rådende temperaturforhold. Herdetiden forkortes med en faktor på fra 1,3 til 1,6 for en 10<sup>0</sup> C temperaturstigning for geler herdet med estere.

Gelstyrken etter herding er en viktig parameter ved bedømming av hvor godt en gel vil motstå erosjon eller utpressing. For de svake silikatgelene i bruk hos oss, ligger trykkfastheten rundt 15 kPa målt som trykkstyrke i et enaksialt trykkprøvningsapparat.

Stabiliteten eller varigheten til vannglassgel er avhengig av tre faktorer, nemlig synerese, selvoppløsning og ensidig trykk.

Synereseprosessen fører til at en nydannet gel gradvis begynner å miste vann og krympe. Vannmengden som utskilles er en komplisert funksjon av bl. a. silikatmengde og type, herdner type og mengde, omrøringstiden og omgivelsestemperaturen. Ved korrekt blanding kan syneresen for svake geler med ca. 17% vannglass holder under 1-2% ved bruk av esterherdere og rundt 10<sup>0</sup> C omgivelsestemperatur.

Selvoppløsning inntreffer når blandingen ikke inneholder nok herdemiddel til å gi tilstrekkelig nøytralisering av lutinnholdet. Det overskytende alkaliet vil da snu om på prosessen som førte til geldannelse. Når dette skjer kan gelen skrumpe sterkt inn, og kan til og med helt forsvinne. Prosessen inntreffer ikke når nøytraliseringsgraden overstiger 70%, dvs. når det tilsettes nok herder til å nøytralisere minst 70% av silikatløsningens alkalinitet.

Silikatgelene er svært følsomme for ensidig trykk. Dette gjelder spesielt de svake vanntettende gelene som nærmest kan forsvinne når de utsettes for ensidig trykk. Forsøk i ødometerapparat på gel laget av ca. 17% vannglass, har vist svinn på over 95% ved ensidig belastninger på 10 kPa (0,1 bar).

Silikatgeler hører til våre rimeligste kjemiske injeksjonsmidler og er derfor mye brukt. Deres mekaniske egenskaper er ikke de beste og de bør derfor fortrinnsvis brukes til mindre kritiske injeksjonsarbeider som utføres i relativ stor målestokk, som f.eks. midlertidig forinjeksjon ved tunneldrift, konsolidering og lignende.

Natriumsilikatløsninger og gel regnes ikke for å være toksiske eller korrosive. Silikatløsningene kan imidlertid virke etsende på glass og enkelte metaller. Materialet regnes ikke for å gi skadelige miljøbelastninger etter plassering.

Selv om natriumsilikatløsninger er lite korrosive, er sprut i øyet meget smertefullt og må behandles av lege så snart som mulig. Førstehjelp består av rikelig skylling med vann. Ved varig hudkontakt blir huden hard, uttørket og har etter hvert lett for å sprekke. Hansker bør derfor brukes. Esterherdnere på det norske markedet er lite toksiske, men brennbare. Fordi de alle har høyt flammepunkt (ca. 90<sup>0</sup>) og er lite flyktige, er det liten brannfare forbundet med å bruke dem.

### Akrylamider og akrylater

Det er pr. i dag (november 2001) forbud mot bruk av akrylamider og akrylat som tettemidler i forbindelse med fjellinjeksjon i Norge. EU diskuterer for tiden om et tilsvarende forbud også skal innføres i resten av Europa.

### 2.4.3. Helse, miljø, sikkerhet (HMS)

Over 200 forskjellige kjemiske injeksjonsmidler har vært i bruk opp igjennom årene. Nesten alle disse midlene er mer eller mindre giftige, etsende, allergifremkallende eller kreftfremkallende. Med mulig unntakelse av lite permanente dyre- og plantederivater er det umulig å finne injeksjonsstoffer som er risikofrie. Noen av disse stoffene kan gi øyeblikkelig skade og andre kan gi skade etter flere års bruk. Øyeblikkelige skader kan være etseskader på hud og øyne eller innånding av forskjellige gasser. Skader etter lang tids bruk kan være fremkalling av allergi og eksem eller skader på indre organer.

Valg av injeksjonsstoffer er i praksis bestemt av tidlig erfaring, eksisterende dokumentasjon og økonomi. Når stoffet så er valgt må dets toksikologi og yrkeshygieniske aspekter studeres og så innrette seg deretter. Man må også huske at farer som er forbundet med rene stoffer ofte er sterkt reduserte når de leveres i injeksjonsferdig form pga. fortykning, prepolymerisering mm.

Arbeidsmiljøloven krever at giftige og andre helseskadelige stoffer ikke skal brukes dersom de kan erstattes med stoffer som er mindre skadelige for arbeidstakeren.

I virksomheter hvor giftige eller andre helsefarlige stoffer blir fremstilt, pakket, benyttet eller oppbevart på en måte som kan innebære helsefare, skal arbeidsprosessen og arbeidet for øvrig være fullt forsvarlig, slik at arbeidstakeren er sikret mot ulykker, helseskader eller særlig ubehag.

For at det skal kunne settes i verk vernetiltak og velges riktig verneutstyr, må en vite hvilke stoffer man kommer i kontakt med og hvilke egenskaper de har. Det er også nødvendig for å kunne yte riktig førstehjelp om et ulykkestilfelle skulle inntreffe.

I følge forskrifter om helsefare - brannfare - og eksponeringsfaremerking skal stoffer eller produkter som kan medføre helsefare, være merket på norsk med:

- Navn og adresse til norsk produsent eller importør
- Stoffets eller produktets handelsnavn
- Stoffets entydige kjemiske navn
- Symbol for helsefare
- Risiko- og sikkerhetssetninger som gir tilstrekkelig opplysninger om farer og nødvendige forholdsregler ved bruk

Symbolene er delt inn i grupper:

- \* Meget giftige
- \* Giftige
- \* Etsende
- \* Helseskadelige
- \* Irriterende

Brannfarlige varer er inndelt i følgende grupper:

- \* Eksplosiv
- \* Ekstremt brannfarlig
- \* Meget brannfarlig
- \* Brannfarlig
- \* Oksiderende

Etiketten skal også inneholde opplysninger om YL-gruppe hvis produktet inneholder løsningsmidler.



Det er begrenset hvor mange opplysninger det er plass til på en etikett. I tillegg er produsent, leverandør eller importør pålagt å fremlegge helse-, miljø- og sikkerhetsdatablad på norsk. I følge internasjonale bestemmelser skal disse inneholde 16 punkter og gi informasjon om følgende:

Handelsnavn og leverandør, kjemisk sammensetning, viktigste faremomenter, førstehjelp, tiltak ved brann, tiltak ved søl og lekkasje, håndtering og lagring, eksponeringskontroll og personvern, fysikalske og kjemiske egenskaper, stabilitet og reaktivitet, helsefareopplysninger, miljøfareopplysninger, avfallsdeponering, transportopplysninger, lover og forskrifter og annen informasjon.

HMS-databladet skal være utfylt på norsk. Ansvarlig er produsent, leverandør eller importør.

Produktblad eller bruksanvisning som angir produktets egenskaper skal også være på norsk.

HMS blir tillagt mer oppmerksomhet nå enn tidligere og det ovenfor nevnte kan virke skremmende på den som skal bruke produktene, men det er viktig å få de nødvendige informasjonene om produktet slik at riktig verneutstyr benyttes.

Til bedømming av faren for akutte forgiftninger brukes gjerne LD 50-verdien (LD=lethal dose) som forenklet kan defineres som den dose som målt i mg/kg kroppsvekt gitt til en gruppe spesielle forsøksdyr forårsaker dødsfall til 50% av individene. Det må understrekes at LD-verdien sier lite om langtidsvirkninger, f.eks. allergi eller kreftfare. Yrkeshygienisk Institutt eller Arbeidstilsynet kan uttale seg om farene forbundet med bruk av kjemiske stoffer og bør kontaktes dersom man er i tvil.

Tabellen nedenfor viser LD 50-verdiene til en del stoffer som brukes i injeksjonssammenheng:

	LD 50 (rotte) mg/kg
Kalsiumklorid	1000
Magnesiumklorid	2800
Jernklorid	900
Dietylsuccinat	8530
Formaldehyd	800
Furfural	127
Dimetylamin	698
Amoniumpersulfat (10%)	820
Akrylamid (AM-9)	150
Akrylat (40%)	5000
Til sammenligning gis LD 50-verdiene til følgende ofte brukte stoffer:	
Etanol	5000
Koksalt	3000
Acetylsalisylsyre (Globoid)	1050
DDT	100

#### 2.4.4 Utstyr for kjemisk injeksjon

I begynnelsen ble kjemiske injeksjonsmidler forsøkt pumpet med det samme utstyret som ble benyttet for sementer. Midlene ble dosert etter oppskriften og blandet direkte i omrøreren. Denne type blanding krevde mye håndtering av de forskjellige komponentene og ofte måtte ferdig masse tømmes ut pga. stopp i pumpingen. Dette førte til store miljømessige og yrkeshygieniske problemer samtidig som utnyttelsen av relativt dyre injeksjonsmidler ble dårlig.

I tillegg førte ofte den manuelle håndteringen av de forskjellige komponentene til feildosering slik at det ferdige produktet ikke hadde de tiltenkte egenskaper. Man fikk også uønskede reaksjoner mellom kjemikaliene og sementrester i systemet og/eller mellom kjemikaliene og diverse metaller.

For geldannede injeksjonsmidler har utstyr som består av separate doserings- og injeksjonspumper vist seg best egnet. Doseringpumpene har kalibrerte målere for vann og leverer ferdig blandet masse til et pumpekar hvor injeksjonspumpen bringer massen videre. Dette systemet kan bygges opp på flere måter, men kravene til utstyret kan listes opp som følger:

- Nødvendig kapasitet: Mengde minimum 3000 l pr. time ved 5 bar. Maks. trykk 60 bar.
- Kontrollerbar dosering med måleutstyr for hver enkelt komponent som viser gjennomstrømning til enhver tid.
- Måleutstyr som registrerer den innpumpede mengden.
- Doseringpumpene må kunne kjøres trinnløst og reguleres i takt med inngangen av massene i fjellet.
- Mest mulig lukket system med kjemikaliene på egne tanker av rustfritt eller spesialbehandlet stål. Tankene bør også være isolert eller ha mulighet for oppvarming for å holde kjemikaliene på en ideell, konstant temperatur.
- Herder-/akselerator tilsetninger og dermed reaksjonstiden på injeksjonsmassen må kunne reguleres på de systemer hvor dette er mulig.
- Alle deler i pumpesystemet må være bestandige overfor de anvendte kjemikalier.

Før injeksjonsarbeidene startes skal doseringpumpene kalibreres. Viskositeten og egenvekten på de forskjellige kjemikaliene er varierende og mengdemålere beregnet på vann kan ikke brukes direkte. Hver kurs i doseringpumpe kontrolleres ved å måle gjennomstrømmet mengde over en viss tid.

Impeller og rotolatorpumper har vist seg godt egnet som doseringpumper. Rotolatorpumpen kan ved en aksialt vridbar rotor regulere mengdekapasiteten ved samme omdreiningshastighet. Doseringsenheten kan byttes ut etter hvilket injeksjonsmateriale som benyttes.

Injeksjonspumper som pumper uten pulsering er å foretrekke. De kjemiske gelene er ofte svært myke og oppbygde barrierer i fjellet kan ødelegges ved for høye pulserende trykk.

Herdeplaster vil ha mange av de samme kravene til utstyr som de geldannende stoffene. Herdeplaster er imidlertid mindre ømfintlige for pulserende trykk og brukes i langt mindre kvanta enn de geldannende stoffene. Mest brukte injeksjonspumper er en- eller tokomponent membranpumper med kapasitet på ca. 500 l pr. time og maks trykk 60- 80 bar.

I de senere årene er slike systemer benyttet sammen med sementinjeksjonsutstyr hvor polyuretan er tilført samtidig med sementsuspensjoner i borhull for å styre avbindingstid, spredning eller stanse større lekkasjer.



## 2.5 Supplement til injeksjon - Alternative løsninger

Som supplement eller alternativ til injeksjon kan benyttes andre vanntette løsninger som utstøpning med og uten membran. Det vil i mange tilfelle være økonomisk gunstig å ta drypp og mindre lekkasjer ved avskjerming i stede for å tette tunnelen 100 % ved injeksjon. Videre kan vanninfiltrasjon være en nødvendig supplerende til injeksjon for tunneler i tettbygde strøk eller for å hindre utlekkasje av væsker eller gasser fra lagerhaller eller luftputekamre.

### 2.5.1 Utstøpning - drenert/udrenert med og uten membran

For mange løsninger, særlig i tettbygde strøk der kravet til poretryksreduksjoner er strengt, vil en kombinasjon av forinjeksjon på stuff for å hindre en større innlekkasje og derved redusering av grunnvannstanden og en tett utstøpning, på eller bak stuff, være en godt alternativ til injeksjon alene.

Injeksjonskostnadene for å tette den siste innlekkaseliteren kan bli svært høy. En vanntett betong kan da være en god løsning - spesielt under geologiske forhold der en likevel måtte investere i omfattende sikringstiltak.

Før utstøpning bør imidlertid innlekkasjen være redusert mest mulig slik at kvaliteten på betongen skal bli tilfredsstillende. Det kan være rasjonelt å drenere støpen ved innlagte rør/slanger/drensmatter mot fjell eller fange opp vannet ved bruk av drenshull som senere tettes når utstøpningen har fått tilstrekkelig styrke.

Kombinasjon med utstøpning og membran har vært prøvd med og uten hell i Norge. Membranene kan være produsert av PVC, PE eller asfalt/bitumen. Membranene krever en nøye avjevnet fjelloverflate før montering. For å unngå skader benyttes det en beskyttelsesfilt mellom avjevnet fjelloverflate og membran. Denne filten fungerer samtidig som et drensnett. Ved drenert løsning vil filten fungere som et permanent drensnett mens den ved full vanntetting vil fungere som drensnett i anleggsfasen slik at membranen ikke blir utsatt for vanntrykk før betongutføringen er etablert. Metoden krever svært nøye oppfølging og kvalitetssikring slik at membranen ikke blir skadet. Det er stort sett under de etterfølgende arbeidene at membranen skades, spesielt dersom betongutføringen utføres med armering. Bentonittmembraner vil også være en aktuell membrantype - spesielt for udrenerte løsninger.

Ved kryssing av svært permeable soner vil en kombinasjon av utstøpning og injeksjon ofte gi en raskere og bedre tetteløsning enn injeksjon alene. Ved å støpe på stoff kan en konsentrere innlekkasjen til avlastningsrørene gjennom støpen og kan benytte større injeksjonstrykk. Derved vil injeksjonen bli mer effektiv ved at man har noe å injisere mot. Det finnes flere eksempler på at en har passert vanskelige partier ved først å støpe ut hele eller deler av konturen og stoffen for deretter å tette sonen ved injeksjon.

### 2.5.2 Vannavskjerming

Der hvor omgivelsene ikke stiller strenge krav til tetthet men anlegget selv ikke kan ha lekkasjer på grunn av iskjøving, overledning i elektriske anlegg, korrosjon etc., vil en vannavskjerming være aktuell. Vannavskjermingen kan være PE-skum med eller uten sprøytebetong, prefabrikkerte betonghvelv eller lette konstruksjoner med stål, aluminium mv. som bæresystem. Disse løsningene betinger at innlekkasjevannet dreneres på baksiden av konstruksjonene og at innlekkasjene er redusert mest mulig ved forinjeksjon.

For å unngå isdannelse bak konstruksjonene må disse være isolerte i forhold til frostmengden på stedet.

### 2.5.3 Vanninfiltrasjon

Kunstig infiltrasjon av vann er et virkemiddel som generelt må anses som et supplement til injeksjonsarbeidene. Formålet med kunstig infiltrasjon av vann kan være:

- i) å hindre en poretrykksreduksjon som kan medføre uønskede setninger
- ii) å hindre utlekkasje av væsker eller gasser fra lagerkaverne

Det er først og fremst i tettbygde strøk der en del konstruksjoner er fundamentert på løsmasser at det førstnevnte formål er aktuelt. For luftputekamre, oljelagre og gasslagre i fjell er det flere eksempler på at “vanngardiner” er blitt etablert og som virker godt i praksis.

Et generelt krav til etablering av infiltrasjonsanlegg er at de geologiske forhold er godt undersøkt slik at anlegget blir plassert og dimensjonert slik at virkningsgraden blir best mulig. Den beste virkningen oppnås ved å etablere en lavpermeabel sone rundt tunnelen / fjellrommet gjennom injeksjon. Det er imidlertid også mulig å etablere infiltrasjonsskjermer uten å injisere der en har generelt lave permeabiliteter (eks. Kvilldal, Ulla-Førre) eller at infiltrasjonen etableres umiddelbart på utsiden av en tett utstøpning (NSB-tunnelen, Oslo).

I forbindelse med gasslageret på Rafnes er det i tillegg til en infiltrasjonsskjerm over lageret for å hindre gasslekkasjer også etablert en vanngardin mot Frierfjorden for å redusere innlekkasje av saltvann. Begge disse skjermene er meget effektive.

Imidlertid skal en være oppmerksom på at langtidsvirkningene av en slik skjerm kan bli redusert over tid ved at det infiltrerte vannet inneholder partikler som kan nedsette infiltra-sjonskapasiteten. Derfor bør et infiltrasjonsanlegg inkludere et filtreringsanlegg som renser vannet før infiltrasjonen.

Infiltrasjonsskjermen kan etableres i både fjell og permeable løsmasser. Ved etablering av fjellhull vil man, spesielt i bløte, sedimentære bergarter, måtte bore en del hull som ikke gir særlig vanninngang og som vil ha liten effekt. Mer ukonvensjonelle og omfattende tiltak i form av egne vanninfiltrasjonstunneler er rapportert utført i forbindelse med olje og gasslagre.

Infiltrasjonsanleggene bør være klare til drift før tunnelen eller fjellrommet er ferdig sprengt. Det er imidlertid mulig å reetablere grunnvannstanden til det tidligere nivå selv om vanninfiltrasjonen har kommet i gang etter at sprengningsarbeidene var utført.

Vanninfiltrasjonstrykket har brukt å ligge på fra 0,5 til 10 bar over det opprinnelige grunnvannstrykket. De lavere overtrykk gjelder for tettbygde strøk med løsmasse-avsetninger.





## ORDLISTE

Ordlisten nedenfor inneholder definisjoner på termer som er viktige injeksjon. Ordlisten er et utdrag av Glossaret i europeisk standard prEN 12715: "Utførelse av spesielle geotekniske arbeider – Injisering"

Avbinding	Den tilstanden en injeksjonsmasse er i når den i vilkårlig grad ikke er plastisk lenger, vanligvis målt ved inntrengning eller deformasjon. Innledende avbinding viser til den første stivningen og avsluttende avbinding viser til at en tilstrekkelig stivhet er oppnådd.
Avbindingstid	Tidsrommet fra materialet blandes og til det oppstår en betydelig endring i de reologiske egenskapene. Avbindingstiden er avhengig av volum og temperatur og måles på flere måter.
Bestandighet	Motstand mot mekanisk og kjemisk angrep.
Binghamvæske	Et stoff som innehar både viskositet og kohesjon.
Dispergeringsmiddel	Et stoff som endrer overflatespenningen til kolloidale dråper slik at de ikke løper sammen og holdes suspendert.
Dobbeltpakker	En innretning som består av et par forseglinger som er montert på et injeksjonsrør i en viss forhåndsbestemt avstand og som benyttes for å avgrense injeksjonen til grunnen mellom de to forseglingene.
Effektivt trykk	Det faktiske trykket i injeksjonsmassen i grunnen.
Epoxy mortel	En harpiksinjeksjonsmasse med flere komponenter som har svært høy strekkfasthet, trykkfasthet og heftfasthet.
Filterpresse	Et instrument som brukes til å måle en injeksjonsmasses filtreringsegenskaper.
Flytespenning	Den laveste skjærspenningsverdien der det er et plutselig fall i verdien på den spenningen som påføres og der den kontinuerlige forlengelsen oppstår ved mer eller mindre samme spenningsverdi.
Flytkonus	En innretning til å måle injeksjonsmassens konsistens, der man lar et forhåndsbestemt volum injeksjonsmasse slippe gjennom en nøyaktig målt åpning flyttiden benyttes til å angi konsistens.
Flytmiddel	Et tilsetningsstoff som forbedrer en injeksjonsmasses strømningssegenskaper.
Gelfasthet	Skjærfastheten til en gel. Denne kan måles ved et fastsatt tidspunkt etter at en gel er blandet eller oppløst eller når gelen er fullt utviklet.
Geltid	Det tidsrommet som måles fra en injeksjonsmasse blandes til det dannes en gel.
GIN- metode GIN- verdi	GIN står for "Grouting Intesity Number". Metoden benytter denne verdien som en parameter for å avgrense området for injeksjonen til en største GIN-verdi. Denne verdien framkommer ved at volum til den injiserte massen (i liter) multipliseres med injeksjonstrykket (i bar) pr. meter borhull.

Grunnvannstand	Ved grunnvannstanden er porevannstrykket lik det atmosfæriske trykket dvs. vannstanden som etablerer seg i et hull som graves i grunnen.
Harpiks	Et materiale som danner grunnlaget for et system av organiske injeksjonsmaterialer som akryl, epoksy, polyester og uretan.
Herdetid	Den tiden det tar før injeksjonsmassen når den dimensjonerende fastheten.
Herding	Økning i fastheten til en injeksjonsmasse etter avbinding.
Herdner	I en kjemisk injeksjonsvæske med to komponenter er det den komponenten som fører til at grunnkomponenten herder.
Hurtigavbinding	Det at en nylig blandet injeksjonsmasse raskt blir stiv, vanligvis samtidig med at det utvikles betydelig varme. Denne stivheten kan ikke fjernes og det er heller ikke mulig å gjøre massen plastisk igjen ved å fortsette å blande uten å tilsette vann.
Hydraulisk splitting	Oppsprekking av grunnen forårsaket av at vann eller injeksjonsmasse injiseres under trykk som er høyere enn den lokale strekkfastheten og det lokale omgivende trykket.
Injeksjonsmasse	Et pumpbart materiale (suspensjon, løsning, emulsjon eller mørtel) som stivner og avbinder over tid.
Injeksjonstrykk	Det trykket som påføres under injeksjonsprosessen og som måles på nærmere angitte steder.
Kjemisk injeksjonsvæske	Alle injeksjonsmaterialer som kjenetegnes ved at de er en løsning, dvs. de har ikke partikler.
Kolloid	Et stoff som består av svært små partikler som er dispergert i et kontinuerlig medium. En kolloidal partikkel har en størrelse på mellom 5 og 5.000 Ångström.
Konsistens	Den relative bevegeligheten til nylig blandet injeksjonsmasse og den evnen den har til å strømme. De vanlige målingene er synkmål for stive blandinger og strømming for mer flytende blandinger.
Kontaktinjeksjon	Injeksjonsmasse injiseres inn i grensesjiktet mellom menneskeskapte konstruksjoner og grunnen.
Lugeon-verdi	En relativ enhet for transmissivitet målt i liter pr. minutt pr. meter borehull med diameter 76 millimeter ved et overtrykk på 1 MPa i berg.
Løsning	En væske som dannes ved at kjemikalier oppløses fullstendig i vann slik at det blir en homogen væske uten faste partikler.
Marsh-viskositet	Viskositetprøvinger foretas med Marsh-konusen. Det tidsrommet et gitt volum strømmer, uttrykt i sekunder, kalles Marsh-viskositet. Se også flytkonus.
Mikro-materiale	Et svært fint materiale med en jevn, bratt partikkelfordelings-kurve, der $d_{95} < 20 \text{ }\mu\text{m}$ .
Newtonsk væske	En sann væske som utviser en konstant viskositet ved alle skjærhastigheter. En Newtonsk væske har ingen flytespenning.

Overdekning	Tykkelse på det berg- og jordmateriale som ligger over det hullet som injiseres.
Pakker	En innretning som føres inn i et borehull for å isolere en del av hullet fra en annen. En pakker er vanligvis en innretning som kan utvide seg og som aktiveres mekanisk, hydraulisk eller pneumatisk.
Permeabilitet	Et mål for hvor lett det er for en væske å passere gjennom et porøst medium.
Polyuretaner	Kjemiske harpikser som reagerer ved å danne skum.
Pozzolan	Et kiselholdig eller kiselholdig og aluminiumholdig materiale som i seg selv har liten eller ingen sementerende virkning, men som vil, i en fint oppdelt form og hvis det er fuktig, reagere kjemisk med kalsiumhydroksyd og danne sammensetninger som innehar sementerende egenskaper.
Reologiske egenskaper	De egenskapene som styrer strømmingen av en væske eller plastisk fast stoff.
Satsvolum	Den mengde injeksjonsmasse som blandes samtidig.
Sedimentering	De partiklene i en injeksjonsmasse som på grunn av tyngdekraften samler seg på bunnen av en beholder når massen ikke blir omrørt.
Sementmørtel	En injeksjonsmasse der det viktigste bindemiddelet er sement.
Skum	Skum som benyttes ved injeksjon er faste stoffer som omslutter luft, vanligvis lukkede porer. De dannes enten ved at gass injiseres i en injeksjonsmasse eller ved en reaksjon mellom injeksjonsmasse og grunnvannet som frigjør en gass.
Spesifikk masseinngang	Den målte mengde injeksjonsmasse som injiseres i en volumenhet av grunnen, eller en lengdeenhet av injeksjonshullet.
Spredningsradius	Den teoretiske avstanden som injeksjonsmassen vandrer fra injeksjonspunktet.
Stabil suspensjon	I stabile suspensjoner skal det i løpet av 2 timer skilles ut mindre enn 5 prosent klart vann øverst i en 1000 ml sylinder med indre diameter 60 millimeter ved en temperatur på 200C.
Stabiliserende middel	Et tilsetningsstoff som reduserer sedimenterings hastigheten til partikler i en væske.
Superplastifiserende middel	Tilsetningsstoffer som gjør mørtel mer plastisk og reduserer viskositeten til suspensjoner.
Suspensjon	En blanding av flytende og faste materialer. Oppfører seg som Bingham-væske når den renner og innehar både viskositet og kohesjon. Partikkelholdige suspensjoner inneholder partikler som er større enn leirfraksjonen, mens kolloidale suspensjoner inneholder partikler av leirstørrelse.
Svinn	En reduksjon i injeksjonsmassens volum.
Synerese	Utskillelse av væske fra en gel som er avbundet og som ikke er utsatt for spenning, ledsaget av at gelen trekker seg sammen. Synerese oppstår over et tidsrom på noen måneder.

Tiksotropi	Den egenskap hos et materiale som gjør at den stivner på relativt kort tid når den ikke blir rørt, men at det ved omrøring eller manipulering får svært myk konsistens eller går over væske med høy viskositet, og at prosessen er helt og fullt reversibel dvs. at viskositeten til tiksotrope væsker avtar med økende skjærhastighet og går tilbake til sin opprinnelige verdi etter at den har regenerert en stund.
Tilsetningsstoff	Alle andre ingredienser i en injeksjonsmassen (for eks. flytemiddel, stabiliserende stoffer) enn grunnkomponentene som benyttes til å endre de egenskapene som injeksjonsmassen har som fast stoff eller væske.
V/C forhold	Vann/semnt-forholdet er forholdet mellom vekten av vannet og innholdet av tørr semnt i en injeksjonsmasse.
Vanninnhold	Forholdet, uttrykt som en prosentandel, mellom vekten av vann i et gitt injeksjonsmateriale og vekten av tørre, faste partikler.
Vannutskillelse	Den autogene strømmen av blandet vann inne i, eller vann som kommer ut av, injeksjonsmasse som nylig er anbrakt.
Viskositet	Den indre væskemotstanden i et stoff som gjør at det motstår en tendens til å renne.

# STIKKORREGISTER

<b>STIKKORD</b>	<b>DEL 1</b>	<b>DEL 2</b>
Aggresivt vann	1.2.2,	2.3.3.1
Akryl	tabell 1.2.1 og 1.4.3.2	2.4.2.1, 2.4.2
Akrylamid	tabell 1.4.3.2	2.4.2.2
Akrylat		2.4.2.2
Alkalireaksjon	1.2.1,	2.3.3.1
Alunskifer	tabell 1.1.1	2.1.3.4, 2.3.3.1
Beslutningsprosess	fig. 1.1.1, 1.1	
Betongpropper		2.1.4.3, 2.1.4.5
Boravvik	1.4.2.	2.2.2.2
Boremotode	1.3.1,	2.2.2
Borhulldiameter		2.3.4.1
Bormønster	1.3.2,	
Borsynk	tabell 1.3.1	2.2.2
Brukstid	1.4.5.	2.4.2.
Epoxy	tabell 1.2.1 og 1.4.3.2	2.4.2.1
Etterinjeksjon	1.3.4.	2.3.4.1, 2.3.4.3, 2.4.1
Fasthet (trykkfasthet)	1.2.2,	2.3.3.1
Filtret vann	tabell 1.4.3.1	
Forinjeksjon		2.3.4.2
Forundersøkelser	tabell 1.1.4, 1.1.4	2.1.5.1, 2.3.4.2
Fritt vann	tabell 1.4.3.1	
Funksjonskrav	1.1	2.1
Gasslager	1.1.5, tabell 1.1.5	2.1.4.2, 2.1.5.2, 2.5.3
Geler	1.2.2.	2.4.2, 2.4.2.2
GIN metoden	1.3.6,	2.3.4.4
Grunnforhold	1.1.4	2.1.5
Grunnundersøkelser	tabell 1.1.4, 1.1.4	
Herdeplast	1.2.2.	2.4.2, 2.4.2.1
Herdetid	tabell 1.4.3.2	
HMS	1.2.3,	2.4.3.
Hullavvik	tabell 1.3.1,	2.2.2
Influensavstand		2.1.2, tabell 2.1.1 og 2.1.2, fig 2.1.3, 2.2.1, fig 2.2.2
Injeksjonslengde	1.3.2.	2.3.2, 2.3.4.1
Injeksjonsmidler	1.2	2.3, 2.4
Injeksjonsskjerm	1.3.2.	2.3.4.2
Injeksjonstrykk	1.3.3,	2.2.2.2, 2.2.3, 2.3.4, fig.2.3.5.1, 2.3.6, 2.4.2, 2.5.1
Injeksjonsutstyr	1.3.5.	
Innlekkasje	1.1.1, 1.1.3, 1.4.4	2.1.1, 2.1.2, 2.4.2
Innstømning		2.1.2,
Inntrengingsevne	tabell 1.2.1, 1.2.1	2.3.3.1, 2.4.2, 2.4.2.1
Inntrengingsevne	1.2.1	2.3.2, 2.4.2
Karbonatisering		2.3.3.1

Karbonatisering		2.3.3.1
Kjemiske midler, stabilitet	1.2.2.	2.1.4.2
Kjemiske midler, valg av	1.3.5.	2.4.2.
Konsolidering	1.2.2.	2.1.3.1
Kontaktinjeksjon		2.1.4.3
Kornstørrelse	1.2.1,	2.3.3.1
Kraftverkstunneler	1.1.5, tabell 1.1.5	2.1.1, 2.1.2, 2.2.1
Lugeon	1.2, tabel 1.2.1, 1.3.1	2.2.1.
Materialer, kontroll	tabell 1.4.3.1 og 1.4.3.2, 1.4.3	2.3.6.
Microsilica		2.3.3.3
Pakker		2.2.2, 2.3.4.1, 2.3.4.3, 2.3.5
Pakkeravstand	1.3.2.	
Permeabilitet	1.2.	2.1.2, 2.2.1, 2.2.4
Plast	1.2.2.	2.4.2.
Polymer		2.4.2.
Polyuretan	1.2.1, tabell 1.2.1, 1.2.2, 1.3.4	2.4.2.1
Poretrykk	1.1.2, tabell 1.1.4, 1.4.4	2.1.2, 2.1.3.1, fig 2.1.6, fig 2.1.8, 2.1.5.2
Primærhull	tabell 1.3.2, 1.3.1	2.3.4, tabell 2.3.4.1
Pumpekapasitet		2.1.4.4
Rheologiske egenskaper		2.3.2,
Samferdselstunneler	1.1.5, tabell 1.1.5	
Sekundær-/splitthull	1.3.2, 1.3.6	
Sementtyper	tabell 1.2.1, 1.2.2, tabell 1.1.4	2.3.3.1
Setninger	tabell 1.1.1, 1.1.2, tabell 1.1.4	2.1.3.1 fig 2.1.6, fig 2.1.7, 2.1.5.2
Sikterest	tabell 1.4.3.1	
Spyling, rengjøring av borhull	1.3.1, 1.4.2,	2.2.3.
Stoppkriterium	1.3.6.	2.3.4.1, 2.3.4.4
Strømningsbilde		2.1.2, fig 2.1.1
Strømningsintensitet		2.1.2, fig 2.1.2
Størkningstid	tabell 1.4.3.2	
Suspensjoner, stabilitet	1.2.2	2.3.2,
Suspensjoner, valg av:	1.3.4	2.3.1
Termoplast		2.4.2.
Tettestrategi	1.1.5.	
Tilsetningsstoffer		2.3.3.5
Trykkstunneler		2.1.4.1
Undersjøiske tunneler	1.1.5, tabell 1.1.5	2.3.4.2
Utlekasje	1.1.1, tabell 1.1.5	2.1.1, 2.1.4.1, 2.1.4.2
Utstyr	1.3.5	2.3.5
Utstøpning	1.1.3, tabell 1.1.1	2.5.1.
Vannavskjerming		2.5.2.
Vannglass	1.1.2.	2.4.2.2
Vanninfiltrasjon	1.1.5, tabell 1.1.1	2.5.3.
Vanntapsmåling	1.1.4, tabell 1.1.4, 1.3.6	2.1.5.2, 2.1.5.3
Varelagre	1.1.5, tabell 1.1.5	
Viskositet	1.4.3, tabell 1.4.3.1 og 1.4.3.2	2.2.1, 2.3.2, 2.4.2

## REFERANSER

Arbeidet med Håndbok – fjellinjeksjon bygger i stor grad på det arbeid som ble utført av Injeksjonskomiteen for tunneler og bergrom i tidsrommet 1978 – 1985.

Hovedkomiteen bestod av følgende personer:

K. Garshol  
E.H. Falch  
A. Tepper  
K. Karlsrud  
P.M. Johansen

Disse fungerte samtidig som formenn i delkomiteer. I tillegg var følgende personer i hver sin delkomitee:

A. Grønhaug  
G. Asting

### Hovedreferanser

- Tepper, A (1988) Erfaringer og meninger etter 45 års arbeid i injeksjonsfaget, Statskraft-rapport
- Kutzner, C (1991) Injektionen in Baugrund, Enke, Stuttgart
- Lombardi, C  
Deere, D (1993) Grouting design and control using the GIN principle, Water Power and Dam Constr., Vol. 45, No 6
- AFTES (1991) Recommendations on Grouting for Underground Works, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 6, No. 6 Pergamon
- Miller, J.B. (1987) Valg av kjemiske injeksjonsmidler  
Kompendium NIF kurs: Tetting av bergmasser, 1987.
- Melbye, R.V. (1990) Injeksjonsmidler og deres bruksområder  
Kompendium NIF kurs: Tetting av tunneler, bergrom og Byggegroper, 1990.
- Karlsrud, K. (1990) Forundersøkelser og funksjonskrav, alternative tettestrategier.  
Kompendium NIF kurs: Tetting av tunneler, bergrom og Byggegroper, 1990.

- API (1985) Standard testing for Field Testing Drilling Fluids. American Petroleum Institute, Dallas.
- ASCE (1992) Grouting, soil improvement and geosynthetics. ASCE Geotechnical Special Publication No. 30, New York.
- NTNF (1992) Injiseringsteknologi – sluttrapport, NTNF "Tunneler og Undergrunnsanlegg". NGI-rapport 548150-5.
- Klüver, B.H. (2000) Berginjeksjon. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Intern rapport nr. 2151 Statens vegvesen.







## **Håndbøker fra NFF/NBG**

- Nr. 1: Fjellinjeksjon. Praktisk veiledning i valg av tettestrategi og injeksjonsopplegg. (kr 250,-)
- Nr. 2: Engineering Geology and Rock Engineering (kr 500,-)
- Nr. 3: Arbeidsmiljø under jord (kr 150,-)

### **Tekniske rapporter fra NFF**

- 01 – Redningskammer for underjordsdrift (kr 100,-)
- 02 – Diesel under jord - Sluttrapport fra forprosjektet (kr 100,-)

Rapportene kan bestilles hos:

NFF/NBG

Postboks 2312 Solli

0201 OSLO

Fax: 22 94 75 02

E-post: [kristin.sande@nif.no](mailto:kristin.sande@nif.no)



NORSK FORENING FOR  
FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK

---

**Adresse:**  
**Postboks 2312 Solli**  
**0201 Oslo**

**ISBN 82-91341-65-6**