

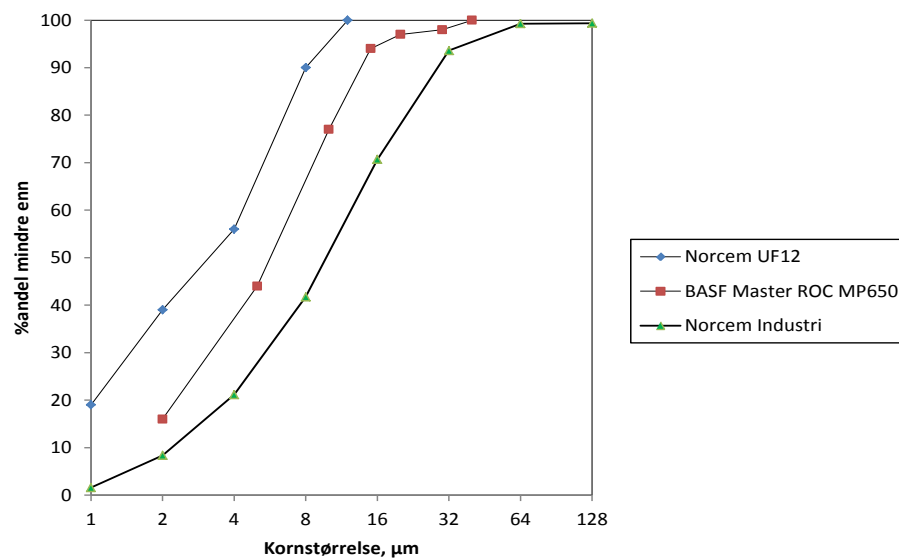
# Rapport

## TIGHT-Sement til injisering

State of the art

### Forfatter(e)

Kari Aarstad, Ola Skjølvold, Harald Justnes



EMNEORD:  
Materialteknologi  
Tunnel  
Injisering  
Sement

# Rapport

## TIGHT-Sement til injisering

State of the art

<b>VERSJON</b>	<b>DATO</b>
2.0	2015-03-09

<b>FORFATTER(E)</b>
Kari Aarstad, Ola Skjølvold, Harald Justnes

<b>OPPDRAKSGIVER(E)</b>	<b>OPPDRAKSGIVERS REF.</b>
TIGHT	Eivind Grøv

<b>PROSJEKTNR</b>	<b>ANTALL SIDER OG VEDLEGG:</b>
102009275-3	14 + 1 vedlegg

### SAMMENDRAG

Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk har oppsummert funksjonskravene til injiseringsmasser; massen skal være stabil, flyte lett og størkne raskt etter plassering i bergmassen. Sementen er av avgjørende betydning for resultatet, både under injisering og i etterkant. Det fokuseres ofte på to typer uønskede hendelser som kan oppstå under injisering som avhenger av injiseringsmassens egenskaper. Det er såkalt "bleeding" (vannseparasjon) og filterkakedannelse. Disse hendelsene er i stor grad avhengig av sementen som benyttes i injiseringsmassen. Finmalte sementer har mindre "bleeding" enn mer grovmalte sementer. Samtidig vil mindre maksimal kornstørrelse tillate injisering i mindre riss enn grovere sementer. Finmalingsgrad (spesifikk overflate) og maksimal kornstørrelse ( $D_{95}$ ) ser ut til å være langt viktigere enn sementens kjemiske sammensetning. I tillegg til "bleeding" og filterkake-dannelse er avbindingstid og fasthetsutvikling avgjørende egenskaper, særlig for framdrifta på anlegget. Fasthetsutviklingen styres primært av hvilket vann/sementforhold som benyttes. Dette kan forholdsvis enkelt justeres ved bruk av tilsetningsstoffer. Avbindingstida kan også være kritisk for arbeidets framdrift. Denne kan også til en viss grad styres ved bruk av tilsetningsstoffer.

I Norge bruker noen Norcem Industrisement, mens andre bruker svært finmalte mikrosemeter. Mikrosemeter har en åpenbar fordel kontra ordinær sement i at de kan trenge inn i mindre sprekker i fjellet og kan blandes med høyere vann/sementforhold uten separasjon i massen.

<b>UTARBEIDET AV</b>	<b>SIGNATUR</b>
Kari Aarstad	

<b>KONTROLLERT AV</b>	<b>SIGNATUR</b>
Harald Justnes	

<b>GODKJENT AV</b>	<b>SIGNATUR</b>
Tor Arne Martius-Hammer	

<b>RAPPORTNR</b>	<b>ISBN</b>	<b>GRADERING</b>	<b>GRADERING DENNE SIDE</b>
SBF 2015 A0056	978-82-14-05811-6	Åpen	Åpen

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning</b> .....	<b>3</b>
1.1	Krav til injiseringsmasser.....	3
1.1.1	Vannutskillelse.....	3
1.1.2	Filterkakedannelse.....	3
<b>2</b>	<b>Sement</b> .....	<b>4</b>
2.1	Sementens kornstørrelse.....	4
2.2	Sementens bindetid og tidligfasthet.....	6
2.3	Effekt av pozzolaner i sementen.....	8
2.4	Oversikt over sementtyper .....	8
2.5	Vann-sementtall (v/c-tall).....	9
2.6	Reologi .....	10
2.7	Kjemiske tilsetningsstoffer.....	11
2.8	Økonomi og tidsforbruk.....	11
<b>3</b>	<b>Oppsummering</b> .....	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Referanseliste</b> .....	<b>12</b>

## BILAG/VEDLEGG

---

Vedlegg 1 Datablad for vanlige sementer på det norske markedet

---

## 1 Innledning

### 1.1 Krav til injiseringsmasser

Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk har oppsummert funksjonskravene til injiseringsmasser i tre hovedpunkter (Håndbok 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg, 2010):

Massen skal:

- være stabil
- flyte lett
- størkne raskt etter plassering i bergmassen

Sementen er av avgjørende betydning for resultatet, både under injisering og i etterkant.

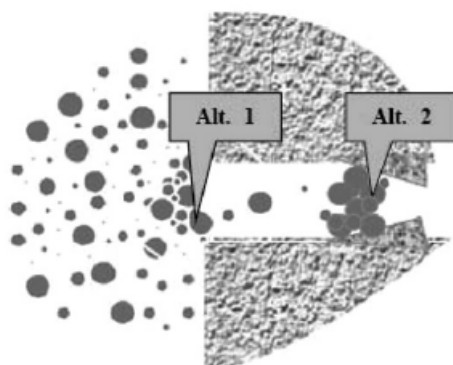
Det fokuseres ofte på to typer uønskede hendelser som kan oppstå under injisering som avhenger av injiseringsmassens egenskaper. Det er såkalt "bleeding" (dvs vannutskillelse forårsaket av separasjon), og det er filterkakedannelse. Disse hendelsene er i stor grad avhengig av sementen som benyttes i injiseringsmassen, og det er derfor gitt en kort forklaring til begrepene.

#### 1.1.1 Vannutskillelse

En stor grad av vannutskillelse i injiseringsmassen er problematisk. Det kan gi separasjon etter at massen er injisert i sprekkene. Sementen vil da synke til bunns i sprekkene, og det blir bare vatn på toppen. Dette gir vannførende kanaler som blir vanskelige å tette i etterkant (Håndbok nr. 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg, 2010). I NS-EN 12715 Utførelse av spesielle geotekniske arbeider- Injeksjon, defineres en suspensjon som stabil dersom den har mindre enn 5% vannutskillelse ved den gitte målemetoden. Det finnes leverandører som garanterer maksimalt 2% separasjon i sine produkter. Separasjon kan også motvirkes ved å tilsette litt tykningsmiddel

#### 1.1.2 Filterkakedannelse

Ustabil injiseringsmasse kan gi dannelse av filterkaker hvor sementkornene separerer fra massen og tetter igjen borehullene. Dette kan skje enten ved inngangen til borehullet, eller det kan skje ved innsnevninger lenger inn som illustrert i Figur 1.



**Figur 1** Illustrasjon av filterkakedannelse, enten ved inngangen til borehullet (Alt. 1) eller ved en innsnevring (Alt. 2). Eklund og Stille (2008).

I tillegg er sementens kornstørrelse avgjørende for injiseringsmassens evne til å trenge inn i små sprekker i fjellet, og i så måte er det viktig å unngå "overkorn" som blokkerer for de mindre kornene. Sementens bindetid er av praktisk betydning for brukstid og framdrift, og massens v/c-tall bestemmer fasthet på massen.

Hvordan sementen påvirker disse faktorene diskuteres nærmere i dette dokumentet.

## 2 Sement

Portlandsements sammensetning bestemmes ut i fra klinkerens mineralogiske sammensetning.

Portlandklinker har følgende mineralogiske sammensetning (Kurdowski, 2002). Fasene benevnes gjerne med forkortelser ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  og  $C_4AF$ ), hvor C står for CaO, S for  $SiO_2$ , A for  $Al_2O_3$  og F for  $Fe_2O_3$ :

$3CaO \cdot SiO_2$ ( $C_3S$ )	55-65%
$2CaO \cdot SiO_2$ ( $C_2S$ )	15-25%
$3CaO \cdot Al_2O_3$ ( $C_3A$ )	8-14%
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ ( $C_4AF$ )	8-12%

Mikrosementens egenskaper kan justeres ved å tilsette gips, tilsetningsstoff, pozzolaner eller ved tilpassing av sementfasen  $C_3A$ .

Fasen  $C_3S$  kontrollerer både tidligfasthet og bindetid.  $C_3A$  er den mest reaktive fasen, og påvirker derfor den tidlige hydratiseringa og reologien (Gartner et al. 2002). Sementen tilsettes 3-5% gips for at  $C_3A$  ikke skal reagere for fort.

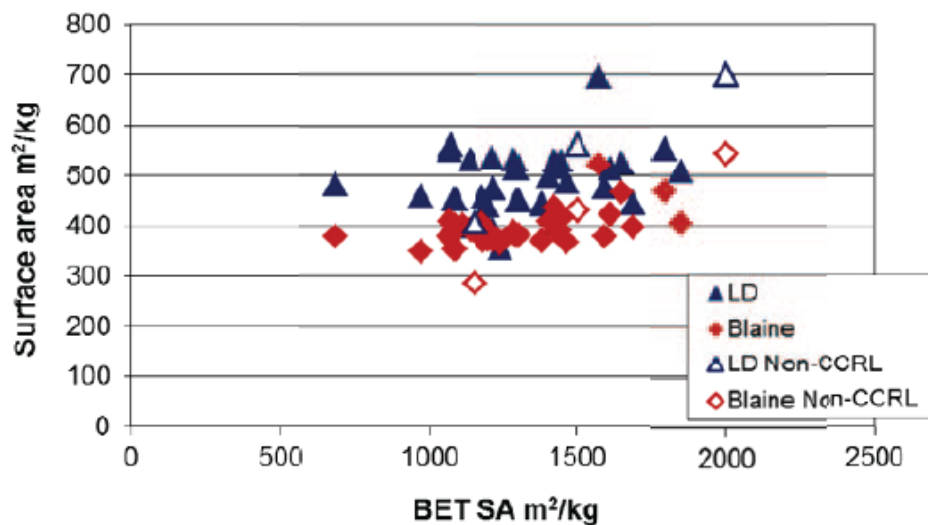
### 2.1 Sementens kornstørrelse

Forholdsvis finmalt, ordinær portlandsement kan benyttes til injisering. Injeksjonsement produseres ut fra samme klinker som ordinær sement, bortsett fra at den finmales. Det er vanlig å angi finhet med Blaine, som overflate per kg. En typisk norsk sement, som ikke er produsert spesielt for injisering, men som brukes til dette, er Norcem Industrisement.

Spesialsementer beregnet for injisering, er enda finere malt og klassifiseres som mikrosementer. Finhet angis også her ofte som Blaine, men det er også relativt vanlig å angi spesifikk overflate målt med nitrogenopptaksmetoden, BET. BET anses som en bedre metode til å beskrive spesifikk overflate for finmalte sementer enn Blaine. Ferrari og Garboczi (2013) viste at BET skiller finheten for ulike sementer mye bedre enn Blaine og at det ikke er noen god sammenheng mellom finhet målt med Blaine og BET, se Figur 2.

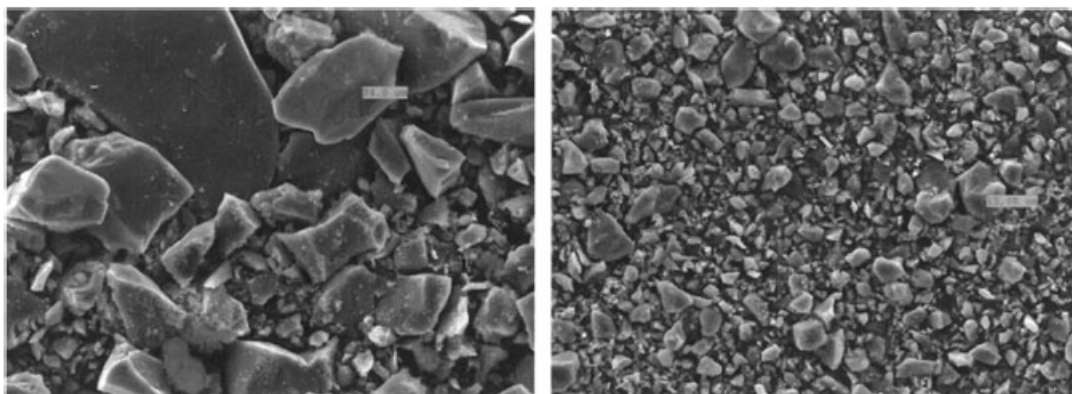
Med utgangspunkt i kornkurven for sementen, er det også vanlig å angi en partikkelstørrelse hvor 95% av sementkornene er mindre en den gitte verdien ( $D_{95}$ ).

Henn og Soule (2010) mener at en Blaine-verdi ikke er tilstrekkelig for å beskrive en mikrosement da den ikke sier noe om maksimal kornstørrelse. De mener derfor at en maksimal kornstørrelse bør oppgis i tillegg. Figur 3 viser et bilde av to typer injeksjonsement hvor Blaine er oppgitt til å være  $1200 \text{ m}^2/\text{kg}$  i begge tilfellene. Sementen til venstre har imidlertid en mye større maksimal kornstørrelse enn sementen til høyre, noe som blant annet påvirker evnen til å trenge inn i små sprekker. Korngraderingen for de to sementene er også svært ulik, da sementen til høyre åpenbart er mye mer ensgradert enn sementen til venstre (noe som også er ønskelig for injisering).



**Figur 2** Figuren viser manglende sammenheng mellom spesifikk overflate målt med Blaine (og laser-diffrasjon, LD) og BET (Ferrari og Garboczi 2013)

Siden selv enkelte "overkorn" kan blokkere inntrengning av mindre korn og danne en filterkake hvor bare vannet presses videre inn, kan det være fordelaktig med en smal kornstørrelsesfordeling og en liten  $D_{95}$ .



**Figur 3** Bildet viser to forskjellige injeksjonssementer som har lik angitt Blaine-verdi, men forskjellig maksimal kornstørrelse og kornfordelingskurve (Henn og Soule, 2010). Sementen til høyre er mye mer ensgradert enn sementen til venstre.

Statens vegvesen definerer mikrosement som en sement med  $D_{95} < 20 \mu\text{m}$ , og ultrafin sement med  $D_{95} < 10 \mu\text{m}$  (Håndbok R761, 2012). NS-EN 12715 angir også mikrosmement som et materiale hvor  $D_{95}$  er  $< 20 \mu\text{m}$ . Henn og Soule (2010) anbefaler at uttrykket "ultrafin" forbeholdes sementer med  $D_{95} < 10 \mu\text{m}$ , kombinert med Blaine på minimum  $900 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

Pantazopoulos et al. (2012) har utført en studie med nedmaling av tre forskjellige sementer til mikrosementer. Utgangspunktet var sementer som vist i Tabell 1.

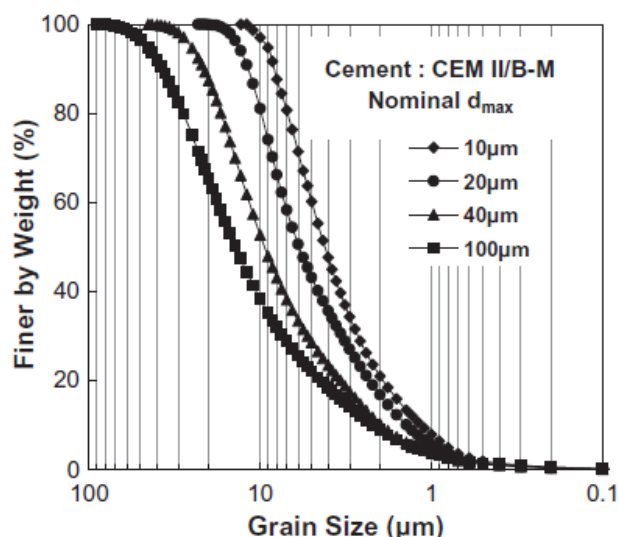
**Tabell 1 Sementtyper som Pantazopoulos et al. (2012) brukte i sitt arbeid**

CEM I	90 % klinker, 5% kalkstein, 5% gips
CEM II/B-M	63 % klinker, 8,5% kalkstein, 13,5% pozzolan, 10% flygeaske, 5% gips
CEM IV/B	58% klinker, 2% kalkstein, 20% pozzolan, 18% flygeaske, 2% gips

Sementene hadde i utgangspunktet en maksimal kornstørrelse ( $D_{max}$ ) på 100  $\mu\text{m}$ , som så ble malt ned til tre typer med  $D_{max}$  på henholdsvis 40, 20 og 10  $\mu\text{m}$ . Kornfordelingskurvene for ulike malingsgrader for CEM II/B-M er vist i Figur 4.

Nedmaling hadde en positiv effekt på vannutskillelse. Målingene viste at tendensen til vannutskillelse avhenger i stor grad av kornstørrelse, og i liten grad sammensetning av sementen. Hvis man maler klinker ned til høyere finhet mens gipsmengden er konstant, så kan størkningstiden avta.

En finere sement vil som sagt trenge lettere inn i små sprekker i fjellet. En tommelfingerregel er at maksimal kornstørrelse må være maksimum 1/3 av sprekken den skal fylle (Hognestad, 2014).



**Figur 4 Kornfordelingskurver for ulike nedmalingsgrader (maks kornstørrelse 10-100  $\mu\text{m}$ ) for CEM II/B-M (Panatazopouls et al, 2012).**

## 2.2 Sementens bindetid og tidligfasthet

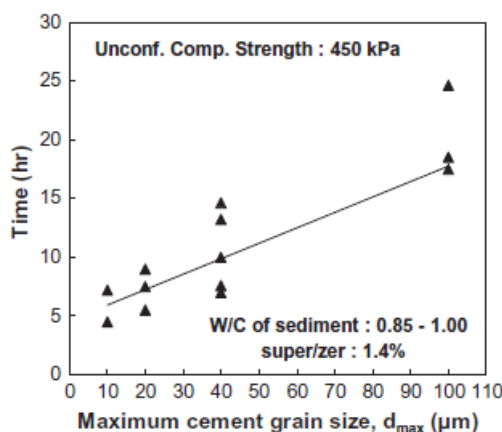
Bindetider oppgis av produsenten, men det varierer litt hvilke verdier som blir oppgitt. Noen oppgir avbindingens start og slutt, mens andre oppgir bare bindetid (start avbinding). For de produktene som finnes på det norske markedet som vi har studert, se Tabell 2, så ligger bindetid stort sett rundt to timer.

Med en vanlig Portlandsement kan det gå 6-8 timer etter injisering før entreprenøren kan fortsette videre arbeid i fjellet. Det finnes imidlertid raskt herdnende sementer hvor egenskapene kontrolleres med gipstilsetning, kornstørrelse og kjemisk sammensetning ( $C_3A$ ) hvor man kan gå videre etter to timer.

De fineste injiseringssementene fra Norcem, Ultrafin 12 og Ultrafin 16, har bindetider på henholdsvis 30 og 70 minutter. Ett produkt som ikke er nevnt i Tabell 2, er Mapeis Cemsil. Dette produktet leveres med en separat akselerator som skal tilsettes under blanding, og som gir en bindetid på mellom fem og ti minutter.

Finmalte sementer kan imidlertid bli for raske i varmt klima (stor overflate som kan reagere). Dette kan kontrolleres ved å tilsette gips på slutten av produksjonen av sementen, eller massen kan tilsettes retarder under blandedprosessen som forsinker hydratiseringsprosessen og dermed gir forlenget brukstid.

Økende finhet i sementen, fører til at sementen oppnår ønsket tidligfasthet raskere da mer finmalte sementer gjør at kornene kommer tettere sammen slik at det skal mindre hydratiseringsgrad til for de binder seg sammen. I Figur 5 er det angitt hvor lang tid det tar å oppnå en gitt tidligfasthet som funksjon av sementens kornstørrelse (Pantazopoulos et al, 2012). Dette er i overensstemmelse med en rekke andre publikasjoner som Pantazopoulos et al (2012) refererer til, og effekten tilskrives en større grad og mer effektiv hydratisering. I tillegg kan kortere avstand mellom kornene gi økt trykkfasthet.



**Figur 5** Grafen viser hvor lang tid det tar å oppnå 450 kPa enaksiell trykkfasthet (tidligfasthet) som funksjon av sementens kornstørrelse (Panatazopoulos et al, 2012).

Når pakket sand injiseres med de samme typer sementer som referert til av Pantazopoulos et al (2012), utpeker CEM I seg som den sementen som gir best enaksiell trykkfasthet etter 28 døgn (Markou og Droudakis, 2013). Denne sementen ansees som gunstig fordi den består av nesten 100% klinker, og ingen innblanding av pozzolaner.

Mirza et al. (2013) foretok blant annet fasthetsmålinger hvor mikrosemter ble sammenliknet med ordinære sementer. Målingene gjaldt ikke tidligfasthet, men trykkfasthet etter 28 døgn. De registrerte at den ordinære sementen, med det minste innholdet av  $C_3S$  kom dårligst ut på trykkfasthetsmålingene.



## 2.3 Effekt av pozzolaner i sementen

Både på grunn av økonomi- og miljøhensyn, er det i dag vanlig å erstatte deler av klinkeren med andre materialer som slagg, mikrosilika, flygeaske osv. Effekten av disse materialene er lik enten det er i betong eller i injiseringsmasse, men avhenger i stor grad av mengde.

Tilsats av **slag** i sementen, gir økt bindetid, langsommere hydratisering og seinere fasthetsutvikling (Lang, 2002).

Innblanding av **flygeaske** reduserer sementens tendens til vannutskillelse og gir også økt bindetid (Luke, 2002).

**Mikrosilika** i sement gir økt kohesjon og redusert vannutskillelse, samtidig som det gir økt styrke (Justnes, 2002).

Pantazopoulos et al (2012) fant i sin studie at sementen med størst innhold av pozzolaner, også var sementen med lengste begynnende og avsluttet bindetid.

## 2.4 Oversikt over sementtyper

Det finnes flere leverandører av injiseringssementer bare i Norge, og en oversikt over tilfeldig utvalgte produkter er gitt i Tabell 2.

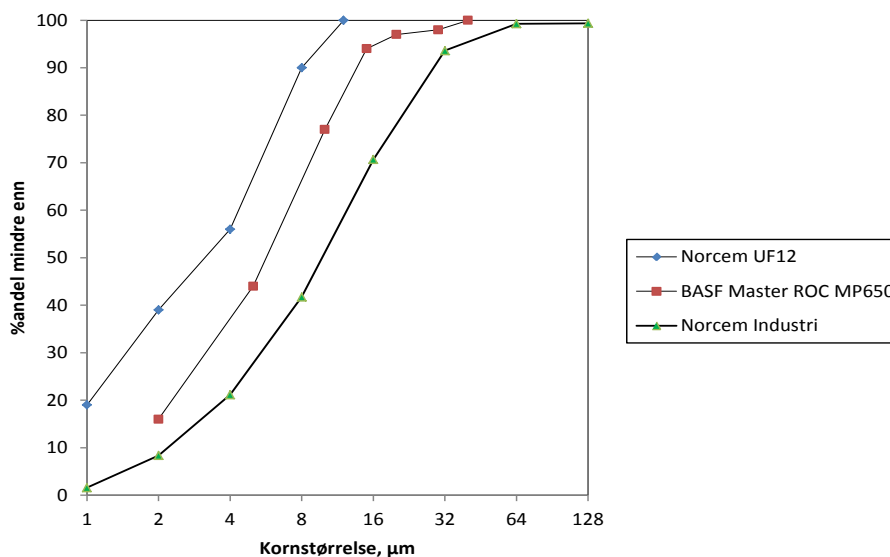
**Tabell 2 Oversikt over forskjellige injiseringssementer som selges i Norge. Finhet måles og angis med forskjellige metoder (Tekniske datablad fra Norcem, Mapei og BASF, se vedlegg 1).**

	Finhet, Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	Spesifikk overflate målt med BET (m <sup>2</sup> /kg)	D95 (95% av korn mindre enn gitt verdi)	Bindetid (min.)
<b>OPC</b>				
Industri (Norcem)	550		40 µm*	100
<b>Mikrosementer</b>				
Injisering 30 (Cementa)		1300	30 µm	100
Microfine 20 (Norcem)	750	2550	20 µm	165
Ultrafin 12 (Norcem)		2200	12 µm	30
Ultrafin 16 (Norcem)		1600	16 µm	70
Mikrofin 20 (Mapei)		2650	20 µm	135
MasterRoc MP 650 (BASF)	650		20 µm	60-150
MasterRoc MP 850 (BASF)	800		15 µm	60-150

\* ref. Håndbok nr. 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg

Grovmalte sementer er ikke nevnt her da de kun er egnet til injisering av store sprekker (Håndbok 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg, 2010).

I Figur 6 er kornfordelingskurven for tre av sementene i Tabell 2 plottet. Her vises det at Norcem Industri er grovmalt sammenliknet med de to andre sementene.



**Figur 6 Kornfordelingskurve for tre sementer som brukes til injisering i Norge.**

Norcem og BASF sine injeksjonssementer er oppgitt at de er rene Portlandsementer, type CEM I, uten tilsats av andre materialer.

Det finnes imidlertid også injeksjonssementer som inneholder større eller mindre andeler tilsetningsmaterialer som kalkstein, flygeaske, slagg, pimpstein etc. Felles for disse tilsetningsmaterialene, er at en stor andel i sementen vil redusere hydratiseringshastigheten, ref. avsnitt 2.3. I USA rapporteres ultrafine sementer til å ha et innhold på bare 20-35 % Portlandklinker (Henn, Soule, 2010).

## 2.5 Vann-sementtall (v/c-tall)

For å få en stabil injiseringsmasse, er det avgjørende å ha et riktig v/c-tall. Et høgt v/c-tall gir gode flyteegenskaper og god inntregningsevne, men det gir samtidig dårligere kvalitet på herdet masse, lengre herdetid, redusert tetteeffekt, høgt masseforbruk og fare for hydraulisk splitting/jekking (Klüver og Kveen, 2004).

Superplastiserende tilsetningsstoffer gjør det mulig å produsere injiseringsmasse med lågere v/c-tall, samtidig som de gode flyteegenskapene opprettholdes.

Mirza et al. (2013) sammenlignet stabilitet på to vanlige, amerikanske Portlandsementer med Blaine på henholdsvis 371 og 515 m<sup>2</sup>/kg med mikrosementer fra Europa og Japan med maksimal kornstørrelse fra 12-40 µm. Målingene viste at injiseringsmasser med de to ordinære sementene, blir ustabile med v/c-tall over henholdsvis 0,6 og 0,8 (det vil si mer enn 5% vannutskillelse etter 120 minutter). Mikrosementene var stabile til minst et v/c-tall på 1,2.

Vanlig praksis i Norge når man bruker mikrosementer, er å legge v/c-tallet mellom 0,8 og 0,9. Når v/c-tallet passerer cirka 1, kan massen bli for treg (for lang avbindingstid).

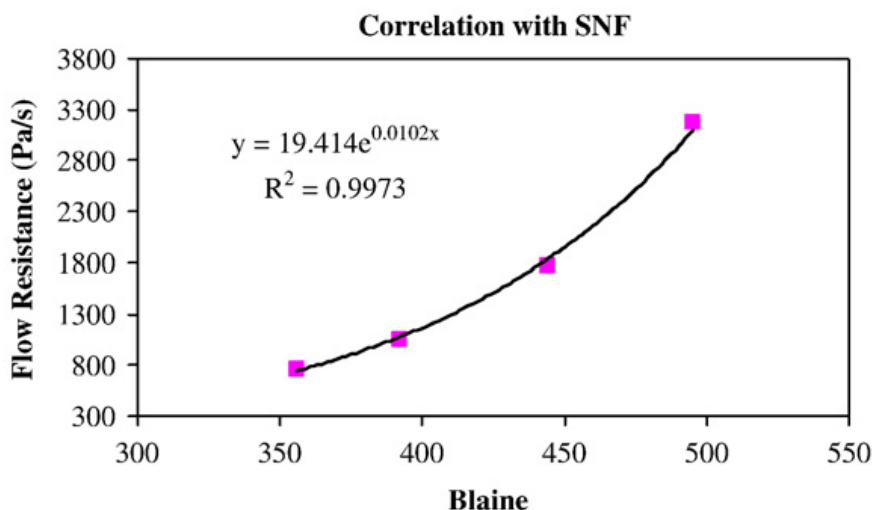
Det er verdt å merke seg at avbindingstid fra produsentens side ofte er målt ved 20°C, mens det i berget i norske tunneler ofte er 8°C. Lavere temperatur vil utsette avbinding og sinke fasthetsutviklingen.

## 2.6 Reologi

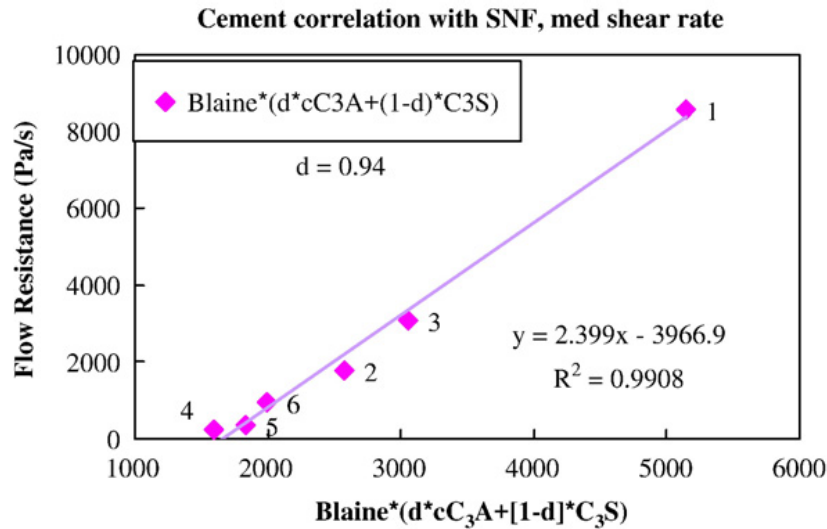
I følge Schwarz og Krizek (2000), er viskositet og flyteskjærspenning i tillegg til kornstørrelse, de egenskapene som påvirker penetrasjonsevnen til injiseringsmasser. Disse egenskapene påvirkes igjen av hydratisering og den kjemiske reaksjonen som skjer når sementen kommer i kontakt med vann. Schwarz og Krizek har derfor dokumentert mikrosegment med stor spesifikk overflate de første timene etter at sementen har kommet i kontakt med vann. De viste at det skjer store endringer i injiseringsmassen i løpet av de første 60 minuttene, og det ble registrert en økning i viskositet og flyteskjærspenning på opp til 300 % før avbinding. Denne effekten kan motvirkes ved bruk av et dispergerende middel eller et retarderende tilsetningsstoff (superplastiserende).

Nedmaling av ordinær sement til microsegment var negativt for den tilsynelatende viskositet, med en gjennomsnittlig økning på 500 % i Pantazopoulos et al. sin studie fra 2012. Mirza et al. (2013) fant at en injiseringsmasses viskositet er direkte proporsjonal med sementens finhet. Denne negative endringen i egenskap tilskrives økningen i reaktivt overflateareal som følge av nedmaling, og dermed raskere hydratisering. Effekten kan imidlertid oppheves ved bruk av superplastiserende tilsetningsstoffer (polykarboksylater).

Vikan et al (2007) viste at det er en eksponentiell korrelasjon mellom flytmotstand og sementens finhet når klinkeren er den samme (se Figur 7), men ikke når klinkerens sammensetning varierer. De fant midlertid en god sammenheng mellom flytmotstand og spesifikk overflate (Blaine) multiplisert med en vektet sum av mengde C<sub>3</sub>S og C<sub>3</sub>A (se Figur 8). Dette representerer hvor mye av de to mest reaktive klinkermineralene som er på overflaten av kornet og dermed vil gi mest groing av hydratasjonsprodukter på overflaten av sementkornene i fersk tilstand.



**Figur 7 Sammenheng mellom flytmotstand og finhet (Blaine) av sement med samme klinkersammensetning. Sementpastaen er plastifisert med en fast mengde naftalen-basert flytmiddel (SNF), Vikan et al (2007)**



**Figur 8 Sammenheng mellom flytmostand og en vektet sum av spesifikk overflate (Blaine) multiplisert med en vektet sum av mengde C<sub>3</sub>S og C<sub>3</sub>A for 6 sementer med ulike klinkersammensetning. Sementpastaen er plastifisert med en fast mengde naftalen-basert flytmiddel (SNF), Vikan et al (2007)**

## 2.7 Kjemiske tilsetningsstoffer

Bruk av superplastiserende tilsetningsstoff i injeksjonsmassen er gunstig fordi det dispergerer sementkornene i massen, og dermed gir massen bedre flyteegenskaper. Dispergeringen oppnås enten ved elektrostatisk repulsjon ved at kornene får lik ladning (eks naftalen) eller ved sterisk hindring (eks. polykarboksylater) når de plastiserende stoffene adsorberes på kornene. Både dagens polykarboksylater eller en blanding av melamin og naftalen kan benyttes. Anagnostopoulos (2014) registrerte imidlertid en antydning til større tendens til vannseparasjon (bleeding) i injiseringsmasser produsert med polykarboksylater enn om det er benyttet naftalener. Begge variantene holdt seg imidlertid godt innenfor akseptable verdier for vannutskillelse. Målingene er gjort på injiseringsmasser ved lågt v/c-tall, fra 0,33-0,5.

I tillegg til stoffene som påvirker injiseringsmassens konsistens, finnes det også kjemiske tilsetningsstoffer som utsetter den kjemiske reaksjonen i sementen (retarder), som framskynder størkning (størkningsakselerator) og herding (herdeakselerator) og som kan stabilisere massen (stabilisator).

## 2.8 Økonomi og tidsforbruk

Mikrosement er 5-15 ganger dyrere enn ordinær Portland-sement (Henn og Davenport, 2005, Lindstrøm, 2002). Henn og Davenport (2005) hevder at på tross av dette, har flere prosjekter oppnådd besparelser ved å bruke mikrosementer. En grunn til dette er at betydelig høyere v/c-kan benyttes med mikrosementer, og dermed oppnås en reduksjon i det totale sementforbruket. Samtidig er det rapportert kortere tid brukt på injisering samt forbedret og mer effektiv injisering.

Lindstrøm (2002) konkluderer imidlertid med det motsatte i prosjektet T-baneringen i Oslo: De registrerte bare en ubetydelig bedre tetting med mikrosement enn med Industrisement, samt at bruk av Industrisement både var tids- og pengebesparende.

### 3 Oppsummering

Sementer til injisering beskrives gjerne med finhet målt med Blaine-metoden. Blaine-metoden er beregnet på måling av finhet for "vanlige" portlandsementer med densitet  $\approx 3,15 \text{ g/cm}^3$ , og metoden er ikke så godt egnet for sementer som avviker vesentlig fra "vanlig" portlandsement i densitet og/eller finhet. Mange injeksjonssementer er vesentlig finere enn "vanlige" portlandsementer, og er derfor ikke så godt egnet for bestemmelse av finhet med Blaine-metoden. ASTM gir føringer for hvordan dette *kan* håndteres, men da innføres en operatørvhengig, subjektiv vurdering og metoden gir da ikke lengre nødvendigvis sammenlignbare resultater. For karakterisering av sementer til injisering bør det benyttes metoder som gir sammenlignbare resultater, eksempelvis nitrogenopptaksmetoden BET for å beskrive spesifikk overflate, gjerne kombinert med kornfordelingskurve og maksimum kornstørrelse (eller  $D_{95}$ ).

Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk har oppsummert funksjonskravene til injiseringsmasser i tre hovedpunkter (Håndbok 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg, 2010). Massen skal:

- være stabil
- flyte lett
- størkne raskt etter plassering i bergmassen

Sementen er av avgjørende betydning for resultatet, både under injisering og i etterkant. Det fokuseres ofte på to typer uønskede hendelser som kan oppstå under injisering som avhenger av injiseringsmassens egenskaper. Det er såkalt bleeding (vannseparasjon) og filterkakedannelse. Disse hendelsene er i stor grad avhengig av sementen som benyttes i injiseringsmassen. Finmalte sementer har mindre vannseparasjon enn mer grovmalte sementer. Samtidig vil mindre maksimal kornstørrelse tillate injisering i mindre riss enn grovere sementer. Finmalingsgrad (spesifikk overflate) og maksimal kornstørrelse ( $D_{95}$ ) ser ut til å være langt viktigere enn sementens kjemiske sammensetning.

I tillegg til vannseparasjon og filterkakedannelse er avbindingstid og fasthetsutvikling avgjørende egenskaper, særlig for framdrifta på anlegget. Fasthetsutviklingen styres primært av hvilket vann/sementforhold som benyttes. Ofte benyttes vann/sementforhold på opp mot 1 uten at massen blir ustabil (for mikrosementer), og dette medfører sein fasthetsutvikling og lav slutfasthet. Dette kan forholdsvis enkelt justeres ved bruk av tilsetningsstoffer. Avbindingstida kan også være kritisk for arbeidets framdrift. Denne kan også til en viss grad styres ved bruk av tilsetningsstoffer.

Injiseringsmassens egenskaper kan altså i stor grad tilpasses situasjonens behov ved riktig bruk av sement, tilsetningsstoff og v/c-tall. Det er i hovedsak to typer sementer som benyttes til injisering. Noen bruker finmalt ordinær portlandsement (i Norge benyttes Norcem Industrisement), mens andre bruker såkalte mikrosementer (svært finmalte spesialsementer). Mikrosementer har en åpenbar fordel kontra ordinær sement i at de kan trenge inn i mindre sprekker i fjellet og kan blandes med høyere vann/sementforhold uten separasjon i massen. Mikrosementene er derimot svært mye dyrere enn ordinære finmalte sementer, og det er ulike erfaringer med om prisforskjellen kan godtgjøres med bedre injiseringsresultater.

### 4 Referanseliste

Anagnostopoulos, C. A. (2014) Effect of Different Superplasticisers on the Physical and Mechanical Properties of Cement Grouts. Construction and Building Materials

Eklund, D. Stille H. (2008) Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts. Tunnelling and Underground Space Technology 23, pp. 389-398

Gartner, E.M. et al Hydration of Portland cement. I Bensted, J. og Barnes, P.(2002) Structure and Performance of Cements, 2002 (2. utgave)

Henn, R., Davenport, R. (2005) Ultrafine cement: a critical component of a grouting program. Tunnels & tunneling international 37 (4) pp. 27-29

Henn, R. og Soule, N. C. (2010) Ultrafine Cement in Pressure Grouting. Chapter 2: Definition of Ultrafine Cements

Hognestad, H.O. Muligheter/begrensninger-ulike materialer (2014) [http://www.vegvesen.no/attachment/389262/binary/666901?fast\\_title=Forinjeksjon+i+tunnel%3A+Kontroll+og+oppf%C3%B8lgning.pdf](http://www.vegvesen.no/attachment/389262/binary/666901?fast_title=Forinjeksjon+i+tunnel%3A+Kontroll+og+oppf%C3%B8lgning.pdf)

Håkansson, U. (1993) Rheology of Fresh Cement-Based Grouts. Doctoral Thesis KTH

Justnes, H. Condensed silica fume as a cement extender I Bensted, J. og Barnes, P.(2002) Structure and Performance of Cements, (2. utgave)

Klüver, B. H. og Kveen, A. (2004) Berginjeksjon i praksis Publikasjon nr. 104 Statens vegvesen

Kurdowski, W. Cement Manufacture. I Bensted, J. og Barnes, P.(2002) Structure and Performance of Cements, 2002 (2. utgave)

Lang, E. Blastfurnace cements. I Bensted, J. og Barnes, P.(2002) Structure and Performance of Cements, (2. utgave)

Lindstrøm, M. (2002) Statens Vegvesen rapport nr. 16. Sluttrapport for injeksjonsarbeidene ved T-baneringen

Luke, K. Pulverized fuel ash as a cement extender. I Bensted, J. og Barnes, P.(2002) Structure and Performance of Cements (2. utgave)

Markou, I.N, Droudakis, A.I. (2013) Factors affecting engineering properties of microfine cement grouted sands. Geotech Geol Eng 321, pp. 1041-1058

Mirza, J. et al (2013) Properties of microfine cement grouts at 4°C, 10°C and 20°C. Construction and Building Materials 47, pp. 1145-1153

Norsk Forening for fjellsprenningsteknikk (2010) Håndbok nr. 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg

NS-EN 12715 Utførelse av spesielle geotekniske arbeider- Injeksjon

Pantazopoulos, I.A. et al (2012) Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements. Cement & Concrete Composites 34, pp. 593-603

Schwarz, L. G. og Krizek, R. J. (2000) Evolving Morphology of Early Age Microfine Cement Grout. Advances in Grouting and Ground Modification: pp. 181-199

Statens vegvesen (2012) Håndbok R761 Prosesskode 1-Standard beskrivelse for vegkontrakter

Teknisk datablad BASF MP 650 (2014) <http://www.master-builders-solutions.basf.no/nn-no/products/masterroc/injeksjoner/288?Product=MasterRocMP650>

Teknisk datablad BASF MP 850 (2014) [http://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Norwegian,%20Nynorsk%20\(Norway\)/basf-masterroc-mp800-db.pdf](http://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Norwegian,%20Nynorsk%20(Norway)/basf-masterroc-mp800-db.pdf)

Teknisk datablad Mapei Mikrofin 20 (2014) <http://www.mapei.com/NO-NO/products-search-results.asp>

Teknisk datablad Norcem Industri (2014) <http://www.norcem.no/no/node/4937>

Teknisk datablad Norcem injisering (2014) <http://www.norcem.no/no/node/4943>

Teknisk datablad Norcem Mikrofin 20 (2014) <http://www.norcem.no/no/node/4943>

Teknisk datablad Norcem Ultrafin 12&16 (2014) <http://www.norcem.no/no/node/4943>

H. Vikan, H. Justnes, F. Winnefeld and R. Figi (2007); "Correlations of cement characteristics with rheology of paste", Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 1502-1511

Ferraris, C. og Garboczi, E. (2013) Measuring cement particle size and surface area by laser diffraction. Research Results Digest 382, National cooperative highway research program.

# **Vedlegg 1**

## **Datablad for vanlige sementer på det norske markedet**





Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)