

**NORMIN 2000**  
**HOVEDPROSJEKTRAPPORT**

# **ALKALIREAKSJONER I BETONG**

**MARS 1999**



## Innholdsfortegnelse

<b>SAMMENDRAG .....</b>	<b>5</b>
VIDEREUTVIKLING AV PETROGRAFISK METODE .....	5
AKSELERERT MØRTELPRISME METODE .....	6
CANADISK BETONGPRISMEMETODE - SANDSTEINSPROBLEMATIKK .....	6
SAMMENSTILLING AV FELTERFARINGER .....	7
REVISJON AV GRENSEKRITERIENE .....	8
<b>0. INNLEDNING .....</b>	<b>9</b>
BAKGRUNN .....	9
<i>Status og aktualitet</i> .....	9
<i>Mål</i> .....	10
<i>Gjennomføring</i> .....	11
<i>Begrensninger</i> .....	12
<b>1. DELPROSJEKT A - VIDEREUTVIKLING AV PETROGRAFISK METODE .....</b>	<b>13</b>
1.1 METODENS USIKKERHETER - RINGPRØVNING - SAMKJØRING MELLOM LABORATORIER .....	13
1.1.1 <i>Bakgrunn</i> .....	13
1.1.2 <i>Prøver og utførelse</i> .....	13
1.1.3 <i>Resultater</i> .....	14
1.1.4 <i>Diskusjoner</i> .....	17
1.1.4.1 <i>Generelt</i> .....	17
1.1.4.2 <i>Felles gjennomgang - Arbeidsdiskusjon vedrørende de spesifikke resultatene</i> .....	20
1.1.5 <i>Statistiske vurderinger</i> .....	21
1.1.5.1 <i>Generelt</i> .....	21
1.1.5.2 <i>Ringprøvningen</i> .....	21
1.1.5.3 <i>Konklusjoner etter statistisk analyse</i> .....	21
1.1.6 <i>Forslag til revidert bergartsliste for petrografisk analyse - trinn 1</i> .....	22
1.1.6.1 <i>Generelle kommentarer og forklaringer vedrørende forslag til ny bergartsliste</i> .....	24
1.1.6.2 <i>Kommentarer vedrørende de ulike bergartsgruppene</i> .....	25
1.1.7 <i>Konklusjon vedrørende ringprøvning</i> .....	28
1.2 BILDEATLAS .....	29
1.2.1 <i>Bakgrunn</i> .....	29
1.2.2 <i>Utførelse</i> .....	29
1.2.3 <i>Resultater</i> .....	29
1.3 NY KVANTITATIV METODE .....	30
1.3.1 <i>Bakgrunn</i> .....	30
1.3.2 <i>Prøver og utførelse</i> .....	30
1.3.2.1 <i>Reproduserbarhet</i> .....	31
1.3.2.2 <i>Analyser av nye bergarter</i> .....	31
1.3.3 <i>Resultater</i> .....	31
1.3.3.1 <i>Reproduserbarhet</i> .....	31
1.3.3.2 <i>Analyser av nye bergarter</i> .....	32
1.3.4 <i>Diskusjoner</i> .....	34
1.3.4.1 <i>Innverknad av glimmer på alkalireaktivitet</i> .....	36
1.3.4.2 <i>Forslag til videre undersøkelser</i> .....	39
1.3.5 <i>Konklusjon vedrørende ny kvantitativ metode</i> .....	42
1.4 NGUS FRAMTIDIGE PLANER VEDRØRENDE REGISTRERING AV PETROGRAFISKE ANALYSEDATA .....	43
1.4.1 <i>Grus- og Pukkregisteret</i> .....	43
1.4.2 <i>Petrografiske analysedata</i> .....	43

<b>2. DELPROSJEKT B - AKSELERERT MØRTELPRISME METODE.....</b>	<b>45</b>
2.1 MODIFISERING AV PROSEDYRE .....	45
2.1.1 <i>Bakgrunn</i> .....	45
2.1.2 <i>Utførelse</i> .....	45
2.1.3 <i>Resultater</i> .....	46
2.1.3.1 <i>Anbefalt tilleggsbeskrivelser til SINTEF rapport STF70 A93030</i> .....	46
2.1.4 <i>Diskusjoner</i> .....	50
2.1.5 <i>Konklusjon</i> .....	50
2.2 RINGPRØVING.....	51
2.2.1 <i>Bakgrunn</i> .....	51
2.2.2 <i>Prøvningsomfang og utførelse</i> .....	51
2.2.3 <i>Resultater fra ringprøvning av 7 naturlige tilslagstyper</i> .....	54
2.2.4 <i>Statistisk vurdering av resultater fra ringprøvingen</i> .....	60
2.2.5 <i>Diskusjoner</i> .....	65
2.2.6 <i>Konklusjon</i> .....	67
2.3 UTVIDET RESULTATGRUNNLAG - NATURLIG TILSLAGSMATERIALE .....	69
2.3.1 <i>Bakgrunn</i> .....	69
2.3.2 <i>Prøvningsutførelse</i> .....	69
2.3.2.1 <i>Utstøpning</i> .....	69
2.3.2.2 <i>Konsistens</i> .....	70
2.3.2.3 <i>Lagring</i> .....	70
2.3.3 <i>Resultater</i> .....	70
2.3.4 <i>Diskusjoner</i> .....	71
2.3.5 <i>Konklusjon</i> .....	72
2.4 UTVIDET RESULTATGRUNNLAG - BLANDET TILSLAGSMATERIALE.....	77
2.4.1 <i>Bakgrunn</i> .....	77
2.4.2 <i>Prøvebehandling</i> .....	77
2.4.2.1 <i>Utstøpning</i> .....	77
2.4.2.2 <i>Konsistens</i> .....	77
2.4.2.3 <i>Lagring</i> .....	78
2.4.3 <i>Resultater</i> .....	78
2.4.4 <i>Diskusjoner</i> .....	79
2.4.5 <i>Konklusjon</i> .....	80
2.5 SAMMENHENG MELLOM RESULTATER OPPNÅDD VED PETROGRAFISK ANALYSE OG AKSELERERT MØRTELPRISMEMETODE .....	83
2.5.1 <i>Bakgrunn</i> .....	83
2.5.2 <i>Prøvningsomfang og utførelse</i> .....	84
2.5.3 <i>Resultater</i> .....	85
2.5.4 <i>Diskusjoner</i> .....	89
2.5.5 <i>Konklusjon</i> .....	91
2.6 CANADISK BETONGPRISMEMETODE.....	93
2.6.1 <i>Bakgrunn</i> .....	93
2.6.2 <i>Prøvningsutførelse</i> .....	93
2.6.3 <i>Resultater</i> .....	94
2.6.4 <i>Diskusjon</i> .....	95
2.6.5 <i>Oppsummering</i> .....	96

2.7 - EFFEKTER AV SILIKASTØV I DEN AKSELERERTE MØTELPRISMETESTEN .....	97
2.7.1 Innledning .....	97
2.7.2 Målsetning.....	97
2.7.3 Generelt om mørtelprismemetoden .....	98
2.7.3.1 Kort beskrivelse av metoden.....	98
2.7.3.2 Metodens bruksbegrensning mht. dokumentasjon p.t.....	98
2.7.3.3 Nedbrytningsforløp.....	99
2.7.4 Diskusjon av ulike fenomener.....	99
2.7.4.1 Mulig pessimumsforhold og avvikende alkalimengde ; Innledende diskusjon.....	99
2.7.4.2 Pozzolanenes virkning .....	101
2.7.4.3 Induksjonsperiode og alkalidiffusjon.....	102
2.7.4.4 Pozzolaners virkning på alkaliinnhold.....	104
2.7.5 Forslag til eksperimentelt arbeid .....	108
2.7.6 Vedtatt eksperimentelt arbeid.....	109
2.7.7 Konklusjoner.....	111
<b>3. DELPROSJEKT C - FELTERFARINGER.....</b>	<b>113</b>
3.1 INNLEDNING .....	113
3.1.1 Mål.....	113
3.1.2 Bakgrunn – opprinnelig arbeidsplan.....	113
3.1.3 Revidert arbeidsplan .....	114
3.2 INNLEDENDE VURDERING AV KVANTITATIVE LABORATORIEUNDERSØKELSER I PLAN- OG TYNNSLIP FOR Å BESTEMME ANDEL RISIKOBERGARTER I BETONGEN .....	114
3.3 INNHENTING AV ERFARINGSDATA FRA FELT .....	115
3.3.1 Innhenting av erfaringsdata fra ”senior betongteknologer” .....	115
3.3.1.1 Generelt .....	115
3.3.1.2 Mottatte opplysninger .....	116
3.3.1.3 Sammenstilling av opplysningene .....	117
3.3.2 Innhenting av erfaringsdata fra 4 laboratorier.....	118
3.3.2.1 Generelt .....	118
3.3.2.2 Mottatte opplysninger .....	118
3.3.2.3 Sammenstilling av opplysningene .....	118
3.3.3 Diskusjon.....	120
3.3.4 Konklusjon .....	122
3.4 FORSLAG TIL VIDERE UNDERSØKELSER .....	122
<b>4. DISKUSJON .....</b>	<b>125</b>
4.1 PETROGRAFISK METODE .....	125
4.1.1 Pålitelighet.....	125
4.1.2 Metodens evne til å gi et klart svar .....	126
4.2 AKSELERERT MØTELPRISME METODE - PÅLITELIGHET .....	127
4.3 SAMMENHENGER MELLOM GRENSEKRITERIENE.....	127
4.4 GRENSEVERDIER - FELTERFARINGER .....	128
4.5 CANADISK BETONGPRISMEMETODE - SANDSTEINSPROBLEMATIKK .....	128
<b>5. KONKLUSJON .....</b>	<b>129</b>
5.1 PETROGRAFISK ANALYSE.....	129
5.2 AKSELERERT MØTELPRISMEMETODE .....	129
5.3 FELTERFARINGER - OG EVENTUELL REVISJON AV GRENSEKRITERIENE.....	130
5.4 CANADISK BETONGPRISMEMETODE - SANDSTEINSPROBLEMATIKK.....	130

<b>6. REFERANSER .....</b>	<b>131</b>
<b>7. VEDLEGG .....</b>	<b>135</b>
Vedlegg 1.1.1 Liste over bergartsgrupperinger som ble benyttet som grunnlag ved petrografisk ringanalyse. ....	135
Vedlegg 1.1.2 Resultat fra ringprøving - Total oversikt over alle resultater med fordelinger i de 12 ulike bergartsgrupperinger.....	136
Vedlegg 1.1.3 Resultater fra ringprøving - statistisk oversikt .....	138
Vedlegg 2.2.1 Prøvningsrapport fra Norcem - sement til ringforsøk.....	139
Vedlegg 2.2.2 Prøvningsrapport fra Norcem - sement til ringforsøk.....	140
Vedlegg 2.2.3 Samlefigurer med vektøkning for hver blanding prøvd ved ulike laboratorier .....	142
Vedlegg 2.2.4 Flytmål .....	143
Vedlegg 2.3.1 Prøvningsrapport fra SINTEF - petrografisk analyse av sand.....	144
Vedlegg 2.5.1 Sammenstilling av resultater for sandtilslag med andel risikobergarter i området 0-60 %, inklusive 2. grads regresjonslinje for hvert laboratorium. ....	150
Vedlegg 2.5.2 Sammenstilling av resultater for steintilslag med andel risikobergarter i området 0-60 %, inklusive 2. grads regresjonslinje for hvert laboratorium. ....	151
Vedlegg 2.5.3 Sammenstilling av alle resultatene .....	152
Vedlegg 2.6.1 Prøvningsrapport fra SINTEF - Petrografisk analyse av stein .....	153
Vedlegg 2.6.2 Prøvningsrapport fra SINTEF - Undersøkelse av knust sandstein fra Lillehammer og Finnmark - Bestemmelse av alkalireaktivitet etter akselerert mørtelprismemetode .....	155
Vedlegg 2.6.3 Prøvningsrapport fra SINTEF - Undersøkelse av knust sandstein fra Lillehammer og Finnmark - Bestemmelse av alkalireaktivitet etter akselerert betongprismemetode.....	158
Vedlegg 3.3.1 Standard innrapporteringsskjema for innhenting av erfaringsdata fra senior betongteknologer .....	163
Vedlegg 3.3.2 Standard innrapporteringsskjema for innhenting av erfaringsdata fra laboratorier .....	164
Vedlegg 3.3.3 Erfaringsrecepter .....	166

## SAMMENDRAG

### Videreutvikling av petrografisk metode

Gjennom ringprøvning mellom 6 uavhengige operatører er det registrert at dagens kvalitative petrografiske metode til dels gir store variasjoner i vurdering av andel risikobergarter i et tilslagsmateriale. Dette skyldes i første rekke manglende samkjøring, og forskjellig oppfatninger av hvordan ulike bergarter skal tolkes og klassifiseres mht alkalireaktivitet. Kun 2 av de 6 operatørene hadde betydelig erfaring med strukturanalyse av betong, som er grunnlaget for klassifisering av ulike bergarter mht alkalireaktivitet. Gjennom detaljert felles diskusjon og samkjøring etter gjennomført ringprøvning, har det vært mulig å forklare svært mange av de opprinnelige variasjonene. Dermed har det i ettertid vært mulig å bli enige om hvordan ulike tvilstilfeller skal klassifiseres. Som et hjelpemiddel for en mer enhetlig oppfatning av de ulike bergartsklassifiseringene er det utført en grundig diskusjon og revisjon av den opprinnelige bergartslisten. I tillegg er det utarbeidet et detaljert bildeatlas med spesifiserte beskrivelser av de ulike bergartene.

På bakgrunn av dette vurderes dagens petrografiske metode å være egnet som trinn 1 i vurdering av tilslagsmaterialers alkalireaktivitet, dersom analysene utføres av erfarne og samkjørte operatører. Men i tilfeller der andel risikobergarter ligger nær kritisk grense, vil metoden derimot ikke kunne gi et klart faglig svar alene, grunnet metodens usikkerhet. Metoden er dermed i slike tilfeller mindre egnet til å skille prøver mhp alkalireaktivitet.

Da dagens metode bygger på kvalitative bergartsklassifiseringer, som gir rom for tolkningsusikkerheter, er det foretatt undersøkelser for å vurdere om kvantitative målinger av ulike bergartsparemetre kan styrke metoden ytterligere. Utvikling av en ny kvantitativ metode vil for mange bergarter gi et bedre bilde på sammenhengen mellom petrografi og ekspansjon. Dette gjelder i første rekke en bedre differensiering av ulik grad av reaktivitet for ulike reaktive bergarter. Dette er spesielt viktig for knust stein, inneholdende reaktive bergarter, som ved dagens metode vurderes til å ha 100% risikobergarter. Metoden vil styrkes ytterligere dersom flere bergartsparemetre vurderes. Den mulige innvirkningen av glimmer er belyst i dette prosjektet, mens flere parametre vil ble undersøkt nærmere i Maarten Broekmans forestående dr. arbeid. Metoden er ikke ferdig utviklet per i dag til kommersielt bruk.

Til tross for at vi i dag har en petrografisk metode som er egnet som et første trinn for å vurdere tilslagsmaterialers mulige reaktivitet, vil det være viktig å opprettholde en diskusjon hvorledes metoden kan styrkes ytterligere. Dette er av stor betydning både for å kunne bestemme tilslagsmaterialers reaktivitet sikrere, men også for å forstå prosessene bak alkalireaksjoner bedre. Derfor, som en oppfølger til videreutvikling av petrografisk metode i dette prosjektet, er det vedtatt å etablere et nasjonalt "kompetanseforum" for å opprettholde den faglige kontakten mellom aktørene som arbeider med denne problematikken.

## **Akselerert mørtelprisme metode**

For å redusere mulighetene for variasjoner i resultatene for den akselererte mørtelprismemetoden, er det grunnleggende at metoden utføres mest mulig likt ved alle de tre godkjente laboratoriene (SINTEF, NOTEBY, Norcem). Prosedyrene for metoden er derfor gjennomgått i detalj, spesifisert ytterligere og modifisert. De gjennomførte modifiseringene er ikke i strid med gjeldende frys-vedtak fastsatt av Kontrollrådet, klasse P. Det er imidlertid anbefalt at ekspansjonen kalkuleres ut fra effektiv lengde mellom måleknastene i mørtelprismet, noe som fører til at den opprinnelige grenseverdien på 0,10% heretter tilsvarer 0,11% ved nye utregninger. Denne kalibreringen foreslås tatt hensyn til ved fastsetting av nye grensekriterier.

For å undersøke grad av variasjon i ekspansjonsresultater ble det utført ringprøvning mellom de tre godkjente laboratoriene. Ut fra registrerte variasjoner er viktigheten av å følge nøyaktige prosedyrer poengtert. Det ble funnet variasjoner mellom laboratorier i ekspansjonsresultater etter 14 døgn på inntil 0,03% ekspansjon, selv om internspredningen for hvert laboratorium var lav.

For å se nærmere på sammenhenger mellom mørtelprismeekspsjon og innhold av risikobergarter gitt ved petrografisk analyse, er det opprettet en database der resultater fra dette prosjektet og tidligere norske undersøkelser er sammenstilt. I dette prosjektet er resultatgrunnlaget utvidet for naturlige tilslagsmaterialer med lavt innhold av risikobergarter (10-20%). I tillegg er det utført undersøkelser med et ikke reaktivt tilslagsmateriale, der det er iblandet ulike mengder reaktivt materiale.

Sammenstillingen mellom ekspansjon og andel risikobergarter viser et kurveforløp der det observeres økende ekspansjon ved økende innhold av risikobergarter, og senere en utflating eller reduksjon i ekspansjon ved innhold av risikobergarter utover et visst nivå (40-60%). Det er stilt spørsmål om dette er en reell pessimaleffekt, eller kun et metodefenomen. Sammenstillingen viser også at det ikke kan registreres signifikante forskjeller i ekspansjonsverdier mellom naturlig sand eller knust stein, og at det heller ikke kan observeres at spesielle bergartstyper skiller seg ut fra de øvrige med hensyn til økt eller redusert ekspansjon.

## **Canadisk betongprismemetode - sandsteinsproblematikk**

Det er totalt utført 3 blandinger i hht Canadisk betongprismemetode. I disse forsøkene ble det benyttet to typer sandstein, en fra Lillehammer og en fra Finnmark.

Etter 12 måneders eksponering har blanding (1) med Årdal sand 0-5 mm og sandstein 5-20 mm fra Lillehammer allerede passert grenseverdien for alkalireaktivitet på 0,04 % med god margin (0,149 %). Det har også en tilsvarende blanding (2), men med sandstein 5-20 mm fra Finnmark gjort, selv om ekspansjonen er betydelig mindre (0,080 %). Årsaken til disse forskjellene er uklare.

Blanding (3) med nedknust sandstein 0-5 mm fra Lillehammer og ikke-alkalireaktiv stein 5-20 mm fra Årdal viste også en ekspansjon godt over grenseverdien (0,067 %).

Ekspansjonsbidraget fra sandfraksjonen (blanding 3) var imidlertid betydelig mindre enn fra steinfraksjonen (blanding 1), hvilket er helt i tråd med tidligere erfaringer.

### **Sammenstilling av feltefaringer**

Det er samlet inn relevant informasjon fra senior betongteknologer i bransjen, og fra utførende laboratorier av strukturanalyser av betong (SINTEF og NOTEBY).

I opplysningene fra senior betongteknologer inngår 53 ulike betongkonstruksjoner. For 22 av konstruksjonene er betongsammensetningen oppgitt. Konstruksjonene er fra Østlandsområdet der de fleste tilslagsmaterialer har i størrelsesorden 10-40% risikobergarter. Det er mottatt mangelfulle opplysninger vedrørende skadegrad. Mottatte opplysninger er sammenstilt og registrert i et regneark.

Fra SINTEF og NOTEBY er det mottatt informasjon om 107 konstruksjoner. Majoriteten av opplysningene kommer fra SINTEF. Det er kun mottatt opplysninger om antatt tilslagslokaliteter for 7 konstruksjoner, og om antatt sementinnhold for 7 konstruksjoner. Manglende opplysninger er forsøkt stipulert. Det er forsøkt å dele konstruksjonene inn i 5 klasser avhengig av grad av opprissing i felt. Alle opplysningene er sammenstilt og lagt inn i et regneark.

Det har vist seg tidkrevende og vanskelig å få samlet inn relevant informasjon om betongkonstruksjoner. Det har heller ikke vært tilstrekkelige rammer innen dette prosjektet til å følge opp informasjonen, for derved å få kvantitative resultater ut av de innsamlede erfaringer. Som en konsekvens har det dermed ikke vært mulig å direkte benytte feltefaringene for å vurdere "riktigheten" av dagens grensekriterier.

Men til tross for dette er det utført et viktig grunnleggende arbeid som er av avgjørende betydning for en fremtidig formålstjenlig gjennomføring av et prosjekt vedrørende feltefaringer. Det er anbefalt videre undersøkelser vedrørende innsamling av formålstjenlige felldata som konkret kan benyttes for å revidere kritiske grenseverdier gitt ved petrografisk metode og akselerert mørtelprismemeteode.

## Revisjon av grensekriteriene

Utvidet resultatgrunnlag rundt de to kritiske grenseverdiene har vist at grensen for kritisk andel risikobergarter (20% ved petrografisk analyse) ikke samsvarer med kritisk ekspansjon etter 14 døgn (0,10% ved mørtelprismemetoden). Det er da en utfordring hvordan dette skal håndteres videre, dvs. hvilke av grensene som bør justeres.

Det har ikke vært mulig i dette prosjektet å fremskaffe tilstrekkelig datagrunnlag for direkte å kunne benytte felterfaringer for å vurdere "riktigheten" av dagens grensekriterier. Men allerede innsamlede og sammenstilte data gir et svært godt grunnlag for en praktisk gjennomføring av et nytt prosjekt vedrørende felterfaringer.

Gjennomføring av et nytt prosjekt med kvantitativ vurdering av felldata er en forutsetning for å kunne revidere dagens grensekriterier.

## 0. INNLEDNING

### Bakgrunn

Alkalireaksjoner i betong er kjemiske reaksjoner mellom sement og tilslagsmaterialer (sand, grus, pukk) som på lengre sikt fører til en delvis oppløsning av kvartsmineraler i visse typer reaktive bergarter. Det dannes en "gel" som ved vannopptak ekspanderer. Utsatte deler av konstruksjoner ekspanderer, og kan i tillegg føre til dannelse av riss og sprekker. Betongens fasthet reduseres og kan disponeres for andre nedbrytende prosesser.

Det norske tilslaget skiller seg ut fra mange andre lands tilslag, ved at det reaktive tilslaget er av en langsomt reagerende type. Det vil si at skader og svekkelse av betongen første gir seg tilkjenne ca. 12-16 år etter at betongen er utstøpt.

I dag er alkalireaksjoner i betong erkjent som et material-teknisk problem i norske sammenhenger. Dette har ført til at analysemetoder og akseptkriterier er innarbeidet i Kontrollrådets klasse P; Deklarasjon- og Godkjenningsordning for Betongtilslag. Norsk Betongforening har utarbeidet retningslinjer for produksjon av bestandig betong med reaktivt tilslag (Norsk Betongforening 1996). NORCEM har justert sine sementtyper for å gi mulighet for redusert alkaliinnhold. Tilslags- og betongprodusenter har iverksatt tiltak for å kunne justere tilslaget, bl.a. ved hjelp av knuste materialer.

I forprosjektsrapporten; **NORMIN 2000 - Alkalireaksjoner i betong (1996)**, oppsummeres status over viten vedrørende prøving og klassifisering av alkalireaktive tilslagsmaterialer. Forprosjektet hadde bred deltagelse fra fagmiljøer, som tidligere har vært engasjert i problematikken. I rapporten ble det påpekte nødvendigheten av videre undersøkelser, og det ble konkludert med at det var behov for et hovedprosjekt. Det ble også poengtert viktigheten av fortsatt samarbeid mellom alle impliserte parter i Norge. Mål og innhold for et hovedprosjekt ble omtalt i forprosjektsrapporten.

Dr.ing. B.J.Wigum, som driver selvstendig det rådgivende ingeniørfirmaet; ERGO i Reykjavik, Island, fikk høsten 1996 i oppdrag å utarbeide et forslag til en arbeidsplan for et fremtidig hovedprosjekt. På initiativ fra Pukk- og Grusleverandørenes Landsforening (PGL) ble det så høsten 1996 utarbeidet en søknad gjennom NORMIN-programmet for et to-årig hovedprosjekt. Søknaden ble godkjent og resulterte i hovedprosjektet; **NORMIN 2000 - Alkalireaksjoner i betong - Hovedprosjekt**, prosjektnr. 119299/222.

### *Status og aktualitet*

Det har vært enighet om at de punkter som nå er «frosset» i regi av Kontrollrådet kl. P, er det som først burde avklares. Dette gjelder da i første rekke vurderinger av usikkerheter i testmetodene og sammenhengene mellom de kritiske grensekriteriene for petrografisk analyse og den akselererte mørtelprismemetoden. Det var også ønskelig å avklare nærmere om dagens kritiske grensekriterier gjenspeiler de erfaringer man har fra virkelige konstruksjoner. Dette inkluderer også undersøkelser av de grensekriteriene som er satt ved blanding av alkalireaktiv sand og ikke alkalireaktiv stein, henholdsvis forbudet mot blanding av alkalireaktiv stein med ikke alkalireaktiv sand.

Grenseverdiene for tillatt innhold av alkalier i betongen ved bruk av reaktivt tilslag, slik det spesifiseres i Norsk Betongforenings Publikasjon nr. 21, er også en sentral faktor som det var ambisjoner om å undersøkes nærmere. Prosjektet omfatter dessverre ikke denne problemstillingen.

I tillegg har det vært ønskelig å undersøke nærmere usikkerhetene vedrørende reaktivitet for sedimentære bergarter i hht den Canadiske betongprismemetode, da denne er avgjørende for funksjonstesting av betong.

Det vil være av stor betydning dersom akselerert mørtelprisme metode kan brukes for å vurdere samlet dokumentasjon av betongsammensetningen. Derfor er det foretatt vurderinger av effekten av silikastøv i den akselererte mørtelprisme metoden.

### ***Mål***

Det har lenge vært et overordnet mål å komme frem til enklest mulig, men tilfredstillende testmetoder for å kunne dokumentere tilslagsmaterialers potensielle alkalireaktivitet i betong. Dette har vært et utgangspunkt for å kunne utarbeide realistiske grensekriterier og retningslinjer for bransjen. Metodene, grensekriteriene og retningslinjene som frem til i dag har vært benyttet, er valgt utfra eksisterende viten, som i mange tilfeller har vært mangelfull. Man har dermed hatt et uklart grunnlag for å kunne dokumentere riktigheten av dagens grensekriterier og retningslinjer.

Det ble ved prosjektets oppstart satt opp hovedmålsetninger for å avklare hovedpunktene vedrørende dette. I løpet av prosjektarbeidet har hovedmålet blitt revidert noe med følgende delmålsetninger:

- **Petrografisk analyse**; forbedre/utvikle metoden slik at den blir mindre personavhengig
  - forbedre klassifiseringen og vektlegging av ulike bergarters reaktivitet
  
- **Akselerert mørtelprismemetode**; evaluere og revidere Kontrollrådets kl. P testprosedyre
  
- **Grenseverdier**; undersøke/verifisere riktigheten av dagens kriterier
  - utvide resultatgrunnlag rundt grenseverdiene (akselerert mørtelprismemetode)
  - bestemme sammenhenger mellom grenseverdier for petrografisk analyse vs. akselerert mørtelprismemetode.
  - sammenligne med feltefaringer
  
- Videreutvikle metoder for funksjonstesting av betong
  - utvide resultatgrunnlaget

## **Gjennomføring**

Oppstartsmøte for hovedprosjektet fant sted 21.04.97, mens første ordinære styringsgruppemøte fant sted 16.05.97. Styringsgruppen har hatt følgende sammensetning:

- ◆ Børge Johannes Wigum, ERGO, **Prosjektleder**
- ◆ Malvin Sandvik, tidligere FABEKO, nå Norcem AS, **Sekretær**
- ◆ Bjørn Aasen, John Myrvang AS, **Økonomiansvarlig**
- ◆ Per Dugstad, Pukk- og grusleverandørenes landsforening (PGL)
- ◆ Finn Fluge, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling
- ◆ Cecilie Hagby/Ingvild Jørgensen (*fra høsten 1998*), Kontrollrådet for betongprodukter
- ◆ Roger R. Johansen, FABEKO
- ◆ Mats Carlsson, FESIL ASA
- ◆ Kjell Skjeggerud, Norsk Betongforening
- ◆ Birger Sjøpler/Terje F. Rønning, Norcem AS, FoU
- ◆ Per-Christian Vedeler, Svelviksand AS
- ◆ Knut Bryne, Stange Betong as (*kun med i 1997 på vegne av FABEKO*)
- ◆ Hanne Rønneberg, NorBetong as (*kun med i oppstartsfasen på vegne av FABEKO*)

Det er i prosjektperioden avholdt 10 styringsgruppemøter. Prosjektets kontaktperson mot NORMIN-programmet har vært Per Helge Fredheim.

Det ble valgt å dele opp hovedprosjektet i tre delprosjekter der hvert delprosjekt, ved delprosjektleder, har innrapportert resultater til prosjektleder. Aktørene i prosjektet har i stor utstrekning kommunisert vha av e-post med vedlegg, noe som har bidratt til å redusere ulemper med ulik lokalisering av de ulike aktørene.

De opprinnelige delprosjektplanene for de respektive delprosjekt inngår som hovedkapitler i denne sluttrapporten fra hovedprosjektet. Prosjektleder har hatt ansvar for å redigere hovedprosjektrapporten.

Arbeidsgruppene i de tre delprosjektene har hatt følgende sammensetning:

### **Delprosjektgruppe A; Videreutvikling av petrografisk metode:**

- ◆ Børge Johannes Wigum, ERGO, **Delprosjektleder**
- ◆ Maarten A.T.M. Broekmans, Norges geologiske undersøkelse (NGU)
- ◆ Per Dugstad, Pukk- og grusleverandørenes landsforening (PGL)
- ◆ Øyvind Gvein, AS Prospektering
- ◆ Per Hagelia, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling
- ◆ Marit Haugen, SINTEF, Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong
- ◆ Jan Viggo Holm, NOTEBY AS

**Delprosjektgruppe B; Akselerert mørtelprismemetode - grenseverdier:**

- ◆ Terje F. Rønning, Norcem AS, FoU, Delprosjektleder
- ◆ Cecilie Hagby/Ingvild Jørgensen (*fra høsten 1998*), Kontrollrådet for betongprodukter
- ◆ Jan Viggo Holm, NOTEBY AS
- ◆ Jan Lindgård, SINTEF, Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong
- ◆ Gudrun Lundevall/Sigrun K. Bremseth (*fra høsten 1998*), Norcem AS, FoU

**Delprosjektgruppe C; Feltefaringer - resultatgrunnlag**

- ◆ Knut Bryne, Stange Betong, Delprosjektleder (*avtroppet 1997*)
- ◆ Jan Lindgård, SINTEF, Bygg og miljøteknikk, Delprosjektleder (*påtroppet 1998*)
- ◆ Børge Johannes Wigum, ERGO, Delprosjektleder (*påtroppet 1998*)
- ◆ Finn Fluge, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling
- ◆ Cecilie Hagby/Invild Jørgensen (*fra høsten 1998*), Kontrollrådet for betongprodukter
- ◆ Hanne Rønneberg, tidl. NorBetong as (*kun med i oppstartsfasen på vegne av FABEKO*)
- ◆ Per-Christian Vedeler, Svelviksand AS

***Begrensninger***

Delprosjektene A og B er i all hovedsak gjennomført etter opprinnelig arbeidsplan og budsjetter. Delprosjekt C; feltefaringer, kom derimot noe sent i gang, og det ble etterhvert klart at opprinnelig arbeidsplan og ambisjoner var for store i forhold til budsjett. Det ble da forsøkt ulike fremstøt ovenfor bransjen for å forsøke å øke midlene til delprosjektet. Da dette ikke gav resultat, ble det på styringsmøte 20.04.98 bestemt at delprosjektet skulle gjennomføres med de opprinnelige midlene. Dette har resultert i et lavere ambisjonsnivå, enn opprinnelig planlagt. For å oppnå en mest mulig kostnadseffektiv gjennomføring, ble arbeidsplanen revidert. Det ble kun satset på innsamling av eksisterende data. De opprinnelige nye planlagte felt- og laboratorieanalyser er utelatt til fordel for en mer omfattende innsamling av mest mulig relevant informasjon fra ressurspersoner i bransjen, og fra utførende laboratorier av strukturanalyser av betong. Fremkomne opplysninger er sammenstilt og ut fra dette benyttet for å forsøke å belyse og vurdere grensekriteriene.

## 1. DELPROSJEKT A - VIDEREUTVIKLING AV PETROGRAFISK METODE

*Arbeidsgruppe - Delprosjekt A*

### 1.1 Metodens usikkerheter - ringprøvning - samkjøring mellom laboratorier

*Arbeidsgruppe - Delprosjekt A, ved delprosjektleder Børge Johannes Wigum - ERGO*

#### 1.1.1 Bakgrunn

Dagens petrografiske metode slik den er beskrevet av Kontrollrådet klasse P (SINTEF, 1993) er ikke spesielt godt dokumentert når det gjelder usikkerheter f.eks. knyttet til repeterbarhet og reproduserbarhet. I forprosjektet ble det foretatt en begrenset ringprøvning mellom SINTEF og NOTEBY, der 8 ulike løsmasseprøver ble undersøkt. Det ble der registrert en relativ liten variasjon i resultater fra 6 av de 8 prøvene. I 1995 ble det utført tilsvarende undersøkelser mellom SINTEF og NGU, som var basert på 47 prøver, og viste en god sammenheng. På bakgrunn av ulikt utgangspunkt for de to undersøkelsene er det ikke uten videre riktig å sammenligne disse to uavhengige ringanalysene.

For å kunne si noe mer om metodens usikkerheter (mellom uavhengige laboratorier og operatører) er det utført en ny ringanalyse mellom flere uavhengige laboratorier.

#### 1.1.2 Prøver og utførelse

Operatørene som deltok i ringanalysen er alle geologer. Alle har betydelig petrografisk erfaring, men ulik erfaring med observasjoner av betongslip og klassifisering av alkalireaktive bergarter. Disse var følgende:

- SINTEF - Marit Haugen
- NOTEBY - Jan Viggo Holm
- NGU - Maarten Broekmans (*Arnhild Ulvik deltok i diskusjonen*)
- PGL - Per Dugstad
- a.s. Prospektering - Øyvind Gvein
- Statens vegvesen - Per Hagelia

Felles oppstart av ringprøvningen ble lagt opp med en gjennomgang/samkjøring av den petrografiske metoden. Dette ble gjennomført på SINTEF i Trondheim under ledelse av Marit Haugen. Hovedmålsettingen med denne felles gjennomgangen var både å etablere et felles utgangspunkt til en mer enhetlig analyse for de operatører som allerede utfører analysen, samt som en introduksjon for nye. Det ble først gitt bakgrunnen for den petrografiske analysen. Videre ble det gjennom presentasjon i mikroskop gjort rede for hva som kjennetegner de typiske bergartsgrupperingene. Til slutt ble usikre bergartsgrupper gjennomgått.

Det ble gjort rede for at analysene skulle utføres i hht Kontrollrådets kl.Ps prosedyrer, slik det går frem av SINTEFs rapport STF70 A93030 (Lindgård et al., 1993). I SINTEFs rapport er det i kapittel 3.4, beskrevet eksempel på norske bergarter i gruppene; 1)

Alkalireaktive bergarter, 2) Mulig alkalireaktive bergarter og 3) ikke-alkalireaktive bergarter. Bakgrunnen for disse bergartsgruppene er å finne i en uoffisiell liste (vedlegg 1.1.1) utarbeidet av B.J. Wigum da han jobbet ved SINTEF, FCB (1990-1992). Denne uoffisielle listen inneholder totalt 12 bergartsklasser som er basert på hvordan disse ulike bergartsgruppene opptrer i felt i forbindelse med AAR. Listen har siden den gang blitt brukt ved SINTEF i forbindelse med petrografisk analyse. For å oppnå en mest mulig enhetlig klasseinndeling, ble det lagt opp til at alle operatørene skulle klassifisere bergartene i de 12 bergartsgrupper som er beskrevet i opprinnelig bergartsliste (vedlegg 1.1.1). Listen ble delt ut til operatørene.

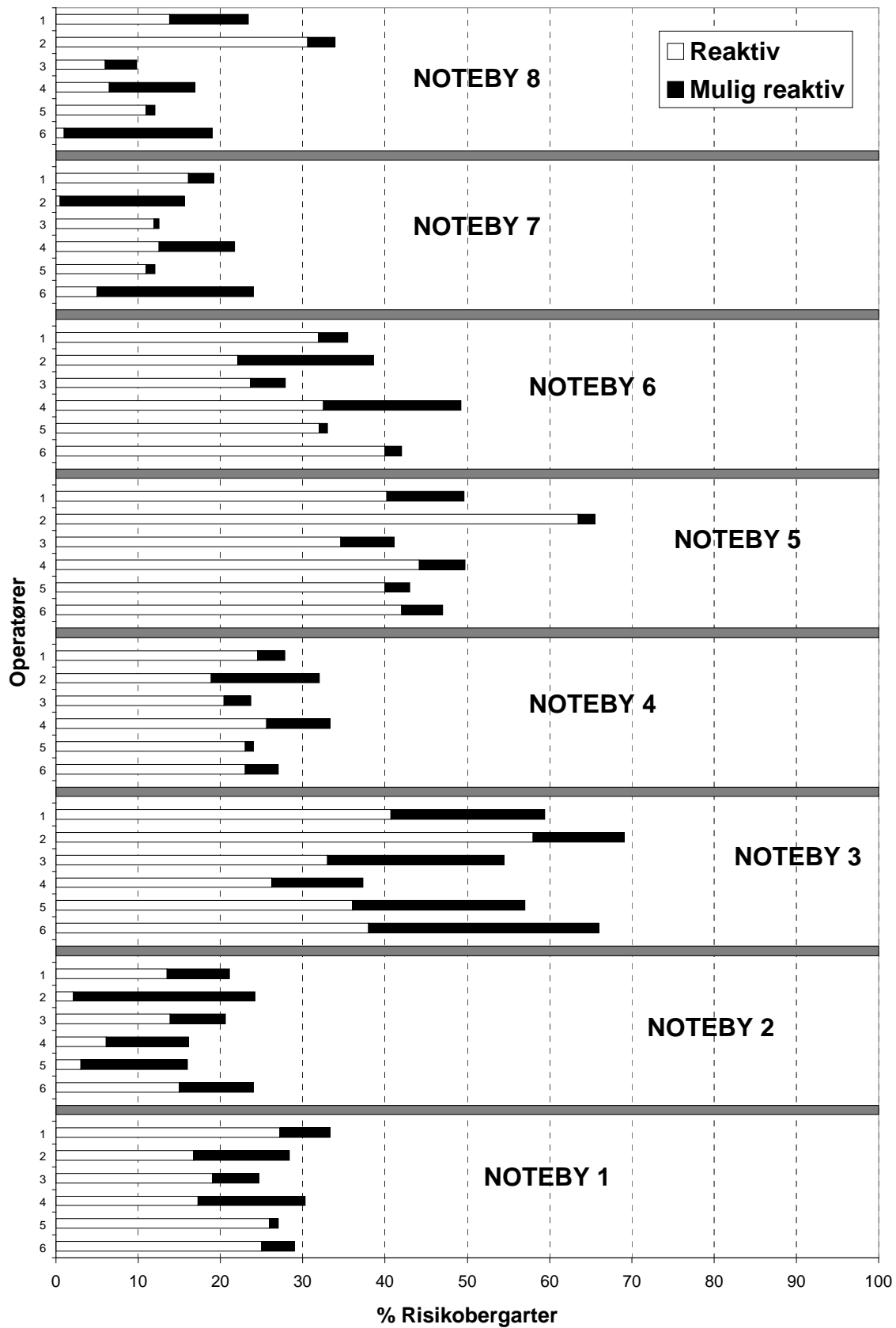
Grunnlaget for ringprøvningen besto av 16 prøver. Av disse var det 12 sandprøver (for hver prøve; 2 slip av fraksjon 2-4mm og 1 slip av 1-2 mm); resten var pukksprøver (hver prøve; 2 slip av 2-4 mm). Prøvene var anonymisert uten referanse til massetak. For hver prøve var det likevel oppgitt område som f.eks. kommune, eller region. For å oppnå mest tids- og kostnadseffektivitet analyserte operatøren fra SINTEF 8 allerede kommersielt analyserte tynnslipp prøver fra NOTEBY og visaversa. Operatørene fra a.s. Prospektering, PGL, Statens vegvesen og NGU analyserer derimot alle de 16 prøvene.

Felles diskusjon og gjennomgang vha. petrografisk mikroskop, ble gjennomført etter at alle resultatene forelå.

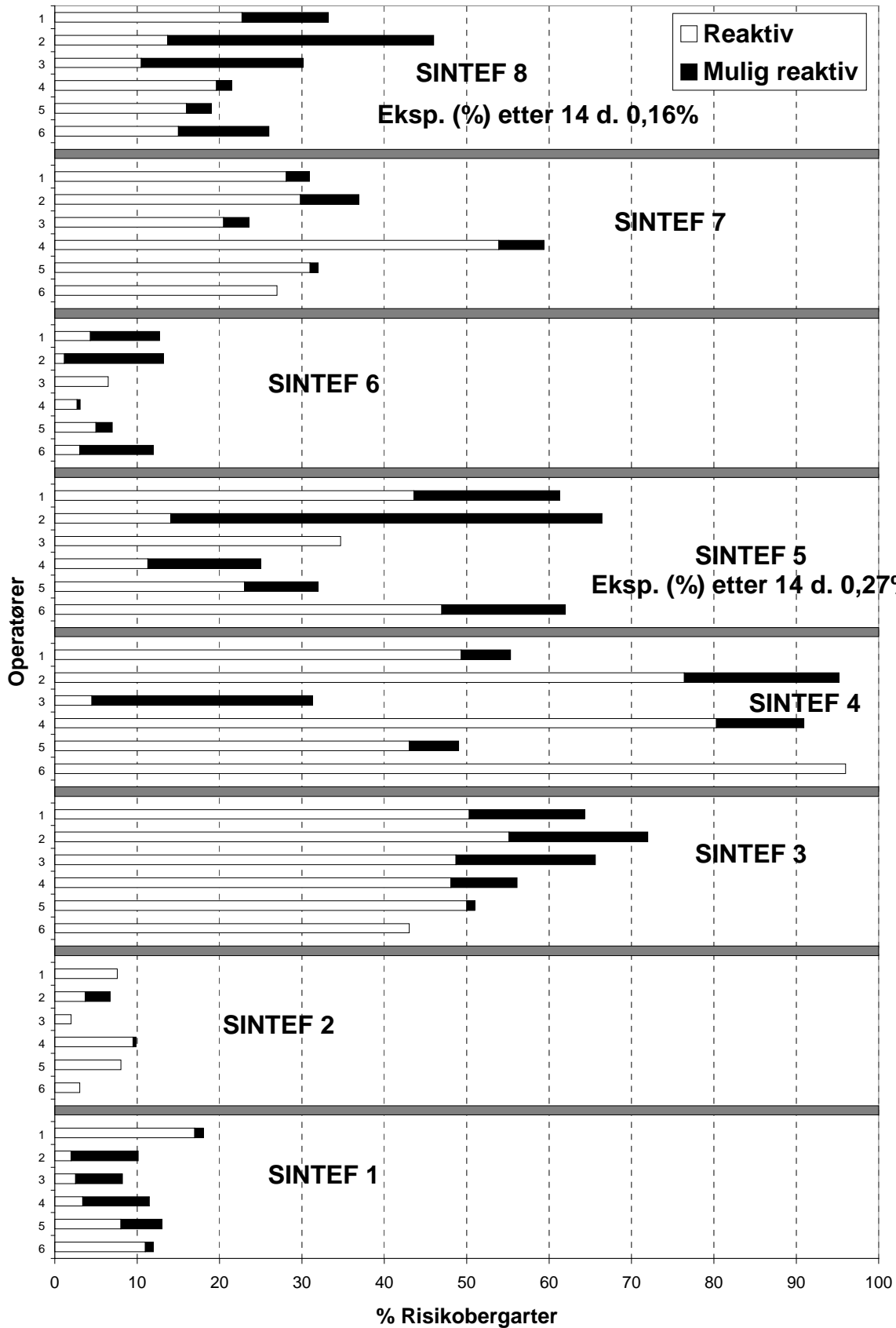
### ***1.1.3 Resultater***

Hovedresultatene fra alle aktørene er satt opp i figur 1.1.1 (8 prøver fra NOTEBY) og figur 1.1.2 (8 prøver fra SINTEF). Stolpediagrammene viser totalt % risikobergarter, i tillegg til fordelingen i % reaktive og % mulig reaktive. For total oversikt over alle resultatene, med fordeling i de 12 ulike bergartsgruppene, vises til vedlegg 1.1.2. Det er valgt å anonymisere resultatene vedrørende hvilken operatør som står bak de ulike resultatene.

På spørsmål om aktuelle prøver skal klassifiseres som reaktive eller ikke reaktive, ut fra dagens grensekriterier på 20% risikobergarter, er det for 4 av 16 prøver (25% av prøvene) ulike svar (alle operatørene under ett).



Figur 1.1.1. Prøver fra NOTEBY (8 stk.-) Sammenstilling av resultater fra ringforsøk - petrografisk analyse. (Resultatene ble oppnådd før grundig gjennomgang av ulike bergarter, og før revisjon av bergartsliste).



Figur 1.1.2. Prøver fra SINTEF (8 stk.-) Sammenstilling av resultater fra ringforsøk - petrografisk analyse (Resultatene ble oppnådd før grundig gjennomgang av ulike bergarter, og før revisjon av bergartsliste).

## 1.1.4 Diskusjoner

### 1.1.4.1 Generelt

I utgangspunktet vil man alltid måtte regne med variasjoner i klassifisering av naturlig bergartsmaterialet som vil gi rom for tolkninger. Dagens petrografiske metode bygger på en kvalitativ gjenkjenning av bergarter, bygd på mineralogi og tekstur. Som en kvalitativ metode, vil det dermed være vanskelig å vurdere denne ut fra kvantitativ statistikk, og dermed kunne si noe om absolutte grenser.

Et viktig kritisk argument mot metoden tidligere har vært at det er svært få operatører som har godkjenning av Kontrollrådet til å utføre petrografisk analyse. Det er dermed berettiget å stille spørsmålet om flere bør kunne utføre analysen, eller om den skal begrenses til få spesialister. Gjennom ringprøvningen var det ønskelig å få nærmere svar på dette.

Tolkninger av resultatene viser tildels store variasjoner mellom de ulike operatørene der resultatene ofte deler seg i to eller flere blokker. Det er verdt å bemerke at der de ulike aktørene skiller seg ut, så har ikke operatøren nødvendigvis gjort "feil" definisjon av bergart. Men målsettingen må være å forsøke å få til en mer enhetlig forståelse av innhold av risikobergarter ("fasit").

### Hovedgrunner for variasjoner

Hovedårsaken til den store variasjonen ligger i ulik tolking av hva som skal klassifiseres som reaktive-, mulig reaktive- og ikke reaktive bergarter. Dette er klart, fordi måleusikkerheten er svært mye større enn de ca. 2-3 % en skulle vente ut fra tellestatistikk basert på 1000 eller 2000 pkt. per prøve når hvert bergartskorn er sikkert identifisert.

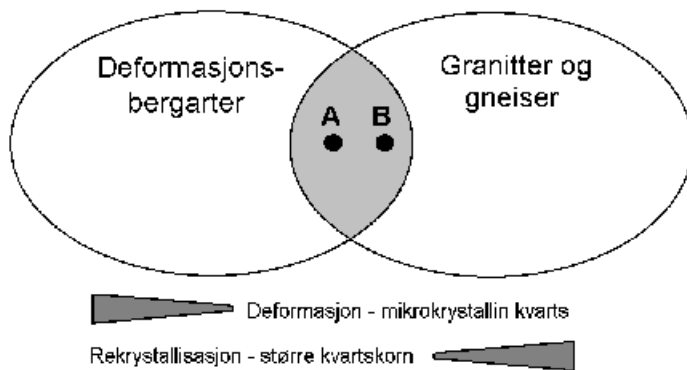
Det er tydelig divergens i klassifisering av ikke reaktiv kvartsitt (kvartskorn  $>130 \mu\text{m}$ ) og granitt vs. sandstein. I enkelte spesielle tilfeller har det vært grunnlag for forskjellig klassifisering av det som (ut fra geologiske bakgrunnskunnskap) er granitt eller sandstein. Dersom slike bergarter forefinnes i relativt store mengder i tynnslipene, har dette gitt grunnlag for tildels store variasjoner.

I gruppen "mulige reaktive bergarter" observerer man at det er grunnlag for store tolkningsmuligheter. Dermed ser man ofte her store variasjoner mellom de ulike observatørene. Dette gjelder ulik klassifisering av finkornige bergarter, grunnet ulik definering av kvartsinnhold.

Det ble også poengtert av operatørene at ved bruk av punkttellingsutstyr, er det ikke praktisk mulig å punktelle hele tynnslipet. Dette ble løst hos enkelte ved at slipet etter en viss tid ble snudd i holderen. På denne måten var det mulig å dekke hele slipet. Denne prosedyren må inkluderes i metodebeskrivelsen.

Enkelte operatører hevdet at det ville være enklere å utføre analysen dersom det forelå stoffprøver (håndstykker). Men det ble poengtert at det som regel heller ikke foreligger stoffprøver ved vanlig utførelse av petrografisk analyse, noe som hadde vært en fordel.

Det kan også tydelig observeres divergens i klassifisering av bergarter utsatt for deformasjon. Eksempelvis vil en finkornet gneis ofte vise sterke tegn på deformasjon. Dersom en slik bergart av en operatør klassifiseres som gneis, mens en annen operatør klassifiserer den i gruppen blant deformasjonsbergarter, ligger det et grunnlag for store variasjoner. Dette er forsøkt illustrert skjematisk i figur 1.1.3.



Figur 1.1.3. Ulike oppfatninger mellom operatør A og operatør B som fører til ulik klassifisering av bergarter.

### Samkjøring mellom operatører

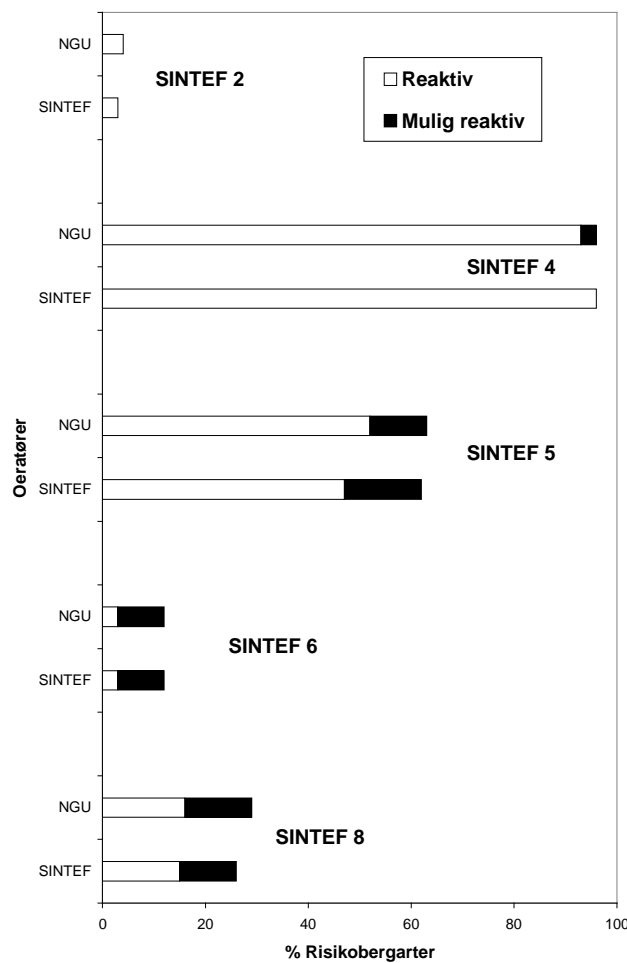
En annen viktig grunn for variasjon i resultatene er manglende samkjøring/spesifisering, ulik bakgrunn og ulike erfaringer med observasjoner av betongtynnslip.

Fra en tidligere parallellprøving mellom SINTEF og NGU (Jensen & Haugen, 1996) går det tydelig frem at det er fullt mulig å oppnå en relativt stor grad av harmoni mellom resultatene for to uavhengige operatører. Fem av prøvene fra dette ringforsøket inngikk også som en del av den tidligere parallellprøvingen mellom SINTEF og NGU. I tabell 1.1.1 og figur 1.1.4 kan det observeres den gode harmonien som er mellom resultatene for disse to operatørene. Dette gjelder også den spesifikke fordelingen i de 12 bergartsklassene. Det som dog skiller denne tidligere parallellprøving fra ringprøvningen i dette prosjektet, er en grundig samkjøring på forhånd av parallellprøvingen. NGU og SINTEF utførte totalt oppimot en ukes samkjøring på forhånd. I tillegg ble det utført felles analyser på 2-3 prøver før ringprøvningen startet.

Dermed har man et mye sterkere utgangspunkt for å ha en felles forståelse av de ulike bergartsgruppene. Dette er også tydelig dokumentert i dette prosjektet der en operatør gikk igjennom en del slip på nytt, etter at resultatene forelå og det var gjennomført en omfattende diskusjon av variasjonene. I operatørens reviderte resultater ser man at de fleste av de opprinnelige "utskuddene" var luket bort. Disse poengene understreker behovet for en nøye samkjøring mellom operatørene. Det viser også viktigheten av utarbeidelsen av et detaljert billedatlas med ulike eksempler som belyser og spesifiserer de ulike bergartsgruppene.

Tabell 1.1.1 Tidligere resultater av parallellprøving - petrografisk analyse - mellom SINTEF og NGU. Prøver som inngikk både i tidligere parallellprøving og denne ringanalysen.

Utført av	Prøve nr.	Bergartsgrupper												% andel reaktiv	% andel mulig reaktiv	% andel risiko b.a.	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				Sum
SINTEF	SI-2	1	1			1					22	74	1	100	3	0	3
NGU		2				2		1			23	72		100	4	1	5
SINTEF	SI-4	84	2		10						2	2		100	96	0	96
NGU		78	1		6	8		3			3	1		100	93	3	96
SINTEF	SI-5	2	20		22	3		15			34	3	1	100	47	15	62
NGU		2	28		19	3		11			31	6		100	52	11	63
SINTEF	SI-6	1	2					9			59	28	1	100	3	9	12
NGU		1	2					9			60	28		100	3	9	12
SINTEF	SI-8	1	6	4	3	1		10	1		62	11	1	100	15	11	26
NGU		1	9		1	5		13			59	12		100	16	13	29



Figur 1.1.4 Resultatene fra tabell ovenfor.

#### *1.1.4.2 Felles gjennomgang - Arbeidsdiskusjon vedrørende de spesifikke resultatene*

I forbindelse med den felles diskusjonen som ble gjennomført etter avsluttet ringprøvning, ble hver operatør anmodet om å kommentere sine mest typiske "avvikende" resultat, slik det har kommet fram ved sammenligning mot hovedtrenden.

Hensikten med denne diskusjonen var å finne ut hva som kunne gjøres for å presisere intensjonene i eksisterende metode, og gjøre bergartsidentifikasjonen mindre personavhengig. Nøkkelen til dette spørsmålet ligger i hvordan de enkelte laboratoriene/operatørene har brukt dagens klassifasjonssystem, og hvorfor de ulike tolkningene har kommet frem med utgangspunkt i samme bergartsliste. Erfaring og dokumentasjon fra denne ringanalysen, med vekt på de ulike tendensene som har kommet frem, utgjør et helt nytt grunnlag for en slik gjennomgang.

Den felles gjennomgangen og arbeidsdiskusjonen omfattet ikke de mer grunnleggende spørsmål om hvilke tilslagsparametre som styrer alkalireaktiviteten. "Treffsikkerheten" til metoden i forhold til faktiske alkalireaksjoner "i felt" blir derfor ikke uten videre bedre, selv om alle 6 laboratorier etterhvert skulle greie å komme ut med samme % andel risikobergarter.

Den naturlige variasjonen med tanke på mineralsammensetning, tekstur og størrelse på mineralkorn er gjerne stor, selv for bergarter som har samme geologiske navn. Videre er det ikke alltid enkelt å identifisere riktig bergart i steinfragment som er 1 til 4 mm store. Begge disse forholdene kan tenkes å virke inn på analyseresultatet.

Alle operatørene ble bedt om å gi konkrete kommentarer til sine resultater, spesielt der disse "avvek" fra hovedtrenden.

### 1.1.5 Statistiske vurderinger

Maarten A.T.M. Broekmans - Norges geologiske undersøkelse

#### 1.1.5.1 Generelt

Den petrografiske metoden er egnet for modalanalyse av tynnslipdata ved punkttelling. Det har blitt publisert mange artikler om slike metoders fordeler og ulemper (se for eksempel i Wimmenauer 1985). Diagrammet til Van der Plas & Tobi (1965) er blitt akseptert som standard redskap for punkttellinger (NORMIN 2000 1996). Howarth (1998) fraråder derimot bruk av dette diagrammet, fordi det gir dårlige eller uriktige resultater.

Resultatene av seksten prøver fra seks aktører ble samlet i en tabell (vedlegg 1.1.3). Fra disse måleverdiene ble det først beregnet gjennomsnittsverdier som er gitt i i spaltene "avg" (fra *average*). Dessuten ble det beregnet standardavvik som vanligvis blir antydnet med  $\delta$  (gresk bokstav delta; fra *deviation*). Standardavvik sier hvor mye hver eneste måleverdi avviker *snittlig* fra gjennomsnittsverdien over hele målerekken. Hvis en tar snittverdien pluss eller minus standardavvik, så får man et inntrykk vedrørende måleusikkerheten. Innenfor det siviltekniske fagområdet pleier man å bruke **avg $\pm$ 2 $\delta$**  som tilsvarer et pålitelighetsnivå på 95%. Nærmere statistiske detaljer fins i Howarth (1998). Det er viktig å vite at den petrografiske metodens måleusikkerheten maksimalt er omtrent 5vol% absolutt.

#### 1.1.5.2 Ringprøvningen

Statistikken impliserer at innhold av de individuelle reaktive bestanddeler kan variere "betydelig", og derfor varierer totalinnholdene av risikobergarter også "betydelig". Men: innholdsvariasjoner av de ikke-reaktive bergarter er imidlertid på minst samme størrelsesorden.

Operatørene i ringprøvningen har diskutert de fleste slipene, og uten unntak var alle enige i hvilke korn som skulle ansees som reaktive, muligens reaktive, eller ikke-reaktive, selv om det var noe diskusjon om bergartens nomenklatur (se i Gjelle & Sigmond 1995). Det er veldig viktig at dette fastslås, ettersom det er bekreftelsen på gyldigheten til den petrografiske metoden.

#### 1.1.5.3 Konklusjoner etter statistisk analyse

- innholdsvariasjoner i prosenter av de individuelle bergarter kan etter statistisk analyse av de resultatene være betydelige;
- operatørene er alle enige i bergartenes reaktivitet henholdsvis ikke-reaktivitet;
- den petrografiske metoden har full gyldighet for klassifisering av pukk-, grus-, og sandprøver med hensyn til alkali-reaktivitet.

### **1.1.6 Forslag til revidert bergartsliste for petrografisk analyse - trinn 1**

*Arbeidsgruppe - Delprosjekt A*

I diskusjonen etter ringprøvningen kom det tydelig frem at mangler og tvetydige definisjoner i den opprinnelige bergartslisten var en viktig medvirkende årsak til de registrerte variasjoner i resultatene fra de ulike operatørene. På bakgrunn av dette ble det klart at det var behov for en kritisk gjennomgang av eksisterende bergartsliste med en påfølgende revisjon av denne.

Gjennom felles diskusjon og innspill arbeidsgruppen utarbeidet et forslag til en revidert bergartsliste som presenteres i dette kapitlet. Forslaget inkluderer også kommentarer og forklaringer til bergartslisten. Under utarbeidelsen av dette forslaget er det lagt vekt på følgende punkter:

1. **Bergartsdefinisjoner** (basert på mineralsammensetning, teksturer, kornstørrelse) må følge gjeldene internasjonal geologisk nomenklatur. For norske forhold er det benyttet NGU Skrifter nr.113; *Bergartsklassifisering og kartsammenstilling* (Gjelle og Sigmond, 1994). Poenget er at det er geologien som har utviklet begrepsapparatet knyttet til bergarter. Uten en direkte tilknytning til presis nomenklatur vil termene bli svevende og vanskelig å gjøre nytte av. Det poengteres dog at denne listen har som utgangspunkt å klassifisere bergarter ut fra alkalireaktivitet, og vil derfor i enkelte tilfeller være en forenkling av tradisjonelle geologiske bergartsgrupperinger.
2. Det har også vært en ambisjon å forsøke å lage en mest mulig **oversiktlig, konsekvent, og operativ liste** for norske forhold. Klasse 2, som tidligere ble kalt mulig reaktive, er nå kalt tvilstillfeller. Utfyllende kommentarer og forklaringer er tatt med for å utdype gruppene, og forklare eventuelle avvik. I kommentarene er det også delvis beskrevet utenlandske reaktive bergarter, som i utgangspunktet ikke forefinnes i Norge.
3. Sist, men ikke minst, er det forsøkt å benytte **resultatene fra diskusjonen vedrørende den petrografiske ringprøvningen** som er foretatt i dette prosjektet. I tillegg er det forsøkt å inkludere oppdatering av dagens kunnskap.

Det har vært viktig å bringe klarhet i en konsekvent klassifisering av deformasjonsbergarter. Dermed har det vært nødvendig med en innskjerping av definisjoner og grenser, der kornstørrelse for kvarts har vært retningsgivende.

Bildeatlasen som er presentert i kapittel 1.2, vil også være et viktig middel for å spesifisere de ulike gruppene ytterligere.

Det poengteres at dette er å betrakte som forslag til bergartsliste med forklaringer. Det vil være Kontrollrådet, klasse P, som sitter med det endelige ansvaret for å utgi en ny formell revidert bergartsliste med beskrivelser.

Tabell 1.1.6-1. Forslag til revidert bergartsliste for petrografisk analyse - trinn 1

<b>Klasse 1.</b> <b>ALKALIREAKTIVE</b> <b>BERGARTER</b> <i>(Dokumentert i betongkonstruksjoner)</i>	<b>Klasse 2.</b> <b>TVILSTILFELLER</b>	<b>Klasse 3.</b> <b>IKKE ALKALI-</b> <b>REAKTIVE BERGARTER</b>
<b>1. SEDIMENTÆRE BERGARTER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sandstein <ul style="list-style-type: none"> <li>- Arkose</li> <li>- Kvartssandstein</li> </ul> </li> <li>• Leirstein (også skifrig)</li> <li>• Siltstein (også skifrig)</li> <li>• Mergelstein-/skifer <i>(også omdannet)</i></li> <li>• Gråvakke <i>(Også omdannet)</i></li> </ul> <p><i>Det forutsettes at det observeres sedimentære trekk</i></p>	<b>5. TVILSTILFELLER</b> <p>Eksempler:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kvartsitt/kvartsskifer</li> <li>• Kvartsrik bergart <i>(Kvartsinnhold &gt;20%)</i></li> <li>• Kalkstein m/ urenheter <i>(urenheter - finfordelt kvarts)</i></li> <li>• Hornfels m/ kvarts</li> <li>• Lyse mylonitter med lite kvarts <i>(1-5%)</i></li> </ul>	<b>6. MØRKE BERGARTER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Basalt</li> <li>• Grønnstein</li> <li>• Gabbro</li> <li>• Amfibolitt</li> </ul> <p><i>(alle bergarter, også som omdannet)</i></p>
<b>2. MYLONITT/KATAKLASITT</b> <b>(Kvartsholdige)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mylonitter</li> <li>• Kataklasitter</li> <li>• Mylonittgneis</li> </ul>	<p><i>Alle bergarter inneholdene kvarts-mineral kan i utgangspunktet være potensielle reaktive bergarter. Dette avhenger av petrografiske parametre som kornstørrelse, grad av deformasjon, og mikrostruktur.</i></p> <p><i>Flere typer kvartsitt har reagert i betong.</i></p> <p><i>Mikrokrystallin kvartsitt (kvartskorn &lt;60 µm) grupperes som alkalireaktive.</i></p> <p><i>Kvartsitt med kornstørrelse &lt;130 µm) grupperes som mulig tvilstilfeller.</i></p> <p><i>Kvartsitt (kvartskorn &gt; 130 µm) grupperes som ikke alkalireaktiv, selvom kvartsitten inneholder "strained" kvarts.</i></p>	<b>7. KVARTSHOLDIGE BERGARTER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Granitt/Gneis</li> <li>• Kvartsitt-/skifer</li> <li>• Glimmerskifer</li> </ul>
<b>3. LYSE, SURE VULKANSKE BERGARTER</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ryolitt</li> <li>• Kvartskeratofyr</li> </ul>		<b>8. FELTSPATISKE BERGARTER</b>
<b>4. ANDRE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikrokrystallin kvartsitt</li> <li>• Fyllitt</li> <li>• Kvartsskifer</li> </ul>		<b>9. ANNET/UIDENTIFISERT</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalkstein (<i>ren</i>) og marmor</li> <li>• Andre ikke reaktive (<i>også frikorn</i>)</li> <li>• Porfyrer</li> <li>• Kvartsfrie mylonitter</li> </ul>
<p>Typisk kornstørrelse for kvarts; &lt; 60 µm <b>UNNTAK: Sandstein</b></p>		<p>Typisk kornstørrelse for kvarts; &lt; 130 µm</p>

*Bergarts nomenklature; Gjelle og Sigmond, (1994).*

### 1.1.6.1 Generelle kommentarer og forklaringer vedrørende forslag til ny bergartsliste

#### **Klassifisering og nomenklatur av bergarter**

Bergartsnomenklatur følger internasjonalt anerkjent faglitteratur fra både artikler og håndbøker (Spry 1969; Streckeisen 1979; Winkler 1979, Pettijohn *et al.* 1987). Opplysninger om norsk bergartsnomenklatur hentet fra Gjelle & Sigmond (1994).

#### **Mineralnomenklatur**

For alkalireaktive komponenter er benevnelsen "kvarts" benyttet, da dette er situasjonen i de aller fleste tilfeller i Norge. Internasjonalt forekommer også andre varianter av reaktivt SiO<sub>2</sub> (Kastner 1979; Heaney 1994) som er vist å være reaktive under pessimistiske forhold. Vedrørende rapportering av bergarter skal det benyttes *offisiell* navngiving av mineraler og ikke noe annet (f.eks. Blackburn & Dennen 1997). For bruk i tabeller, på bilder osv. brukes eventuelt forkortinger etter Kretz (1983).

#### **Omdannelse og reaktivitet**

Omdanning ved høy grad (P,T) impliserer en minkende grad av reaktivitet for alle risikobergarter. Høy omdanning kan medføre at reaktiviteten forsvinner. Lavere grad av omdanning eller diagenese vil ikke ha tilsvarende effekt; dvs. risikobergartene forblir reaktive. Grunnen til forskjellen er uklar, men har muligens å gjøre med vanninnholdet, krystallinitet, samt defekter i mineralstrukturen og kornstørrelse av det involverte silika (Dove & Rimstidt 1994; Dove 1995). Om retrograd omvandling eller/og forvitring betyr noe for reaktiviteten er ikke dokumentert, men siden prosessene ofte leder til sprekkdannelse, løsning eller utluting av mineraler, kan det medføre at mineralene blir gjort lettere tilgjengelig for betongens alkalier eller for andre skadestoffer.

#### **Sjiktsilikater og reaktivitet**

Det er flere faktorer som tyder på at bergarter som har et 'betydelig' innhold av sjiktsilikater, har et økt potensiale for alkalireaksjoner. Mekanismen er i dag uklar, men er blitt beskrevet tidligere fra Canada for Flogopitt (Grattan-Bellew & Beaudoin 1980). Også muskovitt påvirker reaktiviteten, mens leirmineraler også sannsynligvis spiller en rolle (Broekmans & Jansen 1997).

### 1.1.6.2 Kommentarer vedrørende de ulike bergartsgruppene

## Klasse 1; Alkalireaktive bergarter

### 1. SEDIMENTÆRE BERGARTER

**Sandstein** klassifiseres i denne klassen uansett mineralogisk sammensetning. Innhold av kvarts, feltspat og lithiske fragmenter bestemmer om det er arkose (=psammitt), arenitt eller lithisk sandstein.

Sandstein, sedimentære slambergarter og slamskifre (argillitter) samt gråvakke tilhører geologisk sett samme bergartsfamilie (Pettijohn *et al.* 1987). Klassifisering er basert på innhold av kvarts, feltspat, lithiske fragmenter samt innhold av matriks (Dott 1964):

Sedimentære slambergarter og slamskifre der andel av matriks  $<30\mu\text{m}$  er  $>75\text{vol}\%$

- Skifrig **leirstein** (*shale*) inkluderer skifrig slamstein og skifrig **siltstein** - fellesnavn: skifrige slambergarter
- Leirskifer (*slate*) inkluderer slamskifer og siltskifer - fellesnavn: slamskifre
- **Gråvakke**; sedimentære slamsandsteiner bestående av 15-75% grunnmassepartikler  $<30\mu\text{m}$ . Inneholder dårlig sorterte kvarts-, feltspat- og bergartsbruddstykker i en slamgrunnmasse. Metagråvakter inngår også i denne klassen.

Denne gruppen inkluderer også; konglomerater og sedimentære breksjer, og på tvers av geologisk klassifisering; **Mergelstein-/skifer** (også metamergel)

### 2. MYLONITT/KATAKLASITT (Kvartsholdige)

#### Deformerte bergarter

- alle slags mylonitter inneholdene  $>5\%$  kvarts, inklusiv proto- og ultramylonitter
- alle slags kataklasitter inneholdene  $>5\%$  kvarts, inklusiv proto- og ultrakataklasitter, og tachylitter.
- **Mylonittgneis** med subkorndannelse som ikke viser tegn til rekrystallisering
- omdannede slike bergarter med lignende strukturelle og teksturelle egenskaper, altså inklusiv blastomylonitter osv.

*Merk; Basiske mylonitter som ikke inneholder kvarts (eller i små mengder) klassifiseres i gruppe 5, eller i gruppe 8 dersom disse er feltspatiske.*

### 3. LYSE, SURE VULKANSKE BERGARTER

- uansett tekstur: jevnkornet, porfyrisk, poiklittisk, poikiloblastisk uansett mineralogi eller bulkkjemi (etter CIPW-norm), men må ha lavt innhold av mørke mineraler samt betydelig innhold av kvarts.
- slike omdannede bergarter med lignende strukturelle og teksturelle egenskaper, altså inklusiv metarhyolitter osv.
- Metaryolitter klassifiseres som reaktive så lenge de ikke er så metamorfe at de har fått økt kornstørrelse, slik at de må klassifiseres som tvilstilfeller eller ikke reaktive.

#### 4. ANNET

Andre bergarter med mikrokrySTALLIN kvarts med kornstørrelse  $<60\mu\text{m}$  som ikke passer inn i bergartsklassene ovenfor. Kvartskornstørrelse er viktig for reaktivitet; jo mindre korn, dess høyere reaktivitet. Dessuten kan dårlig krystallinitet med mange dislokasjoner i krystallgitteret være en grunn for økt reaktivitet. Dog vil "strained" kvarts ikke være grunnlag for å klassifisere en bergart som alkalireaktiv.

- **MikrokrySTALLIN kvartsitt** (kvartskorn $<60\mu\text{m}$ ), ofte deformert med subkorndannelse.
- **Fyllitt**
- **Kvartsskifer** med kvartskornstørrelse  $<60\mu\text{m}$

Utenlandske bergarter vil også kunne inngå i denne klassen:

- ustabil  $\text{SiO}_2$ -forbindelser: tridymitt, kristobalitt, coesitt, (snøfnugg-) obsidian, melanophlogitt, glass av alle slag, osv.
- vannholdig og/eller dårlig krystallin: opal, kalsedon, flint, chert, kenyaitt, magadiitt, og inklusiv neogen/nydannet silikament i sandsteiner og lignende.
- slike omdannede bergarter med lignende strukturelle og teksturelle egenskaper, altså inklusiv hälleflinta, også løse korn av ethvert reaktivt silika, osv

#### Klasse 2; Tvilstilfeller

#### 5. TVILSTILFELLER

Kvartsrike ( $>20\%$  kvarts) bergarter der kvartskorn  $>60\mu\text{m}$  og  $<130\mu\text{m}$ , inkluderer ulike bergarter uansett opprinnelse. Betydningen av glimmer-mineraler i forbindelse med alkalireaktivitet er ikke avklart enda, men det er ting som indikerer at glimmer-mineraler eller andre sjiktsilikater gir økt alkalireaktivitet.

Inkluderer også kalksteiner med urenheter i form av finfordelt kvarts, eller hornfels med finfordelt kvarts (Oslo-feltet).

### **Klasse 3; Ikke alkalireaktive bergarter**

#### **6. MØRKE BERGARTER**

Relativt finkrystalline vulkanske bergarter med lite eller intet innhold av kvarts, eksempelvis; basalter. Klassen inkluderer også omdannede utgaver av disse, eksempelvis; grønnsteiner.

Inkluderer bergarter med svært lavt eller intet innhold av kvarts, eksempelvis; doleritt, gabbro, olivenstein, dunitt, amfibolitt, lherzolitt, pyroksenitt, hornblenditt, eklogitt. Også slike omdannede bergarter med lignende strukturelle og teksturelle egenskaper.

#### **7. KVARTSHOLDIGE BERGARTER**

Inkluderer grovkornete (kornstørrelse for kvarts  $>130\mu\text{m}$ ) felsiske bergarter, uansett tekstur og eventuell deformasjon (strained) av kvarts. Også uansett opprinnelse, øvrig mineralogi eller bulkkjemi; alle slags felsiske bergarter, eksempelvis: granitt, granodioritt, charnockitt, enderbitt, gneis, skifer, kvartsitt, syenitt, kalksilikater, skarn, noritt, charnockitt, anorthositt, mangeritt. Klassen inkluderer i tillegg frikorn av ikke-reaktiv kvarts som fra årer, osv. Også slike omdannede bergarter med lignende strukturelle og teksturelle egenskaper

#### **8. FELTSPATISKE BERGARTER**

#### **9. ANNET/UIIDENTIFISERT**

Andre ikke-reaktive bergarter, uidentifiserte bergarter som har et svært lavt kvartsinnhold, og/eller der kvartskrystallene er  $>130\mu\text{m}$ .

Denne klassen inkluderer også rene kalksteiner, marmor og porfyrer.

### ***1.1.7 Konklusjon vedrørende ringprøvning***

Det er observert og statistisk dokumentert store variasjoner i resultatene fra ringprøvningen mellom de ulike operatørene. Tellemetoden er rent statistisk sett funnet tilfredsstillende, men hovedårsakene til variasjonene er:

- Manglende samkjøring mellom operatører/ulike bakgrunn/erfaring med betongtynnslip
- Divergens i klassifisering av deformasjonsbergarter (finkornet gneis vs. mylonitt)
- Divergens i klassifisering i gruppen ”mulig reaktive” bergarter
- Ulike tolkninger av sandsteiner vs. granitt/grovkornet kvartsitt.

Gjennom en grundig felles faglig diskusjon av resultatene fra ringprøvningen, er det erfart at det er mulig å forklare de fleste av ringprøvningens variasjoner (tvilstilfeller og misoppfatninger). Man har også oppnådd en mer enhetlig utførelse av den petrografiske analysen. Erfaringer er nedfelt i et forslag til revidert bergartsliste for petrografisk analyse.

I fremtiden vil det være nødvendig med en tett dialog mellom aktører som utfører petrografisk metode for å samkjøre disse ytterligere. Tidligere parallellprøvning mellom to operatører har understreket viktigheten av samkjøring og felles dialog. Kontrollrådet har her et overordnet ansvar for å kreve økt samkjøring mellom godkjente operatører. Dette kan eventuelt effektueres ved obligatoriske parallellprøvninger, eksempelvis hvert halvår. Kontrollrådet har også et ansvar for å initiere opplæring og kursing av nye operatører.

Det må fortsatt stilles kritiske spørsmål til muligheten for å forbedre dagens petrografiske metode. Det må også vurderes om metoden kan forbedres ytterligere ved å supplere med kvantitative målinger.

Utarbeidelse av et detaljert bildeatlas vil være et viktig hjelpemiddel for å spesifisere de ulike bergartsgruppene ytterligere.

## **1.2 Bildeatlas**

*Marit Haugen, SINTEF Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong  
Jan Viggo Holm, NOTEBY*

### **1.2.1 Bakgrunn**

Som en oppfølger etter den grundige gjennomgang og diskusjon etter ringprøvningen, ble det klart at et viktig hjelpemiddel for å forberede dagens petrografiske analyse, er utarbeidelsen av et detaljert bildeatlas. Dette vil være et effektivt hjelpemiddel for nye operatører som ønsker å bli kjent med bergartsgruppene som inngår i den petrografiske analysen. I tillegg vil et slikt bildeatlas være et svært viktig fremtidig verktøy for eksisterende og nye operatører for en bedre felles forståelse av bergartsklassifiseringen og bidra til en mer enhetlig klassifisering av de ulike bergartene, for denne type undersøkelser. Dette vil forhåpentligvis forbedre dagens petrografiske metode og redusere variasjoner mellom operatører.

### **1.2.2 Utførelse**

De 9 nye bergartsgrupperingene er spesifisert i størst mulig grad (både kvalitativt og kvantitativt). Hver bergartsgruppe er dekket med bildeeksempler, i tillegg til at ulike mikrostrukturelle trekk er beskrevet og dokumentert med ytterligere bildeeksempler. Tvilstilfeller er også spesifisert og beskrevet, der det vil være vanskelig å klassifisere bergarter. SINTEF og NOTEBY har tatt bilder og spesifisert og beskrevet bergarter hver for seg. Prosjektleder har så vært med i en felles diskusjon og redigert dette sammen.

### **1.2.3 Resultater**

Bildeatlasen er utgitt som en egen publikasjon. Spesielt interesserte kan få et eksemplar ved henvendelse til PGL.

### 1.3 Ny kvantitativ metode

*Marit Haugen - SINTEF Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong  
Per Hagelia - Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling  
Børge Johannes Wigum - ERGO Engineering Geology*

#### 1.3.1 Bakgrunn

I forprosjektsrapporten vedrørende den petrografiske metode, konkluderes det med at det er ønskelig å utvikle en metode som er mer kvantitativ enn dagens metode (STF70 A93030, Lindgård et al., 1993). Den store spredningen i resultatene fra den petrografiske metoden som ble registrert i ringforsøket i dette prosjektet underbygger også dette. I tillegg er det også ønskelig med en petrografisk metode som best mulig gjenspeiler resultater fra den akselererte mørtelprismemetoden.

Dagens petrografiske metode, som bygger på en *kvalitativ* vurdering, har avdekket klare svakheter spesielt i evnen til å differensiere grad av reaktivitet hos mulige- og ulike grupper av reaktive bergarter. Utvikling av en ny *kvantitativ* metode vil være et viktig fremtidig verktøy for å forbedre og supplere dagens petrografiske metode. Det poengteres dog viktigheten av alltid også å foreta en kvalitativ vurdering.

En ny kvantitativ petrografisk metode utviklet i forbindelse med Wigums dr.ing. arbeid (1995<sub>a,b</sub>) har for kataklastiske bergarter (mylonitter og kataklasitter) vist gode sammenhenger med resultater fra den akselererte mørtelprismemetoden. I stedet for å foreta geologiske vurderinger for å klassifisere bergarter i ulike grupper, punkttelles tynnslipet for å måle kornstørrelsen for kvarts. Ut fra dette er det så mulig å regne ut midlere korndiameter for kvarts ( $d_{50}$ ) samt å få en verdi av total kornoverflate for kvarts ( $m^2/cm^3$ ).

I dette hovedprosjektet ble det derfor vurdert som svært interessant å vurdere denne metoden nærmere for å se på om tilsvarende sammenhenger også ble funnet for andre typer bergarter. Det ble også vurdert nødvendig å se på reproduserbarheten til metoden.

For å undersøke om metoden passet for andre typer reaktive bergarter, ble det ansett mest tids- og kostnadseffektivt å undersøke prøver der det allerede forelå tynnslip som allerede hadde blitt analysert ved den akselererte mørtelprismemetoden.

#### 1.3.2 Prøver og utførelse

Prosedyre for ny kvantitativ analysen er beskrevet i NORMIN 2000 forprosjektsrapport (1996), kap. 1.6.1 og 1.6.2, og vil ikke bli beskrevet nærmere her. Før analysene startet ble det benyttet en dag ved SINTEF i Trondheim, der metoden ble gjennomgått i detalj og diskutert. Det ble også i fellesskap foretatt prøvetellinger i tynnslip.

Arbeid utført ved Statens vegvesen inngår i deres interne prosjektet; "P-496 Bildeanalyse og database for steinmaterialer".

### 1.3.2.1 Reproduserbarhet

For å undersøke metodens reproduserbarhet ble det benyttet 5 tynnslip av kataklastiske bergarter som allerede hadde vært analysert av Wigum (jfr. Wigum's dr.ing. arbeid, 1995<sub>a,b</sub>). Disse slipene ble så analysert av Marit Haugen ved SINTEF Bygg og miljøteknikk og Per Hagelia, Statens vegvesen og sammenstilt med opprinnelige resultater.

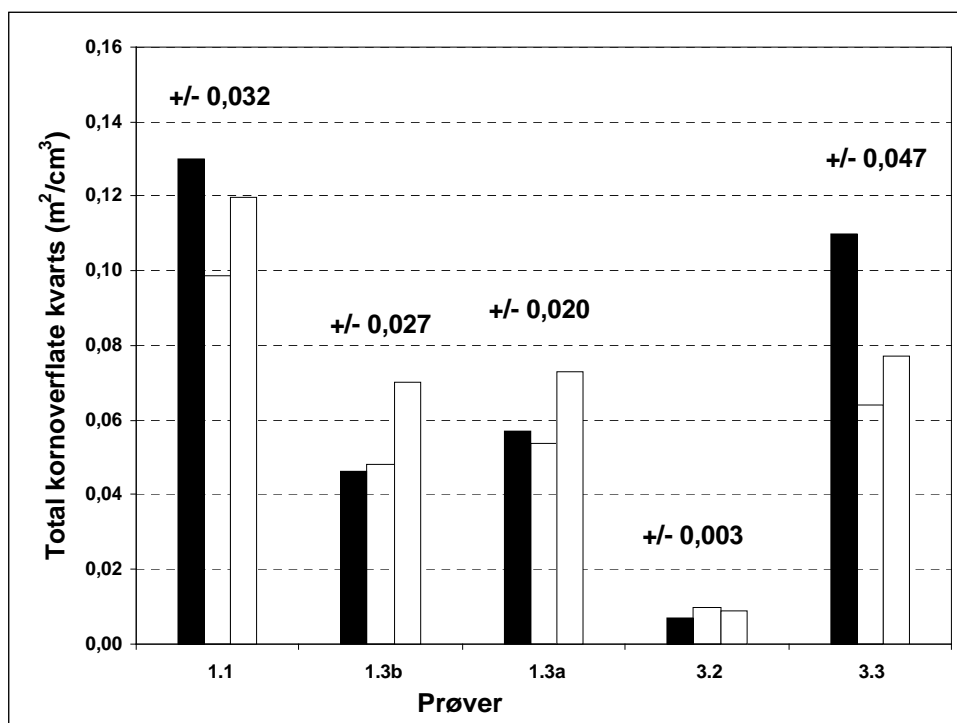
### 1.3.2.2 Analyser av nye bergarter

I tillegg til de 14 pukk-prøvene som forelå fra Wigums dr.ing. arbeid, ble det utført nye kvantitative punkttellinger av 7 tilslagsprøver (3 pukk- og 4 sand-prøver) ved SINTEF og 8 pukk-prøver ved Statens vegvesen. Som bakgrunn for å regne ut total kornoverflate for kvarts benyttet SINTEF et estimat for kvartsinnhold basert på visuelt estimat. Statens vegvesen derimot baserte kvantifiseringen av kvarts vha XRD målinger tilsvarende det som ble benyttet i Wigums arbeid, tiltross for at ulike XRD-instrumenter ble benyttet.

## 1.3.3 Resultater

### 1.3.3.1 Reproduserbarhet

Resultatene fra ringprøvingen av 5 tilslagsprøver er vist i figur 1.3.1. Som det går frem av disse få prøvene, ligger verdien for to ganger standardavviket, gjennomsnittlig i størrelsesorden 0,026.



Figur 1.3.1. Tre parallellprøvinger av fem ulike prøver. Resultater av punkttelling av tynnslip med utregning av total kornoverflate ( $\text{m}^2/\text{cm}^3$ ) av kvarts. Verdien for to ganger standardavviket er antydnet med +/-.

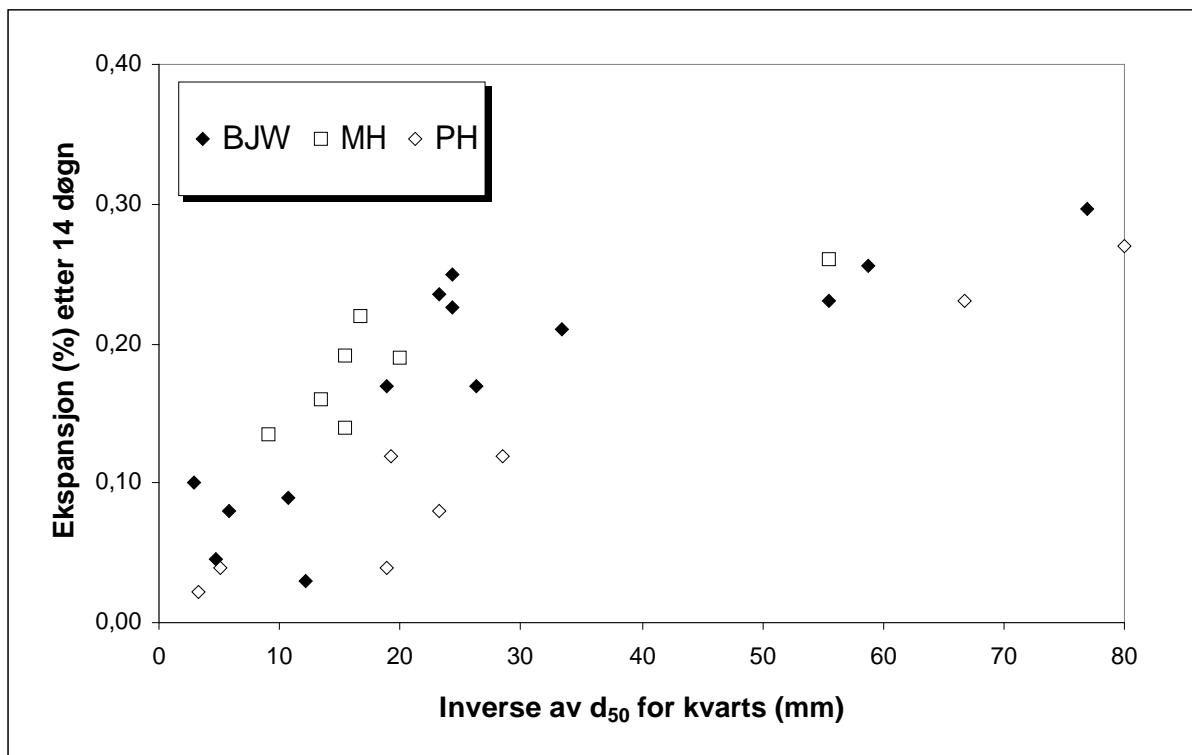
### 1.3.3.2 Analyser av nye bergarter

I tabell 1.3.1 er hovedresultatene for de totalt 29 bergartene som nå er analysert ved ny kvantitativ metode. Dette er både resultatene for de 14 kataklastiske bergartene som ble analysert i forbindelse med Wigums dr.ing. arbeid, og de nye resultatene fra de 7 bergartene som ble analysert ved SINTEF, og de 8 bergartene som ble analysert ved Statens vegvesen.

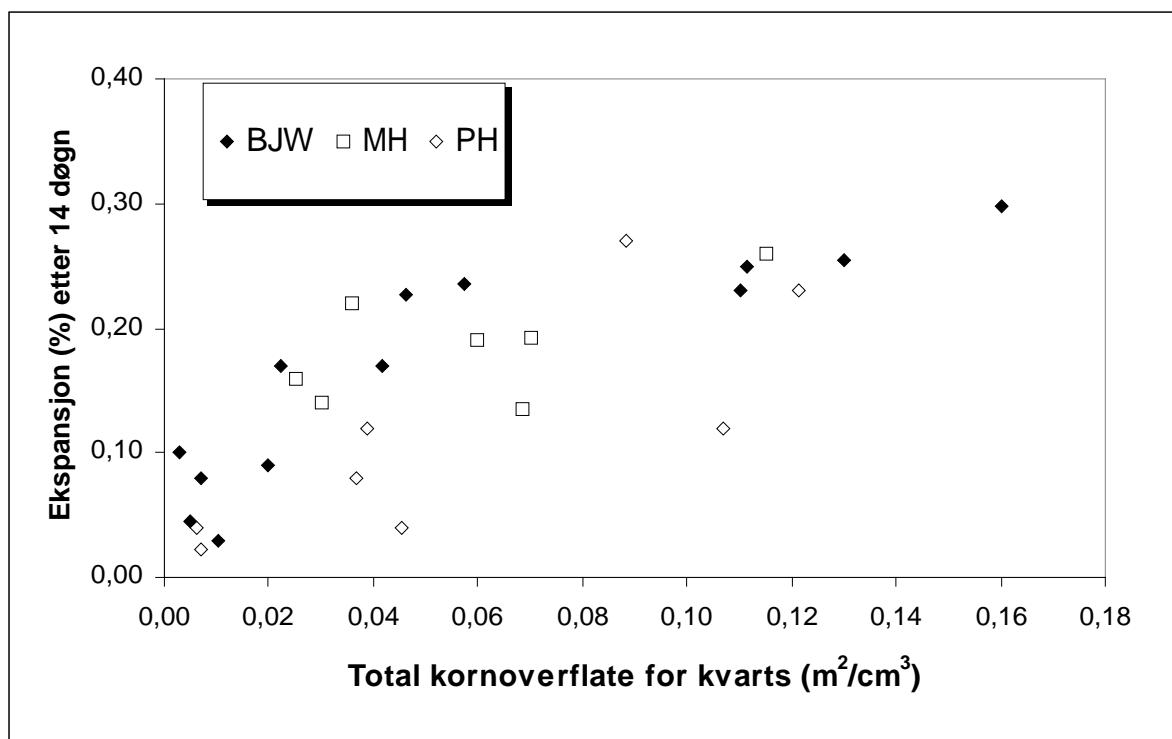
I figurene 1.3.2 og 1.3.3 er resultatene for  $1/d_{50}$  av kvarts og total kornoverflate for kvarts ( $m^2/cm^3$ ) sammenlignet mot resultater for akselerert mørtelprismeeekspansjon etter 14 dager. Det kan observeres at punktene for de nye analysene følger samme logaritmiske sammenheng som tidligere har blitt presentert av Wigum. Dog ligger enkelte av de nye analysene, i hovedsak resultater fra statens vegvesen, høyere i verdiene for  $1/d_{50}$  og total kornoverflate for kvarts ( $m^2/cm^3$ ) enn hva som skulle være forventet ut fra korresponderende ekspansjon.

Tabell 1.3.1 Oversikt over tilslagstyper analysert ved ny kvantitativ analyse.

Opera- tør	Prøve nr.	Bergartstype	$1/d_{50}$ (mm)	Total kornover- flate for kvarts ( $m^2/cm^3$ )	Mørtel- prisme ekspansjon etter 14 døgn (%)
BJW	1.1	Mylonitt	58,82	0,130	0,26
BJW	1.2	Ultramylonitt	76,92	0,160	0,30
BJW	1.3a	Mylonitt	23,26	0,057	0,24
BJW	1.3b	Mylonitt	24,39	0,046	0,23
BJW	1.4	Porfyrisk granitt	2,86	0,003	0,10
BJW	2.1	Kataklasitt	33,33	0,297	0,21
BJW	3.1	Blastomylonitt	18,87	0,022	0,17
BJW	3.2	Mikrogranitt	5,88	0,007	0,08
BJW	3.3	Mylonitt	24,39	0,112	0,25
BJW	4.1	Mylonitt	55,56	0,110	0,23
BJW	4.2	Gneis	10,64	0,020	0,09
BJW	5.1	Mylonitt	26,32	0,042	0,17
BJW		Gneis	4,76	0,005	0,05
BJW		Gneis	12,20	0,011	0,03
MH	20051	Metarhyolitt	15,38	0,030	0,14
MH	20173	Mylonitt/gneis/granitt	13,33	0,025	0,16
MH	20238	B.a. med fin til mikroskryst. kvarts/myl./gneis	16,67	0,036	0,22
MH	20129	Metagråvakke	20,00	0,060	0,19
MH	20085	Metagråvakke	55,56	0,115	0,26
MH	AAN136	Finkornet kvartsitt	9,09	0,069	0,14
MH	AAN146	B.a med fin til mikro kvarts	15,38	0,070	0,19
PH	229/95	Mylonitt	66,67	0,122	0,23
PH	230/95	Rhyolitt konglomerat	80,00	0,088	0,27
PH	275/95	Mylonitt	18,86	0,046	0,04
PH	276/95	Mylonitt	23,25	0,037	0,08
PH	277/95	Metarhyolitt	28,57	0,107	0,12
PH	278/95	Metarhyolitt	19,23	0,039	0,12
PH	279/5	Granittisk gneis	5,00	0,006	0,04
PH	280/95	Granittisk gneis	3,33	0,007	0,02



Figur 1.3.2. Sammenheng mellom inverse av  $d_{50}$  (mm) - og mørtelprisme ekspansjon etter 14 dager.



Figur 1.3.3. Sammenheng mellom total kornoverflate for kvarts ( $m^2/cm^3$ ) - og mørtelprisme ekspansjon etter 14 dager.

### 1.3.4 Diskusjoner

Før analysene av ny kvantitativ metode startet, ble det foretatt en grundig gjennomgang av metoden. Dette avdekket at flere av problemene som var skissert i forprosjektrapporten kunne elimineres. Dette gjelder blant annet punktene om at det skulle være vanskelig å utføre metoden på sedimentære bergarter, ryolitt og fyllitt, og at metoden ville være meget tidkrevende. Det vites dog ennå ikke hvordan metoden kan benyttes for sandsteiner.

Et problem med metoden er likevel vanskeligheten med å skille kvarts- og feltspatkorn, spesielt i de minste kornstørrelsene. Dette vil kanskje ikke ha så stor betydning da kvarts og feltspat trolig vil for de minste kornstørrelsene ha tilnærmet lik kornstørrelsesfordeling. Ved hjelp av farveteknikker vil det kunne være mulig å skille kvartskorn fra feltspat. Dette bør undersøkes nærmere.

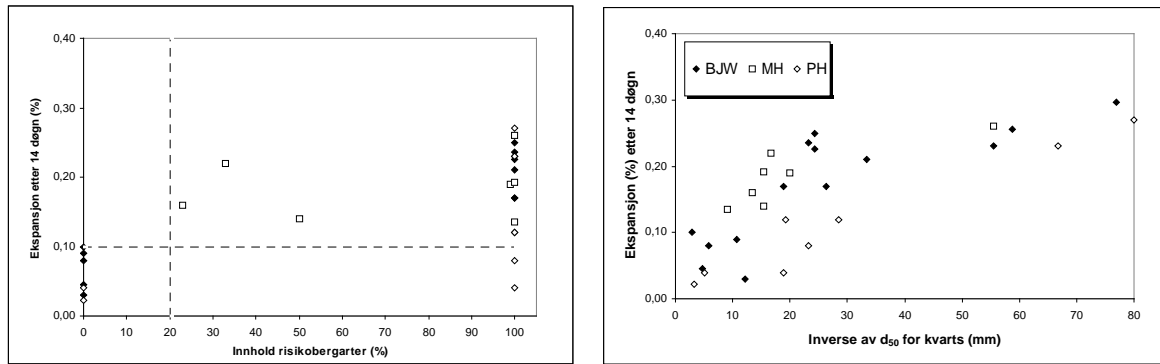
Det må også påpekes at ved svært finkornete bergarter vil trolig minste kvartskornstørrelse være mindre enn det som kan registreres i et optisk mikroskop. Ved undervurdering av minste kornstørrelse av kvarts vil også verdiene for  $1/d_{50}$  av kvarts og total kornoverflate for kvarts ( $m^2/cm^3$ ) reduseres signifikant. Dette kan være en av årsakene til at det observeres logaritmiske sammenhenger isteden for lineære.

Ved utregning av verdiene for total kornoverflate for kvarts ( $m^2/cm^3$ ), inngår mengde kvarts i prøven som en viktig parameter. For resultatene i dette prosjektet er kvartsmengden enten bestemt vha XRD-analyser eller estimert ut fra tynnslip. Begge metodene innebærer usikkerheter. Dersom man kun benytter resultatene for  $1/d_{50}$  av kvarts slipper man unna denne vurderingen av kvartsmengde, og dermed usikkerheten.

Ekspansjonsresultatene for prøvene som er analysert ved ny kvantitativ petrografisk metode er utført ved to ulike laboratorier. I kapittel 2.2 i denne rapporten er det vist ved ringprøvning mellom tre laboratorier at det er tildels store variasjoner mellom disse. Dette kan være en medvirkende forklaring til hvorfor prøvene fra Statens vegvesen ligger relativt lavt i ekspansjon i forhold til registrerte kvantitative petrografiske parametre. Ekspansjonsforsøkene for disse 8 prøvene ble undersøkt ved et annet laboratorium enn de øvrige.

I ringprøvningen er det registrert en relativt stor variasjon. Etter at analysene var gjennomført, ble det påpekt at punkttelling av 200 punkter muligens er i minste laget. Ved å øke mengder punkter, til eksempelvis 300, vil metoden bli litt mer tidkrevende, men det vil da være mulig å begrense den statistiske tellerusikkerheten.

På neste side (figur 1.3.4) er diagrammet fra figur 1.3.2 satt ved siden av et diagram som presenterer resultatene fra ny kvantitativ metode, ut fra hvordan de ville ha blitt klassifisert ved dagens petrografiske metode. Det kan tydelig observeres at ny kvantitativ metode, til tross for relativ stor spredning, gir et mye bedre bilde på sammenhengen mellom petrografi og ekspansjon. Dette er spesielt tydelig i situasjoner der man ved dagens metode klassifiserer en prøve med 100% risikobergarter, som viser stor spredning i ekspansjon. Disse to figurene viser også tydelig behovet for å vektlegge ulikt ulike typer reaktive bergarter, som ikke er gjort i dagens petrografiske metode. Ny kvantitativ metode kan her være et viktig hjelpemiddel som et supplement til dagens metode.



Figur 1.3.4. Diagram til venstre: Resultater fra ny kvantitativ metode fremstilt ut fra hvordan de ville ha blitt klassifisert ved dagens petrografiske metode med inndeling i prosentandel risikobergarter. Diagram til høyre: Tilsvarende resultater ved ny kvantitativ metode (figur 1.3.2).

I de neste underkapitler av diskusjonen er det også gjort rede for hvordan vurdering av andre ulike forklarelsesvariabler, fremtidig kan bidra til å øke mulighetene for ny kvantitativ metode til å prediktere ekspansjon.

### 1.3.4.1 Innverknad av glimmer på alkalireaktivitet

Per Hagelia - Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling

Når ein plottar opp dei nye resultatata i diagramma frå Wigum; 1) NBRI eksp (14 dagar) mot “Total kornoverflate for kvarts” ( $\text{m}^2/\text{cm}^3$ ), og 2) NBRI eksp (14 dagar mot “Invers av  $d_{50}$  for kvarts” (1/mm), så avviker nokre nye resultat frå hovudtrenden til Wigum (totalt 4-5 punkt ligg *under kurvene* til Wigum). Årsaka til dette kan vere fleire.

- Kvartsinnhald i %. Om ein overestimerer kvartsinnhaldet vil total kvartsoverflate bli tilsvarande høg, og punkta vil få høge verdiar og dermed ligge under kurva.
- Nøyaktigheit i oppmåling av kvartsdiametrar, og særleg dei finaste fraksjonane. Dersom ein overestimerer dei finare fraksjonane vil det spesifikke kornarealet kunne slå kraftig ut på det totale kvartsarealet (og  $d_{50}$  også) og effekten vil også i dette tilfellet vere at punkt blir liggande under kurva til Wigum.
- Innverknad av andre mineral enn kvarts. M. Broekmans ved NGU har påvist at skiktsilikat som biotitt og muskovitt kan ha ein katalytisk effekt på løysingsevna til kvarts. Om dette er tilfelle skulle glimmerfattige/-frie prøver vere mindre reaktive enn glimmerrike.

#### Undersøking av innverknad av glimmer

I prosjektmøte for NORMIN 2000, Alkalireaksjoner i betong, Aktivitet A4 Ny kvantitativ metode (1998-09--09) fekk underteikna i oppdrag å undersøke nærmare om glimmer kan føre til auka alkalireaktivitet.

På diagrammet NBRI ekspansjon versus total kornoverflate for kvarts (T) blei det vald ut ein travers (*Travers 1*) med 6 prøver som har omtrent same verdiar for T, men som har mørtelprisme-ekspansjon på mellom 0,04 og 0,23. *Travers 2* blei vald ut som “kontroll” ,og har noko mindre variasjon i mørtelprisme-ekspansjon. Resultata er plotta opp i Tabell 1.3.2 og 1.3.3.

Tabell 1.3.2 Oversikt over prøver med ganske lik total kornoverflate for kvarts og sterkt varierende mørtelprismeeekspansjon. % glimmer er estimert ved semi-kvantitativ XRD for alle prøver bortsett frå MH 20238 (visuell estimering i tynnslip). \* Gneis/granitt=60 %; bergart m/fin-mikrokrystallinsk kvarts=25%; mylonittisk gneis=10 %.; diverse “ikkje reaktive”=5%

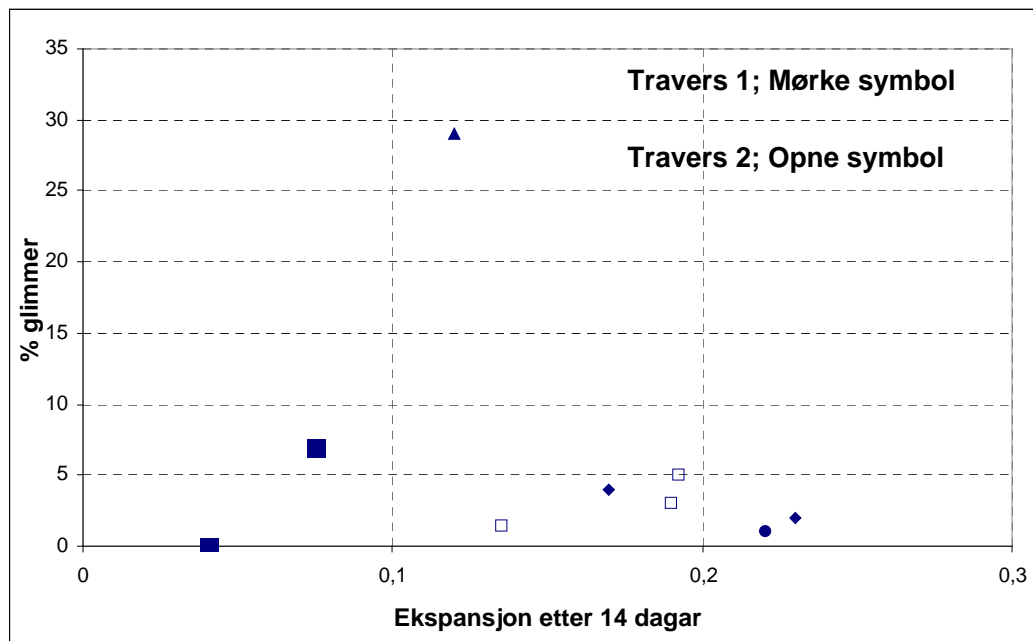
Travers 1 (prøver)	NBRI eksp. (14 d)	Total kornareal for kvarts	Bergart	% Glimmer
MH 20238	0,22	0,036	Blanda*	1 (biotitt)
BJW 1.3b	0,23	0,046	Mylonitt	2 (mu>biot)
BJW 5.1	0,17	0,042	Mylonitt	4(?)
PH 278/95	0,12	0,039	Metarhyolitt	29 (muskovitt)
PH 276/95	0,08	0,037	Mylonitt	7 (biotitt)
PH 275/95	0,04	0,046	Mylonitt	0

Tabell 1.3.3 Oversikt over data for Travers 2. Glimmerinnhald estimert visuelt i tynnslip.

Travers 2 (prøver)	NBRI eksp. (14 d)	Total kornareal for kvarts	Bergart	% Glimmer
MH 20129	0,19	0,060	Metagråvakke	3 (muskovitt)
MH AAN 136	0,135	0,069	Kvarstsitt., finkorna	1-2 (muskovitt)
MH AAN 146	0,192	0,070	B.a m/fin-mikrokvarts	5 (muskovitt)

I prøvene 275/95 og 276/95 frå Statens vegvesen kunne det i blant vere vanskeleg å skilje mellom mikrokrySTALLINSK kvarts og feltspat. Dersom feltspat dominerer kraftig over kvarts kan dette vere årsaka til at prøvepunktta plottar under hovudtrenden til Wigum, og dei to prøvene blei mikroskopert på nytt. Det viser seg at det ikkje var vanskeleg å identifisere mykje kvarts med kornstorleik omkring 60 mikron, og dette samsvarer omtrentleg med  $d_{50}$  for begge prøvene. Analysane av desse to prøvene har dermed neppe større usikkerheit enn for det samla prøvematerialet.

Figur 1.3.5 viser ei samanstilling av alle data. Generelt er det ingen klar trend, og dette fortel at det er fleire variablar som verkar inn. Det er likevel verd å merke seg at to prøver i kvar serie (som kvar for seg representerer nokså like bergartar, men der glimmerinnhaldet varierer) tyder på at innhaldet av glimmer kanskje påverkar reaktiviteten (sjå figurforklaringa for fleire detaljar). Dersom ein samanliknar verdiane for T og held dette saman med % glimmerinnhald så kan det sjå ut til at ei auke på ca. 5 % glimmer kan føre til ei auke på 0,05-0,1% mørtelprisme-ekspansjon. Det er likevel for få datapunkt for kvar bergartstype til å feste alt for stor lit til denne tolkinga.



Figur 1.3.5 Samlediagram for undersøkinga. Travers 1 har Total kornoverflate for kvarts (T) = 0,041 +/- 0,005. Travers 2 har T = 0,065 +/- 0,005. Generelt ingen opplagt samanheng mellom glimmerinnhald og mørtelprismeeekspansjon. Men i meir einsarta bergartar er det likevel sannsynleg at glimmer kan ha ein effekt. Merk at store mørke firkantar (275/95 og 276/95) er omtrent same type mylonitt, og indikerer at auka glimmerinnhald (biotitt) bidrar til auka mørtelprismeeekspansjon. Vidare ser ein tilsvarande systematikk for AAN 136 til AAN 146. (opne firkantar; finkorna kvartsrike til kvartsittiske bergartar; muskovittglimmer).

**Konklusjonar**

Når ein ser på alkalireaktivitetet til tilslag i lys av 14 dagars ekspansjon “Total kornoverflate for kvarts” kjem det klart fram at;

- 1) Det er ikkje nokon generell samanheng mellom glimmerinnhald og ekspansjon for prøver med omtrent lik “Total kornoverflate for kvarts”.
- 2) Parallellar av prøver frå omtrentleg same bergartstypar (dvs a) 275/95 & 276/95, og b) AAN 136 & AAN 146), der glimmer varierer noko, og som elles har omtrent lik total kornoverflate for kvarts, tyder likevel på at ekspansjonen aukar når glimmerinnhaldet aukar.
- 3) Prøvematerialet er truleg enno for lite for å kunne nytte “glimmerffekten” i praktisk tilslagsevaluering.

### 1.3.4.2 Forslag til videre undersøkelser

*Maarten A.T.M. Broekmans - Norges geologiske undersøkelse*

I sin doktoravhandling har Wigum (1995<sub>a</sub>) gjort et bra forsøk på å systematisere forskning vedrørende alkalireaksjoner. Han har undersøkt flere mylonittprøver, og har publisert grafer som viser forhold mellom relativ ekspansjon i % versus (1) totalt kvartarsareal i  $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-6}$ , og (2) invers av gjennomsnittlig kvartskorndiameter eller  $(d_{50})^{-1}$ -verdi i  $\text{mm}^{-1}$ . Grafene viser et logaritmisk, eller kvadratisk sammenheng, med en rimelig bra korrelasjonsfaktor opp til  $R^2=0,89$ . Dessverre mangler det en forklaring i geokjemiske eller reaksjonsmessige termer (Wigum 1995<sub>b</sub>).

Nye resultater fra ringundersøkelsen i dette prosjektet ble plottet inn i de to grafene, og de nye punktene passer rimelig med de opprinnelige. Likevel opptrer det klare forskjeller, og noen av de punktene ligger utenfor den generelle trenden. Dette gjelder også for to prøver (1.4 henholdsvis 2.1) hos Wigum (1995<sub>b</sub>). Wigum argumenterer at sine prøver har en noe avvikende mikrostruktur, som også gjelder for de nyundersøkte prøver. Om det er ekte forskjeller i de undersøkte bergartene eller kunstige på grunn av målemetoden eller målefeil, bør undersøkes videre. Resultatene fra ringanalysen gjør det klart at i noen tilfeller er overflateareal hos kvarts ikke den eneste parameter som styrer alkalireaktiviteten.

Overflateareal av kvarts er bare en av flere parametre som styrer oppløsning av kvarts; det finnes i tillegg seks/sju andre uavhengige parametre (Dove & Rimstidt 1994). I flere tilfeller har det blitt påvist en klar, eller mulig sammenheng, mellom reaktivitet og prøvers mineralogi (Hadley 1961; Grattan-Bellew & Beaudoin 1980; Goguel 1994; Gillott & Rogers 1994; Thaulow *et al.* 1996; Broekmans & Jansen 1998).

Det ovenstående impliserer at det er behov for videreførende grunnforskning.

## **Konkrete forslag for teknikker**

### *Petrografi*

Tilslagsmaterialers mineralogisk sammensetning bestemmer i viktig grad både type og måte alkalireaksjoner tilkjennegir seg på. Dessuten er det velkjent at noen mineraler påvirker poreløsningers pH. Det ville være interessant å sammenligne prøvers innhold for forskjellige mineraler med ekspansjon. Blant de mest interessante kombinasjoner finnes: (ekspansjon mot...) kalifeltspat, plagioklas, sercitt eller muskovitt, biotitt, phlogopitt, lavgradige leirmineraler, alkaliarnfiboler, osv. Disse undersøkelser utføres ved bruk av et vanlig petrografisk mikroskop med både på- og gjenlys.

Man kan også plote andre egenskaper som sprekkeantall per  $\text{mm}^2$ , total omvandlingsgrad og lignende. Disse undersøkelser utføres med fluorescensmikroskopi ved bruk av impregnerte tynn- og planslip. Prøvene impregneres under vakuum slik at selv de minste porer blir helt fylte med en høykapillær epoxy harpiks. Et innblandet fluorescensmiddel lyser lysegrønt under belysning med blå-violett lys. For å være sikker på at harpiksen gjennomtrenger porene fullstendig blir prøven tørket meget forsiktig slik at det ikke oppstår nye tørkningssprekker.

Et mikroskop utstyrt med spesielle filtre viser et bilde der bakgrunnen er svart, og alt som er impregneret lysegrønt. Det vises porøsitet, hull inklusiv åpenslipte innslutninger, sprekker, spalteplan og lignende helt ned til  $1\mu\text{m}$ , kornrensere mellom tvillingslameller i feltspat og sonering i allanitt og zirkon, osv. Det kommer fullstendig an på prøveprepareringen om det lykkes med metoden, og særlig med nedslipingen til den riktige tykkelsen.

#### *Vanninnhold, flyktige bestanddeler*

Vann spiller en vesentlig rolle for alkalireaksjoner. Dette gjelder både i forbindelse med transport av alkalier mellom sementpasta og tilslag, for videregående hydratering av reaksjonsproduktene med påfølgende svelling, og for transport av hydratert silikagel ut fra betongen. Mineraler som ofte er observert sammen med alkalireaksjoner er blant annen ettringitt/thaumasitt ( $\text{Ca}_6[(\text{Al},\text{Si})(\text{OH})_6]_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O} | (\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), portlanditt ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), og gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); alle inneholder betydelige mengder vann.

Vann opptrer ellers i poresystemet som fritt vann, til dels mer eller mindre absorbert på poreveggen. Jo nærmere vannmolekylene er til poreveggen, dess mer bundet eller dess mindre fri bevegelige er de. Mindre bevegelig enn porevannet er vann som er innebygget i mineralenes krystallstruktur som krystallvann ( $\cdot\text{H}_2\text{O}$ ). Hvor sterk bindingen er bestemmes av vannets omgivelse i mineralet. Porevann (under visse forhold også krystallvann) blir brukt for å skysse de reagerende bestanddelene i alkalireaksjonen.

Sterkest bundet vann som opptrer i mineraler er hydroxylgrupper ( $\text{OH}^-$ ), som utgjør en vesentlig del i strukturen. I kvarts eller i andre mineraler finnes det ofte såkalte silanolgrupper der fire  $\text{H}^+$  erstatter en  $\text{Si}^{4+}$  (Wilkins & Sabine 1973). Det koster forholdsvis mye energi for å løse slike vanntyper. Hvis det skjer da blir mineralstrukturen faktisk ødelagt, som gjør at resten blir lettere angrepet av alkalireaksjon.

Alle disse vanntyper kan måles vha. DTA/TGA, ved at en liten mengde pulver fra prøvene blir oppvarmet til f.eks. 1050EC. I løpet av oppvarmingen måles kontinuerlig prøvevekten samt energiforbruk. De resulterende kurvene viser vekttap eller -økning ved økende temperatur (TGA-delen) og på samme skala varmeforbruk (DTA). Vekttap med vedkommende varmeforbruk forklares f.eks. som fordampning av flyktige bestanddeler (som vann), mens vektøkning med samtidig varmeproduksjon kan forklares som oksidasjon.

Sett fra det synspunktet at vann er vesentlig i alkalireaksjoner er det interessant å vite noe mer om vannet i en rekke spesifikke reaktive bergarter som mylonitt, sandstein, osv. Med DTA/TGA undersøker man vanninnholdet spesifikt per type for hele bergarten, som gir et generelt inntrykk. Alternativt kan man også bruke infrarødmetoder som FTIR eller/og Raman. For å få mer detaljerte opplysninger fra tynnslip kan man imidlertid koble slikt utstyr til et mikroskop og måle vanninnhold i et enkelt korn eller spesifikke områder i kornet. Dette er veldig viktig for å skjønne hvordan oppløsningsprosessen virker, og hvilke deler av korn i hvilke bergarter er reaktive eller/og ikke-reaktive.

### *Alkali-innhold og kjemisk sammensetning*

Alkalireaksjoner er kjemiske reaksjoner, og det er alminnelig akseptert at disse styres av alkali-innholdet i sementen. Derimot ble det vist nylig, i et Nederlandsk tilfelle, at alkaliene stammet fra tilslaget (Broekmans & Jansen 1997, 1998). Slik forskning er opp til nå blitt utført i liten grad i Norge, og det er derfor meget interessant å undersøke norsk AAR-skadet betong på samme måten, samt potensiell reaktiv tilslag.

De viktigste elementene (såkalte hovedelementer) som skal måles er da  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -total som total jerninnhold,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$  og  $\text{Cl}$ , og i tillegg 'elementene'  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , LOI (glødetap) og  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ . I noen tilfeller er det aktuelt å analysere  $\text{NH}_4^+$  eller total-N også. I tillegg er det noen sporelementer som kan være av interesse, blant annen: As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, og Zn. Dessuten er Li og B særlig interessante på ulike grunner. I enkelte tilfeller i utlandet tilsettes Li-salter mørtel for nye konstruksjoner i håpet at man unngår alkalireaksjon, og dermed blir det interessant å forske hva som skjer med dette elementet i sporemengder i skadet betong. Likedan er B interessant: det opptrer gjerne i noen viktige leirmineraler (som kan ha en katalytisk virkning på silikaløsning), og det spiller dessuten en rolle i kompleksforming ved løsning av silika under lavgradige geologiske (ie. diagenetiske) forhold, som under omkrystallisering av sandstein.

Betongprøver kan analyseres ved XRF eller/og ICP-AES for hoved- og sporelementer, med ionselektive elektroder ISE for  $\text{Cl}^-$  og eventuell  $\text{F}^-$ , og våtkjemiske metoder. Ved smart valg av oppslutningsmetoden og -kjemikalier er det mulig å analysere enkelte bestanddeler i prøvene som f.eks. bare sementpastaen og ikke tilslaget. Valg av oppslutningsmetoden skjer etter petrografisk analyse av både tynn- og planslip. Oppslutningsmetoden må sannsynligvis justeres for norske materialer. Slike analyser gir opplysninger om (del-) prøver i sin helhet, men ikke per mineral eller lignende. Detaljeringen er altså på noen måte begrenset.

Mikrosondedata gir derimot opplysninger om omtrentlig kjemiske detaljer på mikromålestokk, dvs. enkelte mineralkorn. Dataene er vesentlig for full begrep av alkalireaksjonen. Det brukes polerte tynnslip, og det vil være optimalt dersom tynnslip er impregnert for fluorescens også. Slik får man sammenligne detaljer fra ulike disipliner som forenkler hele interpretasjonen.

### ***1.3.5 Konklusjon vedrørende ny kvantitativ metode***

#### **Reproduserbarhet**

Gjennom en begrenset ringprøvning ble reproduserbarheten til ny kvantitativ metode vurdert til å være i størrelsesorden 0,026 (2 ganger standardavvik). Variasjonen kan trolig reduseres ved å øke talte punkt fra 200 til 300.

#### **Analyser av nye bergarter**

Gjennom diskusjoner og analyser av ytterligere tilslagsprøver ved ny kvantitativ metode har man kommet frem til følgende konklusjoner:

- Nye resultater samsvarer i store trekk tidligere resultater
- Nye resultater viser dog større spredning enn tidligere resultater
- Metoden er anvendbar for analyser av sedimentære bergarter, ryolitt og fyllitt
- Metoden er ikke vurdert for sandsteiner
- Metoden er ikke vurdert til å være meget tidkrevende i forhold til dagens metode  
*(Men det poengteres at metoden kan oppfattes som slitsom for operatøren)*
- For de minste kornstørrelsene kan det være vanskelig å skille feltspat fra kvarts. Dette kan minimaliseres ved å utprøve farging av tynnslip
- Det foreligger en risiko for å underestimere størrelser på de minste kvartskornene
- Ny kvantitativ metode skiller bedre ulik grad av reaktivitet for ulike reaktive bergarter enn dagens petrografiske metode
- Det vil alltid foreligge et behov for en kvalitativ helhetsvurdering i tillegg til kvantitative målinger

For å vurdere metoden som en aktuell ny metode, eller som et supplement til dagens petrografiske metode, vil det være nødvendig med ytterligere undersøkelser. Det vil bl.a. være nødvendig å analysere flere ulike løsmassprøver på tilsvarende måte.

Metodens objektivitet vil bli styrket ytterligere dersom den tilpasses automatisk billedbehandling.

Gjennom faglig diskusjon og vurderinger er det gjort rede for hvordan vurderinger og undersøkelser av andre ulike forklarelsesvariabler kan bidra til å styrke metoden. Oppfølgende arbeid knyttet til Broekmans pågående dr. arbeid vil spille en viktig rolle. Det vil også være essensielt å fortsette den påstartede kreative diskusjonen som dette prosjektet har initiert.

## **1.4 NGUs framtidige planer vedrørende registrering av petrografiske analysedata**

*Arnhold Ulvik, Norges geologiske undersøkelse*

### **1.4.1 Grus- og Pukkregisteret**

NGUs Grus- og Pukkregister er en landsdekkende grus- og pukkdatabase for de fleste og viktigste sand-, grus- og pukkkforekomstene vi har. Databasen inneholder opplysninger om forekomstenes beliggenhet, avgrensning og volum, samt massenes kvalitet til byggetekniske formål. I tillegg finnes informasjon om massetak og arealdisponering på forekomstene.

For alle fjelluttak og sand-/grusforekomster registreres blant annet også informasjon om driftsforhold og analyser. Langs hovedvegnettet er det registrert en del områder for mulig uttak av fast fjell til pukk. Grus og Pukkregisteret gir ikke grunnlag for utarbeidelse av detaljerte uttaksplaner.

Databasen inneholder opplysninger om totalt ca. 9000 sand- og grusforekomster og ca. 1000 pukkkforekomster. Den dekker som nevnt hele landet. Det foretas en oppdatering og et ajourhold fylkesvis omtrent hvert 5.-10. år. Grus- og Pukkregisteret kan nås via Internett på NGUs hjemmesider med adressen <http://www.ngu.no/>.

### **1.4.2 Petrografiske analysedata**

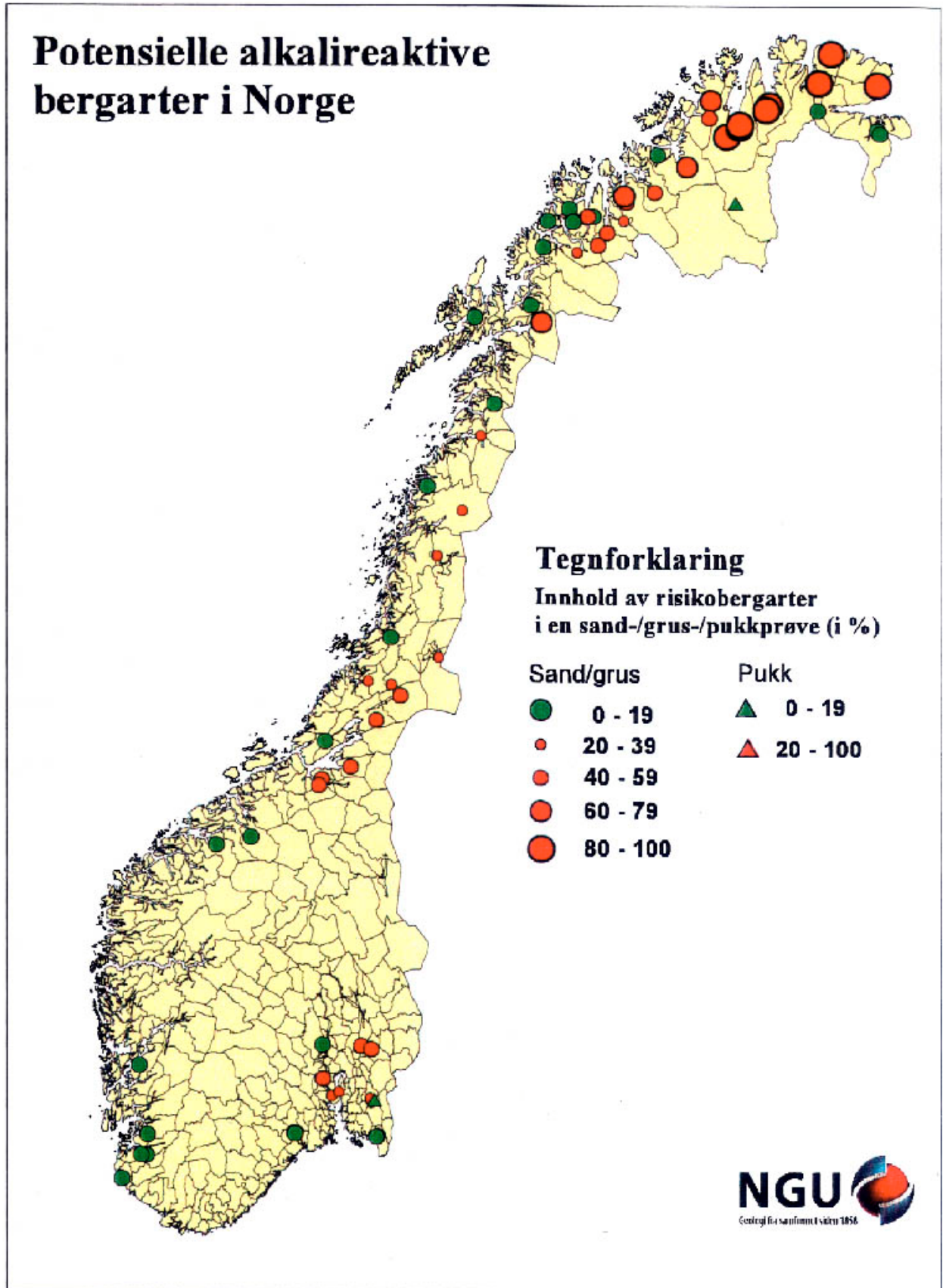
NGUs Grus- og Pukkregister inneholder som nevnt ulike analysedata. Det er også lagt til rette for innlegging av petrografiske tellinger med hensyn til alkalireaktivitet tilhørende hver grus- og pukkkforekomst. NGU legger inn sine egne data fortløpende. Det er hovedsakelig prøver fra Nord-Norge som ligger inne per i dag. Det vil bli lagt inn flere analyseresultater under ajourholdet og oppdateringen av Grus- og Pukkregisteret for resten av landet.

NGU har gjennom flere år samlet inn prøvemateriale for tynnslip-identifikasjon, så det vil være mulig å utvide databasen noe allerede. For at databasen skal bli mer komplett for statistiske beregninger og til presentasjon av ulike kart er det ønskelig å innhente tilgjengelige analysedata eksternt. Det kan praktisk gjennomføres ved at:

- bransjen kontaktes direkte, hvor det søkes om tillatelse for bruk av resultatene fra hver enkelt produsent godkjent av Kontrollrådet kl. P.
- petrografiske analyser utført ved SINTEF og NOTEBY frigis etter tillatelse fra hver enkelt produsent.
- andre resultater fra forskningsprosjekter frigis.

Før NGU i det hele tatt kan gå i gang med en slik registrering er det en forutsetning at bransjen er interessert og ser nytteverdien i arbeidet.

Analysedataene kan legges inn i databasen uten innsynsrett, men de må kunne benyttes til framstilling av kart og statistiske framstillinger.



Figur 1.4.1. Innhold av risikobergarter (sand/grus og pukk) i Norge plottet i NGUs Grus- og Pukkregister

## 2. DELPROSJEKT B - AKSELERERT MØRTELPRISME METODE

### 2.1 Modifisering av prosedyre

*Arbeidsgruppe - delprosjekt B*

#### 2.1.1 Bakgrunn

Kontrollrådets testprosedyrer for den akselererte mørtelprisme metoden gitt i SINTEF-rapport STF70-A93030 (Lindgård et al., 1993), overlater en del punkter med hensyn til utførelse til de enkelte laboratorier. I kap. 2.4 i forprosjekts-rapporten ble det gjort rede for at dette har gitt spillerom for ulike utførelse mellom de ulike laboratorier. Det ble konkludert med at det var nødvendig med en nøye gjennomgang med forslag til revisjon, da utførelsesavvik mellom laboratoriene ville kunne ha betydning for ekspansjonsresultatene. Et forslag til en revisjon og modifikasjon var mulig på bakgrunn av de undersøkelser og konklusjoner som forelå i forprosjektsrapporten.

#### 2.1.2 Utførelse

Det ble nedsatt en arbeidsgruppe med representanter fra de tre godkjente laboratorier, Kontrollrådet samt prosjektleder. Arbeidsgruppen ble gitt som mandat blant annet å vurdere utforming av forslag til prosedyre for dokumentasjon av alkalireaktivitet i henhold til Mørtelprisme metode etter Kontrollrådets regelverk, beskrevet i SINTEF rapport STF A93030. Arbeidet ble betraktet som metodeutvikling, og ble utført som egeninnsats fra de impliserte laboratorier.

Arbeidsgruppen har bestått av:

Kontrollrådet, klasse P v/ C. Hagby  
SINTEF v/ J. Lindgård, I. Meland  
Noteby v/ J.V. Holm  
Norcem v/ G. Lundevall, T.F. Rønning  
ERGO v/ B.J. Wigum

Forslag til modifisering av prosedyrer ble gjennomført ved to typer vurderinger;

- **Presisering av enkelte punkter** i utførelsen. Da disse ikke er i overensstemmelse med dagens metode, kunne de gjennomføres umiddelbart ved lab-intern revisjon av KS-prosedyrene.
- **Direkte endringer** i dagens beskrivelse/krav til utførelse. Slike endringer kunne ikke uten videre implementeres på grunn av gjeldende frys-bestemmelser i Kontrollrådet for betongprodukter (klasse P) med hensyn til retningslinjene for dokumentasjon av alkalireaktivitet.

### 2.1.3 Resultater

Det presenteres her foreslåtte punkter som allerede er innarbeidet som del av utførelsesprosedyrene i laboratoriene i forbindelse med lab-intern revisjon av KS-prosedyrene. Det understrekes at dette ikke representerer noe brudd med eller endring av dagens regler i Kontrollrådet, klasse P, men kun er ment som et presisering for å høyne kvaliteten av prøvningen.

#### 2.1.3.1 Anbefalt tilleggsbeskrivelser til SINTEF rapport STF70 A93030

Forslagene til tilleggsspesifiseringene er ordnet etter kapittelinnvidlingen i STF70 A93030, Vedlegg 3.

(1.5) **Støpeformer**

Tilføyelse: "System for å ivareta forsvarlig innfesting av knaster mht. sentrisitet, rettinkelhet og unngåelse av fastkiling. Dette kan med fordel gjøres som angitt i Figurer 2.1.1 og 2.1.2

(1.7) **Måleutstyr**

Tilføyelse: "Knasteform skal være i henhold til Figurer 2.1.1 og 2.1.2, knastemateriale skal være syrefast stål.

(1.6) **Beholdere for væskelagring av prøvene**

Tilføyelse: "Forholdet væskemengde (volum)/volum prøver skal være 4,0 ( $\pm 0,5$ ):1,0. Det skal benyttes én beholder pr. serie à 3 prismer".

(2.2) **Mørtelsammensetning**

Veiledning: I stedet for sement P30 (gammel betegnelse) i henhold til NS 3098 benyttes Norcem Std, CEM I 42,5 R i henhold til NS3086.

(2.5) **Formolje**

Tilføyelse: "Det skal brukes et så tynt lag formolje som mulig". Olje påføres av hensyn til heft knaster/mørtel fortrinnsvis før montering av knaster i formene. I motsatt fall vil knastene måtte rengjøres med rødsprit e.l.

(2.6) **Lagring og måling av prøvene**

Det bør henvises til metode eller standard for måling.

Etter lengdemåling kan to alternative prosedyrer følges :

- A) Prøvene legges tilbake i karet, hvorpå de enkeltvis tas opp igjen og tørkes av med et håndkle før umiddelbar veiing. Deretter tilbakeføres prøven til karet for annen gang.
- B) Prøvene veies enkeltvis direkte og uten opphold direkte etter lengdemåling. Deretter tilbakeføres prøven til karet.

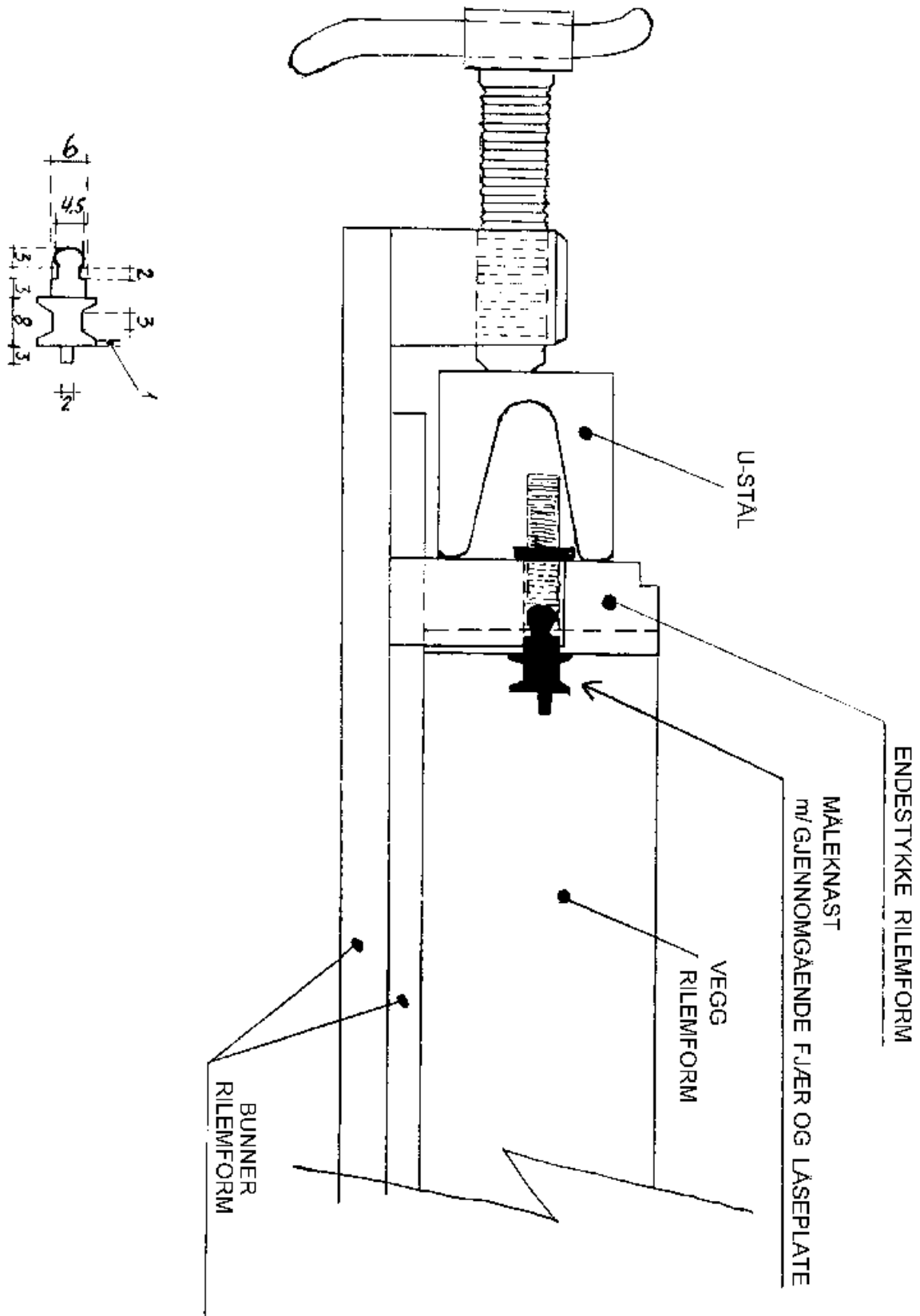
Prøvene skal ikke ha fritt vann på overflaten ved veiing.

Prøvevæsken skal skiftes for hver ny prøveserie. Væsknivå og temperatur kontrolleres minimum to ganger ukentlig. Ved fordamping etterfylles evt. væske i form av rent vann.

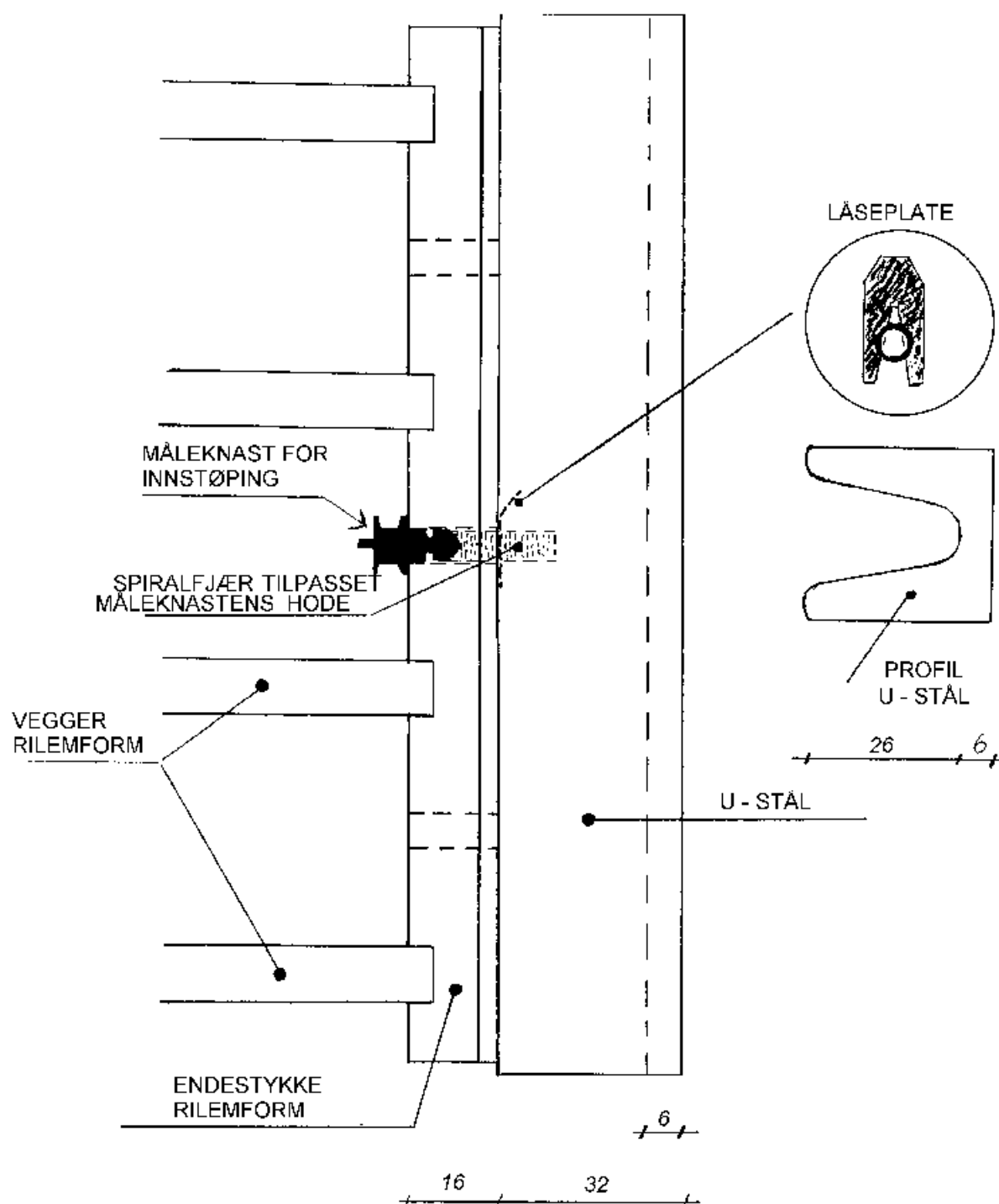
(3.) **Rapport**

Tilføyelse: “ - henvisning til “Akselerert Mørtelprismemetode”, beskrevet i SINTEF Rapport STF70 A93030" (Lindgård et al., 1993).

Tilføyelse: “Eventuelle avvik fra prøvningsprosedyren”.



Figur 2.1.1 Mørtelprismemotode. System for innfesting av knaster. (Sett fra siden. Mål i mm)



Figur 2.1.2. Mørtelprismemotode. System for innfesting av knaster. (Sett ovenfra. Mål i mm.)

### **2.1.4 Diskusjoner**

Det benyttes i Norge knaster av ulik lengde og form, og registrerte lengdeendringer divideres med prismets total lengde 160 mm for å beregne prosentvis tøyning. Internasjonalt er knaster også relativt dårlig spesifisert, mens tøyning beregnes ut fra såkalt effektiv lengde, dvs. minste innbyrdes avstand mellom knastene.

Faglig sett er ingen av de to prosedyrene optimale, selv om sistnevnte antagelig er “mindre gal” på grunn av knastenes langt større stivhet enn materialet rundt. Både kommende RILEM-metode med hensyn til AAR - og formodentlig fremtidig CEN-standard - samt andre standarder for måling av tøyning (blant annet svinn) benytter prinsippet om avstanden mellom indre knasteender.

Det anses uheldig at det skal finnes ulike prinsipper for å bestemme ekspansjon. Dette gjelder både av hensyn til entydig praksis i laboratoriene, samt på grunn av resultatbehandling og sammenlignbarhet.

Arbeidsgruppen er derfor av den oppfatning at man bør slutte seg til gjeldende praksis i mange andre europeiske land og benytte effektiv lengde. Sammen med innføring av ensartede knaster i Norge vil de stadige diskusjonene om dette temaet få en ende, og likheten mellom laboratoriene øker.

Endret praksis som foreslått vil - sammen med innføring av “standard” knaster på 8 mm - forårsake en endring i beregnet ekspansjon med en faktor på  $160/(160-2 \times 8) = 1,111$ . Da det ikke er gruppens intensjon med dette å senke de faktiske kravene til godkjennelse, anbefales samtidig å endre grenseverdien fra 0,10 til 0,11 %.

### **2.1.5 Konklusjon**

Anbefalte tilleggsbeskrivelser er allerede innarbeidet som en del av utførelsesprosedyrer i laboratoriene ved lab-intern revisjon av KS-prosedyrene.

Det anbefales i dette delprosjektet at man ved revisjon av retningslinjene slutter seg til konvensjonen om “effektiv lengde”. Dette endrer grenseverdiene tilsvarende fra 0,10 til 0,11 %. Dette må tas hensyn til i den endelige vurdering av grensekriteriene.

Det overordnede ansvaret for å gjennomføre revisjonen ligger hos Kontrollrådet, klasse P. Det er delprosjektets ønske at innholdet blir innarbeidet ved en fremtidig revisjon av retningslinjene. I tillegg ligger det et oppfølgende ansvar hos Kontrollrådet, klasse P for å kontrollere at de godkjente laboratorier i fremtiden følger nye reviderte prosedyrer.

## 2.2 Ringprøving

*Jan Lindgård – SINTEF Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong*

### 2.2.1 Bakgrunn

I dag er 3 laboratorier godkjent av Kontrollrådet for Betongprodukter, klasse P, for prøving av tilslag i hht den akselererte Mørtelprismemetoden. Frem til nå er det ikke foretatt noen ”offisiell” ringprøving mellom disse laboratoriene. I forprosjekt-rapporten ble det imidlertid foreslått å utføre dette i kombinasjon med ”standardisering” av utførelsen ved de 3 laboratoriene (jfr kapittel 2.1).

Formålet med ringprøvingen var å undersøke grad av variasjon mellom resultater oppnådd ved de 3 laboratoriene. Det var også av interesse å undersøke om eventuelle forskjeller var avhengig av oppnådde ekspansjonsverdier, dvs om usikkerhetene i resultatene varierer i takt med nivå for ekspansjon. I rapporteringen av resultatene fra ringprøvingen er laboratoriene anonymisert og benevnt hhv Lab.1, Lab.2 og Lab.3.

### 2.2.2 Prøvningsomfang og utførelse

Opprinnelig var det planlagt at hvert av laboratoriene skulle teste 7 ulike tilslagsmaterialer med antatt spennvidde i ekspansjon etter 14 døgns eksponering fra ca 0,02 % (ikke-reaktivt) og opp til ca 0,30 % (hurtig reaktivt). I tillegg var det planlagt å prøve en spesiell type knust tilslag som tidligere har vist uforholdsmessig høy ekspansjon (ca 0,07-0,08 %) til tross for at innholdet av risikobergarter var tilnærmet lik 0. Det viste seg imidlertid vanskelig å fremskaffe dette materialet, slik at dette tilslaget ble kuttet ut fra ringprøvingen.

I Tabell 2.2.1 er det angitt prøvingsnummer, lokalitet og antatt område for ekspansjon for de 7 prøvde naturtilslagene. I tillegg er det for 5 av tilslagene angitt antatt innhold av risikobergarter, basert på tidligere utførte petrografiske analyser av materiale fra samme forekomst. For de 2 siste tilslagene (merket B.2.3 og B.2.4) ble det foretatt petrografisk analyse innenfor prosjektet, da disse tilslagene også ble benyttet til blandingene beskrevet under kapittel 2.3 (tilslagene er der merket hhv B.3.2 (=B.2.4) og B.3.4 (=B.2.3)).

For alle de prøvde tilslagene ble det fra en større prøve som ble tatt ut fra ferdig produsert tilslag, splittet ut 3 prøver à ca 5 kg som ble sendt til de 3 laboratoriene. For hver av de 7 sandtilslagene siktet laboratoriene selv ut de fraksjonene som inngår i den standardiserte siktekurven i hht beskrivelsen.

Til bruk for ringprøvingen ved de 3 laboratoriene sendte NORCEM ut sement tatt ut fra samme produksjon. Prøvningsrapport for denne sementen av type NORCEM Standard sement er gitt i vedlegg 2.2.1.

Tabell 2.2.1 Opplysninger om de 7 naturtilslagene som inngikk i ringprøvingen

Prøv enr.	Lokalitet	Forventet ekspansjon <sup>2)</sup> etter 14 døgn	Innhold av risiko- bergarter	Hovedbergarter <sup>3)</sup>
B.2.1	Rogaland	ca 0,03 %	ca 1 % <sup>1)</sup>	Gneis/granitt (ir)
B.2.3	Buskerud	0,08-0,15 %	16 %	Gneis/granitt (ir), grov kvartsitt (ir), feltspatisk b.a. (ir), meta-ryolitt (r), fin kvartsitt (mr)
B.2.4	Sør- Trøndelag	0,08-0,15 %	14 %	Gneis/granitt (ir), mafisk b.a. (ir), sedimenter (r), bergart m/fin-mikrokryst. kvarts (mr)
B.2.5	Sogn- og Fjordane	0,08-0,15 %	ca 25 % <sup>1)</sup>	Gneis/granitt (ir), gneis m/fin-mikrokryst. kvarts (mr)
B.2.6	Sogn- og Fjordane	ca 0,20 %	ca 45 % <sup>1)</sup>	Gneis/granitt (ir), mylonitt/ kataklasitt (r), mylonittisert gneis/granitt (mr)
B.2.7	Nord- Trøndelag	ca 0,25 %	ca 40 % <sup>1)</sup>	Mafisk b.a. (ir), gneis/granitt (ir), sedimenter (r), metaryolitt (r)
B.2.8	Sør- Trøndelag	ca 0,30 %	ca 60 % <sup>1)</sup>	Mylonitt (r)

- 1) Antatt innhold av risikobergarter er basert på tidligere utførte petrografiske analyser foretatt av SINTEF på materiale fra samme grustak
- 2) Forventet ekspansjon (målelengde 160 mm) er antatt ut fra tidligere mørtelprismeforsøk på samme tilslag eller ut fra innhold av risikobergarter
- 3) ir = ikke reaktiv, r = reaktiv, mr = mulig reaktiv

Prøvingen ble utført i hht metodebeskrivelsen i SINTEF-rapport nr STF70 A93030, med de tilleggsbeskrivelser som ble utarbeidet av prosjektgruppen i DP B (jfr brev fra NORCEM datert 20.10.1997, samt kapittel 2.1).

Ved utførelsen av forsøkene er det rapport om følgende avvik:

- I forsøkene ved Lab.1 ble dette laboratoriets CEM I laborariesement benyttet. Også denne er av type NORCEM Standard sement, men den har en annen produksjonsdato. Kjemisk sammensetning og vannbehov for denne sementen (jfr prøvingsrapport i vedlegg 2.2.2) er imidlertid tilnærmet det samme som for sementen som ble benyttet ved Lab.2 og Lab.3 (jfr prøvingsrapport i vedlegg 2.2.1).
- I forsøkene ved Lab.1 ble ekspansjonen målt ved 5 prøvetidspunkt (i hht prosedyren skal det måles minst 6 ganger i løpet av lagringsperioden).
- I forsøkene utført ved Lab.3 ble det i første omgang foretatt prøving av 6 av tilslagene (ikke B.2.3). Ved foreløpig resultatbehandling viste det seg at Lab.3 for 4 av de 6 tilslagene oppnådde betydelig lavere ekspansjonsverdier enn de 2 andre laboratoriene. De foretok da en nærmere gjennomgang av utførelsesprosedyren sin. Det viste seg da at de ikke hadde vasket tilslagene før prøving slik prosedyren foreskriver. De utførte derfor nye forsøk på 2 av disse 4 tilslagene med "for lav" ekspansjon (merket hhv B.2.4 og B.2.7), i tillegg til at tilslaget merket B.2.3 ble prøvd for første gang. For de 2 resterende tilslagene med "for lav" ekspansjon (merket hhv B.2.5 og B.2.6) var det ikke tilstrekkelige mengder restmateriale igjen til gjentagelse av forsøkene. Oppsummert er de 7 tilslagsprøvene testet ved Lab.3 forbehandlet som følger: B.2.1 (uvasket), B.2.3 (vasket), B.2.4 (vasket), B.2.5 (uvasket), B.2.6 (uvasket), B.2.7 (vasket) og B.2.8 (uvasket).

- I alle 4 forsøkene utført ved Lab.3 der tilslaget ikke ble vasket på forhånd, avvek også blandedprosedyren i forhold til beskrivelsen. Lab.3 tørrblandet først tilslagene og sementen før vannet ble tilsatt, mens beskrivelsen foreskriver at sementen og vannet først skal blandes før tilslaget tilsettes.
- For prøvene merket B.2.6 og B.2.8 foretok Lab.3 måling etter 27 i stedet for 28 døgns eksponering.
- Det er benyttet forskjellige prosedyrer ved veiing av prismene, men alle disse tilfredsstillende beskrivelsen (dvs det er valgfrihet mht utførelse). Ved Lab.1 legges hvert prisme ned i vannet igjen etter lengdemåling. Etter at lengde-målingene er utført tas ett og ett prisme opp av vannet, ristes forsiktig og legges direkte på vekt for veiing. Ved Lab.2 og Lab.3 tørkes hvert prisme først med et håndkle, før lengdemålingen gjennomføres. Det samme prismet veies så umiddelbart etterpå. Deretter oppbevares prismene under et klede inntil alle 3 prismene er målt og veid.

I hht metodebeskrivelsen skal det alltid foretas måling av prismenes lengde og vekt etter både  $4\pm 1$ ,  $7\pm 1$ , 14 og 28 døgns NaOH-lagring, samt ved minst ytterligere 2 aldre.

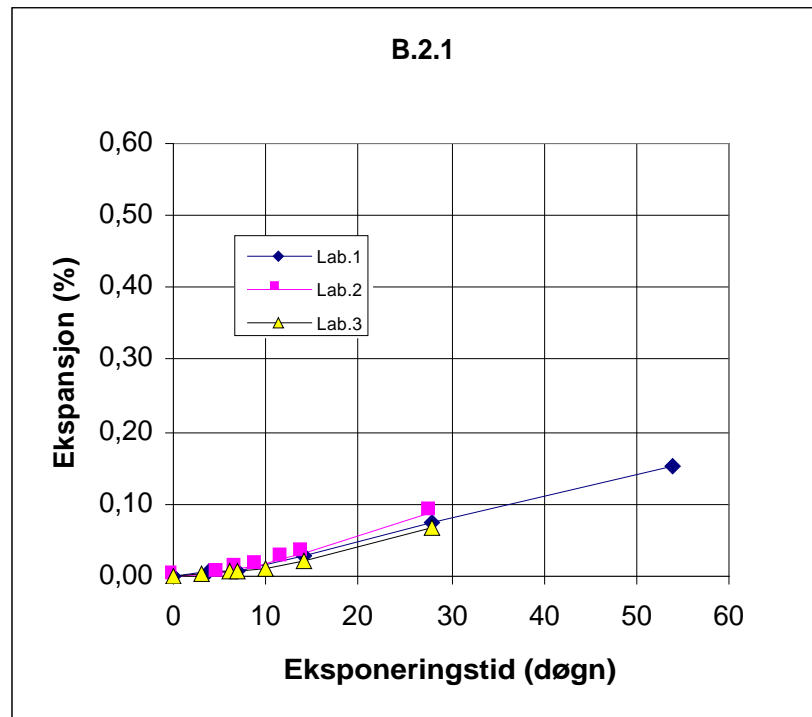
De 3 laboratoriene foretok alle prøving etter hhv 7, 14 og 28 døgns eksponering, men de øvrige prøvingsaldrene var forskjellige. Ved resultatbehandlingen presentert i kapitlene 2.2.3 og 2.2.4 er det derfor kun foretatt sammenligning av verdiene ved disse 3 prøvingsaldrene. For de 2 blandingene (B.2.6 og B.2.8) som Lab.3 målte etter 27 i stedet for 28 døgn, er 28 døgns ekspansjonen antatt ut fra en ekstrapolering. I alle figurene er imidlertid 27 døgns resultatet plottet.

### 2.2.3 Resultater fra ringprøving av 7 naturlige tilslagstyper

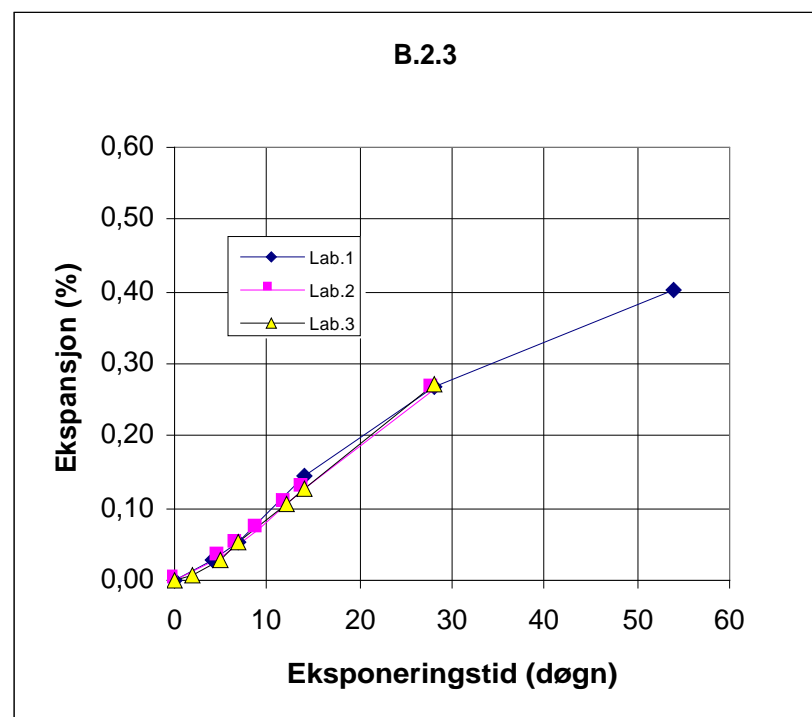
Alle måleresultatene fra de 3 laboratoriene ble oversendt SINTEF for resultatbehandling. SINTEF utviklet et regneark for formålet, hvor alle målte lengder og vekter ble lagt inn. I Tabell 2.2.2 er det gitt en oversikt over hvor de ulike resultatene presenteres i rapporten. I alle tabellene og figurene er ekspansjonsverdiene beregnet ut fra en målelengde på 160 mm (dvs prismelengden).

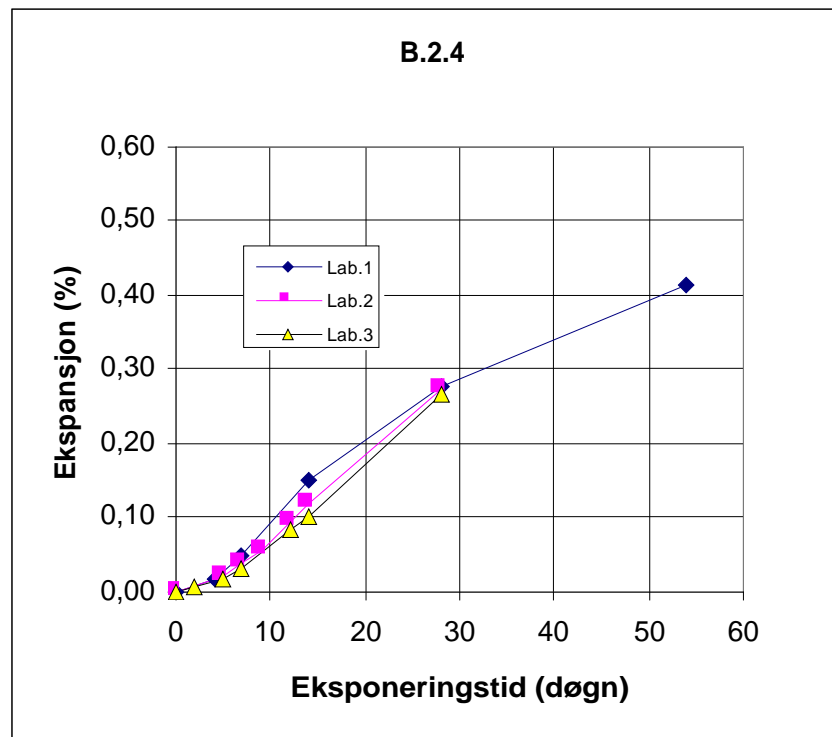
Tabell 2.2.2 Oversikt over presentasjon av resultatene fra ringprøvingen

<i>Flytmål</i>	<i>Ekspansjons- utvikling</i> for hver blanding prøvd ved ulike laboratorier	Samlefigurer med <i>vektøkning</i> for hver blanding prøvd ved ulike laboratorier	Forhold mellom <i>vektøkning</i> og <i>ekspansjon</i>	<i>Statistisk vurdering</i> av ekspansjons- resultatene
Vedlegg 2.2.4	Figur 2.2.1-2.2.7 Tabell 2.2.3	Vedlegg 2.2.3	Figur 2.2.8- 2.2.11	Tabell 2.2.3 og 2.2.4. Figur 2.2.12 og 2.2.13

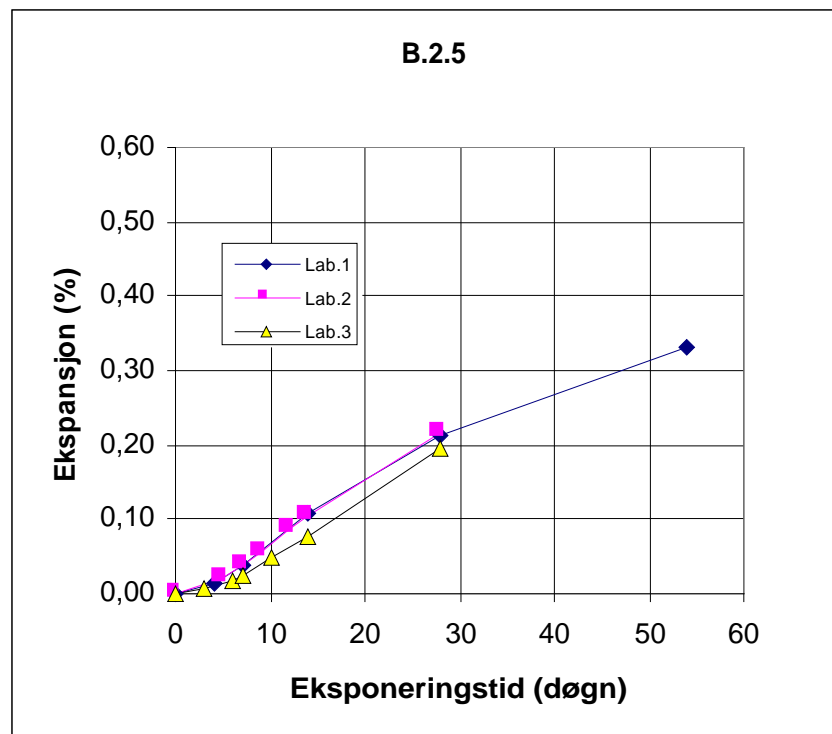


Figur 2.2.1. Målt ekspansjonsutvikling for blanding B.2.1 (målelengde 160 mm)  
(Merk: I forsøkene utført ved Lab.3 ble ikke tilslaget vasket på forhånd, samtidig som blandedprosydyre avvok fra beskrivelsen)



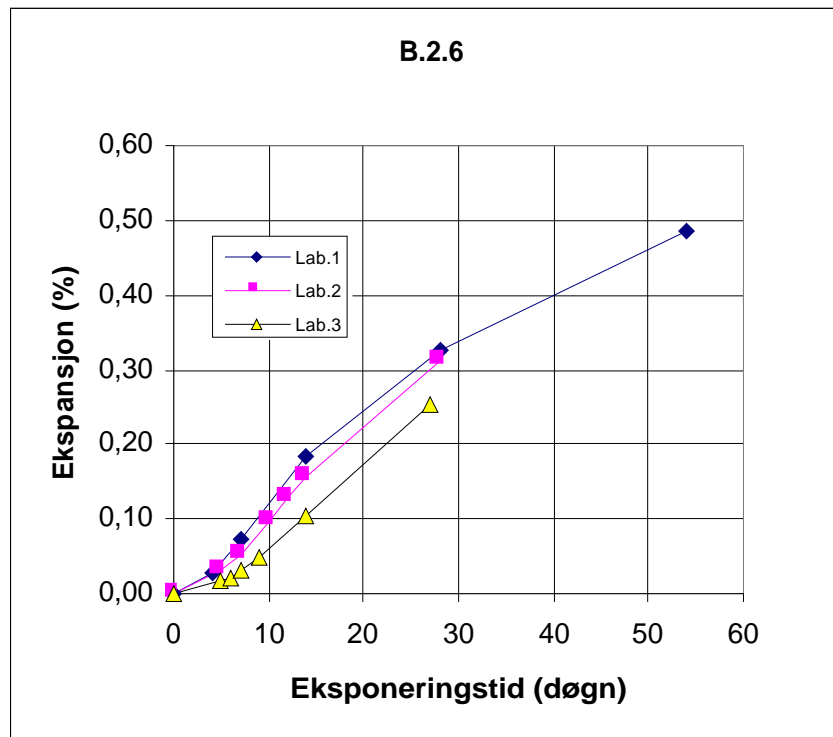


Figur 2.2.3. Målt ekspansjonsutvikling for blanding B.2.4 (målelengde 160 mm)

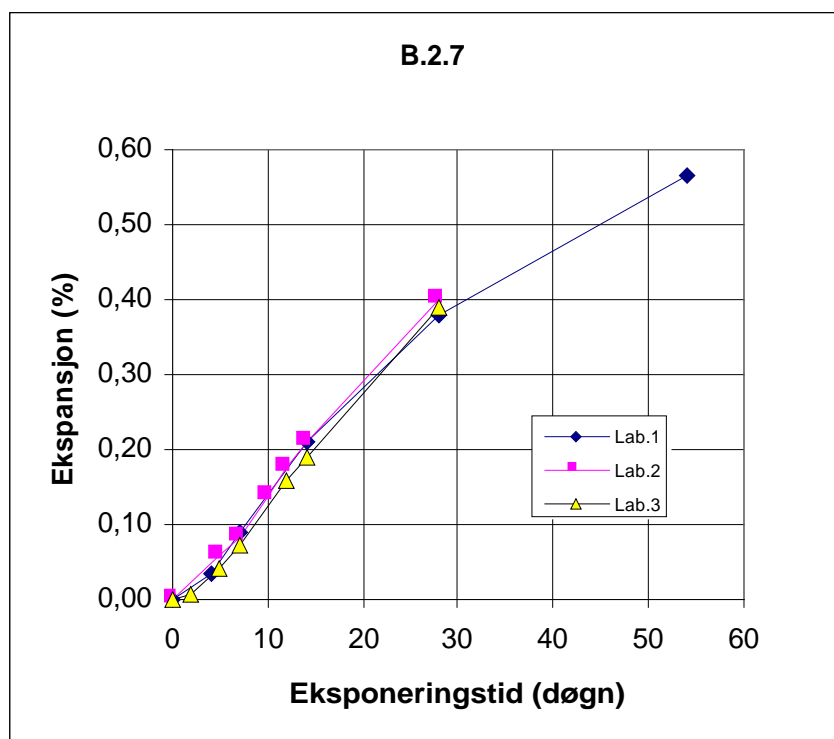


Figur 2.2.4. Målt ekspansjonsutvikling for blanding B.2.5 (målelengde 160 mm)

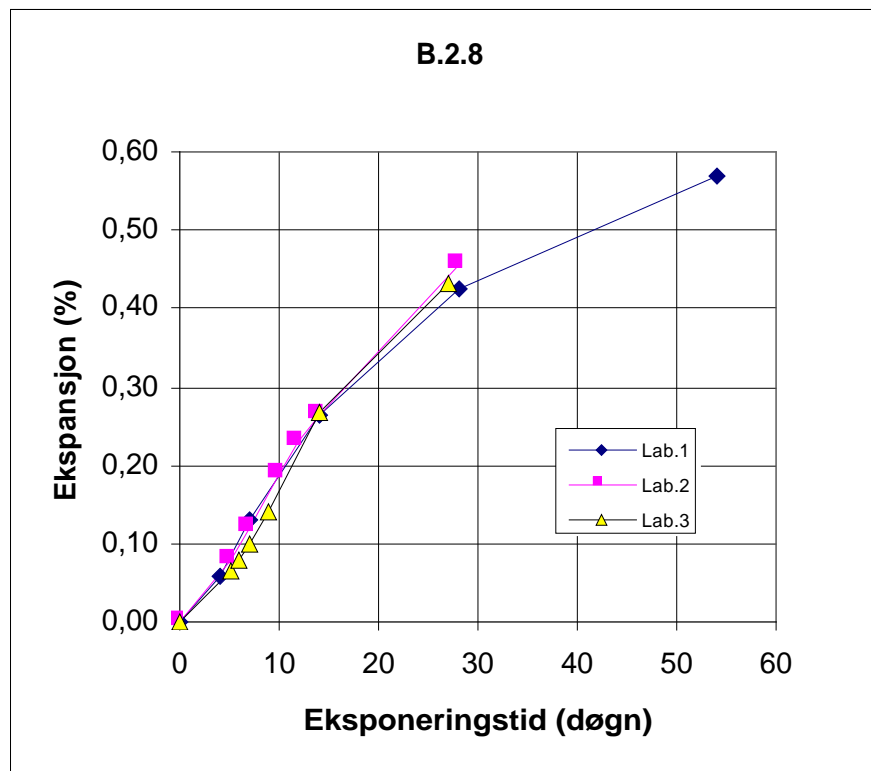
(Merk: I forsøkene utført ved Lab.3 ble ikke tilslaget vasket på forhånd, samtidig som blandedprosyre avvek fra beskrivelsen)



Figur 2.2.5. Målt ekspansjonsutvikling for blanding B.2.6 (målelengde 160 mm)  
(Merk: I forsøkene utført ved Lab.3 ble ikke tilslaget vasket på forhånd, samtidig som blandeprosedyre avvok fra beskrivelsen)

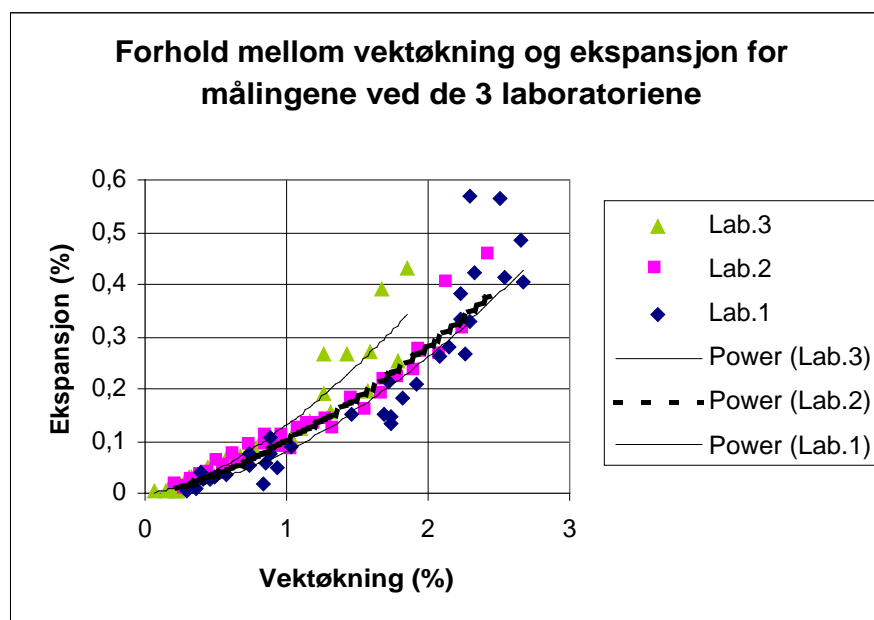


Figur 2.2.6. Målt ekspansjonsutvikling for blanding B.2.7 (målelengde 160 mm)

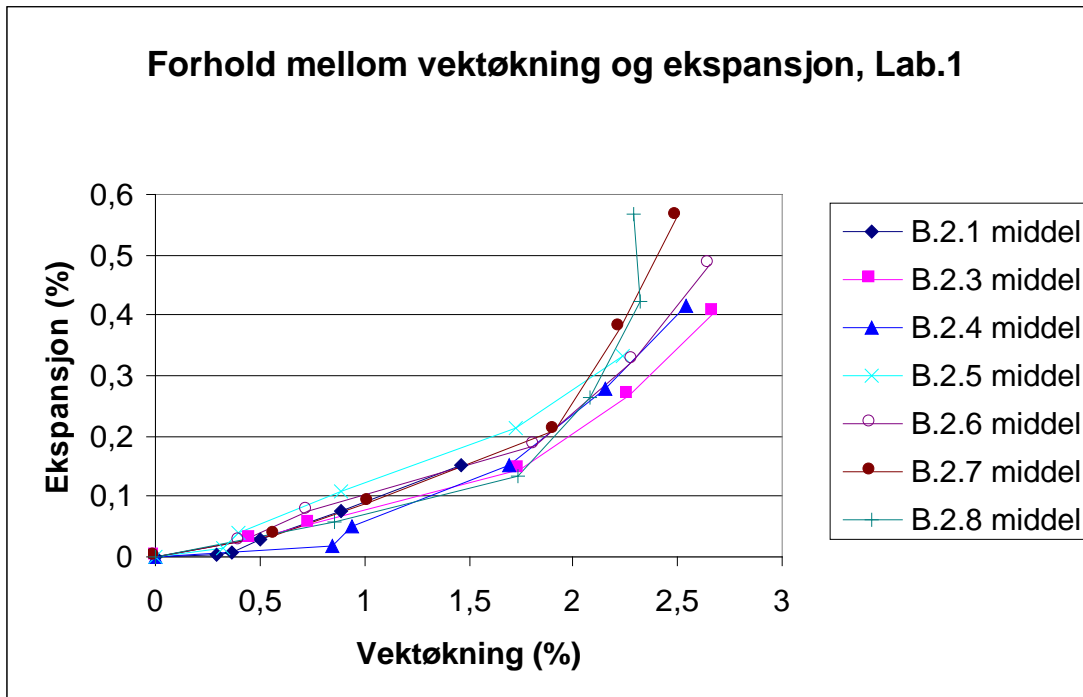


Figur 2.2.7. Målt ekspansjonsutvikling for blanding B.2.8 (målelengde 160 mm)  
(Merk: I forsøkene utført ved Lab.3 ble ikke tilslaget vasket på forhånd, samtidig som blandeprosedyre avvok fra beskrivelsen)

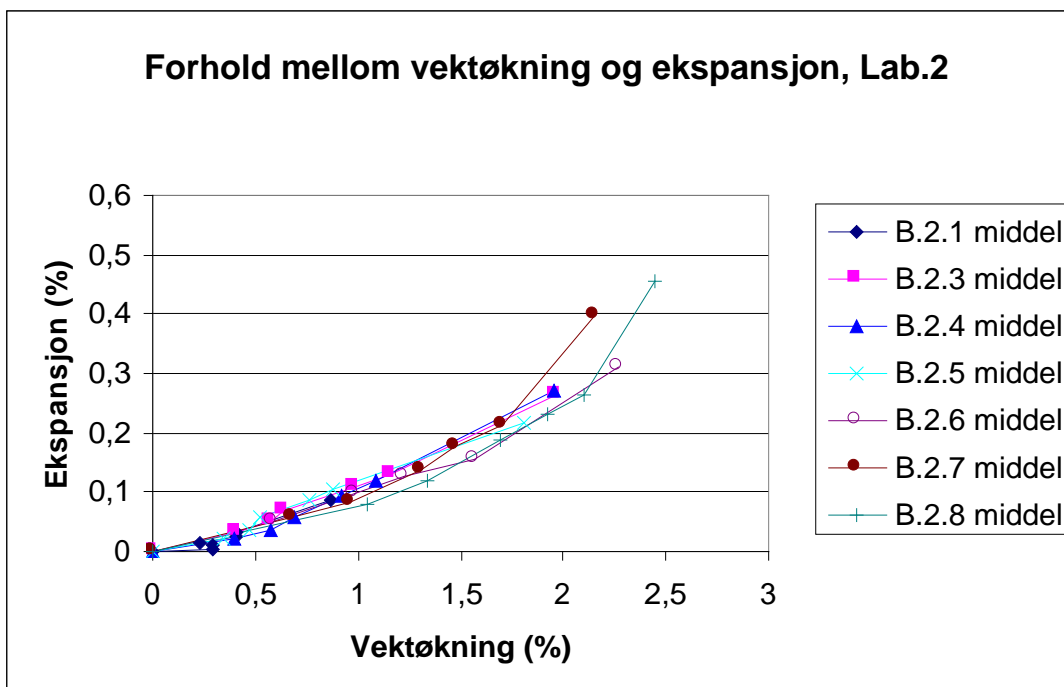
Figur 2.2.8-2.2.11 viser forholdet mellom målt ekspansjon og vektøkning for blandingene utført ved de 3 laboratoriene.



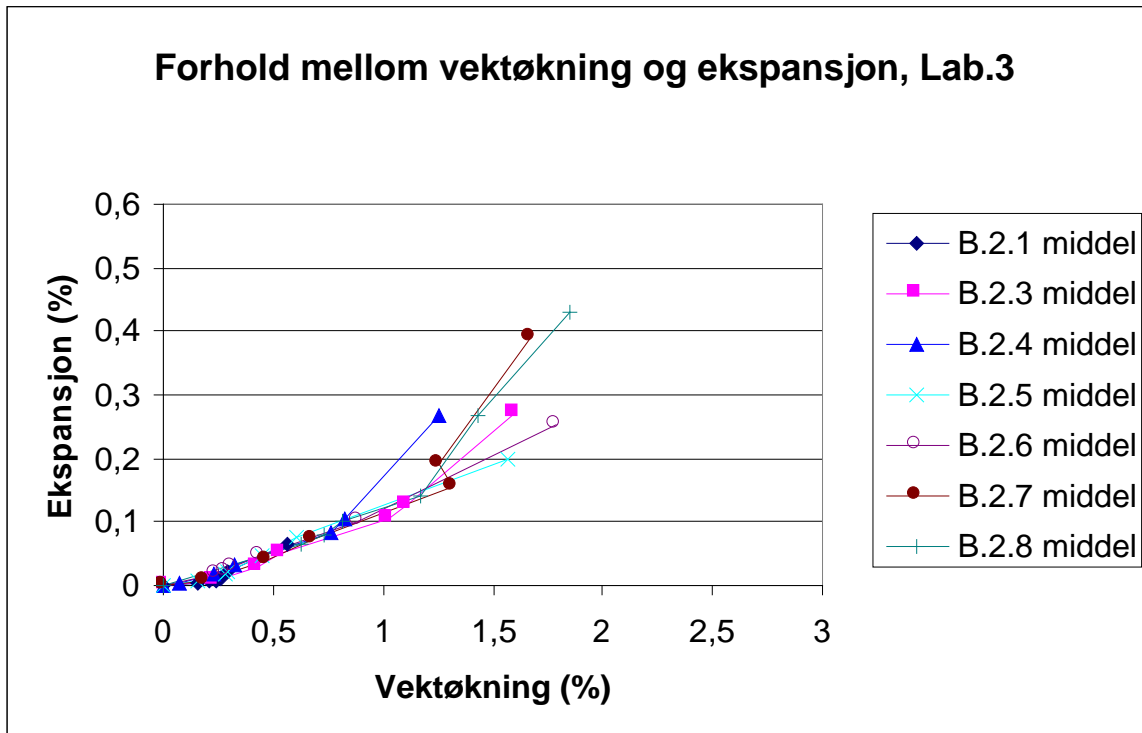
Figur 2.2.8. Korrelasjon mellom vektøkning og ekspansjon for alle blandingene utført ved de 3 laboratoriene (inkluderer alle måletidspunktene)



Figur 2.2.9. Forhold mellom vektøkning og ekspansjon for alle blandिंगene utført ved Lab.1 (inkluderer alle måletidspunkt t.o.m. 56 døgns eksponering)



Figur 2.2.10. Forhold mellom vektøkning og ekspansjon for alle blandिंगene utført ved Lab.2 (inkluderer alle måletidspunkt t.o.m. 28 døgns eksponering)



Figur 2.2.11. Forhold mellom vektøkning og ekspansjon for alle blandningene utført ved Lab.3 (inkluderer alle måletidspunkt t.o.m. 28 døgns eksponering)

### 2.2.4 Statistisk vurdering av resultater fra ringprøvingen

Den statistiske vurderingen av prøveresultatene er gjennomført av *Einar Aassved Hansen ved SINTEF* etter en variansanalyse. Den forutsetter at forsøkene er gjennomført vilkårlig uten noen form for systematisk utvelgelse av prøvestykker etc. og at prøvebetingelsene er så like som mulig. Den statistiske modellen kalles "The fixed effects model one-way classification", og en fullstendig beskrivelse kan finnes i statistiske fagbøker. "One way" fordi kun en faktor (utførende laboratorium) er undersøkt, og "fixed effect" fordi observerte verdier defineres som avvik fra middel-verdien av alle målingene.

I prinsippet antas det at alle målingene er normalfordelte og at observerte avvik skyldes normale avvik som ligger innenfor den spredning som må forventes. I analysen er det denne hypotesen (null hypotesen  $H_0$ ) som testes, dvs at det i utgangspunktet forutsettes at det enkelte laboratorium ikke påvirker resultatene. Det forutsettes med andre ord at alle laboratoriene bruker tilsvarende typer utstyr, samme prosedyrer og rutiner, etc.

Som nevnt antas måleresultatene både totalt og innen det enkelte laboratorium å være normalfordelte. I analysen sammenlignes total middelerverdi og spredningen (for alle 3 laboratoriene sett under ett) med middelerverdi og spredningen innen det enkelte laboratorium. En slik sammenligning av to ulike normalfordelinger har en såkalt F-fordeling.

Null hypotesen forutsetter at den virkelige middelverdien for målinger utført ved de tre aktuelle laboratoriene er den samme. Denne hypotesen forkastes dersom den målte F-verdi ( $F_o$ ) i analysen overstiger en gitt F-verdi. Styrken av testen kan vi velge gjennom valg av grenseverdi for den gitte F-verdien. Vi har valgt den vanligste som tilsvarer en sannsynlighet på 2,5 %, dvs  $F_{0,025}$ . I praksis betyr det at det er 2,5 % sannsynlighet for at vi forkaster nullhypotesen når den er riktig, dvs at vi konkluderer med at det er signifikant forskjell mellom laboratoriene selv om det ikke er det.

Dersom nullhypotesen holder stikk (dvs.  $F_o < F_{0,025}$ ) er det ingen statistisk signifikant forskjell mellom laboratoriene. I motsatt fall ( $F_o > F_{0,025}$ ) konkluderer vi med at det er en statistisk sett signifikant forskjell mellom laboratoriene. I det siste tilfelle sammenlignes middelverdiene fra de enkelte laboratorier (multiple comparison method) for å avdekke hvilket eller hvilke laboratorier som avviker. Jo større  $F_o$  er, desto større statistisk spredning er det på resultatene oppnådd ved de 3 laboratoriene (jfr Tabell 2.2.4 og Figur 2.2.13).

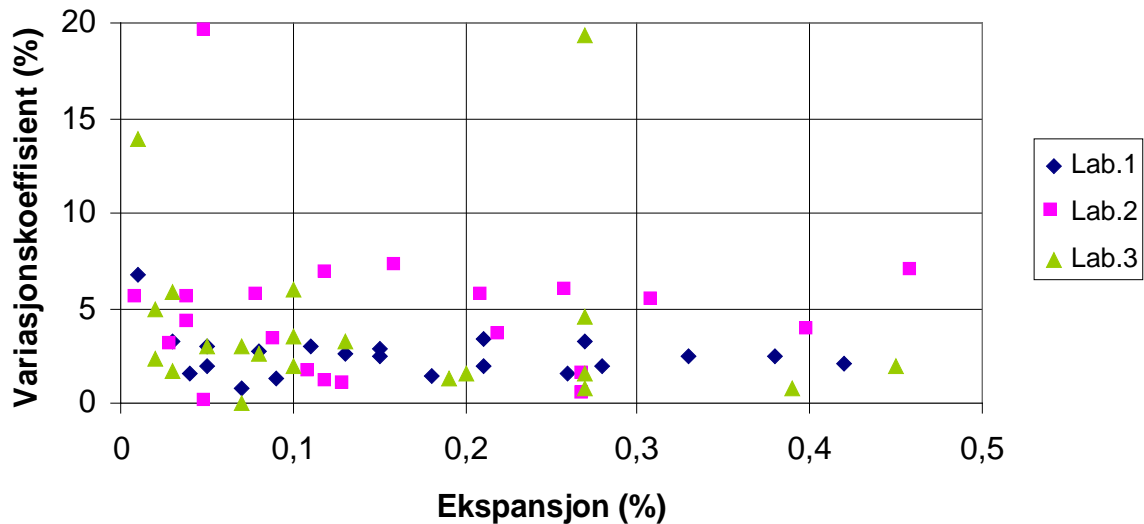
I tabell 2.2.3 er det for alle 7 tilslagstypene angitt midlere ekspansjon målt ved de 3 laboratoriene etter hhv 7, 14 og 28 døgn. I tabellen er også variasjonskoeffisientene for de 3 parallelle prøvestykkene angitt. Variasjonskoeffisientene er i tillegg plottet i Figur 2.2.12 som funksjon av målt ekspansjon.

Tabell 2.2.3 Målt midlere ekspansjon (%) etter hhv 7, 14 og 28 døgns eksponering. I parentes er variasjonskoeffisienten for 3 parallelle prøvestykker angitt (i %). (For blanding B.2.6 og B.2.8 er Lab.3's verdi etter 28 døgn ekstrapolert ut fra måling utført etter 27 døgns eksponering)

Blandingsnummer	7 døgn			14 døgn			28 døgn		
	Lab.1	Lab.2	Lab.3	Lab.1	Lab.2	Lab.3	Lab.1	Lab.2	Lab.3
<b>B 2.1</b> <sup>1)</sup>	0,01 (6,7)	0,01 (5,4)	0,01 (13,9)	0,03 (3,3)	0,03 (3,0)	0,02 (5,0)	0,08 (2,7)	0,09 (3,3)	0,07 (3,0)
<b>B 2.3</b>	0,05 (1,9)	0,05 (0,0)	0,05 (3,0)	0,15 (2,8)	0,13 (0,9)	0,13 (3,2)	0,27 (3,2)	0,27 (1,4)	0,27 (1,5)
<b>B 2.4</b>	0,05 (3,0)	0,04 (5,4)	0,03 (1,7)	0,15 (2,5)	0,12 (1,0)	0,10 (2,0)	0,28 (1,9)	0,27 (0,4)	0,27 (0,8)
<b>B 2.5</b> <sup>1)</sup>	0,04 (1,5)	0,04 (4,1)	0,02 (2,4)	0,11 (3,0)	0,11 (1,6)	0,08 (2,6)	0,21 (3,4)	0,22 (3,5)	0,20 (1,5)
<b>B 2.6</b> <sup>1)</sup>	0,07 (0,8)	0,05 (19,5)	0,03 (5,8)	0,18 (1,4)	0,16 (7,1)	0,10 (6,0)	0,33 (2,5)	0,31 (5,3)	0,27 (4,6)
<b>B 2.7</b>	0,09 (1,3)	0,08 (5,6)	0,07 (0,0)	0,21 (2,0)	0,21 (5,6)	0,19 (1,3)	0,38 (2,5)	0,40 (3,8)	0,39 (0,8)
<b>B 2.8</b> <sup>1)</sup>	0,13 (2,6)	0,12 (6,8)	0,10 (3,5)	0,26 (1,5)	0,26 (5,8)	0,27 (19,3)	0,42 (2,1)	0,46 (6,9)	0,45 (2,0)

<sup>1)</sup> Merk: I forsøkene utført ved Lab.3 ble ikke tilslaget vasket på forhånd, samtidig som blandedprosedyre avvek fra beskrivelsen

### Variasjonskoeffisient mellom 3 parallelle prøvestykker som funksjon av målt ekspansjon



Figur 2.2.12 Sammenstilling av variasjonskoeffisientene for lengdemålingene etter 7, 14 og 28 døgns alder som funksjon av målt ekspansjon

Den gjennomsnittlige variasjonskoeffisienten for lengdemålingene utført på de 3 parallelle prøvestykkene ved aldrene 7, 14 og 28 døgn var hhv 2,5 % ved Lab.1, 4,0 % ved Lab.3 og 4,6 % ved Lab.2. For de samme målingene var det gjennomsnittlige standardavviket (angitt som % ekspansjon) hhv 0,004 ved Lab.1, 0,006 ved Lab.3 og 0,007 ved Lab.2. Som forventet var standardavviket høyest for de høyeste ekspansjonsverdiene.

I tabell 2.2.4 er det for alle 7 tilslagstypene gitt en oppsummering av den statistiske analysen av ekspansjonsresultatene etter hhv 7, 14 og 28 døgns eksponeringstid.

Tabell 2.2.4 Oppsummering av den statistiske analysen av ekspansjonsresultatene fra ringprøvingen.

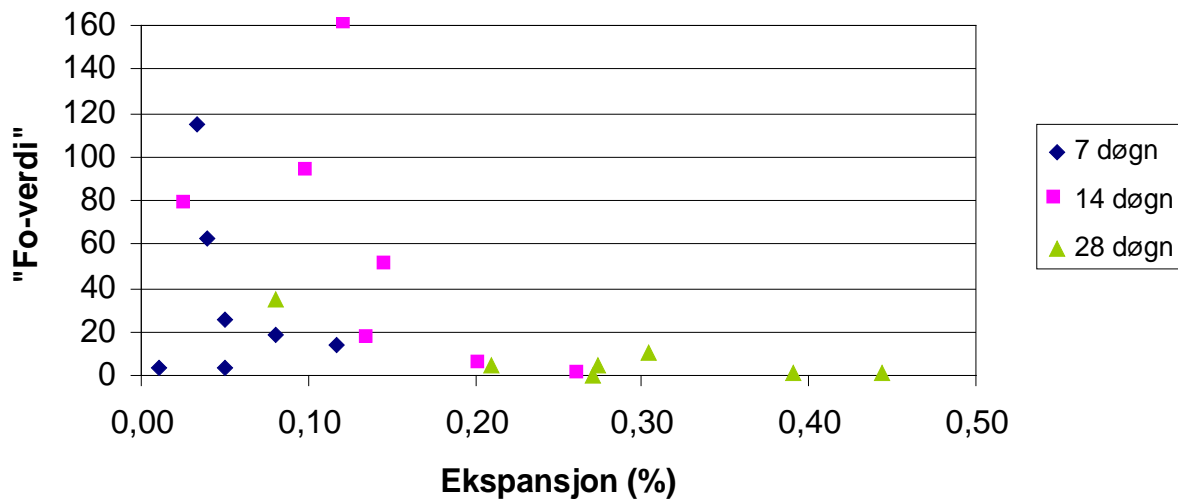
Blanding nr	7 døgn	14 døgn	28 døgn
<b>B 2.1</b> <sup>2)</sup>	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=4,0)	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=77,2) Lab.3s målinger lave	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=35,1) Alle ulike Lab.2 > Lab.1 > Lab.3
<b>B 2.3</b>	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=3,4)	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=16,5) Lab.1s målinger høye	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=0,4)
<b>B 2.4</b>	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=62,6) Lab.1s målinger høye	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=159,9) Alle ulike Lab.1 > Lab.2 > Lab.30	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=5,1)
<b>B 2.5</b> <sup>2)</sup>	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=114,9) Lab.3s målinger lave	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=92,4) Lab.3s målinger lave	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=4,5)
<b>B 2.6</b> <sup>2)</sup>	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=25,1) Alle ulike Lab.1 > Lab.2 > Lab.3	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=50,2) Alle ulike Lab.1 > Lab.2 > Lab.3	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=11,0) Lab.3s målinger lave
<b>B 2.7</b>	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=19,1) Alle ulike Lab.1 > Lab.2 > Lab.3	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=4,1)	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=1,3)
<b>B 2.8</b> <sup>2)</sup>	<b>Signifikant forskjell</b> (Fo <sup>1</sup> )=14,2) Lab.3s målinger lave	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=0,0)	<i>Ingen forskjell</i> (Fo <sup>1</sup> )=1,1)

<sup>1)</sup> Fo er et mål for spredningen mellom laboratoriene. Dersom  $F_o < F_{0,025}$  (=8,43) er det ingen statistisk signifikant forskjell mellom laboratoriene. I motsatt fall ( $F_o > F_{0,025}$ =8,43) konkluderer vi med at det er en statistisk sett signifikant forskjell mellom laboratoriene. I det siste tilfelle sammenlignes middelveidene fra de enkelte laboratorier for å avdekke hvilket eller hvilke laboratorier som avviker. Jo større  $F_o$  er, desto større statistisk spredning er det på resultatene oppnådd ved de 3 laboratoriene

<sup>2)</sup> Merk: I forsøkene utført ved Lab.3 ble ikke tilslaget vasket på forhånd, samtidig som blandedprosedyre avvek fra beskrivelsen

Forholdet mellom ekspansjon og "Fo-verdi" er plottet i Figur 2.2.13. Den gjennom-snittlige verdien for Fo var hhv 34,8 etter 7 døgn, 57,2 etter 14 døgn og 8,4 etter 28 døgn. Spredningen mellom laboratoriene er med andre ord klart lavest ved alder 28 døgn. Ut fra Figur 2.2.13 observerer en også at spredningen mellom laboratoriene generelt er lavest ved ekspansjoner > 0,20 %, uavhengig av eksponeringstid. For målingene etter 14 døgns eksponering betyr dette at spredningen mellom laboratoriene er minst for de to blandingene med høyest ekspansjon (B.2.7 og B.2.8).

### Spredning mellom laboratoriene versus ekspansjon (Fo>8,43 betyr signifikant forskjell mellom laboratoriene)



Figur 2.2.13 Forholdet mellom ekspansjon og "Fo-verdi" (Fo er et mål for spredning mellom laboratoriene. Høy Fo betyr stor spredning i målt ekspansjon)

For de 4 blandingene (B.2.3-B.2.6) med gjennomsnittlig ekspansjonsverdi etter 14 døgn mellom 0,10 og 0,15 % er spredningen mellom laboratoriene stor.

### 2.2.5 Diskusjoner

Forholdet mellom innhold av risikobergarter (jfr Tabell 2.2.1) og ekspansjon behandles nærmere i kapittel 2.5.

Ut fra figurene i vedlegg 2.2.3 ser en at målt vektøkning ved Lab.2 ligger jevnt over litt lavere enn målingene utført ved Lab.1, mens verdiene ved Lab.3 ligger betydelig lavere enn for de 2 andre laboratoriene. Spredningen mellom laboratoriene ser ut til å være mye større mht målt vektøkning enn mht målt ekspansjon, uten at det er gjort noen nærmere statistisk vurdering av dette. En hovedårsakene til at det måles ulik vektøkning mellom Lab.1 og Lab.2, er at det er benyttet ulike prosedyrer ved veiing av prismene (jfr kapittel 2.2.2). At Lab.3 registrerer de laveste vekt-økningene, og da spesielt ved høye ekspansjoner, antas å ha sammenheng med at dette laboratoriet før veiing tørker av eventuell gel som felles ut på overflaten av prismene under forsøkenes gang.

Som vist i Figurene 2.2.8-2.2.11 og Tabell 2.2.5 er det en god korrelasjon mellom målt ekspansjon og vektøkning for de 7 blandningene utført innen ett og samme laboratorium. Best korrelasjon ble oppnådd ved Lab.2 og Lab.3. For alle de 3 laboratoriene gav ”korrelasjonsligninger” av typen  $y=a \cdot x^b$  de høyeste korrelasjonskoeffisientene. Konstantene a og b var imidlertid forskjellige fra laboratorium til laboratorium. Konstantene basert på kun 14 døgns målingene avvek også vesentlig fra konstantene basert på alle måletidspunktene sett under ett.

Tabell 2.2.5 Korrelasjon mellom målt ekspansjon og vektøkning innen ett og samme laboratorium

Laboratorium	Korrelasjon <sup>1)</sup> mellom målt ekspansjon og vektøkning		
	Inkl alle måletidspunkt	Kun 14 døgns-målinger	Kommentarer <sup>2)</sup>
Lab.1	$R^2 = 0,91$	$R^2 = 0,92$	Høyest vektøkning ved gitt eksponeringstid
Lab.2	$R^2 = 0,94$	$R^2 = 0,98$	
Lab.3	$R^2 = 0,94$	$R^2 = 0,97$	Klart lavest vektøkning ved gitt eksponeringstid

<sup>1)</sup>  $R^2$  angir korrelasjonskoeffisienten. For alle de 3 laboratoriene gav ”korrelasjonsligninger” av typen  $y=a \cdot x^b$  de høyeste korrelasjonskoeffisientene. Konstantene a og b var imidlertid forskjellige fra laboratorium til laboratorium. Konstantene basert på kun 14 døgns målingene avvek også vesentlig fra konstantene basert på alle måletidspunktene sett under ett.

<sup>2)</sup> Det ble benyttet samme veiprosedyre ved Lab.2 og Lab.3, mens prosedyren ved Lab.1 var noe forskjellig fra denne (jfr kapittel 2.2.2). Før veiing tørker Lab.3 av eventuell gel som felles ut på overflaten av prismene under forsøkenes gang

Resultatene stemmer godt overens med resultatene fra forprosjektet, der NORCEM registrerte forholdsvis god overensstemmelse mellom målt ekspansjon og vektøkning så lenge ekspansjonen var  $> 0,20 \%$ . Ut fra det begrensede prøvegrunlaget er det ikke gjort noen forsøk på å korrelere grenseverdier for ekspansjon med mulige grenseverdier for vektøkning. Dette er heller ikke relevant å gjøre. Vektregistreringene kan imidlertid med fordel benyttes som ”kvalitetskontroll” av forsøkene i forbindelse med vurdering og rapportering av ekspansjonsresultatene.

Etter 14 døgns eksponering oppnår Lab.1 og Lab.2 identiske verdier for ekspansjon for 4 av de 7 blandingene. For de 3 øvrige blandingene ligger Lab.2 inntil 0,03 %-poeng lavere enn Lab.1, men konklusjonen vedrørende om et tilslag er alkalireaktivt eller ikke er imidlertid den samme ved de 2 laboratoriene. Lab.3 oppnår lavest ekspansjonsverdi for alle blandingene eksklusive B.2.8 (der de oppnår tilnærmet samme verdi som de 2 øvrige laboratoriene). For en av blandingene (B.2.5) konkluderer Lab.3 med at tilslaget er ikke-alkalireaktivt, mens Lab.1 og Lab.2 har motsatt konklusjon.

Ved både 7 og 14 døgns målingene av ekspansjon er det ut fra den statistiske behandlingen av resultatene konkludert med at det er signifikante forskjeller mellom laboratoriene for fem av de syv blandingene. Ved både 7 og 14 døgn er det tre typer avvik:

- Lab.3s resultater er lavere enn for de to øvrige laboratoriene for to blanding (B.2.1 og B.2.5)
- Lab.1s resultater er høyere enn for de to øvrige laboratoriene for en blanding (B.2.3)
- Alle laboratoriene gir forskjellig resultat for to blanding (B.2.4 og B.2.6). Lab.1 gir høyest verdi og Lab.3 lavest.

Ved 28 døgn er det ingen signifikant forskjell for fem av blandingene. For de to øvrige oppnår alle laboratoriene ulike verdier i ett tilfelle (B.2.1; Lab.2 oppnår her høyest verdi og Lab.3 lavest), mens Lab.3 oppnår lavere verdi enn de to øvrige i det andre tilfellet (B.2.6).

Den gjennomsnittlige variasjonskoeffisienten for lengdemålingene utført på de 3 parallelle prøvestykkene innenfor hver blanding var spesielt lav ved Lab.1 (2,5 %). For de øvrige laboratoriene lå den på hhv 4,0 % (Lab.3) og 4,6 % (Lab.2). Denne ”internspredningen” er et mål for metodens usikkerhet og egenspredning, samtidig som den gir et uttrykk for nøyaktigheten i det utførte arbeidet (forbehandling av tilslaget, blanding, utstøping, lagringsbetingelser og målinger). At variasjonskoeffisientene jevnt over er tilnærmet like ved lave og høye ekspansjonsverdier (jfr Figur 2.2.12), indikerer at det er relevant å foreta statistisk behandling av resultatene også for blandingene med lave ekspansjonsverdier. Det er heller ingen ting som tyder på at det opptrer konstante avvik (”bias”), for eksempel pga unøyaktighet i lengdemålingene, som ville ha slått mest ut på små ekspansjonsverdier.

De refererte avvikene i utførelsen ved Lab.3 (dvs ingen vasking av tilslaget og endret blandedeprosedyre - jfr kapittel 2.2.2) antas å ha hatt signifikant innvirkning på de oppnådde ekspansjonsresultatene, og dermed på de registrerte forskjellene mellom Lab.3 og de øvrige laboratoriene (gjelder blanding B.2.1, B.2.5, B.2.6 og B.2.8).

Det er vanskelig å si hvor stor innvirkning manglende vasking har hatt for det enkelte tilslag, spesielt fordi innholdet av finstoff og belegg som kan vaskes vekk vil variere fra tilslag til tilslag. De målte flytmålene varierte imidlertid lite mellom blandingene utført ved Lab.1 og Lab.3 (jfr vedlegg 2.2.4), til tross for forskjell i vaske- og blandedeprosedyre. Flytmålene bestemt ved Lab.2 lå på den annen side betydelig høyere enn ved Lab.1 og Lab.3, selv for de 4 blandingene hvor Lab.1 og Lab.2 målte identisk ekspansjon etter 14 døgns eksponering. Årsaken til dette er uklar.

Det kan ikke utelukkes at Lab.3s avvik fra vaske- og blandeprosedyren har ført til små endringer i porestruktur i de herdede prismene, selv om dette ikke var registrerbart på mørtlenes konsistens (uttrykt ved flytmålet). Et eventuelt økt poreinnhold kan tenkes å fungere som "avlastingskammer" for gelen som utvikles, og dette kan igjen påvirke de målte ytre ekspansjonene av prismene.

Forskjell i ekspansjon mellom de 2 blandningene som ble utført 2 ganger ved Lab.3 (B.2.4 og B.2.7) kan gi en pekepinn på betydningen som avvikene fra prosedyren har hatt. Fra første til andre gangs utførelse (som var i hht beskrivelsen) økte ekspansjonen for B.2.4 hhv fra 0,02%→0,03% (7 døgn), 0,08%→0,10% (14 døgn) og 0,24%→0,27% (28 døgn). Tilsvarende økning for B.2.7 var hhv fra 0,05%→0,07% (7 døgn), 0,14%→0,19% (14 døgn) og 0,31%→0,39% (28 døgn). De registrerte flytmålene for de 2 blandningene ble imidlertid lite endret fra første til andre gangs blanding (174→173 mm for B.2.4 og 181→188 mm for B.2.7).

At Lab.1 benyttet sement med en annen produksjonsdato enn de øvrige 2 laboratoriene ser ikke ut til å ha hatt noen signifikant innvirkning på resultatene.

### **2.2.6 Konklusjon**

Ut fra den utførte ringprøvingen av 7 tilslagstyper ved laboratoriene Lab.1, Lab.2 og Lab.3 kan en trekke følgende konklusjoner:

- "Internspredningen" mellom ekspansjon målt på de 3 parallelle prøvestykker for hver blanding var lav, spesielt ved Lab.1
- Etter 14 døgns eksponering oppnår Lab.1 og Lab.2 identiske verdier for ekspansjon for 4 av de 7 blandningene. For de 3 øvrige blandningene ligger Lab.2 inntil 0,03 %-ekspansjon lavere enn Lab.1, men konklusjonen vedrørende om et tilslag er alkalireaktivt eller ikke er imidlertid den samme ved de 2 laboratoriene
- Lab.3 oppnår lavest ekspansjonsverdi for 6 av de 7 blandningene, og for èn av disse konkluderer Lab.3 med at tilslaget er ikke-alkalireaktivt, mens Lab.1 og Lab.2 har motsatt konklusjon
- De refererte avvikene i utførelsen ved Lab.3 for 4 av de 7 blandningene (dvs ingen vasking av tilslaget og endret blandeprosedyre) antas å ha hatt signifikant innvirkning på de oppnådde ekspansjonsresultatene, og dermed på de registrerte forskjellene mellom Lab.3 og de øvrige laboratoriene
- Ved både 7 og 14 døgns målingene av ekspansjon viser den statistiske behandlingen av resultatene at det er signifikante forskjeller mellom laboratoriene for fem av de syv blandningene

- Spredningen mellom laboratoriene er generelt lavest ved ekspansjoner  $>0,20$  %, uavhengig av eksponeringstid. For målingene etter 14 døgns eksponering er spredningen mellom laboratoriene lavest for de to blandingene med høyest ekspansjon ( $>0,20$  %). For de 4 blandingene med gjennomsnittlig ekspansjonsverdier etter 14 døgn mellom 0,10 og 0,15 % er spredningen mellom laboratoriene stor
- Ved 28 døgn er det ingen signifikant forskjell mellom målt ekspansjon ved de 3 laboratoriene for fem av de 7 blandingene, dvs det er mye mindre spredning i resultatene etter 28 døgns eksponering enn ved tidligere aldre
- Spredningen mellom laboratoriene ser ut til å være mye større mht registrert vektøkning enn mht målt ekspansjon. Innenfor ett og samme laboratorium var det imidlertid god korrelasjon mellom målt ekspansjon og vektøkning av prismene
- Observerte forskjeller i blandingenes konsistens uttrykt ved flytmålet ser ikke ut til å ha hatt signifikant innvirkning på ekspansjonsresultatene
- Det er meget viktig å følge metodebeskrivelsen nøye

## 2.3 Utvidet resultatgrunnlag - Naturlig tilslagsmateriale

*Gudrun Lundevall og Sigrun K. Bremseth - Norcem AS, FoU*

### 2.3.1 Bakgrunn

For naturlige tilslagsmaterialer med 20 % risikobergarter eller mer, har det tidligere vært vanlig å utføre akselerert mørtelprismememotode. Naturlig tilslag med risikobergarter under 20 % skal ikke utprøves etter akselerert mørtelprismemotode, fordi tilslaget blir klassifisert som ikke-alkalireaktivt ut fra den petrografiske analysen. Enkeltforsøk i området 10-20 % risikobergarter tyder også på at den akselererte mørtelprismemotoden er strengere enn den petrografiske. For å få bedre erfaring med tilslag med lavt innhold risikobergarter, er det blitt foretatt både petrografisk analyse og ekspansjonsundersøkelse etter akselerert metode av 5 tilslag som ved tidligere analyser inneholdt 10- 20 % risikobergarter.

### 2.3.2 Prøvningsutførelse

Petrografisk analyse ved hjelp av tynnslip er utført ved SINTEF Bygg og Miljøteknikk, avd. for Sement og Betong, av 5 naturlige tilslagsmaterialer. Sandprøvene er merket 3.1-3.5, og har ved tidligere analyser inneholdt 10 - 20% risikobergarter.

Det er utført ekspansjonsforsøk etter akselerert mørtelprismemotode ved Norcem FoU av de samme 5 sandprøver som ble analysert petrografisk ved SINTEF. Ekspansjonsforsøket er utført i henhold til SINTEF-rapport STF70 A93030 datert juni 1993 og vedlegg datert 8.10.97.

Sand B3.2 og B3.4 inngår også i Normin 2000, DP B2, ringforsøk for metodeutprøving av ekspansjon mellom SINTEF, Noteby og Norcem, henholdsvis som prøve B2.4 og B2.3.

#### 2.3.2.1 Utstøpning

Det er utstøpt 5 mørtelblandinger med:

- Sement (CEM I 42.5R) uttatt 1.04.97. Alkaliinnhold: 0.97 % Na<sub>2</sub>O ekv
- Sement : tilslag - 1 : 2.25
- v/c - 0.45
- 5 forskjellige sand tilslag:
- B3.1: sand 0-12 mm fra Buskerud. 6 % risikobergarter (metaryolitt, mylonitt/kataklasitt)
- B3.2 (B2.4): sand fra Sør-Trøndelag. 14 % risikobergarter (ryolittlign. bergart, siltstein, bergart m/ fin-mikrokrystallin kvarts)
- B3.3: sand fra Vestfold. 13 % risikobergarter (hornfels, bergart m/ fin-mikrokrystallin kvarts, siltstein, mylonitt/kataklasitt)
- B3.4 (B2.3): sand 0-8 mm fra Sør-Telemark. 16 % risikobergarter (metaryolitt, finkornet kvartsitt, mylonitt/kataklasitt )

- B3.5: sand 0-8 mm fra Nordland. 24 % risikobergarter (fyllitt, bergart m/ finmikrokrystallin kvarts, finkornet kvartsitt, gråvakke, mylonitt/kataklasitt)

Sanden er siktet ut og fraksjonert i hht. ASTM C227 (små avvik i sikter).

### 2.3.2.2 Konsistens

Utbredelse av mørtel: B.3.1-215 mm, B3.2-200 mm, B3.3-213 mm, B3.4-218 mm, B3.5-160 mm

### 2.3.2.3 Lagring

Det er støpt ut 3 prismer i størrelse 4x4x16 cm<sup>3</sup> av hver blanding. Mørtlene er eksponert i 1-N NaOH løsning ved 80°C. Volum av mørtel/væske er 1/4. Prøvning ihht kapittel 2.1. Det ble foretatt ekspansjonsmåling av mørtlene etter 5, 7, 9 (10), 12, 14 og 28 døgn.

### 2.3.3 Resultater

Resultater fra petrografisk analyse av sanden er nærmere beskrevet i SINTEF prøvningsrapport merket prosjektnummer 22M103.23 datert 16.04.98, se vedlegg 2.3.1.

Tabell 2.3.1 Resultater for utprøvning av sandtilslag etter akselerert mørtelprismemotode - % Ekspansjon. Ekspansjonsforløpet er også angitt i figurene 2.3.1 - 2.3.5.

Risikobergarter	6 %	13 %	14 %	16 %	24 %
Blanding	B 3.1	B 3.3	B 3.2	B 3.4	B 3.5
5 dg	0.021	0.006	0.021	0.032	0.022
7 dg	0.035	0.013	0.039	0.050	0.034
14 dg	0.090	0.059	0.118	0.129	0.108
28dg	0.215	0.178	0.273	0.265	0.236

Tabell 2.3.2 Resultater for utprøvning av sandtilslag etter akselerert mørtelprismemotode - % Vektøkning. Ekspansjonsforløpet er også angitt i figurene 2.3.1 - 2.3.5..

Risikobergarter	6 %	13 %	14 %	16 %	24 %
Blanding	B 3.1	B 3.3	B 3.2	B 3.4	B 3.5
7 dg	0.35	0.29	0.57	0.59	0.46
14 dg	0.81	0.70	1.08	1.16	0.92
28dg	1.61	1.57	1.95	1.98	1.73

### 2.3.4 Diskusjoner

Resultater ved utprøvning av mørtel med tilslag B3.5 etter akselerert mørtelprismememotode, viser 0.108 % i ekspansjon. Petrografisk analyse av sanden som tidligere har hatt 19 % risikobergarter, har nå 24 % av disse. Det reaktive/mulig reaktive tilslaget er hovedsakelig bergart med finkrystallin kvarts og finkornet kvartsitt. Tilslag B3.5 tilfredsstiller ikke forsøksbetingelsene med risikobergarter < 20 % og viser som forventet, en ekspansjon over den kritiske grensen på 0.10 %.

Prøve B3.3 med 13 % risikobergarter som vesentlig består av mulig reaktive bergarter som hornfels og bergart med fin-mikrokrystallin kvarts samt siltstein, viser en forventet lav ekspansjon på 0.059 %. Hornfels fra Dalen har ved tidligere utprøvning etter akselerert mørtelprismemotode vist ekspansjoner under den kritiske grensen, Norcem FoU internrapport.

Prøve B3.1 med 6 % risikobergarter (metaryolitt og mylonitt/kataklasitt), viser 0.090 % ekspansjon i mørtel etter 14 dagers eksponering. Ekspansjonen er under den kritiske grensen på 0.10 %, men er noe høyere enn forventet med så lavt innhold av risikobergarter.

Både ryolitt og mylonitt/kataklasitt hører hver for seg til de mest ekspansive bergarter i Norge. I følge den petrografiske analysen er det ikke identifisert andre mulig reaktive bergarter i sanden. Sanden inneholder imidlertid 29 % grove kvartsitter. Det er et spørsmål om den kritiske grensen for kornstørrelse av kvarts er korrekt (se neste avsnitt).

Prøvene B3.2 og B3.4 med henholdsvis 14 % og 16 % risikobergarter, viser hhv 0.118 % og 0.129 % ekspansjon. Begge prøver viser ekspansjon over den kritiske grensen og er høyere enn forventet. Årsaken til den høye ekspansjonen kan skyldes flere faktorer som:

- særlig ekspansive bergartskombinasjoner (ryolitt og mylonitt/kataklasitt).
- akselerert mørtelprismemotode, der mørtler er eksponert i 1N NaOH ved 80°C, er kjent for å være en svært streng metode. Det er hevdet internasjonalt at metoden har underkjent bergarter som aldri har vist alkalireaksjoner i felt.

Tynnslipsanalyse av prøver med høyere ekspansjon enn forventet, vil kunne gi bedre svar på årsaksforhold. Prøvematerialet i forsøket er imidlertid svært begrenset.

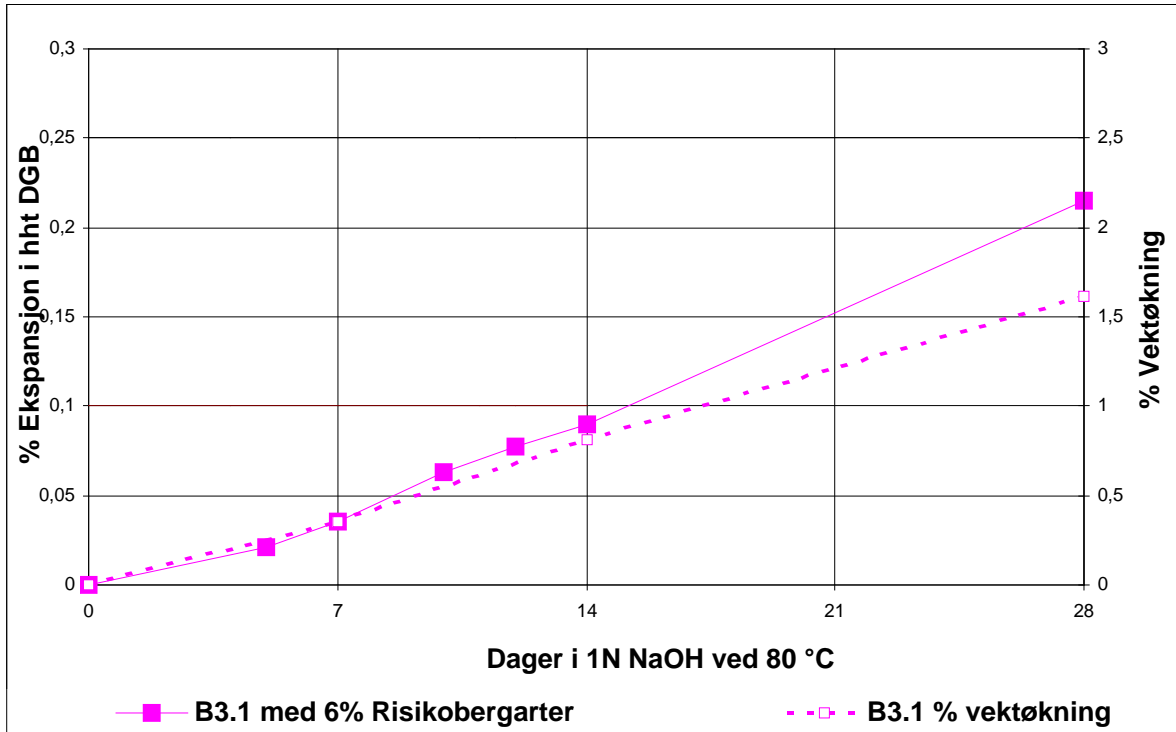
### 2.3.5 Konklusjon

Petrografisk analyse av tilslagene viste at bare 4 sandprøver tilfredstilte forsøksbetingelser for utprøvning av prøver med risikobergarter under 20 % etter akselerert mørtelprismemotode.

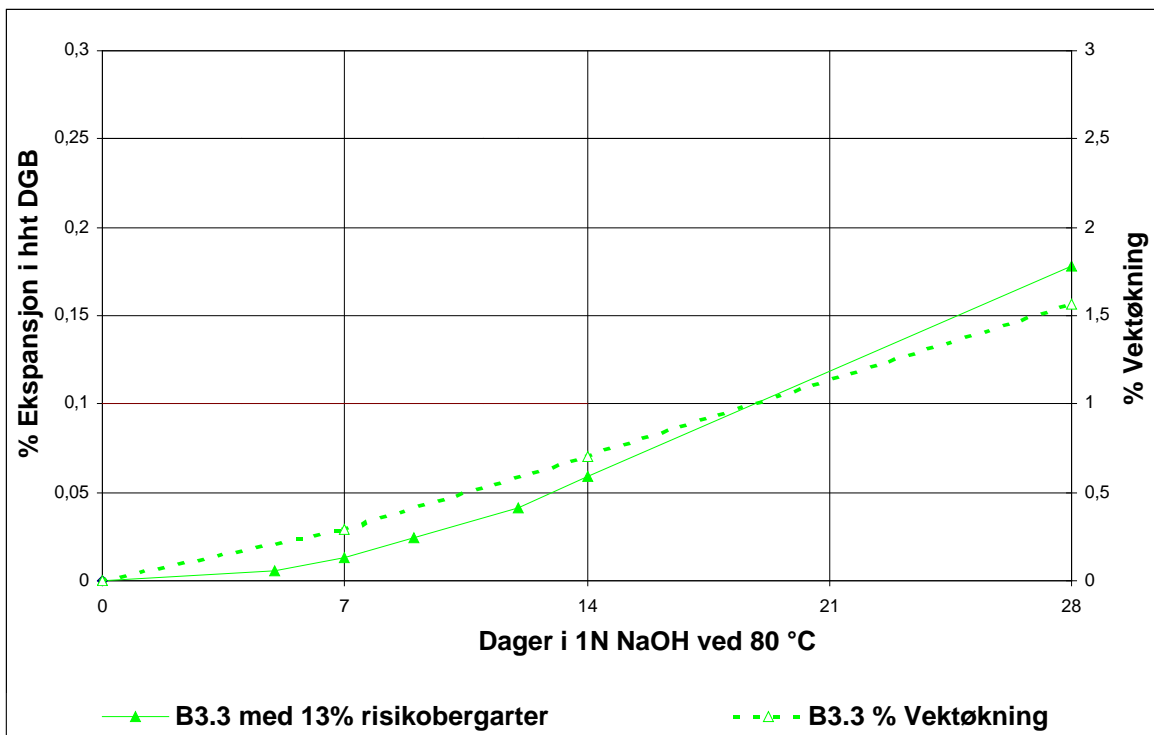
Sand med 6 % og 13 % risikobergarter viste ekspansjoner under den kritiske grensen på 0.10 %, mens sand med 14 % og 16 % risikobergarter viste ekspansjoner over den kritiske grensen. 3 av tilslagene viste en høyere ekspansjon enn forventet. Årsakene til dette kan være flere, som f.eks. metodepåvirkning som høy temperatur og alkalisk oppløsning. Enkelte bergartstyper eller bergartskombinasjoner kan også gi uventet høy ekspansjon.

Tabell 2.3.3 % Ekspansjon og % vektøkning av tilslag med lav andel risikobergarter

Blanding	B 3.1	B 3.3	B 3.2	B 3.4	B 3.5
Sand	0-12 mm, Buskerud	Vestfold	Sør-Trøndelag	0-8 mm Nenset	0-8 mm Nordland
Risikobergarter målt nå, (før)	<b>6 %</b> (11 %)	<b>13 %</b> (14 %)	<b>14 %</b> (12 %)	<b>16 %</b> (16-18 %)	<b>24 %</b> (19 %)
Reaktive tilslag	metaryolitt, mylonitt/ kataklasitt	siltstein, mylonitt/ katalasitt, hornfels, b.a. m/ finkr.- mikrokr. kvarts	ryolittlign b.a., siltstein b.a. m/ finkr.- mikrokr. kvarts	metaryolitt, finkr. kvartsitt, mylonitt/ kataklasitt	fyllitt, finkorn. kvartsitt, mylonitt/ kataklasitt
Utbredelse	215 mm	213 mm	200 mm	218 mm	222 mm
5 dg		0.006	0.021	0.032	0.022
7 dg % eksp % vektøk	0.035 0.35	0.013 0.29	0.039 0.57	0.050 0.59	0.034 0.46
9 dg		0.024	0.056	0.070	0.053
10 dg	0.063				
12 dg	0.077	0.041	0.093	0.103	0.088
<b>14 dg % eksp % vektøk</b>	<b>0.090</b>	<b>0.059 0.70</b>	<b>0.118 1.08</b>	<b>0.129 1.16</b>	<b>0.108 0.92</b>
28dg % eksp % vektøk	0.215 1.61	0.178 1.57	0.273 1.95	0.265 1.98	0.236 1.73



Figur 2.3.1. Ekspansjonsforløp og vektøkning for sand med 6% risikobergarter som ryolitt og mylonitt



Figur 2.3.2. Ekspansjonsforløp og vektøkning for sand med 13% risikobergarter som silt, mylonitt og hornfels

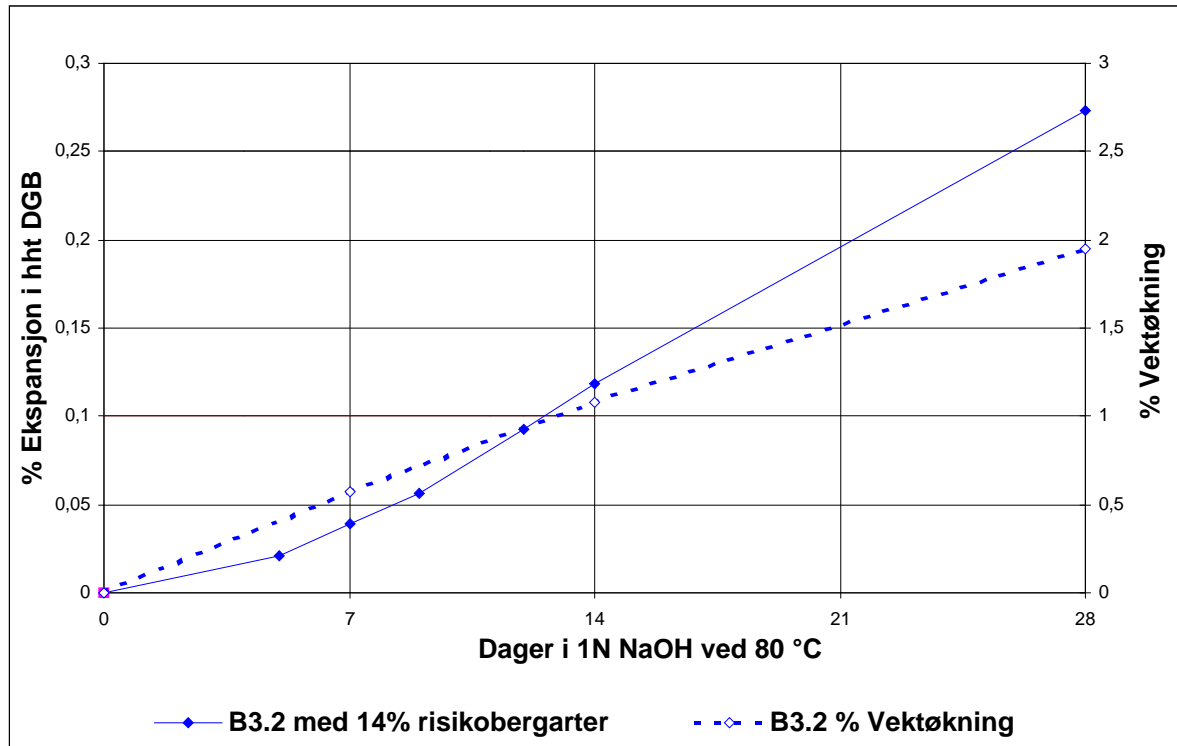
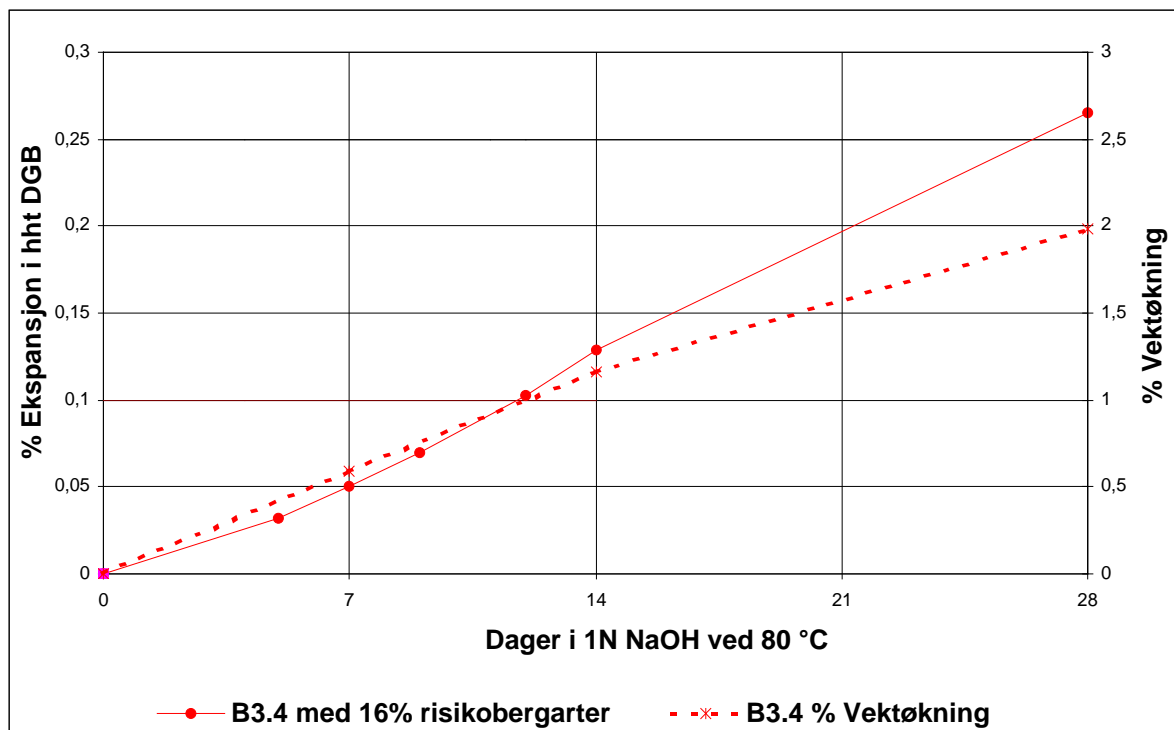
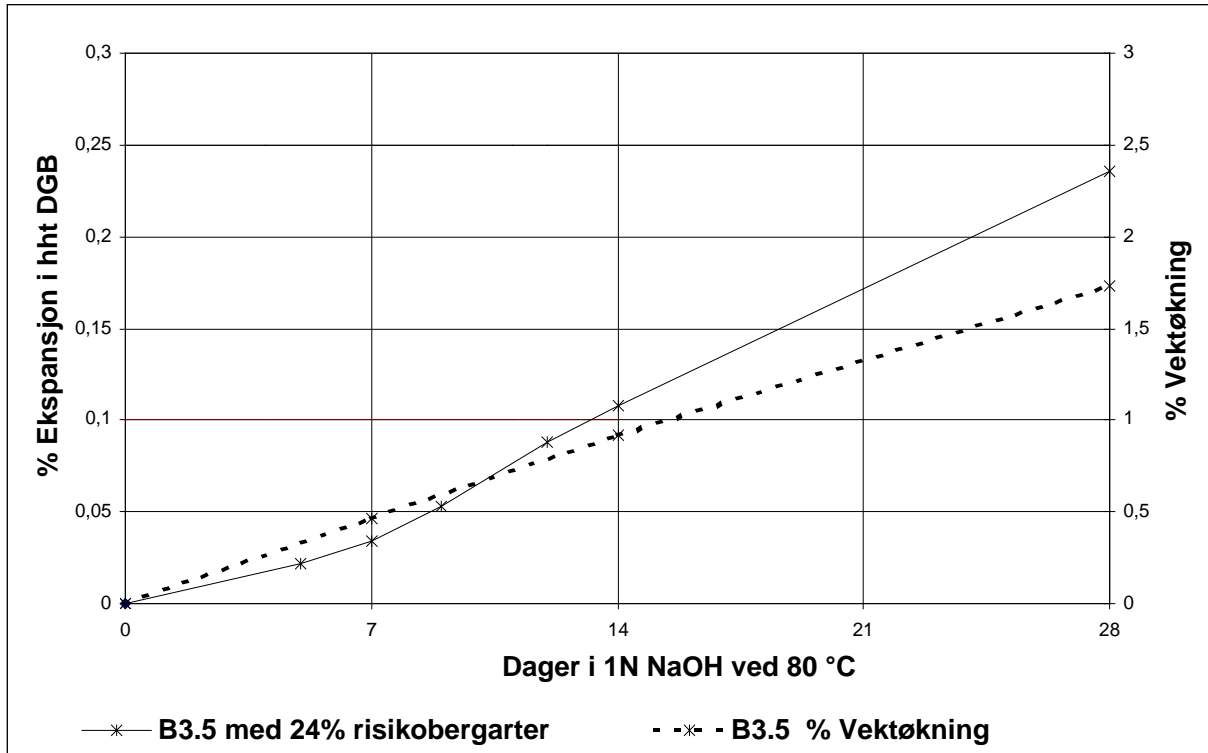


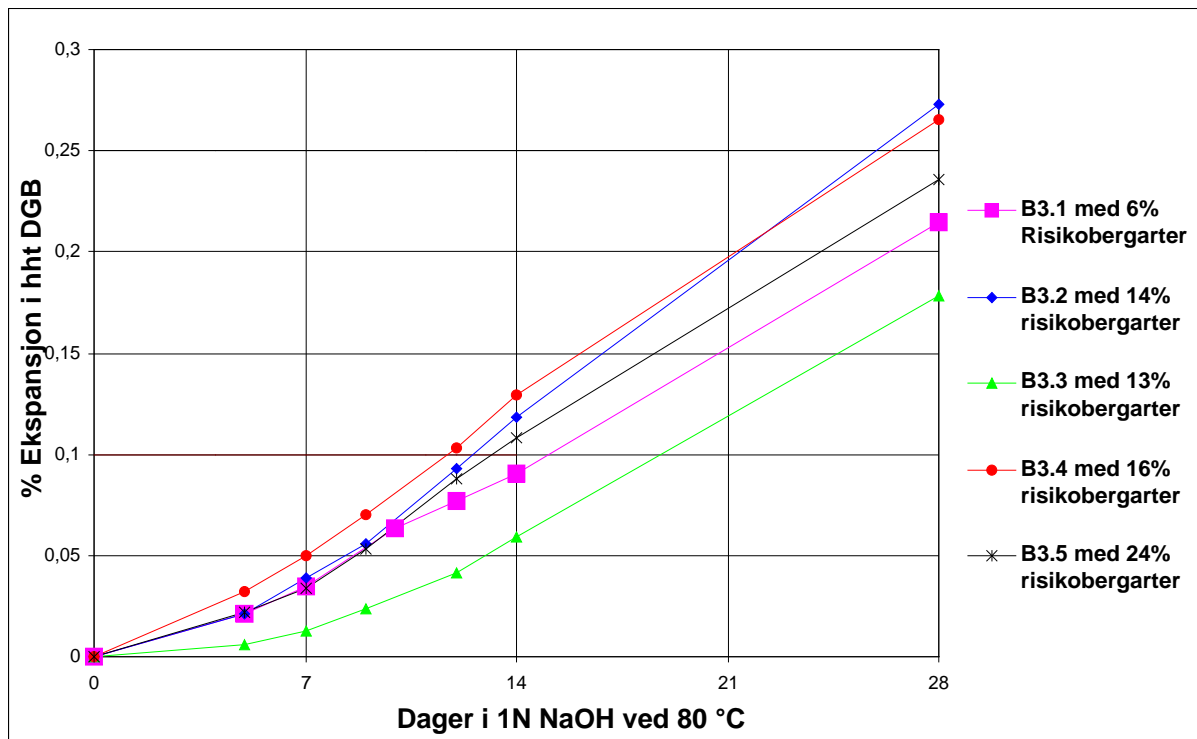
Figure 2.3.3. Ekspansjonsforløp og vektøkning for sand med 14% risikobergarter som ryolittlign. bergart, silt og mikrokr. kvarts



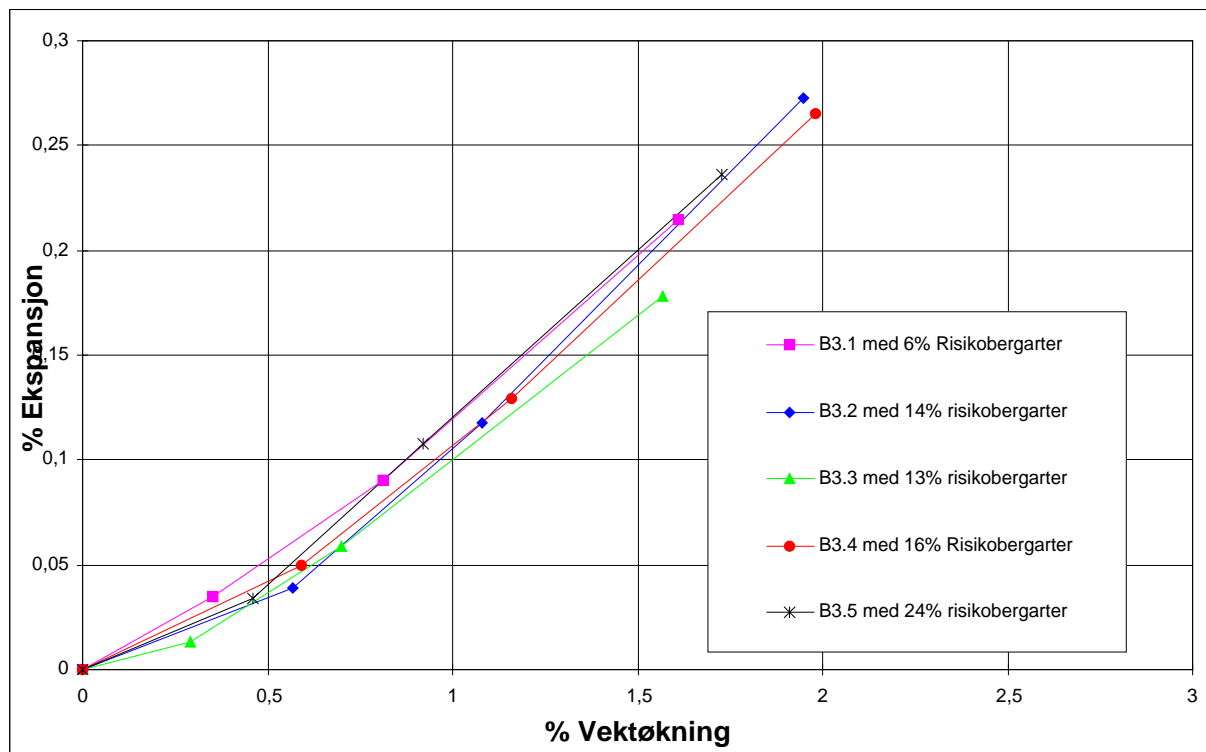
Figur 2.3.4. Ekspansjonsforløp og vektøkning for sand med 16% risikobergarter som ryolitt, kvartsitt og mylonitt



Figur 2.3.5. Ekspansjonsforløp og vektøkning for sand med 24% risikobergarter som fyllitt og finkornet kvarts o.l.



Figur 2.3.6. Samlet ekspansjonsforløp sand med ulikt innhold av risikobergarter



Figur 2.3.7. Samlet vektøkning for sand med ulikt innhold av risikobergarter

## 2.4 Utvidet resultatgrunnlag - Blandet tilslagsmateriale

*Gudrun Lundevall og Sigrun K. Bremseth - Norcem AS, FoU*

### 2.4.1 Bakgrunn

Tilslag er klassifisert som ikke reaktivt når andelen risikobergarter (reaktive og mulig reaktive bergarter) er under 20 %. Denne grenseverdi er blant annet basert på tilslagsblandinger med ryolitt og en inaktiv sand fra NorStone utprøvet etter akselerert mørtelprismemotode. Ryolitt er ansett som en av de mest reaktive bergarter i Norge, og derfor ble den kritiske grensen på 20 % risikobergarter ansett for å være streng.

Ved utprøving etter akselerert mørtelprismemotode har tilslagsblandinger med reaktive og ikke reaktive materialer noen ganger vist høyere ekspansjon enn forventet. Årsaken til dette er ikke godt nok klarlagt. Det blir antydnet at den uventete ekspansjonsøkningen kan skyldes pessimalverdier, eventuelt høyt ekspansjonsbidrag fra det ikke reaktive materialet eller metodeforhold.

For å få bedre forståelse av reaksjonsmønsteret ved tilslagsblandinger, er det i første omgang foretatt undersøkelse av reaktiv kataklasitt i blanding med inaktiv gabbro.

### 2.4.2 Prøvebehandling

Det er utført ekspansjonsforsøk med mørtelblandinger med ulik sammensetning av gabbro og kataklasitt ved Norcem FoU etter akselerert mørtelprismemotode i henhold til SINTEF-rapport STF70 A93030 datert juni 1993 og vedlegg datert 8.10.97.

#### 2.4.2.1 Utstøpning

Det er utstøpt 7 blandinger mørtel som er merket bl.4.0-4.6, med:

- Sement (CEM I 42.5R) uttatt 1.04.97. Alkaliinnhold: 0.97 % Na<sub>2</sub>O ekv
- Sement : tilslag = 1 : 2.25
- v/c - 0.45
- Kataklasitt som inneholder 100 % risikobergarter
- Gabbro som inneholder 0 risikobergarter

Tilslagene, kataklasitt og gabbro, er fraksjonert hver for seg etter ASTM C227 og blandet i følgende forhold:

- Kataklasitt/Gabbro: 0/100, 10/90, 20/80, 40/60, 60/40, 90/10, 100/0

#### 2.4.2.2 Konsistens

- Utbredelse av mørtel: 205, 194, 194, 190, 185, 172, 164 mm



Tabell 2.4.3 Resultater av tilslagsblandinger: Kataklasitt / Gabbro

Blanding	B 4	B 4.2	B 4.3	B 4.4	B 4.5	B 4.6	B 4.1
Kataklasitt	0	10 %	20 %	40 %	60 %	90 %	100 %
Gabbro	100 %	90 %	80 %	60 %	40 %	10 %	0
Utbredelse	205mm	194mm	194mm	190mm	185mm	172mm	164mm
5 dg	0.003	0.014	0.023	0.040	0.055	0.064	0.069
7 dg % eksp	0.003	0.023	0.039	0.067	0.090	0.097	0.098
% vektøk	0.16	0.43	0.67	0.78	1.08	1.41	1.41
9 dg	0.005					0.126	0.124
10 dg		0.042	0.072	0.113	0.142		
12 dg	0.005	0.057	0.097	0.151	0.171	0.157	0.156
14 dg % eksp	0.006	0.071	0.122	0.178	0.198	0.181	0.177
% vektøk	0.26	0.93	1.34	1.63	1.76	1.76	1.81
28 dg % eksp	0.008	0.186	0.298	0.367	0.351	0.275	0.267
% vektøk	0.38	1.54	2.23	2.25	2.15	2.11	2.11
42 dg % eksp						0.342	
% vektøk						2.11	
56 dg % eksp						0.387	
% vektøk						2.11	
84 dg % eksp						0.459	
% vektøk						2.28	
112 dg % eksp						0.51	
% vektøk						2.34	
140 dg % eksp						0.564	
% vektøk						2.69	
168 dg % eksp						0.616	
% vektøk						2.75	
196 dg % eksp						0.664	
% vektøk						2.69	
224 dg % eksp						0.714	
% vektøk						2.81	

#### 2.4.4 Diskusjoner

Resultatene viser at den kritiske grensen på 0.10 % ekspansjon i hht akselerert mørtelprismemotode er overskredet for blandet tilslag med 20 % kataklasitt som reaktivt materiale. Dette er i samsvar med noen tidligere resultater når det gjelder utprøvning av blandet materiale. Videre utprøvning av materialkombinasjoner med mindre enn 20 % kataklasitt anbefales for å finne den kritiske grensen for kataklasitt i blanding med gabbro.

Ved 7 døgn eksponering i 1N NaOH øker ekspansjonen av mørtel med økende andel kataklasitt i forhold til gabbro. Ved 14 og 28 døgn eksponering i NaOH-løsning er ekspansjonen høyest når andelen kataklasitt er henholdsvis 60 % og 40 %. Disse resultater tyder på at det observeres pessimumsverdier for disse tilslagskombinasjonene ved prøving etter den akselererte mørtelprismemotoden. Det henvises til kapittel 2.5 og 2.7 for nærmere diskusjon om pessimums-spørsmålet.

Mørtlenes vektøkning er stort sett sammenfallende med 1/10 av ekspansjonsresultatene for blandingene etter 14 døgn. Ved 28 døgn er vektøkningen størst i mørtel med 40/60 kataklasitt/gabbro. Vektøkningen er et mål på fukt og alkali-inntrengning i prøvene og mengde reaksjonsprodukter.

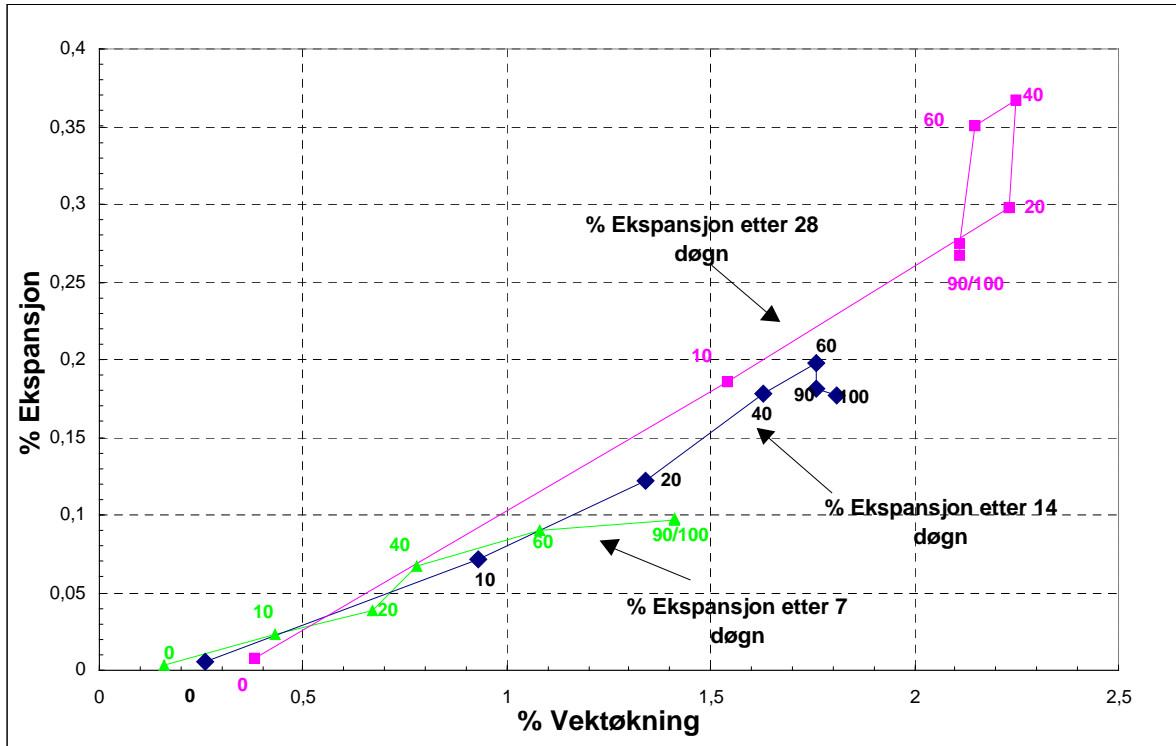
Konsistensen for mørtelblandingene som har fast v/c-forhold lik 0.45, varierer fra 205 til 164 mm i utbredelse avhengig av andel kataklasitt. Mørtler med ren kataklasitt virker stivest. Konsistensen var imidlertid ansett som tilfredsstillende, og homogenitet av struktur er i etterhånd sjekket og funnet i orden.

Tilslagskombinasjoner som gir høyest ekspansjon og vektøkning i løpet av 28 døgn, viser en utbredelse av mørtel på 190-185 mm. Mørtel med ren, inaktiv gabbro har størst utbredelse, men helt ubetydelig vektøkning og ekspansjon.

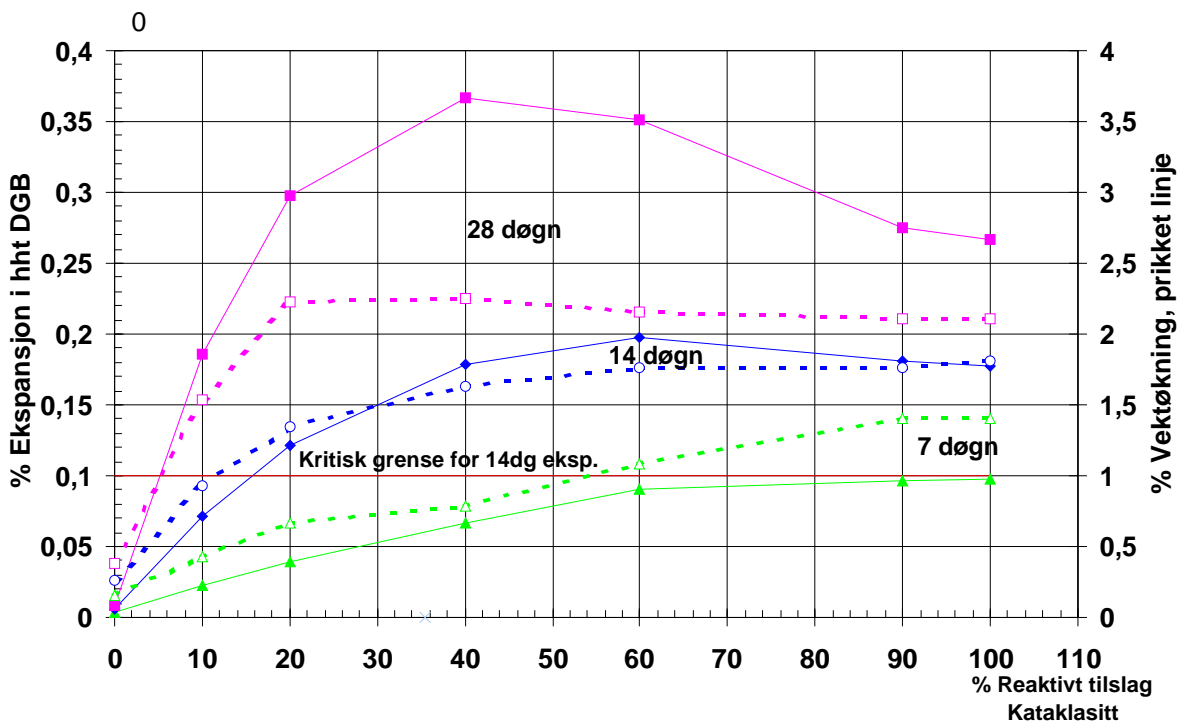
#### **2.4.5 Konklusjon**

Resultatene viser at den kritiske grensen på 0.10 % ekspansjon i hht akselerert mørtelprismemetode er overskredet for blandet tilslag med 20 % kataklasitt som reaktivt materiale.

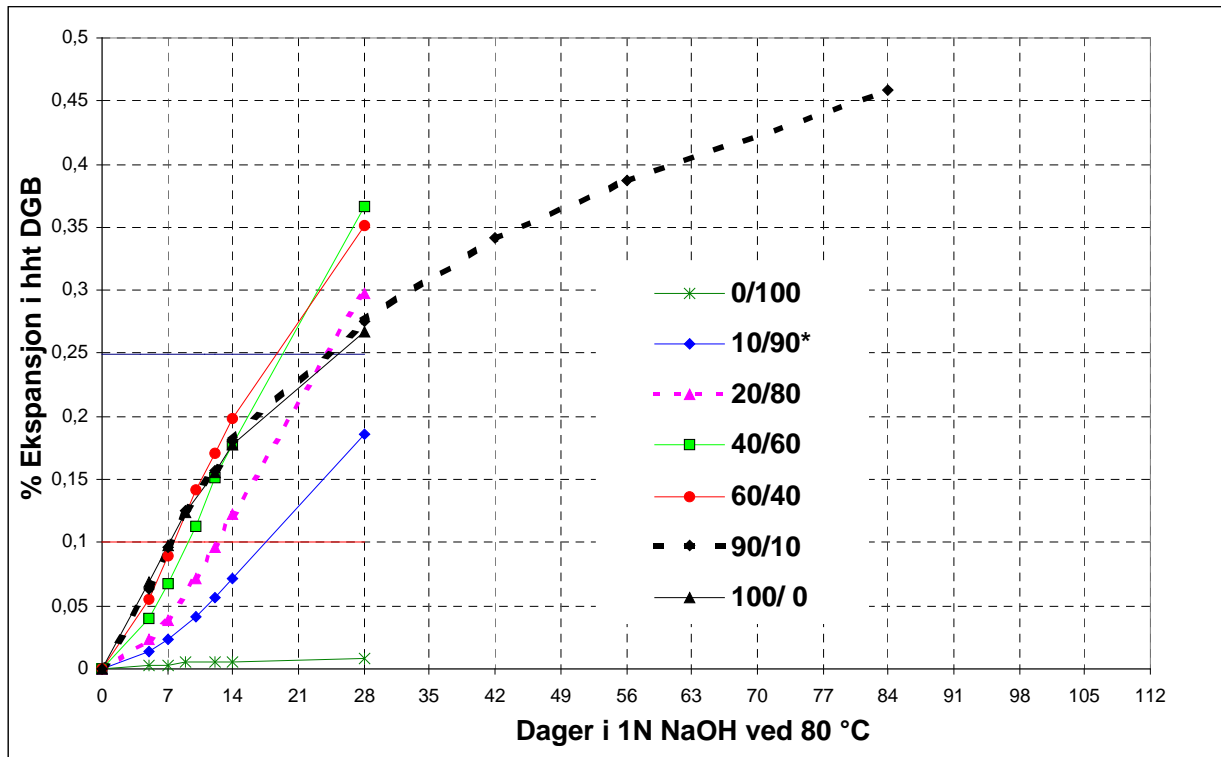
Ved 7 døgns eksponering i 1N NaOH øker ekspansjonen av mørtel med økende andel kataklasitt i forhold til gabbro. Ved 14 og 28 døgns eksponering i NaOH-løsning er ekspansjonen høyest når andelen kataklasitt er henholdsvis 60 % og 40 %. Disse resultater for tilslagskombinasjonen tyder på at det observeres pessimumsverdier som kan være både metode- og bergartbetinget. Se også kapittel 2.5 og 2.7 angående diskusjon om pessimumsverdier.



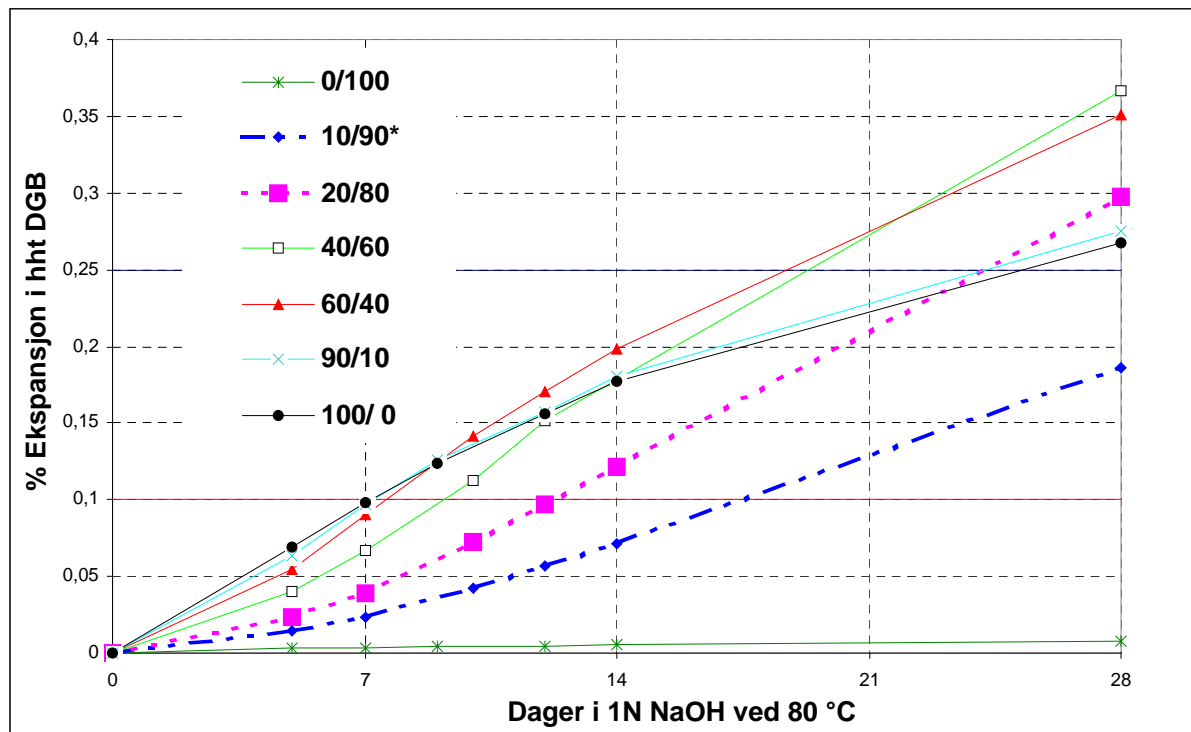
Figur 2.4.1. Akselerert mørtelprismemotode for blandet tilslagsmateriale, % ekspansjon vs. % vektøkning



Figur 2.4.2. Akselerert mørtelprismemotode for blandet tilslagsmateriale, % ekspansjons og % vektøkning for ulike andeler risikobergarter.



Figur 2.4.3. Akselerert mørtelprismemotode for blandet tilslagsmateriale, ekspansjonsforløp for alle blandinger frem til 84 dager



Figur 2.4.4. Akselerert mørtelprismemotode for blandet tilslagsmateriale, ekspansjonsforløp for alle blandinger frem til 28 dager

## 2.5 Sammenheng mellom resultater oppnådd ved petrografisk analyse og akselerert mørtelprismemetode

*Jan Lindgård og Einar Aassved Hansen, SINTEF Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong*

### 2.5.1 Bakgrunn

Som nevnt er det i dag 3 laboratorier som er godkjent av Kontrollrådet for betongprodukter, klasse P, for å utføre prøving av tilslag i hht den akselererte mørtelprismemetoden. Disse ble i kapittel 2.2 benevnt hhv Lab.1, Lab.2 og Lab.3. I følge beskrivelsen for Kontrollrådet skal mørtelprismeforsøkene foretas på den samme uttatte tilslagsprøven som det foretas petrografisk analyse av (Lindgård et.al, 1993). 2 av de 3 laboratoriene er godkjent i Kontrollrådet for prøving av tilslag ved petrografisk analyse. Det tredje sender derfor sine prøver til ett av de øvrige for utførelse av petrografisk analyse.

I løpet av de 5 årene som har gått siden den refererte beskrivelsen ble vedtatt i Kontrollrådet, er det totalt utført over 100 forsøk i hht de to metodene på den samme uttatte tilslags-prøven fra ulike forekomster i Norge. Det er ikke tidligere foretatt noen felles sammenstilling av resultatene fra disse forsøkene som er utført ved de 3 laboratoriene. De sammenstillingene som er publisert tidligere gjelder kun forsøk utført ved SINTEF (Wigum og Lindgård, 1994; Jensen og Haugen, 1997).

Når de to metodene med tilhørende grenseverdier skal vurderes opp i mot hverandre, er det viktig å foreta en mest mulig komplett sammenstilling av resultater oppnådd ved de 3 laboratoriene. Det vil gi best mulig grunnlag for å besvare følgende spørsmål;

1. Er det en god overensstemmelse mellom dagens gjeldende grenseverdier på hhv 20 % risikobergarter (sum av reaktive - og mulig reaktive bergarter) og 0,10 % ekspansjon etter 14 dager?
2. Oppnås bedre korrelasjon mellom % risikobergarter og 28 døgns ekspansjon enn 14 døgns ekspansjon?
3. Samsvarer resultatene oppnådd ved de 3 laboratoriene?
4. Er det signifikante forskjeller mellom sand (utsiktet fra naturlige forekomster) og stein (utsiktet fra nedknust singel eller puk) mht sammenhengen % risiko-bergarter og ekspansjon?
5. Er det mulig å observere pessimalverdier for sammenhengen mellom % risiko-bergarter og ekspansjon? (dvs ser ekspansjonen ut til først å øke for så å avta med økende andel risikobergarter?)
6. Kan eventuelle avvikende ekspansjonsverdier relateres til spesifikke typer risikobergarter?
7. Er det mulig å observere trender der enkelte risikobergarter bidrar til økt eller redusert ekspansjon i forhold til "gjennomsnitt"?
8. Oppnås det bedre korrelasjon mellom resultatene dersom ulike reaktive- og mulig reaktive bergarter vektlegges forskjellig ut fra antatt "grad av reaktivitet"?

En mest mulig komplett sammenstilling av resultater oppnådd i Norge i løpet av de siste 5 årene er foretatt innenfor dette NORMIN-prosjektet. De ulike laboratoriene har gått igjennom sine forsøksresultater og oversendt resultatene til SINTEF som har sammenstilt og bearbeidet disse ved bruk av Excel regneark. I rapporteringen er både tilslagsleverandørene og laboratoriene anonymisert. Laboratoriene er benevnt det samme som i kapittel 2.2, dvs hhv Lab.1, Lab.2 og Lab.3.

Den statistiske behandlingen av dataene er hovedsakelig utført innenfor SINTEF's strategiske instituttprogrammet (SIP) "FDV og levetid av bygd miljø", som er finansiert av Norges Forskningsråd.

### 2.5.2 Prøvingsomfang og utførelse

I sammenstillingene av resultatene er det skilt mellom:

*Sand:* Utsiktet fra naturlige forekomster. I enkelte tilfeller inneholder sanda også mindre innslag av nedknust overstein, uten at dette fremgår av resultatene

*Stein:* Utsiktet fra nedknust singel eller pukk. Inkluderer også enkelte mørtelprisme-forsøk utført på blandet tilslag (dvs tilslag der 2 pukktyper er blandet). Alle tilslagskornene for "steinprøvene" har i hovedsak knuste overflater

Totalt er det utført forsøk på 112 tilslagstyper. Tabell 2.5.1 gir en oversikt over antall enkeltresultater som er inkludert i de presenterte resultatene, samt fordeling av disse både mht type tilslag (sand eller stein) og mht hvem som har utført forsøkene.

I følge beskrivelsen av de to metodene, skal det kun foretas videre forsøk i hht den akselererte mørtelprismemetoden dersom innholdet av risikobergarter er  $\geq 20\%$ . Av denne grunn finnes det få data for sammenhengen mellom innhold av risikobergarter og ekspansjon ved akselerert mørtelprismeforsøk i området 0-20 % risikobergarter. De fleste tilgjengelige resultatene i området 0-20 % risikobergarter er fremskaffet gjennom forsøk utført innenfor dette NORMIN-prosjektet.

Tabell 2.5.1 Oversikt over prøveomfang og fordeling mellom laboratoriene

Laboratorium	Antall prøver inkludert i sammenstillingene			Kommentarer
	Sand	Stein	Totalt	
Lab.1	29	22	51	
Lab.2	24	18	42	
Lab.3	7	12	19	For stein har Lab.3 hovedsakelig prøvd tilslag med enten 0 eller 100 % risikobergarter
Totalt	60	52	112	

Ved bearbeidingen og vurderingen av dataene er det laget følgende sammenstillinger/ plott av resultatene, både for ekspansjon ved 14 og 28 døgns alder:

1) Alle måleresultater:

- samlet med og uten regresjonslinje (2.gradspolynom)
- som over, men de tre laboratoriene er gitt ulike symboler
- ett laboratorium er utelatt og regresjonslinje trukket for de to øvrige
- samlet med angivelse av dominerende bergartsgrupper (kun 14 døgn, med og uten regresjonslinje)

2) Kun sandtilslag:

- resultatene fra de tre lab.ene plottet i en figur, med og uten ulike symboler for laboratoriene
- resultater med andel risikobergarter 0-40 % plottet sammen med ulike symboler for laboratoriene, både med lineær - og 2.grads regresjonslinje for hvert laboratorium.
- som over, men for andel risikobergarter 0-60 % (ikke-lineær regresjon)
- som over, men for andel risikobergarter 0-100 % (ikke-lineær regresjon)
- % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 dager, inkl. angivelse av dominerende bergartsgrupper (uten regresjonslinje)

3) Kun steintilslag (dvs. pukk, singel og blandet tilslag):

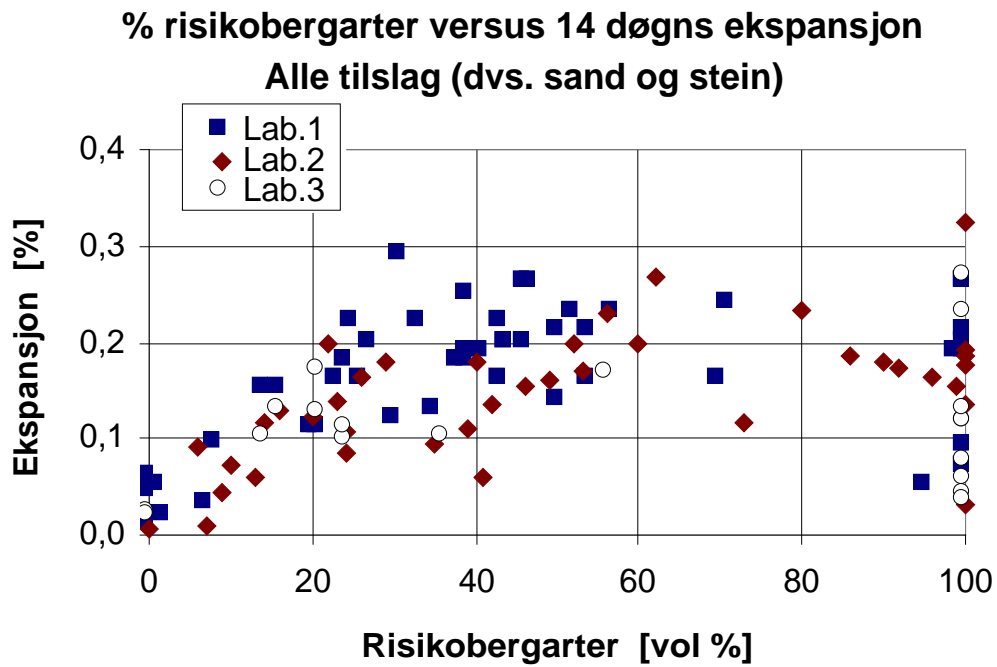
- resultatene fra de tre lab.ene plottet i en figur, med og uten ulike symboler for laboratoriene
- resultater med andel risikobergarter 0-40 % plottet sammen med ulike symboler for laboratoriene, både med lineær - og 2.grads regresjonslinje for hvert laboratorium.
- som over, men for andel risikobergarter 0-60 %
- som over, men for andel risikobergarter 0-100 % (ikke lineær regresjon)
- % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 dager, inkl. angivelse av dominerende bergartsgrupper (uten regresjonslinje)

I tillegg er det laget flere plott der ulike bergartsgrupper er gitt ulik vekting, ut fra en antagelse om at noen bergartstyper gir høyere ekspansjonsverdier i mørtelprisme-forsøkene enn andre. Ved denne vektingen ble innholdet av risikobergarter av bestemte bergartstyper multiplisert med ulike faktorer ("vektingstall") i området 0,5-1,5. Etter vektingen ble det foretatt regresjonsanalyser for å se om de valgte "vektingstallene" førte til bedre korrelasjon mellom resultatene oppnådd ved de to laboratoriemetodene.

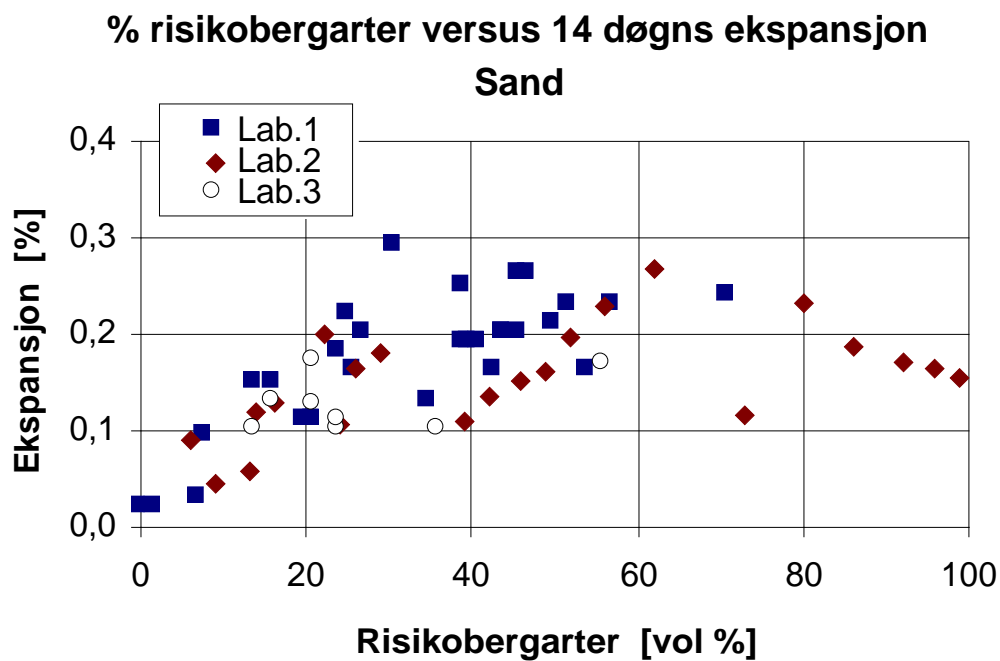
De mest relevante av plottene/figurene er presentert i kapittel 2.5.3 og 2.5.4, samt i vedlegg 2.5.1-2.5.3. For de presenterte sammenstillingene er det foretatt en vurdering av de punktene som ligger lengst ut fra regresjonslinjen, med det formål å utelukke plottefeil samt å undersøke om resultatene for noen bergartsgrupper konsekvent avviker fra de øvrige resultatene.

### **2.5.3 Resultater**

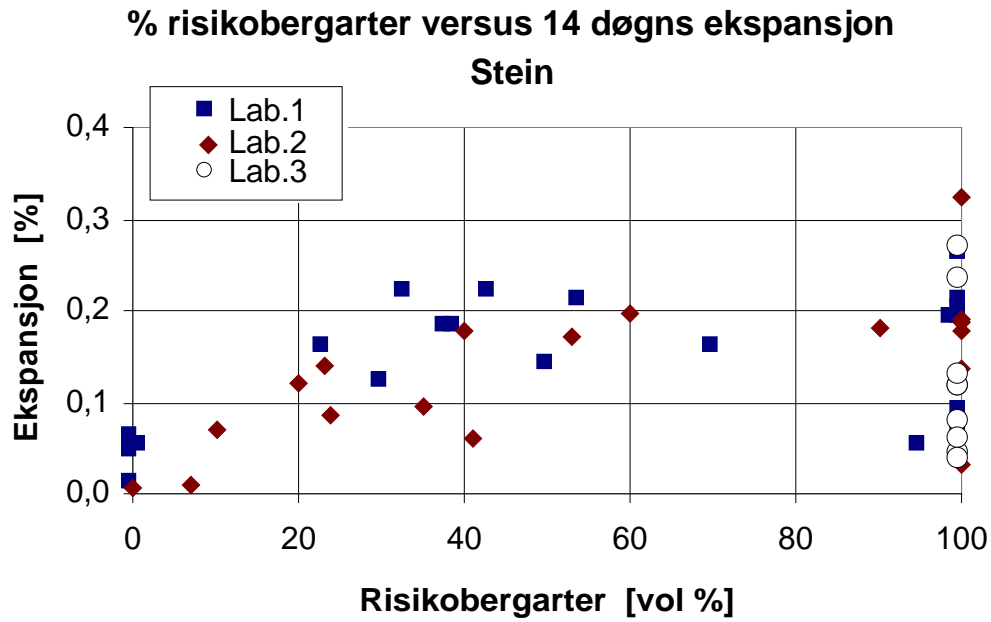
I figur 2.5.1 er samtlige resultat for de 112 tilslagstypene (både sand og stein) presentert samlet, og de tre laboratoriene er her gitt ulike symboler. Resultatene for sand og stein (dvs. pukk, singel og blandet knust tilslag) er presentert hver for seg i figurene 2.5.2 og 2.5.3. Tilsvarende figurer som beskrevet ovenfor, men med angivelse av dominerende bergartsgrupper (i stedet for laboratorium), er presentert i figurene 2.5.4 (sand), 2.5.5 (stein) og 2.5.6 (både sand og stein). I vedlegg 2.5.3 er det presentert en figur tilsvarende figur 2.5.6, men som inkluderer regresjonslinjer for de ulike bergartsgruppene.



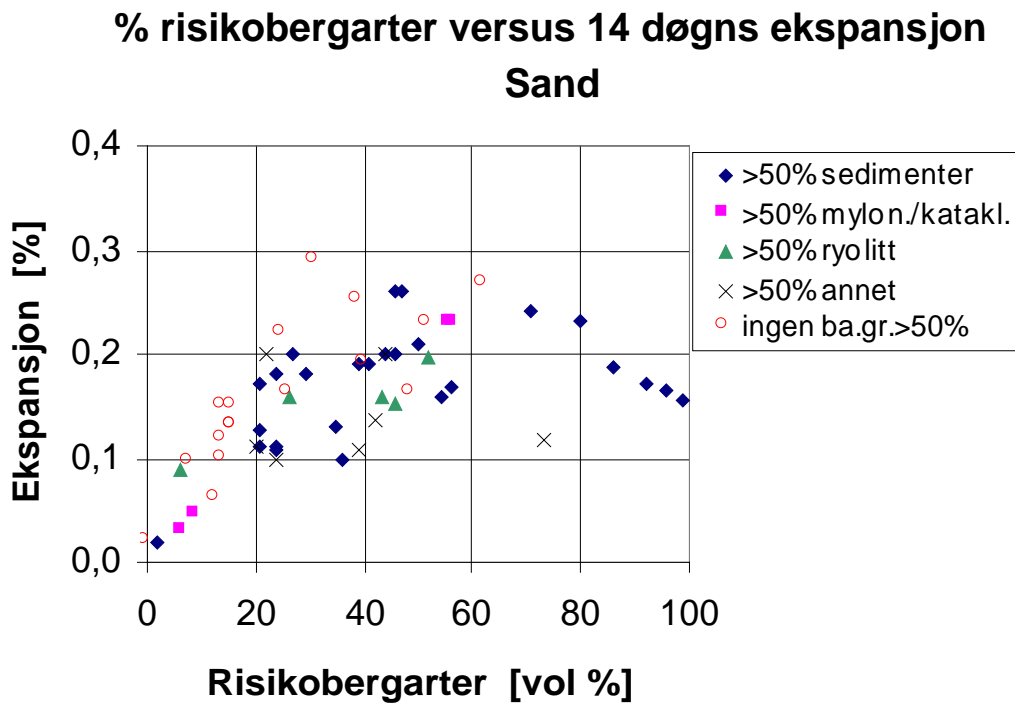
Figur 2.5.1 % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 døgn for alle de 112 tilslagene inkludert, med ulike symbol for de tre laboratoriene



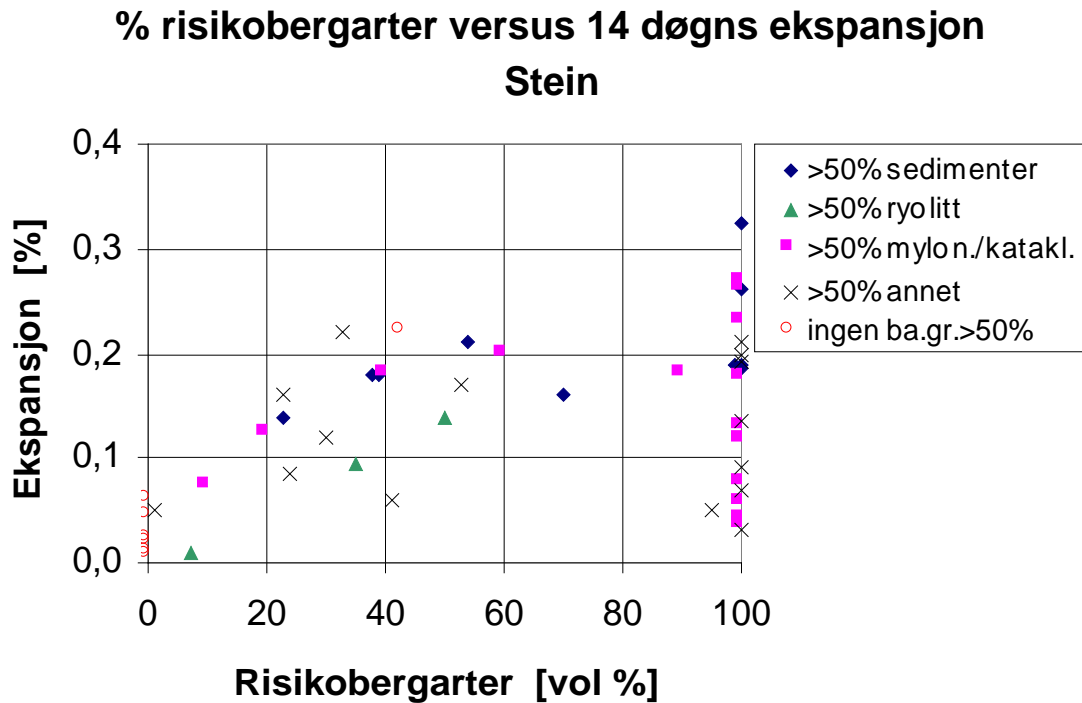
Figur 2.5.2 % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 døgn for de 60 sand-typene, med ulike symbol for de tre laboratoriene



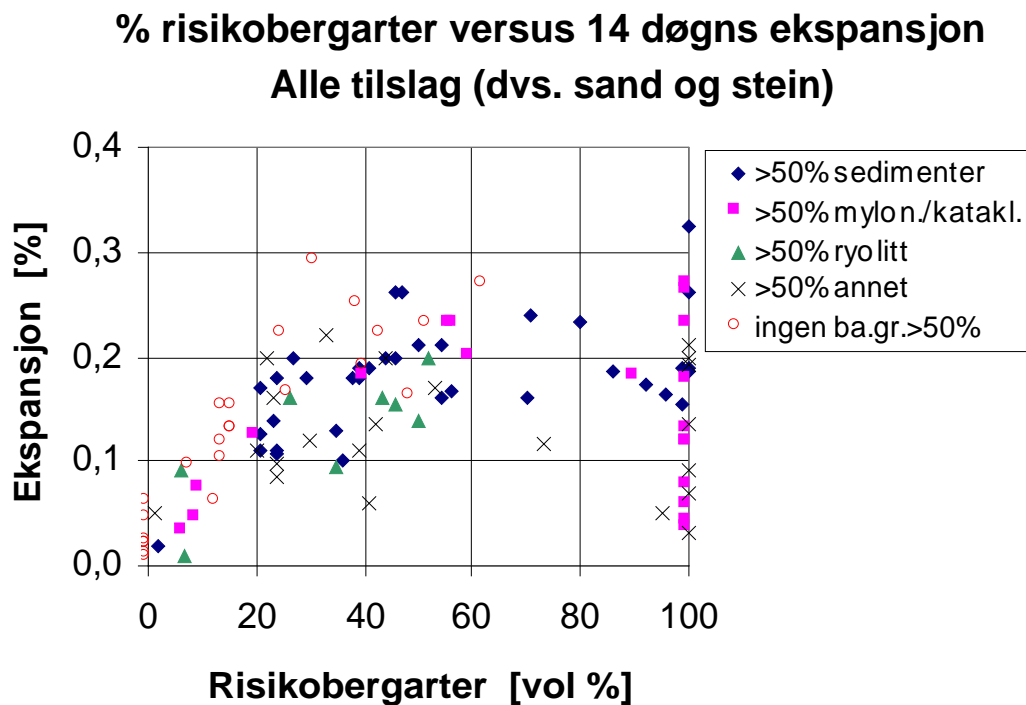
Figur 2.5.3 % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 døgn for de 52 stein-typene (dvs. pukk, singel og blandet knust tilslag), med ulike symbol for de tre laboratoriene



Figur 2.5.4 % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 døgn for de 60 sand-typene, inkl angivelse av dominerende bergartsgrupper



Figur 2.5.5 % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 døgn for de 52 stein-typene (dvs. pukk, singel og blandet knust tilslag), inkl angivelse av dominerende bergartsgrupper



Figur 2.5.6 % risikobergarter versus ekspansjon etter 14 døgn for alle de 112 tilslagene, inkl angivelse av dominerende bergartsgrupper

I vedlegg 2.5.1 og 2.5.2 er det vist en sammenstilling av resultater for hhv sand- og steintilslag med andel risikobergarter i området 0-60 %, inklusive 2.grads regresjonslinje for hvert laboratorium. Ved regresjonsanalysen for sandprøvene (jfr vedlegg 2.5.1) har vi utelatt 3 punkt fra plottet. Disse hadde et innhold av risikobergarter fra 0-1 % og ekspansjoner i området 0,05-0,06 %.

#### 2.5.4 Diskusjoner

Figurene 2.5.1-2.5.6, samt vedlegg 2.5.1-2.5.3 er nærmest selvforklarende mht å belyse de fleste av de 8 spørsmålene som ble stilt i kapittel 2.5.1. Nedenfor er det imidlertid forsøkt å besvare disse spørsmålene fortløpende. Det er ikke forsøkt å foreta noen grundig diskusjon av resultatene, men det er knyttet relevante kommentarer til hvert av spørsmålene.

- 1) I hovedsak ser det ut til at dagens gjeldende grenseverdier på hhv 20 % risiko-bergarter (sum av reaktive - og mulig reaktive bergarter) og 0,10 % ekspansjon etter 14 dager har fungert brukbart i den perioden de har vært inkludert i bestemmelser i Kontrollrådet (DGB-godkjenningen). Hovedinntrykket fra plottene er at 14 døgns ekspansjonen er  $\geq 0,10$  % når innholdet av risikobergarter er  $\geq 20$  %. De fleste unntak fra denne generelle tendensen gjelder pukkrøver med 100 % risikobergarter (jfr. kommentarene gitt til spørsmål 4).

I følge beskrivelsen av de to metodene, skal det imidlertid kun foretas videre forsøk i hht den akselererte mørtelprismemetoden dersom innholdet av risikobergarter er  $\geq 20$  %. Av den grunn finnes det få data for sammenhengen mellom innhold av risikobergarter og ekspansjon ved akselerert mørtelprismeforsøk i området 10-20 % risikobergarter. Av de 7 punktene som ligger i dette området, ligger 6 av dem over grenseverdien på 0,10 % (men  $\leq 0,15$  %) etter 14 døgns eksponering. Disse 6 er fremkommet ved ringprøvingen innenfor NORMIN-prosjektet (jfr kapittel 2.2), ved at 2 ulike sandtyper er prøvd ved alle de 3 laboratoriene. Den relativt store spredningen mellom de 3 laboratoriene for disse 2 prøvene er nærmere diskutert i kapittel 2.2.

Oppsummert ligger 2 av de 3 tilslagstypene som har et innhold av risikobergarter i området 10-20 % over grenseverdien på 0,10 %. Ved senere forskning blir det derfor viktig å konsentrere innsatsen om dette viktige området av skalaen, spesielt med tanke på å verifisere grenseverdiene for de to metodene.

- 2) Generelt oppnås det litt bedre korrelasjon mellom % risikobergarter og 14 døgns ekspansjon enn 28 døgns ekspansjon. Det skal imidlertid bemerkes at korrelasjonskoeffisienten ( $R^2$ ) er lav, dvs det er ingen god korrelasjon (uttrykt ved en ligning) mellom de to metodene (jfr figurene i vedlegg 2.5.1 og 2.5.2). Dersom det viktigste er at metodene er i stand til å klassifisere tilslag som ikke-alkalireaktive eller reaktive i forhold til gitte grenseverdier, og at disse grenseverdiene gir byggherrene en tilstrekkelig grad av sikkerhet, kan imidlertid de to metodene fungere utmerket sammen som trinn 1 og 2 ved prøving av ulike tilslagstypers reaktivitet.

- 3) Ved alle laboratoriene ser en "kurveforløp" som viser økende ekspansjon ved økende innhold av risikobergarter, og senere en "utflating eller reduksjon (?)" i ekspansjonen når innhold av risikobergarter overstiger et visst nivå (40-60 %; jfr diskusjon under spørsmål 5). Som det fremgår av figurene 2.5.1-2.5.3 og av figurene i vedlegg 2.5.1 og 2.5.2, er tendensen i denne samlede sammenstillingen av resultatene fra de 3 laboratoriene den samme som ringprøvingen viste: Lab.1 ser ut til å oppnå de høyeste ekspansjonsverdiene og Lab.3 de laveste. Som diskutert i kapittel 2.2, antas dette å ha sammenheng med at Lab.3 ikke har fulgt prøvingsprosedyrene for vasking av tilslagene og blanding av mørtelen. For punktene med 100 % innhold av risikobergarter, kan en annen medvirkende årsak til "avvikene" være at spesielt Lab.3 har klassifisert flere pukktyper som reaktive ut fra petrografimetoden, men at disse senere har vist seg å være ikke reaktive da de har gitt ekspansjoner i mørtelprismeforsøkene i størrelsesorden 0,05 % etter 14 døgn. I slike tilfeller fungerer imidlertid den 2-trinns prøvingsprosedyren etter hensikten, ved at disse tilslagene til slutt blir "frikjent" på grunnlag av mørtelprismeforsøkene.
- 4) Det er generelt ingen signifikante forskjeller mellom sand (utsiktet fra naturlige forekomster) og stein (utsiktet fra nedknust singel eller pukk; inkluderer også noen forsøk med blandet knust tilslag) mht sammenhengen % risikobergarter og ekspansjon. Tidligere har enkelte forsøk med blanding av tilslag (dvs. "uttynning" av det totale innholdet av risikobergarter ved at reaktive sandtilslag blandes med ikke-reaktive steintilslag – jfr NB Publ. nr 21) gitt ekspansjonsverdier  $> 0,10$  % etter 14 døgns eksponering til tross for at det totale innholdet av risikobergarter var lavere enn grenseverdien på 20 % (Jensen og Haugen, 1997). Den mest sannsynlige årsaken til dette ble antatt å være "testproblemer" ved mørtelprisme-metoden ved prøving av blandet tilslag. Disse resultatene er imidlertid ikke inkludert her, da petrografiundersøkelsene og mørtelprismeforsøkene var utført på forskjellige uttak av prøver. Ut fra de sammenstilte resultatene i kapittel 2.5.3 er det imidlertid ingen ting som tyder på at tilslag som knuses ned og prøves i hht mørtelprismemetoden (med en fast graderingskurve fra 0,125-4,76 mm) bidrar til større ekspansjoner enn sandprøver som kun siktes ut fra naturlige forekomster. Lab.1 har også utført enkelte mørtelprismeforsøk på både sand og singel fra samme forekomst. For både sand og singel fra disse forekomstene lå 14 døgns ekspansjonene rundt 0,20 %, dvs heller ikke for disse avvek ekspansjonen mellom utsiktet materiale og nedknust materiale.

Der det sees "avvik" mellom ekspansjoner oppnådd for sand- og steintilslag antas hovedårsaken å være usikkerhet i bestemmelsen av bergartstypene. Dette er mest merkbart for prøver med et innhold av risikobergarter på 100 %. For steintilslag som ikke inneholder risikobergarter har også noen prøver vist uforholdsmessig høye ekspansjoner (ca 0,05 %). Dette kan skyldes innslag av bestanddeler som ikke er påviselige ved den petrografiske metoden, men som bidrar til ekspansjoner ved mørtelprismemetoden.

- 5) Som nevnt under spørsmål 3, ser en ved alle laboratoriene samme tendens til en "utflating eller reduksjon (?)" i ekspansjonen ved innhold av risikobergarter over et visst nivå (40-60 %). I et prøveprogram som tar for seg denne problemstillingen spesielt (jfr kapittel 2.4) ble det oppnådd tilsvarende resultater. Resultatene herfra er også inkludert i figurene presentert i kapittel 2.5.3. Mulige årsaker til disse

tilsynelatende pessimalfenomenene er nærmere diskutert i kapittel 2.4. Her skal kun bemerkes at i et tidligere forsøksprogram utført ved NTNU/SINTEF der to bergartstyper ble blandet slik at innholdet av risikobergarter varierte fra 0-100 %, viste resultatene konsekvent en økende ekspansjon ved økende innhold av risikobergarter. Forskjellen i prøvebetingelsene fra disse forsøkene og de som er presentert i kapittel 2.4, er at volum alkalisk væske i forhold til volum prismer nå er betydelig lavere (forhold 4:1, jfr kapittel 2.1).

6-8) Figurene 2.5.4-2.5.6 og vedlegg 2.5.3 viser en sammenstilling av alle resultatene, der de dominerende bergartsgruppene blant risikobergarterne er gitt ulike symboler. Ut fra disse plottene er det ingen bergartstyper som skiller seg ut fra de øvrige med hensyn til økt eller redusert ekspansjon i forhold til "gjennom-snittet". De punktene som tilsynelatende ligger høyest i ekspansjonsverdi i forhold til innhold av risikobergarter, representerer derimot tilslag hvor ingen reaktive-/mulig reaktive bergartsgrupper dominerer (jfr vedlegg 2.5.3).

Den samme konklusjonen kan en også trekke ut fra plottene der ulike bergarts-grupper ble gitt ulik vektning, ut fra antagelsen om at noen bergartstyper var forventet å gi høyere ekspansjonsverdier i Mørtelprismeforsøkene enn andre. Ved denne vektingen ble innholdet av risikobergarter av bestemte bergartstyper multi-plisert med ulike faktorer ("vektningstall") i området 0,5-1,5. Her ble mylonitt, kataklasitt og ryolitt multiplisert med faktorer  $>1$  (dvs punktene flyttet seg til høyre i diagrammet), mens fyllitt ble gitt verdier  $<1$  (dvs punktene flyttet seg til venstre i diagrammet). Regresjonsanalyser viste imidlertid bedre korrelasjon mellom resultatene før vektingen.

"Avvikende" ekspansjonsverdier kan heller ikke relateres til spesielle typer risikobergarter.

### 2.5.5 Konklusjon

Det har gått 5 år siden beskrivelsen for den petrografiske metoden og mørtelprisme-metoden ble vedtatt i Kontrollrådet, klasse P (DGB). I denne perioden er det ved de 3 godkjente laboratoriene totalt utført ca 110 forsøk i hht de to metodene på den samme uttatte tilslagsprøven fra ulike forekomster i Norge. Ut fra den felles sammenstillingen av alle disse resultatene kan en trekke følgende konklusjoner:

Hovedinntrykket fra plottene er at 14 døgns ekspansjonen er  $\geq 0,10$  % når innholdet av risikobergarter er  $\geq 20$  %. De fleste unntak fra denne generelle tendensen gjelder pukkrøver med 100 % risikobergarter.

Det finnes få data for sammenhengen mellom innhold av risikobergarter og ekspansjon ved akselerert mørtelprismeforsøk i området 10-20 % risikobergarter. Av de tre tilslagstypene som ligger i dette området, ligger 2 av dem over grenseverdien på 0,10 %.

Generelt oppnås det litt bedre korrelasjon mellom % risikobergarter og 14 døgns ekspansjon enn 28 døgns ekspansjon. Korrelasjonskoeffisienten ( $R^2$ ) er imidlertid lav, dvs det er ingen

god korrelasjon (uttrykt ved en ligning) mellom de to metodene. Forskjellen i korrelasjonsverdi gir derfor ikke grunnlag for å hevde at 14 døgn gir bedre samsvar enn 28 døgn.

Ved alle laboratoriene ser en samme "kurveforløp" som viser økende ekspansjon ved økende innhold av risikobergarter, og senere en "utflating eller reduksjon (?)" i ekspansjonen ved innhold av risikobergarter utover et visst nivå (40-60%).

Tendensen i denne sammenstillingen av resultatene fra de 3 laboratoriene er den samme som oppnådd under ringprøvingen (jfr kapittel 2.2): Lab.1 ser ut til å oppnå de høyeste ekspansjonsverdiene og Lab.3 de laveste. Resultatene er imidlertid ikke uten videre sammenlignbare, idet Lab.3 sannsynligvis ikke har fulgt prøvingsprosedyrene for mørtelprismemetoden mht vasking av tilslagene og blanding av mørtelen.

Det er generelt ingen signifikante forskjeller mellom sand (utsiktet fra naturlige forekomster) og stein (utsiktet fra nedknust singel eller pukk; inkluderer også noen forsøk med blandet knust tilslag) mht sammenhengen % risikobergarter og ekspansjon.

Det er ingen bergartstyper som skiller seg ut fra de øvrige med hensyn til økt eller redusert ekspansjon i forhold til "gjennomsnittet". De punktene som tilsynelatende ligger høyest i ekspansjonsverdi i forhold til innhold av risikobergarter, representerer derimot tilslag hvor ingen reaktive-/mulig reaktive bergartsgrupper dominerer.

"Avvikende" ekspansjonsverdier kan heller ikke relateres til spesielle typer risikobergarter.

## 2.6 Canadisk betongprismememotode

*Jan Lindgård og Per Arne Dahl, SINTEF Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong*

### 2.6.1 Bakgrunn

Akselerert Betongprismemotode var tidligere akseptert i Norge som "trinn 3" ved prøving av alkalireaktivitet for ulike tilslag. I hht metodebeskrivelsen (Lindgård et.al., 1993) skulle et tilslag klassifiseres som alkalireaktivt dersom ekspansjonen etter 52 ukers eksponering oversteg 0,04 %. I dag benyttes imidlertid den akselererte Betongprismemotoden kun i forbindelse med funksjonsprøving av ulike betongblandingers alkalireaktivitet (jfr retningslinjene gitt i NB 21), for eksempel for å undersøke effekten av ulike alkaliinnhold eller ulike silikainnhold i betonger med alkalireaktive tilslag.

Tidligere forsøk i Norge med denne metoden har vist uoverensstemmelser mellom testresultater og felterfaringer med metasedimentære- og sedimentære sandsteiner. I laboratorieforsøk med Årdal sand og sandstein fra Lillehammerområdet som steintilslag ble det observert at ekspansjonsutviklingen stoppet mer eller mindre opp etter 6 måneders eksponering, uvisst av hvilken årsak. Dette førte til at den totale ekspansjonen etter 12 måneders eksponering ble lavere enn grenseverdien på 0,04 % (Meland et.al., 1993). I felt er det derimot observert at denne og andre sandsteiner har ført til skader på betongkonstruksjoner som kan tilbakeføres til alkalireaksjoner. Disse uoverensstemmelsene mellom resultater fra lab.forsøk og felterfaringer var også årsaken til at denne metoden midt på 90-tallet ikke lenger ble akseptert som "trinn 3" ved prøving av alkalireaktivitet for ulike tilslag.

I NB publ. nr 21 er det foreløpig tatt hensyn til denne "utflatende ekspansjonsutviklingen" ved at resultater fra funksjonsprøving av sedimentære bergarter i hht den akselererte Betongprismemotoden skaleres ut fra resultater oppnådd ved prøving av sandsteinen i hht den akselererte Mørtelprismemotoden.

For å undersøke nærmere noen av usikkerhetene vedrørende reaktivitet for sedimentære bergarter i hht akselererte Betongprismemotode, er det utført 3 blandinger ved denne metoden innenfor NORMIN-programmet.

### 2.6.2 Prøvingsutførelse

De 3 blandningene ble utført ved SINTEF Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong. I disse forsøkene ble det benyttet to typer sandstein, en fra Lillehammer og en fra Finnmark. Som identifiserende dokumentasjon av de to sandsteinene er det i tillegg utført petrografiske analyser ved tynnslip, samt akselererte Mørtelprismeforsøk (i hht den reviderte metodebeskrivelsen beskrevet under kapittel 2.1).

Fra hver av de to lokalitetene mottok SINTEF 2 pukkfraksjoner i fraksjonsområdet 8-25 mm. Før forsøkene ble tilslagene oppredet ved at en del materiale fra hver av de 4 fraksjonene ble nedknust til kornstørrelse < 5 mm og fraksjonert. Både de petrografiske analysene og de akselererte Mørtelprismeforsøkene ble utført på dette knuste, fraksjonerte tilslaget (jfr

detaljert materialsammensetning for Mørtelprismeforsøkene i SINTEF prøvingsrapport nummer 20275/2 i vedlegg 2.6.2).

Ved de 3 akselererte Betongprismeforsøkene ble også SINTEF's ikke reaktive laboratorietilslag fra NorStone i Årdal benyttet. Årdal-tilslaget består hovedsaklig av gneis/granitt. I blandingene ble det benyttet følgende tilslagssammenstninger:

- Blanding 1: Sand 0-5 mm fra Årdal + stein 5-20 mm fra Lillehammer
- Blanding 2: Sand 0-5 mm fra Årdal + stein 5-20 mm fra Finnmark
- Blanding 3: Sand 0-5 mm fra Lillehammer (produsert ved knusing av puk) + stein 5-20 mm fra Årdal.

For å ta høyde for eventuelle forskjeller i sammensetning mellom de 2 innsendte fraksjonene fra hver av sandssteinslokalitetene, ble det benyttet like store andeler fra begge fraksjonene både i Mørtelprismeforsøkene og i Betongprismeforsøkene. I alle blandingene for Betongprismeforsøkene ble det tilsatt NaOH, slik at alkaliinnholdet pr  $m^3$  betong lå på ca 5,0 kg  $Na_2O$ -ekvivalent. Detaljert materialsammensetning for blandingene til de akselererte Betongprismeforsøkene er gitt i SINTEF prøvingsrapport nummer 20275/3 i vedlegg 2.6.3.

Ved eksponeringen ble betongprismene lagret stående på en rist ved 100 % RF i tette plastkar med lokk (3 prismer fra samme serie i hvert kar). Karene var kledd innvendig med nylonforsterket frottè. Dette er de samme lagringsbetingelsene som SINTEF benytter i Betongprismeforsøkene som utføres på oppdrag for NORCEM innenfor forskningsprosjektet "Ressursvennlig kvalitetsbetong". Prosedyren er identisk med de lagringsbetingelsene som NORCEM FoU i Brevik har benyttet de seneste årene.

Til forskjell for disse lagringsbetingelsene, har SINTEF tidligere lagret prismer fra flere blandinger sammen i større kar med lokk (også da stående). For å holde fuktigheten på 100 % ble disse større karene kledd innvendig med en spesiell strie. Både "dagens" og "tidligere" lagringsprosedyre er imidlertid i hht beskrivelsen av metoden (Lindgård et.al., 1993).

### **2.6.3 Resultater**

Resultatene fra den petrografiske analysen er detaljert rapportert i SINTEF prøvings-rapport nummer 20275/1 (jfr vedlegg 2.6.1). Det totale innholdet av risikobergarter ble bestemt til hhv 100 % i sandsteinen fra Lillehammer og 96 % i sandsteinen fra Finnmark. Analysen viste også at sandsteinen fra Lillehammer inneholdt litt mer matriks enn sandsteinen fra Finnmark. Ellers var det liten forskjell mellom de to typene sandstein.

Mørtelprismeforsøkene gav en ekspansjon etter 14 dagers eksponering på hhv 0,21 % (Lillehammer) og 0,18 % (Finnmark), jfr SINTEF prøvingsrapport nummer 20275/2 i vedlegg 2.6.2. Begge de to sandsteinene skal derfor betraktes som alkalireaktive ihht retningslinjene til Kontrollrådet, klasse P (tidligere DGB).

Tabell 2.6.1 viser resultatene fra de 3 Betongprismeforsøkene etter hhv 8, 12, 16, 26 og 52 ukers eksponering. Detaljerte resultater er presentert i SINTEF prøvingsrapport nummer 20275/3 i vedlegg 2.6.3.

Tabell 2.6.1 Prøvingsresultater fra Betongprismeforsøkene

Blanding nummer		1	2	3
Tilslag 0-5 mm		Årdal	Årdal	Lillehammer
Tilslag 5-20 mm		Lillehammer	Finnmark	Årdal
Ekspansjon i % av ref. Lengde	8 uker	0,002	0,003	0,005
	12 uker	0,007	0,007	0,008
	16 uker	0,013	0,009	0,010
	26 uker	0,048	0,024	0,021
	52 uker	0,149	0,080	0,067

#### 2.6.4 Diskusjon

I hht metodebeskrivelsen (Lindgård et.al., 1993) som tidligere var akseptert i Norge som "trinn 3" ved prøving av alkalireaktivitet, skulle et tilslag klassifiseres som alkalireaktivt dersom ekspansjonen i løpet av 52 ukers eksponering oversteg 0,04 %. Nå benyttes imidlertid den akselererte Betongprismemetoden kun for dokumentasjon av ulike betongblandingers alkalireaktivitet (jfr kapittel 2.6.1 og retningslinjene gitt i NB publ. nr 21).

Etter 52 ukers eksponering har alle de 3 betongblandingene passert grenseverdien på 0,04 %. Etter 52 ukers eksponeringstid er ekspansjonen for blandingen med steinfraksjon fra Finnmark (men ellers samme betongsammensetning) kun vel det halve av blandingen med steinfraksjon fra Lillehammer. Verken petrografisk sammensetning eller resultatene fra Mørtelprismeforsøkene forklarer den relativt store forskjellen. Den eneste observerte forskjellen er at sandsteinen fra Lillehammer-området inneholder mest matriks (dvs mest "fyllmasse/lim mellom sandsteinspartiklene"). Mineralogien til matriksen i de to sandsteinstypene kan imidlertid ikke bestemmes ut fra petrografisk analyse.

Blanding med alkalireaktiv sand 0-5 mm fra Lillehammer og ikke-alkalireaktiv stein 5-20 mm fra Årdal har gitt lavest ekspansjon (0,067 % etter 52 ukers eksponering). Dette samsvarer med tidligere erfaringer (laboratorieforsøk og feltobservasjoner) med norske alkalireaktive tilslag, hvor steinandelen gir størst bidrag til ekspansjoner og observerte skader. I utborede betongkjerner er det heller ikke observert at tilslagskorn < 1 mm har reagert.

Som nevnt i kapittel 2.6.1, har tidligere forsøk med sandstein fra Lillehammer-området vist liten ekspansjonsutvikling i perioden mellom 6 og 12 måneders eksponering. Etter 6 måneder var total ekspansjon for betonger med 2 typer sandstein (sort og rød), men ellers med tilsvarende materialsammensetning som blanding 1 hhv ca 0,018 % (sort) og ca 0,030 % (rød), mens ekspansjonene etter 12 måneders var hhv ca 0,024 % (sort) og 0,030 % (rød) (Meland et.al., 1993). Forsøkene med sandstein nå i 1998-99 viser ingen slik utflatende ekspansjon i perioden 6 til 12 måneder.

Begge de 2 refererte sandsteinstypene (sort og rød) gav i Mørtelprismeforsøk en ekspansjon rundt 0,20 % etter 14 dagers eksponering (Meland et.al., 1993), dvs i samme størrelsesorden som de 2 sandsteinstypene som nå er under utprøving.

Årsaken til at det nå ble oppnådd en svært høy ekspansjon for sandsteinen fra Lillehammerområdet etter 52 ukers eksponering i forhold til erfaringene fra tidligere forsøk, er uklar. En av årsakene kan være noe forskjellige egenskaper for "tidligere" og "dagens" sandstein, da forsøkene er utført på sandstein fra to vidt forskjellige uttak.

Det er imidlertid sterke indikasjoner på at resultatene kan være påvirket av at lagringsbetingelsene for prismene er noe endret i forhold til tidligere praksis (jfr kapittel 2.6.2). I et pågående forsøk ved SINTEF med en kataklasitt er det etter 12 måneders eksponering nemlig observert høyere ekspansjon nå enn ved et tidligere forsøk (med tilslag fra samme pukkeforekomst) utført etter "gammel" lagringsprosedyre. NORCEM har også observert en økning av ekspansjonsverdiene ved prøving av en rhyolitt etter "dagens" lagringsbetingelser i forhold til et tidligere forsøk med samme tilslagstype og lagringsbetingelser tilsvarende SINTEFs "gamle" prosedyre. For begge disse to steintypene er imidlertid forsøkene nå og tidligere utført på tilslag fra to vidt forskjellige uttak.

Erfaringer med ekspansjon av sandstein i en del andre land synes å være at Betongprismemetoden er godt egnet også for karakterisering av sandsteins alkalireaktivitet. Resultatene fra 1998-99 undersøkelsen ved SINTEF tyder på det samme.

Hvorvidt de store forskjellene i 12 måneders-ekspansjon mellom betongene med de to typene sandstein som steintilslag også har gitt seg utslag i forskjellig skadegrad i felt, vil bli forsøkt sett nærmere på i kapittel 3 "Felterfaringer".

### **2.6.5 Oppsummering**

Etter 12 måneders eksponering har blandingen med Årdal sand 0-5 mm og sandstein 5-20 mm fra Lillehammer (blanding 1) allerede passert grenseverdien for alkalireaktivitet på 0,04 % med god margin (0,149 %). Det har også en tilsvarende blanding, men med sandstein 5-20 mm fra Finnmark gjort (blanding 2), selv om ekspansjonen er betydelig mindre (0,080 %). Årsaken til disse forskjellene er uklar.

Blanding med nedknust sandstein 0-5 mm fra Lillehammer og ikke-alkalireaktiv stein 5-20 mm fra Årdal (blanding 3) viste også en ekspansjon godt over grenseverdien (0,067 %). Ekspansjonsbidraget fra sandfraksjonen (blanding 3) var imidlertid betydelig mindre enn fra steinfraksjonen (blanding 1), hvilket er helt i tråd med tidligere erfaringer.

Skulle det trekkes en konklusjon basert utelukkende på 1998-99 undersøkelsen, ville Betongprismemetodens egnethet mht karakterisering av alkalireaktivitet for sandstein eller betongblandinger inneholdende sandstein bli vurdert som like god som for karakterisering av andre reaktive tilslag. Sammenhengen mellom mørtelprisme- og betongprisme-ekspansjon for sandstein (jfr NB publ. nr 21) ser heller ikke ut til å være dårligere enn for andre reaktive tilslag.

## **2.7 - Effekter av silikastøv i den akselererte mørtelprismetesten**

*Terje F. Rønning - NORCEM as, FoU*

### **2.7.1 Innledning**

På Island har man i snart 20 år benyttet sement med iblandet silikastøv for å forhindre alkalireaksjoner i betong. Feltundersøkelser har vist at dette har vært med på å løse problematikken vedrørende alkalireaksjoner for Islandske forhold (Gudmundsson og Möller, 1997).

Muligheten for bruk av alkalireaktive tilslagsmaterialer for produksjon av bestandig betong er av stor økonomisk betydning for mange aktører i den norske betongbransjen. Det foreligger retningslinjer for hvordan man på generelt grunnlag kan gjøre dette, bl.a. ved å overholde visse krav til alkaliinnhold i betongen. De reaktive bergartsmineralene i Norge er imidlertid såvidt forskjellige av natur at det ligger et potensiale i å kunne differensiere etter deres respektive egenskaper, utover den petrografiske karakteriseringen/klassifiseringen. Dette gjøres ved prøvning (Lindgård et al., 1993) direkte på tilslaget vha. den såkalte Mørtelprismemetoden - eller indirekte ved dokumentasjon av den aktuelle betongsammensetningen. Førstnevnte er normalt unnagjort på to-tre uker, mens sistnevnte er en lang og tidkrevende prosess som tar ett til to år eller mer.

Det vil derfor være av stor praktisk betydning dersom Mørtelprismemetoden kunne brukes også for samlet dokumentasjon av betongsammensetningen, dvs. samspillet mellom tilslaget og bindemidlet - indirekte tilslagets "miljø". Metoden gjenspeiler i seg selv ikke det miljø betongen normalt befinner seg i, men for dagens bruksområde (ren tilslagsdeklarasjon) dokumenteres likevel sammenheng mellom denne og den skadegrad som kan oppstå under reelle betingelser for en betongkonstruksjon.

Etterfølgende vurdering gjør et forsøk på å utrede en del uavklarte og nødvendige momenter ved bruk av nevnte metode for dokumentasjon av betongsammensetning, spesielt justeringer i form av pozzolantilsetninger som flyveaske og silika. Et delmål vil være å vurdere hvorvidt målsetningen kan oppnås ved å benytte tilleggsundersøkelser, men slik at man unngår vidtgående bruk av den tidkrevende betongprismemetoden.

Vurderingen baseres på litteraturgjennomgang samt tilgjengelig informasjon fra øvrige deler av prosjektet "Alkalireaksjoner i Betong" og ennå ikke-publisert materiale hos forfatteren.

### **2.7.2 Målsetning**

Hensikten med foreliggende arbeid er å avklare bruk av Mørtelprismemetoden til dokumentasjon/ undersøkelse av betongsammensetning mht. pozzolantilsetning i form av flyveaske eller silika. Evt. vurderes hvorvidt tilleggsundersøkelser er aktuelt hvis gjennomføringen er mulig innefor et vesentlig raskere tidsrom enn vha. Betongprismemetoden.

### 2.7.3 Generelt om mørtelprismemetoden

#### 2.7.3.1 Kort beskrivelse av metoden

Mørtelprismemetoden utgjør i Norge et trinn to i en deklarasjonsordning for betongtilslag og benyttes p.t. som dokumentasjon/undersøkelse mht. anvendelighet av et betongtilslag - etter en eventuell underkjennelse basert på petrografisk analyse. Dette er aktuelt ved en overskridelse av reaktivt og mulig reaktivt mineralinnhold på 20 %. Metoden er aktuell både for sand og for grovt tilslag, men i sistnevnte tilfelle følges prosedyrer for knusning. For blandede tilslag finnes også spesielle regler.

Tilslaget klargjøres mht. normert fraksjonsfordeling og blandes med portlandsement og vann til en mørtel med fast v/c-tall på 0,45. Det støpes prizmer á 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> med monterte måle-(avstands-)nubber. Etter herding (ett døgn ved 20 °C og ett ved 80 °C) skal prismene eksponeres i 1 N NaOH-løsning ved 80 °C og reaksjonsgrad / ekspansjon regi-streres, minimum i en 14 dagers periode. Kravet til maksimal utvidelse for godkjenning er satt til 0,10 % ved 14 døgn.

Den norske metoden er én av flere varianter som bygger på såkalt Sør-Afrikansk Metode eller NBRI, mens den mest brukte varianten internasjonalt er ASTM C 1260-94 (1994). Sistnevnte går under betegnelsen den akselererte mørtelmetoden (også benevnt AMBM), til forskjell fra eksempelvis ASTM C 227, som benytter lavere temperatur og ikke NaOH. I litteraturen er altså den norske metoden sammenlignbar med AMBM.

Selv om de ytre randbetingelsene i metoden er relativt enkle, har det vært en del diskusjoner rundt spredning i resultater, innen og mellom laboratorier. En del utførelsesmessige, praktiske momenter mht. dette er ivaretatt via andre deler av dette prosjektarbeidet. I Canada, som geologisk sett har en del likhetstrekk med Norge, er det gjort en del for å kartlegge statistisk spredning. For norske og britiske forhold har Wigum et al. (1997) gjort en relativt omfattende forsøksserie, hvor også ulike metodevarianter vurderes. Deres konklusjon er at det er fullt mulig å teste for normale standardformål (tilslagsdokumentasjon) med tilstrekkelig definerte randbetingelser, men at tilslagets egenvariasjon er begrensende for repeterbarhet og reproduserbarhet.

#### 2.7.3.2 Metodens bruksbegrensning mht. dokumentasjon p.t.

Utenom tilslagets innvirkning på statistisk usikkerhet som nevnt ovenfor er det klart at det er de ytre randbetingelsene (eksponeringsforholdene) for prøvene som defineres. At sementens kjemiske sammensetning, bl.a. alkaliinnhold, rapporteres ikke å ha noen betydning (Hooton, 1996 og Wigum et al, 1997) indikerer at det ytre miljøet overstyrer bindemidlets eget bidrag til dette. At imidlertid dens malingsgrad (finhet) har betydning indikerer like fullt at indre forhold kan være viktige for eksponeringsgraden av selve tilslaget. Sementens malingsgrad vil påvirke hydratasjonshastigheten og indirekte porestrørelsesfordeling. Dette kan i sin tur påvirke permeabilitet overfor lagringsmediet (NaOH) og dermed hvor tidlig og sterkt tilslaget utsettes for dette sterkt alkaliske miljøet.

Når det rapporteres fra Island (Gudmundsson og Möller, 1997) at undersøkelser med silika etter ASTM 1260 viser samme resultater som med dansk lavalkalisement, er dette iht. Hooton (1996) og Wigum et al (1997) derfor ikke tilstrekkelig som dokumentasjon. Det vises riktignok også til parallelle arbeid med ASTM C 227, men som ikke er gjengitt. At materialkombinasjonen under feltforhold har vist seg å fungere etter hensikten (eliminering av ekspansjon) betinger ikke at man kan "snu" denne konklusjonen: Det godtgjør ikke nødvendigvis at prøvemethoden er egnet for å ivareta de ukjente størrelser som andre bindemidler medfører for eksponeringsgraden av tilslaget under en slik prøvning.

Det er fremsatt en rekke teorier om hvorfor pozzolaner virker gunstig sammen med reaktive tilslag, jfr. etterfølgene avsnitt. Foreløpig har likevel komitéen for ASTM C 1260 pga. usikkerheten mht. årsak vært tilbakeholden og ikke villet foreslå metoden til slik bruk (Hooton, 1996).

### *2.7.3.3 Nedbrytningsforløp*

Metoden benytter altså et lagringsmedium for prøvene bestående av 1 N NaOH (dvs. for denne forbindelsen ; 1 Mol = 40 g pr. liter). Dette gir pr. definisjon pH = 14, dvs. noe i overkant av det man finner i betong selv med høyalkali sement. Sammen med temperaturnivået kan disse akselererte betingelsene være med på å gi en noe annen reaksjon og et forløp enn det man finner ute under feltbetingelser: Wigum & French (1996) mener reaksjonen i mørtelprismemetoden skjer i to trinn, først en oppsprekking og senere en oppløsning av de aktuelle, reaktive mineralene. De mener å påvise at siste reaksjonstrinn fremmes i laboratoriemetoden i forhold til det man kan observere fra angrepne konstruksjoner. Dette behøver imidlertid ikke å bety at metodens relevans for feltbetingelser svekkes; de fant nemlig også at ekspansjonen synes å henge sammen med oppsprekkingsfasen heller enn neste trinn.

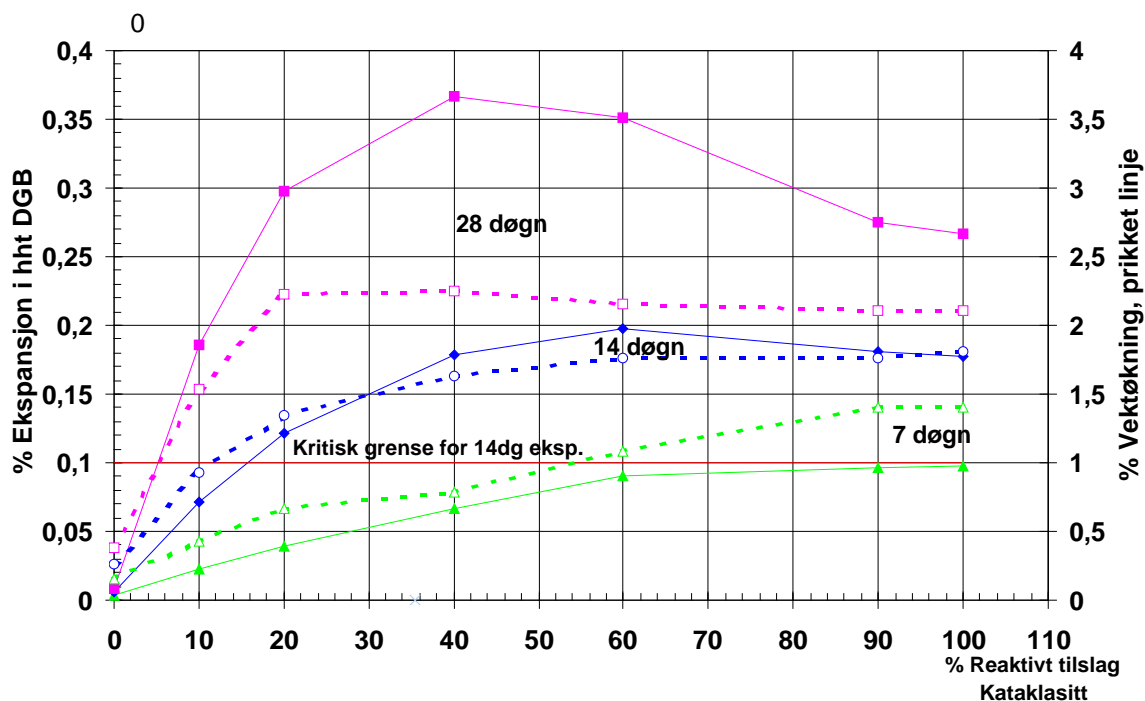
## *2.7.4 Diskusjon av ulike fenomen*

### *2.7.4.1 Mulig pessimumsforhold og avvikende alkalimengde ; Innledende diskusjon*

Helmuth et al (1997) trekker på generelt grunnlag frem usikkerhet omkring betydning av brøken mellom alkalimengde og mengde reaktivt tilslag. Dette er blant de forhold som er med på å akselerere eksponeringsgraden i forhold til felteksponering og berører problemstillingen mht. såkalte pessimumsverdier. I vår betydning innebærer dette at det kan finnes gitte konsentrasjoner av reaktive mineraler som forårsaker større reaksjon/skade enn både lavere og høyere andeler av det skadelige mineralet. Dette er påvist for utenlandske, raskt reagerende tilslag, mens tendenser også kan sees for våre forhold med mer langsomt reagerende tilslag (Wigum & Lindgård, 1994), samt Fig. 2.7.1., som er hentet fra Kap. 2.4. I begge disse arbeidene indikeres et pessimum rundt 40 % innhold av risikobergarter. Spørsmålet er om dette er reelt, dvs. også finnes igjen ute i naturen, eller om fenomenet er metodespesifikt :

I figur 2.7.1 kan man observere et interessant mønster: I starten øker ekspansjon og vekt lineært med andel risikobergarter til et sted mellom 70 og 90 %. Ved senere terminer forskyves “pessimumspunktet” nedover til ca 40 % ved 28 døgns eksponering, og det samme gjelder vektøkningen !

I starten (7 døgn eller tidligere) kan man tenke seg at inntrengt alkalimengde er en begrensende faktor for reaksjon. Dette underbygges av Wigum & French (1996), som observerer en progressiv nedbrytning over tid utenfra og innover i prøvene. Vektøkningen kunne tenkes tatt som et mål på inntrengt mengde alkalier. Da er forholdet alkalier/reaktivt materiale klart avtagende med økt reaktiv andel, unntatt i starten, dvs. før ca. 7 døgn. I den første fasen øker vekt-(væske-)opptaket pr. reaktiv andel mer enn ekspansjonen øker.



2.7.1 Figur Alkalireaksjoner med forskjellige andeler kataklasitt og gabbro.

Overflatespenningen av 1 N NaOH er lavere enn for vann, og det vil derfor skje en utskiftning av vannet i prøvene til fordel for lagringsmediet. Dersom de på forhånd antatt vannmettede prøvene får skiftet ut porevannet fullstendig til fordel for lagringsmediet, som har en relativ densitet overfor vann på 1,04, vil dette med totalporøsitet for mørtelen på 20-25 volum-% (kapillær-, gel- og luft-porøsitet) kun være ansvarlig for en vektøkning på 2 g, eller ca. 0,33 %. Dette er av samme størrelsesorden som forventet vektøkning som følge av større volum ved maksimal ekspansjon.

Det er også nivået for målt vektøkning i det tilfelle vi har rent ikke-reaktivt materiale, men for de øvrige langt lavere enn registrert vektøkning. Sistnevnte ligger over 2 % ved 28 døgn. Dersom etterfylling av ikke-vannfylte porer skulle være ansvarlig for forskjellen i vektøkning, ville dette tilsvare en forskjell i porevolum mellom disse blandingene på 4 - 5 %. Prøvene med reaktivt innhold er imidlertid sjekket vha. tynnslip mht. homogenitet (Kap. 2.4).

Alternativt kunne man tenke seg at prøvene i starten ikke var vannmettede, men gradvis ble fylt kapillært av lagringsmediet. I så fall skulle imidlertid dette være en v/c-avhengig prosess, ikke primært avhengig av andel reaktivt tilslag og i alle fall ikke i starten - før reaksjonsutfelling eventuelt kan tenkes å få en tettende effekt og motvirke videre inntrengning. Vektøkningen på over 2 % må derfor hovedsakelig skyldes utfelling av reaksjonsprodukter og da en ganske betydelig mengde sådan. Den ekstra økningen utgjør 15-20 g for et prisme som i utgangspunktet veier ca. 580 g.

Hooton (1996) refererer forslag om å modifisere bruken av mørtelprismemetoden til NaOH-konsentrasjoner i overensstemmelse med det alkaliinnhold man vil få i betongen med den aktuelle sement. Med alkaliinnhold i sistnevnte på 0,6 til 1,2 % vil dette tilsvare løsningskonsentrasjoner på (lineært varierende) 0,5 til 0,9 N NaOH. Imidlertid bør man huske på at metoden likevel er (og skal være) akselerert i forhold til feltbetingelsene, og konsentrasjonen inne i prøvene vil uansett ha en tendens til å variere. Temperaturnivået alene vil bevirke en slik aktivitetsøkning i kjemisk forstand, og en endring av konsentrasjonen vil ikke nødvendigvis gjøre forholdet “riktig”. Det viktige er å finne forsøksbetingelser som med rimelige tillempninger kan gi resultater som overensstemmer med praktisk erfaring - under reelle feltforhold.

Denne overensstemmelsen skal/vil gjelde ved en gitt prøvningstermin. Det er ikke gitt at (bedre) overensstemmelse oppnås ved andre eller senere terminer, tross justering av “akseptgrenser”. Forlenget prøvning har nemlig vært foreslått som “løsning” på problematikken rundt pozzolaners innvirkning på permeabilitet (neste avsnitt).

#### 2.7.4.2 Pozzolanenes virkning

Det er fremsatt flere hypoteser for å beskrive pozzolaners virkning for å redusere ekspansjon som følge av alkalireaksjoner (Bérubé et al 1995). Høyere styrke til å motstå den svellende påkjenningen har vært nevnt. Lavere permeabilitet kan foruten redusert alkaliinntrengning under prøvning tenkes å bidra til mindre grad av fukteksponering generelt. Begrensning av ionetransport pga. tett bindemiddelstruktur alene, eller pga. fysisk innelukking i reaksjonsprodukter (“CSH”) kan redusere tilgjengeligheten overfor reaktive tilslag, dvs. redusere frie alkali-ioner i porevann. Dessuten senkes da også pH-nivået, en gunstig effekt for å redusere nedbrytning av “sure” mineraler. En annen teori er reduksjon av portlanditt- $(Ca(OH)_2)$ -innholdet, enten direkte for dannelsen av CSH eller indirekte ved at den tette randen langs (den reagerte) tilslagsoverflaten fjernes og øvrige reaksjonsprodukter kan diffundere fritt (Bleszynski & Thomas, 1998). Dette kan igjen tenkes å ha videre indirekte virkninger. I prinsippet skulle man imidlertid også kunne tenke seg at pozzolanenes silikatfaser reagerer med alkaliene på lik linje med tilslagsmineralene, men da raskere pga. deres langt høyere reaktivitet.

Samtidig er det også ting som tyder på at (den akselererte) mørtelprismemetoden ASTM C 1260 ved bruk av flyveaske og slagg, kanskje i mindre grad med silika (Bérubé et al, 1995), er noe hardere enn ASTM C 227, som benytter 38 °C og 95 % RF, og derved kan vise seg å gi resultater til sikker side.

Uansett årsak er det mest sannsynlig pozzolanenes virkning på senket alkali- og pH-nivå i porevæsken som er av betydning for redusert nedbrytning av tilslaget. Det er rapportert (Bérubé et al, 1995) en tilsynelatende kritisk verdi på ca. 0,65 mol  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  pr. liter. Bl.a. fordi sementens sammensetning ikke har hatt noen dokumenterbar effekt på resultatet ved bruk av mørtel-metoden, har ikke alkalnivå i mørtelen vært ansett som noen kritisk faktor; dette ville likevel styres av det ytre miljø i dette tilfellet.

#### 2.7.4.3 Induksjonsperiode og alkalidiffusjon

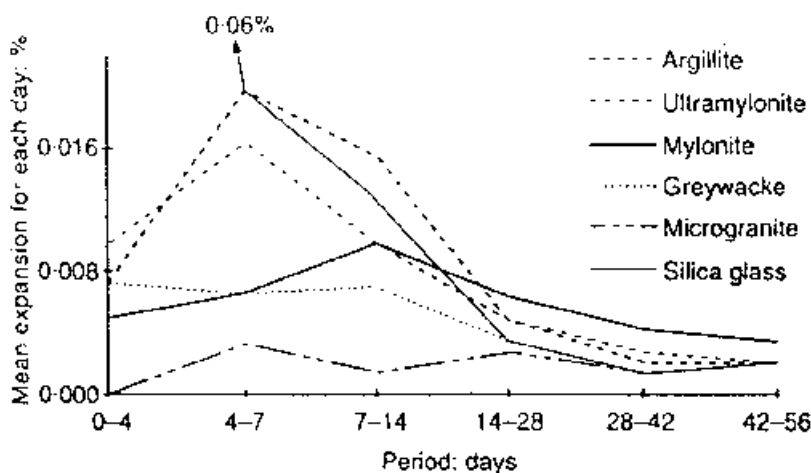
Et alternativ for å redusere induksjonsperioden og også eventuelt redusere pozzolanenes bremsende effekt pga. inntrengningsmotstand kunne være å benytte slankere prismer. En av flere betenkeligheter med dette er at det likevel ikke eliminerer problemstillingen - fordi effekten vanskelig lar seg kvantifisere.

Det vanligste er å plote ekspansjonsutvikling mot tid. Wigum & French (1996) har i sine studier av ekspansjonsforløpet (omtalt ovenfor) brukket opp dette i ekspansjonshastighet vs. tid, se Fig. 2.7.2. For alle de reaktive tilslagene (dvs. alle unntatt "microgranite") er induksjonsperioden under fire dager, til tross for at det dreier seg om langsomtreagerende tilslag i internasjonal sammenheng.

På samme måte som i Figur 2.7.2, kan også kurvene i Figur 2.7.1 analyseres mht. hastighetsforløp: I Figur 2.7.3 fremkommer midlere ekspansjon pr. dag som funksjon av prøvetid. Resultatene indikerer at økt mengde reaktivt materiale inntil 60 % (av samme type) fører til en økning av ekspansjonshastigheten. Mengdeøkning utover 60 % gir noe fall i ekspansjonshastighet. Det gir sågar økende fall sent i prøvningsperioden, på et tidspunkt da tilgang på alkali - og derved forholdet alkalier/reaktivt materiale - skulle være minst kritisk (Figur 2.7.7). Eventuelt måtte det være reaksjonsomfanget i yttersonen som via utfelling av gel e.l. skaper barriere mot videre inntrengning. Dette burde imidlertid igjen kunne spores i form av lavere alkali-konsentrasjon i porevannet i slike tilfelle. I tidlig fase, derimot, gir økt mengde reaktivt materiale også økt reaksjonshastighet. I denne fasen er det i alle fall ikke snakk om noen pessimumseffekt.

Akseptkriteriet på 0,1 %, fastsatt på grunnlag av "kalibrering" mot resultater fra felt og mer realistiske betongprøvemethoder, er knyttet til tilslag med i størrelsesorden 20 % reaktivt materiale. Disse ligger i nedre område også mht. reaksjonshastighet. Innenfor akseptkriteriet bedømmes m.a.o. tilslaget strengere jo høyere den reaktive andelen er - i den forstand at "relativt mer reaktivitet" hentes ut innefor prøveperioden.

Dermed vil det være et vesentlig poeng i forbindelse med prøvning av pozzolaner i AMBM hvorvidt en eventuell langsommere alkaliinntrengning (se senere avsnitt) medfører forlenget induksjonsperiode og/eller tidsmessig forskyvning av (ekspansjons-)hastighetstoppen, i tillegg til den forventede nivåsenkningen. Hvis pozzolanet forbruker alkaliene, og dette er en varig effekt, er en slik forlengelse i tid ikke å forvente.

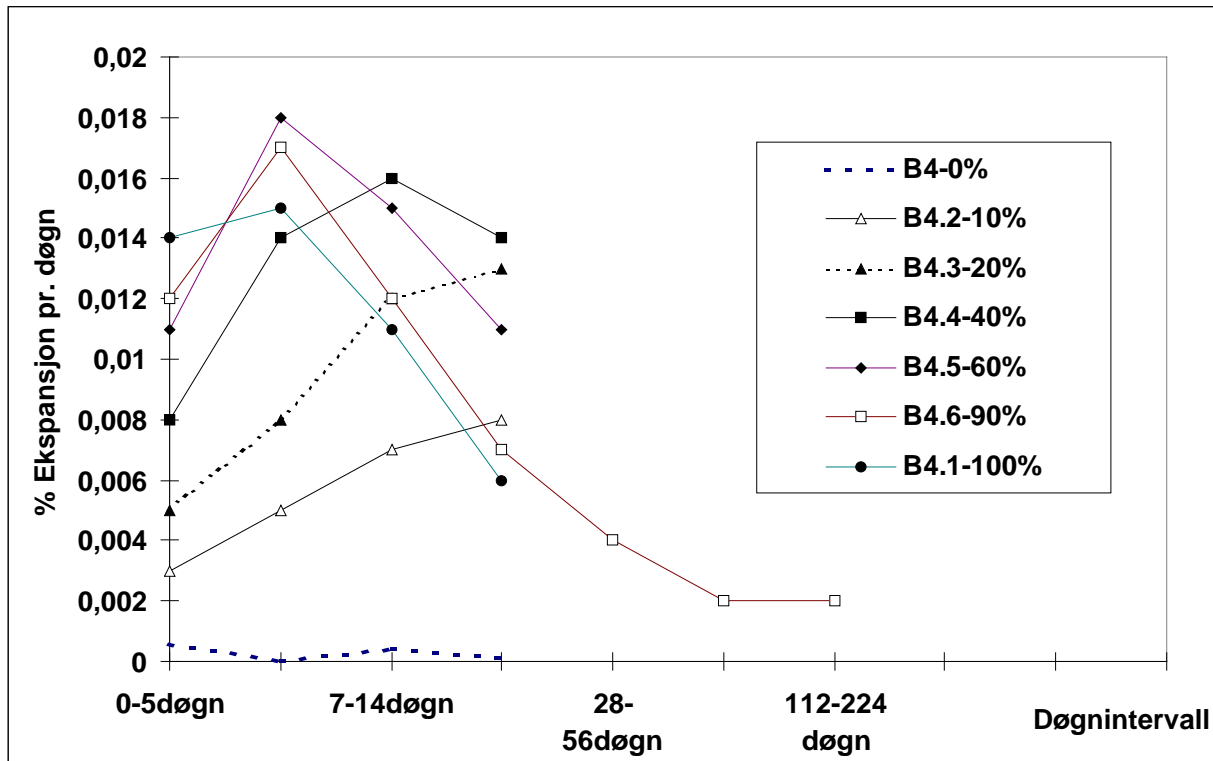


Figur 2.7.2. Varierende ekspansjonshastighet for ulike tilslag, fra Wigum & French (1996).

Samme publikasjon foreslår likevel også lengre prøvetid for tilslag med “lang” induksjonsfase. Dette vil imidlertid pga. tross alt noe høyere alkalnivå mot slutten av prøvningen (se senere) gi en hardere eksponering og forrykke den dokumenterte sammenhengen mellom feltobservasjoner og laboratoriedata basert på 14 dagers prøvning (avsn. 4.1).

Lagerblad & Trägårdh (1994) har gjort undersøkelser med ulike v/c-tall, dvs. studert effekten av høyfast betong i en metode med mettet NaCl-løsning (!) ved 50 °C. Deres konklusjon er at v/c ikke har betydning for langsomt reagerende tilslag, men for raskt reagerende. Dvs. at diffusjonen kun i sistnevnte tilfelle var en kritisk faktor, m.a.o. manglende alkali-tilførsel.

Tross pozzolaners evne til å redusere alkaliinnholdet er det imidlertid også her nødvendigvis et tidsspørsmål før innholdet blir høyt nok til å fremprovosere en reaksjon. Fournier et al (1995) konkluderer på basis av forsøk i 1 N NaOH (riktignok ved “bare” 38 °C) med overskridelse av “grenseverdien” etter ett år (!) at 20 % flyveaske ikke nødvendigvis er tilstrekkelig til å hindre reaksjon. Slik “ekstrapolering” av metoder savner korrelasjon til virkeligheten.



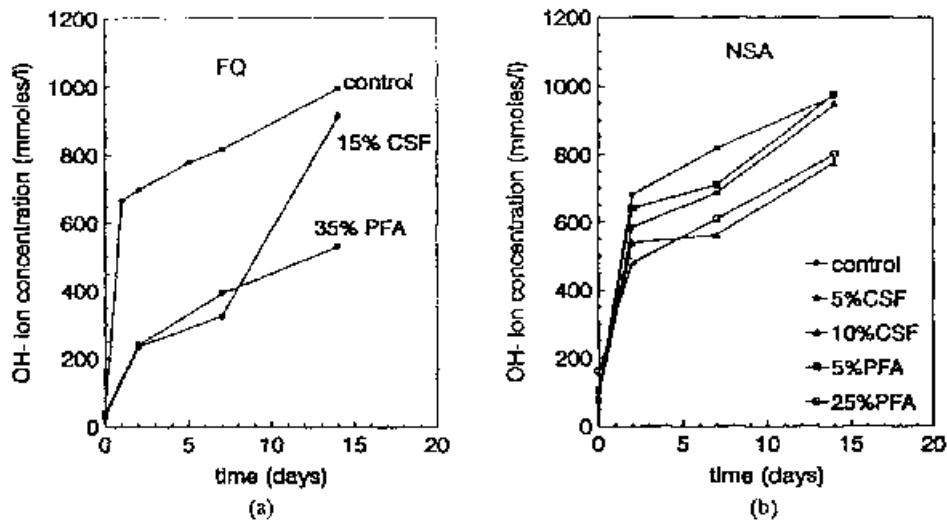
Figur 2.7.3 Resultater fra figur 2.7.1 differensiert mht tid.

#### 2.7.4.4 Pozzolaners virkning på alkaliinnhold

Som nevnt ovenfor, er en observert hovedeffekt altså at alkaliinnholdet og pH-nivået i porevannet reduseres naturlig pga. pozzolantilsetningen. Bérubé et al (1995) har studert effekten av flyveaskens finhet på alkalireaksjonen. De finner - for et gitt alkaliinnhold - at flyveaskens effektivitet av malefinheten er positiv ; jo finere jo bedre.

De finner derimot ingen signifikant virkning av flyveaskens eget alkali- (eller sulfat-) innhold. Dette kan imidlertid langt på vei forklares med at høyere alkaliinnhold også generelt er positivt for askens aktivitetsindeks.

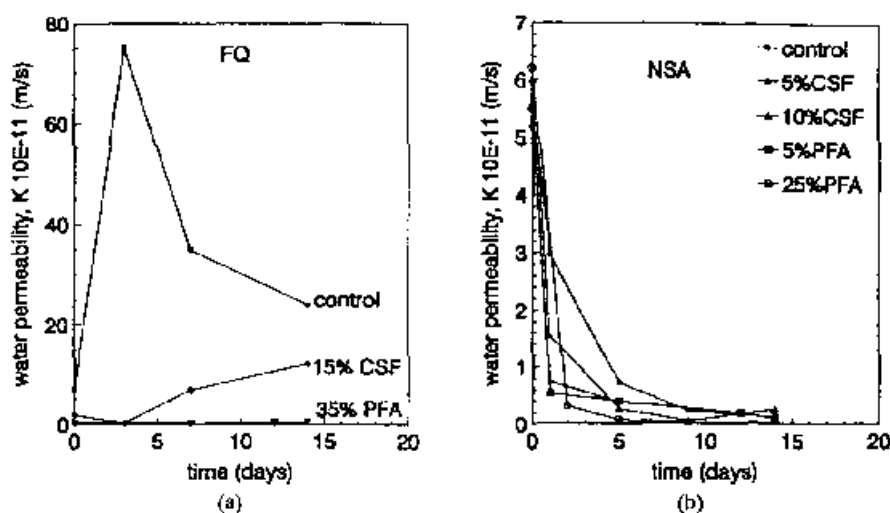
Berra et al (1994 & 1996) har studert en del faktorer sammenligningsvis for flyveaske og silika i AMBM. De registrerer at det tar langt mer tid før alkaliinnholdet stabiliseres til likevekt med det omgivende miljøet. De finner at effekten av 25 % flyveaske er omtrent den samme som for 10 % silika, se figur 2.7.4. Dette rimer også bra med undersøkelse av vannpermeabilitet, se figur 2.7.5. Det samme gjelder effekt på portlandtinnholdet. Forskjellen mellom silika og flyveaske synes imidlertid å øke noe over tid, muligens fordi silika blir raskere "ferdig" med å utnytte sitt potensiale.



Figur 2.7.4 Effekt av silika og flyveaske på OH-konsentrasjonen i porevannet med to ulike tilslag (FQ og NSA). Fra Berra et al (1996).

Berra et al (1994) forsøker også å bestemme nødvendig mengde pozzolan for å komme under grenseverdiene på både ASTM C 1260 og ASTM C 227. Disse to metodene gir ikke helt sammenfallende resultater, og avviket er noe større for silika-serien enn for flyveaskeserien.

Ved bruk av pozzolaner i AMBM vil et problem likevel være å vurdere akseptgrensens relevans. Denne er som nevnt fastsatt på grunnlag av "fri" alkali-tilgang for tilslaget. Et alkaliinnhold initielt i mørtelen på nivå med det den ville være i (den prosjekterte) betongen vil ikke nødvendigvis tilfredsstille denne randbetingelsen. Denne randbetingelsen er nødvendig for å tilfredsstille den måten kriteriet opprinnelig ble fastsatt på - nemlig ved kalibrering mot felt etter x antall år.

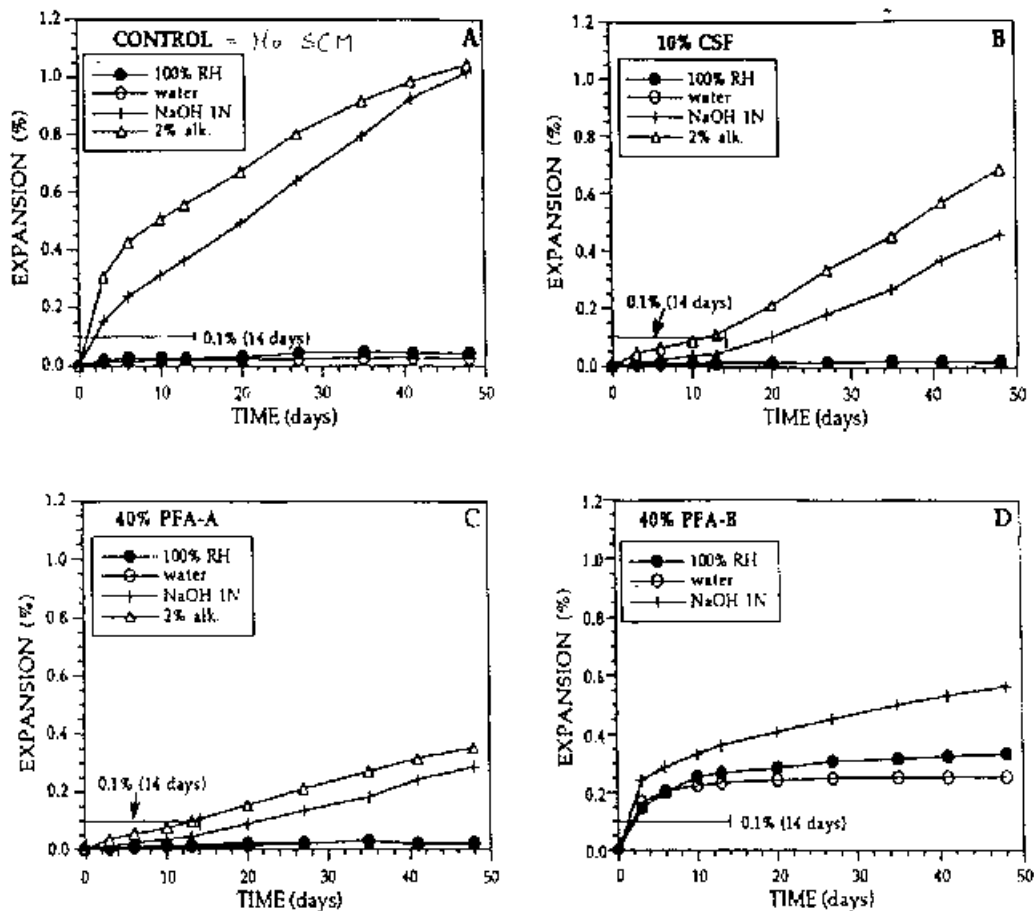


Figur 2.7.5 Effekt av silika og flyveaske på vannpermeabilitet, med to ulike tilslag (FQ og NSA). Fra Berra et al (1996).

Bérubé et al (1995) mener det er riktig å overstyre pozzolanenes innvirkning på det initielle alkali-innholdet under prøvning ved å justere dette kunstig til 1,25 %. Dermed vil man delvis eliminere effekten av økt diffusjonsmotstand og ventetid før "likevekt". På den annen side oppviste slike prøver lagret i vann raskt fallende ekspansjon, hvilket de mener indikerer rask ione-utveksling tross bruk av pozzolaner. Dette kan imidlertid skyldes "dra-hjelpen" fra pozzolanene til senkning av porevannskonsentrasjonen. Et slikt tema ville kunne undersøkes som tilleggsforsøk ved å ta ut prizmer på ulike tidspunkt og legge dem isolert eller i vann ved samme temperaturbetingelser.

Samme forfattere har gått videre med å sammenligne effekten av to ulike flyveasker og én silika, lagret ved ulike betingelser, mht. ekspansjon og alkaliinnhold i porevannet, se figurene 2.7.6 og 2.7.7. Det mest iøynefallende er svært ulik tid for å oppnå den såkalte likevekten med konsentrasjonen i lagringsmediet. Den nødvendige tidsperioden strekker seg til dels ut over standard prøvetid på 14 dager. Kanskje ennå mer slående er imidlertid kanskje at "likevekts"-konsentrasjonen overskrides ! Noe av dette kan forklares med "avvik" i utførelsen i forhold til den prosedyre som nå benyttes i Norge (etterfylling med vann i stedet for NaOH ved fordampning), men bør likevel settes et spørsmålstejn ved mht. realisme.

Sammenstilling av konsentrasjons- og ekspansjonsdata indikerer at alle bindemiddel-sammensetninger som i AMBM er i stand til å senke/holde alkalikonsentrasjonen ved 14 dager under 2%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  (tilsv. 0,64 mol pr. liter ; se tidligere) gir ekspansjoner i samme metode under 0,1 % ved 14 dager, dvs. iht. standardkravet for tilslagstesting etter samme metode. Da har altså også alkalnivået vært "kontrollert" til 1,25% fra starten.



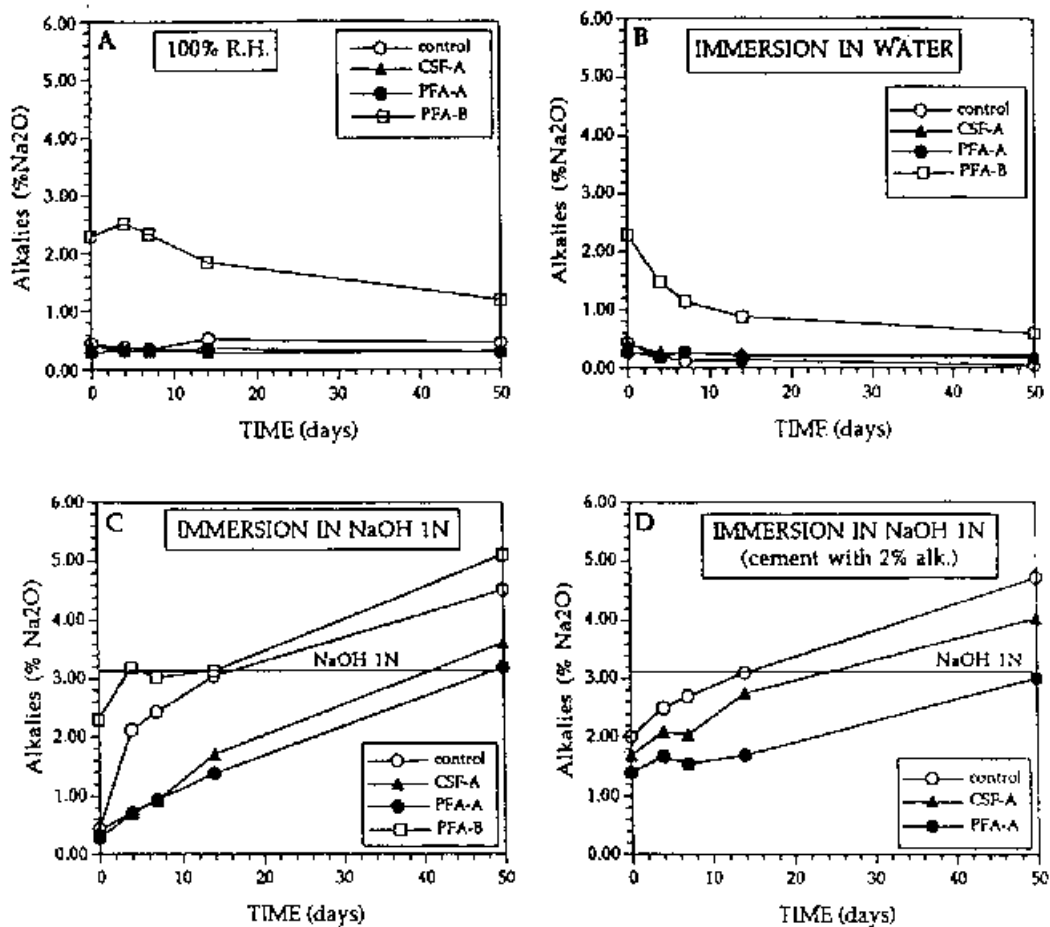
Figur 2.7.6 Ekspansjonsforsøk med ulike pozzoloner og lagringsbetingelser. (Bérubé et al, 1995).

Et spørsmål som bør vurderes nærmere, er om porevannssammensetningen som målt ovenfor er reell, verdiene tilsvarende ved (teoretisk) etterregning pH-nivå over 14,1.

Hvilke alkalimengder som da, dvs. på tidspunktet for prøvningsavslutning, totalt finnes i prøvene - altså summen av bundne og frie - kan være en angrepsvinkel for å vurdere hvorvidt såvidt strenge betingelser er riktige for denne type prøvning. Eventuelt kan en mulighet være å forsøke å styre inn mot et korrigert nivå.

På denne bakgrunn anses imidlertid lenger prøveperiode ved disse konsentrasjonsnivå som lite realistisk.

Forlenget prøvetid gir også tilsynelatende ugunstige verdier for silika men er samtidig mindre felt-relevant, jfr. forutgående diskusjoner.



Figur 2.7.7 Porevannsforsøk med ulike pozzolaner og lagringsbetingelser. (Bérubé et al, 1995).

### 2.7.5 Forslag til eksperimentelt arbeid

En prosjektaktivitet med målsetning å komme nærmere et svar på hvorvidt mørtelprismemetoden kan "kvalifisere" et reaktivt tilslagsmateriale sammen med en mengde av et bestemt pozzolan må ta inn over seg en del problemstillinger parallelt:

Som diskutert i avsn. 2.7.4.3, vil et av de viktigste aspekt være at initieringsfase ikke forlenges slik at reaksjonen forskyves vesentlig i tid. Det vil være meget viktig at den delen av reaksjonen som finner sted innenfor prøvningsperioden (14 dager) ikke avtar relativt til "totalreaksjonen". Imidlertid er sistnevnte også i høyeste grad et relativt begrep fordi ubegrenset (i tid) tilgjengelighet på alkalier vil lede til fortsatt ekspansjon.

Dermed er det nødvendig å stipulere et sannsynlig alkalnivå innenfor tidsperioden. Dette alkalnivået vil under naturlige forhold påvirkes av bindemiddelsammensetning som diskutert foran. Da blir det viktig å ikke oppheve denne effekten ved å la prøvene ligge i alkalisk løsning "i det uendelige". Derfor er det interessant å finne det tidspunkt hvor summen av løste og bundne alkalier i prøvene overstiger konsentrasjonen i lagringsmediet - og realistisk maksimalkonsentrasjon i en mørtel eller betong.

Interessant vil det også være å undersøke om man kan klare seg med et initielt alkalnivå tilsvarende lagringsmediet (1 N NaOH) og så la bindemidlet og temperaturen alene “gjøre jobben”, dvs. eksponere prøvene isolert ved samme temperaturnivå. Ekspansjonsverdiene vil under slike omstendigheter ganske sikkert avta pga. noe lavere fuktnivå i prøvene. Ikke desto mindre vil det være verdifullt å fastslå hvorvidt alkalikonsentrasjonen i porevannet faller til under kritisk verdi (avsn. 2.7.4.4) og om skadebildet endres (for konsentrasjoner høyere enn denne grenseverdien). Da vil forsøk med måling av slike konsentrasjoner fortelle en del om valg av nødvendig type og mengde pozzolan som er nødvendig for å komme under en slik kritisk konsentrasjonsgrense - med et aktuelt tilslag X. Slike valg vil med fordel kunne verifiseres vha. betongprismemetoden.

Med et slikt perspektiv vil det være av stor betydning å dokumentere at en endring av alkalnivå, oppnådd vha. pozzolan(-type/-mengde) er av varig karakter.

Det vil også være av verdi å verifisere og forklare årsak til ulike vektendringer som funksjon av andel reaktivt tilslag som registrert og drøftet i avsn. 2.7.4.1.

### 2.7.6 Vedtatt eksperimentelt arbeid

Det er diskutert frem et program som involverer flere av problemstillingene ovenfor. Dette omfatter penetrasjonsforhold, sammenligning med og uten silika eller flyveaske, andel reaktivt tilslag og innstøping av “maksimalt naturlig” alkaliinnhold. Målemetoder vil være alkalikonsentrasjon over tid, i porevann og totalt, dessuten ekspansjons- og skadeforløp (strukturanalyse). Det gjøres også et forsøk på å følge dette for fukt-/alkali-isolerte prøver. Materialmatrisen for programmet gjengis i Tabell 2.7.1 :

Tabell 2.7.1 Materialkombinasjoner for prøveprogram med mørtel med v/c=0,45 iht. AMBM.

Alk.Innh.	Pozz.Type	Pozz.Andel <sup>3)</sup>	Kataklasitt i tilslag ; Andel		
			0 %	40 %	100 %
“Naturlig”	-	-	X	X	
	Silika FA <sup>1)</sup>	5 % 20 %		X X	
1,25 % <sup>2)</sup>	-	-	X	X	X
	Silika	5 % 10 %		X X	X X
	FA <sup>1)</sup>	20 %		X	X

<sup>1)</sup> Det benyttes sement Std.FA, dvs. uten ekstra tilsetning av flyveaske.

<sup>2)</sup> Alkalitilsetning v/ blanding slik at nivå 1,25 % av bindemiddel oppnås.

<sup>3)</sup> Beregnet som % av bindemiddel, dvs. på erstatningsbasis.

For disse gjennomføres :

- Det støpes 4 prismer pr. blanding, hvorav ett pålegges epoksy-maling etter ett døgn vannherding (alder to døgn).
- Måleterminer ekspansjon : 0, 5, 14, 42 døgn (Forskyves fra 28 pga. kollisjon m/ helg/jul, og da likt for alle blandinger).
- Måleterminer porevann ; uttak for forsendelse v/ 14 og 42 døgn. Pressing skjer et par dager senere, men likt for alle blandinger. Endelig fastsettelse av 42 døgn termin gjøres når andre data foreligger.
- Tynnslip ved 5, 14 og 42 døgn som over, for bestemmelse av nedbrytningsforløp, men muligens ikke av samtlige varianter/terminer.
- Ved hver av terminene foretas ekspansjonsmåling og vektbestemmelse på alle p.t eksisterende prismer.
- Ved hver aktuell termin uttas ett prisme, hvor halvparten går til porevanns-pressing, resten til tynnslip. Reaksjonen i sistnevnte bør umiddelbart stoppes v/ sprit e.l.
- Etter porevannspressing samles resten av prøven for bestemmelse av totalt (syreløselig), gjenværende alkaliinnhold.
- Som sement benyttes Std./Anl. i forholdet 80/20, unntatt hvis annet angitt.
- Der det er aktuelt, økes alkaliinnhold vha. tilsats av NaOH i blandingen.
- Ved evt. behov brukes et P- eller SP-stoff med lavest mulig alkaliinnhold for å ivareta god utstøpning.

Rapportering av disse forsøkene vil skje separat.

### 2.7.7 Konklusjoner

Mørtelprismemetoden er utviklet utelukkende med deklarasjonssprøvnig av tilslag for øye. Aksept iht. denne deklarasjonen forutsetter i utgangspunktet en tilgang på 1 N NaOH overfor tilslaget som ikke begrenses av bindemidlets sammensetning, dvs. relativt rask innstilling inne i prøvene til det nivå som finnes i lagringsmediet.

Et avvik mht. alkalnivå og/eller prøvningstid vil fjerne en dokumentert korrelasjonen mellom laboratorieprøvnig og erfaringer fra felt.

Pozzolaner, deriblant silika og flyveaske, har – uansett usikkerhet mht. mekanisme - den virkning at fritt alkalnivå i porevannet i betong/mørtel senkes. Dette har bakgrunn både i kjemisk reaksjon og økt motstand mot inntrengning utenfra. Førstnevnte gjelder både for lab og i felt, mens sistnevnte kun er relevant for labprøvnig.

For å kunne vurdere nærmere hvorvidt mørtelprismemetoden kan brukes – evt. i modifisert form – til å dokumentere tilslag sammen med pozzolaner må det derfor gjøres en del nærmere undersøkelser.

Nøkkelpunkt i denne forbindelse er hvorvidt pozzolanet virker retarderende på tilslagets reaksjonshastighetsforløp og om man kan holde alkalnivået på realistisk nivå. Uten omfattende, ny undersøkelse med etablering av felt-lab data med pozzolaner vil bruk av metoden i dette tilfelle kreve at man legger seg ”på sikker side”. Realistisk alkalnivå kan ivaretas ved innstøpning, men samtidig må dette ikke forrykke forannevnte hensyn til relativ reaksjonshastighet.

Det er anbefalt og vedtatt deler av et forsøksarbeid for å klarlegge en del av disse spørsmålene. Aktiviteten kommer imidlertid i tillegg til den opprinnelig definerte prosjektplanen og vil først bli rapportert på et noe senere tidspunkt.

### **3. DELPROSJEKT C - FELTERFARINGER**

*Jan Lindgård - SINTEF, Bygg og miljøteknikk, avd. Sement og betong  
Børge Johannes Wigum - ERGO*

#### **3.1 Innledning**

##### **3.1.1 Mål**

Det overordnede målet i dette delprosjektet var i utgangspunktet å benytte erfaringer fra konstruksjoner i felt til en kritisk vurdering av de grensekriteriene som i dag er satt for den petrografiske analysen og den akselererte mørtelprismemetoden.

Ut fra de begrensede midlene i delprosjektet viste det seg tidlig i prosjektfasen at ambisjonsnivået måtte reduseres. Den reviderte målsetningen har vært å samle inn mest mulig relevant informasjon fra ”ressurspersoner/senior betongteknologer” i bransjen og fra utførende laboratorier av strukturanalyser av betong, sammenstille opplysningene som fremkommer og ut fra dette forsøke å belyse og vurdere grensekriteriene innenfor de tildelte prosjektmidlene.

##### **3.1.2 Bakgrunn – opprinnelig arbeidsplan**

Fra start av delprosjektet var Knut Bryne, Stange Betong delprosjektleder. Høsten 1997 overtok Jan Lindgård, SINTEF og Børge Johannes Wigum, ERGO prosjektlederansvaret. Av ulike årsaker kom delprosjektet ikke skikkelig i gang før i 1998.

Som nevnt i kapittel 3.1.1 ble det etterhvert klart at opprinnelig arbeidsplan og ambisjoner ikke var praktisk gjennomførbare i forhold til delprosjektets budsjett. Det ble da forsøkt ulike fremstøt ovenfor bransjen for å forsøke å øke midlene til delprosjektet. Da dette ikke gav resultat, ble det på styringsmøte 20.04.98 bestemt at delprosjektet skulle gjennomføres med de opprinnelige midlene.

På bakgrunn av dette, diskuterte og evaluerte delprosjektlederne den opprinnelige arbeidsplanen for delprosjektet. Der var det bl.a. lagt opp til å utføre egne feltundersøkelser på utvalgte konstruksjoner. I disse feltundersøkelsene skulle grad av reaksjon i felt beskrives ved kartlegging av rissareal og rissvidder. Dette skulle gi et grunnlag for å dele konstruksjonene inn i skadeklasser. Eksponeringsbetingelser, alder og lokal klimapåkjenning skulle også kartlegges. Videre var det lagt opp til innsamling av kjerneprøver som skulle undersøkes nærmere i laboratorium for å kvantifisere grad av reaksjon ved telling av mikroriss, sprekkeintensitet o.l. Til slutt var det opprinnelig foreslått å undersøke andel risikobergarter i betongen i de uttatte kjerneprøvene ved plan- og tynnslipundersøkelser (ved punkttelling – jfr en vurdering av metoden i kapittel 3.2), samt prøve utseparert tilslagsmateriale fra kjerneprøvene i hht den akselererte mørtelprismemetoden. Samlede resultater skulle så benyttes som grunnlag for å vurdere dagens grensekriterier (for petrografisk analyse og mørtelprismemetoden) ut fra felterfaringer.

### **3.1.3 Revidert arbeidsplan**

For å oppnå en mest mulig kostnadseffektiv bruk av de begrensede økonomiske midlene, og for å få et visst grunnlag for å vurdere dagens grensekriterier opp mot felterfaringer, ble arbeidsplanen revidert. Deriblant er de opprinnelig planlagte felt- og laboratorieanalyser utelatt til fordel for en mer omfattende innsamling og sammenstilling av erfaringsdata som allerede foreligger. Det ble lagt opp til å samle inn erfaringsdata både fra "ressurspersoner" i betongbransjen (jfr kapittel 3.3.1) og fra laboratorier som driver med både feltundersøkelser av betongkonstruksjoner og strukturanalyse av betong (jfr kapittel 3.3.2). Dette er datagrunnlag som det i mange tilfeller allerede er lagt ned betydelige ressurser i å samle inn, uten at det tidligere har vært forsøkt å sammenstille og vurdere disse under ett.

Spesielt var det interessant å sammenstille så mye erfaring som mulig fra konstruksjoner der det er benyttet tilslagsmaterialer fra lokaliteter som har et innhold av risikobergarter rundt dagens grenseverdi (dvs fra ca 10 til ca 30 %).

### **3.2 Innledende vurdering av kvantitative laboratorieundersøkelser i plan- og tynnslip for å bestemme andel risikobergarter i betongen**

Som foreslått i den opprinnelige arbeidsplanen (jfr kapittel 3.1.2) ble enkelte av kjerneprøvene fra SINTEFs "Nord-Norge prosjekt" (Jensen og Haugen, 1996) undersøkt nærmere ved kvantitative analyser i plan- og tynnslip. Dette ble utført av Børge Johannes Wigum, ERGO og Marit Haugen, SINTEF. Formålet var primært å undersøke om man ved disse analysemetodene kunne bestemme andel risikobergarter i eksisterende betongkonstruksjoner med rimelig sikkerhet. Hvis så var tilfelle var planen videre å utvikle en detaljert metodebeskrivelse for dette, og benytte denne for analyse av utvalgte utborede betongkjerner.

Ut fra dette innledende arbeidet ble det konkludert med at det praktisk kan la seg gjøre å anslå mengde risikobergarter i sandfraksjonen ut fra punkttelling i *tynnslip* av betong. For å kunne anslå andel risikobergarter i steinfraksjonen vil det imidlertid være nødvendig å benytte makroanalyser på *planslip*. Dette er nødvendig for å oppnå et tilstrekkelig stort antall representative tilslagspartikler. Makroanalyser vil derimot innebære en mye større usikkerhet med tanke på korrekt beskrivelse av bergartene og deres potensielle alkalireaktivitet. I hht metodebeskrivelsen for petrografi kreves det derfor tynnslipanalyse for å vurdere et tilslags potensielle alkalireaktivitet.

For å få et tilstrekkelig statistisk grunnlag for å kunne vurdere dagens grensekriterier, ville det ha vært nødvendig å utføre slike kvantitative analyser på et betydelig antall undersøkte betongkonstruksjoner (både i felt og i lab.) som har et innhold av risikobergarter rundt dagens kritiske grenseverdier. Da det i praksis har vært vanlig å kun bore ut betongkjerner fra konstruksjoner som har vist en betydelig opprissing i felt (inklusive i det omtalte Nord-Norge prosjektet og andre forskningsprosjekter på alkalireaktivitet), ble det antatt å være vanskelig å finne et tilstrekkelig antall relevante prøver med et forventet innhold av risikobergarter rundt dagens grenseverdier, selv om man lette igjennom arkivene til alle de 4 forespurte institusjonene (jfr kapittel 3.3.2). Uansett om det hadde vært mulig å oppdrive et tilstrekkelig prøvemateriale, så ville delprosjektets knappe økonomiske rammer sette klare

begrensninger for antall prøver som kunne undersøkes nærmere ved slike plan- og tynnslipanalyser.

På grunnlag av dette ble det etter disse innledende undersøkelsene foreslått ovenfor styringsgruppen at man derfor i denne omgang ikke burde gå videre med å utvikle metoder for slike kvantitative analyser av betongprøver i laboratoriet. Av samme årsak ble det også foreslått (og vedtatt) at man også skulle legge på is arbeidet med den andre foreslåtte metoden med verifisering av grensekriteriene for akselerert mørtelprismemetode (jfr kapittel 3.1.2).

### **3.3 Innhenting av erfaringsdata fra felt**

#### **3.3.1 Innhenting av erfaringsdata fra ”senior betongteknologer”**

##### *3.3.1.1 Generelt*

Allerede fra starten av arbeidet i delprosjektet ble det ansett som viktig å innhente erfaringer fra ”ressurspersoner/senior betongteknologer” vedrørende eksisterende konstruksjoner. I den forbindelse ble det utformet et standardisert rapporteringsskjema (jfr vedlegg 3.3.1), som de ulike ressurspersonene ble satt inn i på et innledende møte. Hovedformålet med denne informasjons-innhenting var å få kjennskap til tilslag- og betongsammensetning til mange betongkonstruksjoner på Østlandet, samt alder og eventuell grad av opprissing av disse. Østlandet ble valgt ut både fordi flere av tilslagene som er brukt i dette området har et innhold av risikobergarter i nærheten av grenseverdiene, samt at det er bygd mange betongkonstruksjoner i denne landsdelen.

De senior betongteknologene som har bidratt til denne innsamlingen av informasjon er:

- Gunleik Sauro - Stange Betong AS (naturtilslag fra Svelviksand og Storsand)
- Gunnar Gabrielsen - Betong Sør Kristiansand (sammen med Hvitsten)
- Gunnar Hvitsten - NorBetong (naturtilslag fra Nenseth, pukk fra Dalen Brevik)
- Knut Bratli - NorBetong, nå pensjonist (sammen med Hvitsten)
- Oddbjørn Føllesdal - NorBetong Hamar (naturtilslag fra Elverum og Brumundal)
- Knut Lie Hansen - FABEKO, tidl. Brynhildsen (generelt om elementer fra Brynhildsen)

Å få inn relevante opplysninger om et tilstrekkelig antall betongkonstruksjoner har vært en tidkrevende og møysommelig prosess. For noen av betongstasjonene har også eldre arkiver blitt kastet, slik at det ikke har vært mulig å finne dokumentasjon på betongsammensetning for konstruksjoner eldre enn en viss alder. Dette er ugunstig for vårt arbeide, da vi primært er interessert i felterfaringer fra betongkonstruksjoner eldre enn ca 20 år der det er brukt tilslag som har et visst innhold av alkalireaktive bergarter.

Da prosjektet via de utleverte skjemaene kun fikk inn opplysninger fra et begrenset antall betongkonstruksjoner, ble det sendt ut et nytt brev til ressurspersonene med noen tilleggsspørsmål. De ble da anmodet om å lage en oversikt over flest mulig konstruksjoner eldre enn 20 år hvor det er benyttet betong fra deres betongstasjon med tilslag fra hhv: Storsand, Svelviksand, Nenseth og Mjøsregionen (utover de konstruksjonene med kjent

betongsammensetning som allerede var meldt inn). Det var også ønskelig å få tilgang til laboratorieundersøkelser foretatt på de nevnte tilslagstypene (petrografi, evt. akselererte mørtelprismeforsøk og/eller Canadiske betongprismeforsøk). Ressurspersonene ble også bedt om å skaffe til veie mest mulig opplysninger om reseptene, for eksempel erfaringsmessig betongsammensetning for ulike tidsepoker. Hensikten var å prøve å knytte forbindelse mellom tilslagslokalitet og aktuell konstruksjon, noe som senere kan danne grunnlag for nærmere undersøkelser av utvalgte konstruksjoner i felt og i laboratoriet.

I tillegg til de nevnte forespørslene har prosjektet via Kåre Johansen, SINTEF fått opplysninger om betongleveranser i Østfold fra slutten av 60-tallet, der det ble benyttet tilslag fra hhv Monaryggen (3 ulike tilslagsprodusenter) og Halden (Oreid grustak). Disse forekomstene er spesielt interessante, da innholdet av risikobergarter ligger i områder 10-30 %. Da disse opplysningene ble mottatt sent i prosjektperioden har det ikke blitt anledning til å gå nærmere etter i sømmene hvilke relevante konstruksjoner som disse tilslagene er benyttet i. Konstruksjoner i Østfold bør imidlertid inkluderes i evt. senere undersøkelser i felt og i laboratoriet (jfr kapittel 3.4).

### 3.3.1.2 Mottatte opplysninger

Etter avsluttet informasjonsinnhenting har prosjektet totalt mottatt opplysninger om 53 ulike betongkonstruksjoner. For 22 av disse har vi også fått oppgitt antatt betongsammensetning. For de fleste av de øvrige har vi kun mottatt opplysninger om tilslagstype og alder på konstruksjonene. For knapt halvparten av de 53 konstruksjonene har vi også mottatt generelle (men delvis vage) opplysninger om tilstanden til den aktuelle konstruksjonen (dvs grad av opprissing). Ressurspersonene har selv utført feltobservasjoner av skader på et fåtall av disse konstruksjonene. De mottatte opplysningene om tilstanden til de fleste av konstruksjonene er dessverre for *mangelfulle* til å gi et tilstrekkelig grunnlag for å kunne vurdere felterfaringer med de benyttede tilslagstypene.

For å prøve å finne mer informasjon om tilstanden til de aktuelle konstruksjonene, har vi kryss-sjekket navnene på dem med de konstruksjonene som er lagt inn i SINTEFs database (ca 750 konstruksjoner) og med de konstruksjonene som vi har fått opplysninger fra NOTEBY om (11 stk – jfr kapittel 3.3.2). Ved denne gjennomgangen ble det funnet tilleggsopplysninger om observerte skader på kun 2 av de 53 konstruksjonene.

I alle de 53 konstruksjonene er det benyttet natursand (hovedsaklig fra 6 ulike forekomster). For minst ca 60 % av konstruksjonene (og muligens flere) er det også benyttet singel fra samme forekomst, mens det er benyttet pukk i de resterende (fra 3 ulike pukkverk).

Av de 53 konstruksjonene består 7 stykker av *prefabrikerte betongelementer* produsert ved B. Brynhildsen i Moss i perioden 1962-80. For disse har vi mottatt detaljerte opplysninger om betongsammensetning fra Knut Lie Hansen (jfr vedlegg 3.3.3). De reseptene som ble benyttet i disse elementene antas å være representative for de reseptene som ble benyttet i betongelementer produsert også ved andre fabrikker på Østlandet i denne perioden. Det generelle ved elementene er at de hadde et høyt alkaliinnhold (ca 5-6 kg Na<sub>2</sub>O-ekv per m<sup>3</sup> betong).

Fra Kåre Johansen har vi i tillegg mottatt opplysninger om erfaringsrecepter (masseforhold, sementmengder, samt bruk av silika og tilsetningsstoffer) for plasstøpt betong produsert i perioden før 1988 (jfr vedlegg 3.3.3).

### 3.3.1.3 Sammenstilling av opplysningene

Alle mottatte relevante opplysninger er sammenstilt og lagt inn i et *Excel regneark*. For å prøve å få mest mulig ut av disse delvis mangelfulle opplysningene, har vi ut fra konstruksjonstype, erfaringsrecepter og antatt vannbehov for tilslagene i de aktuelle geografiske områdene (jfr vedlegg 3.3.3) stipulert et sementinnhold i betongen i de ca 30 konstruksjonene der dette ikke var opplyst om. For alle konstruksjonene har vi så ut fra alkaliinnholdet i NORCEMs sementer i de aktuelle periodene, gjort et overslag over *totalt alkaliinnhold* i betongene. I disse beregningene ble det ikke inkludert bidrag fra *tilsetningsstoffer* i betong produsert før 1980 (jfr kommentar i vedlegg 3.3.3).

I tabell 3.1 er det gitt en oversikt over lokaliteten til tilslagene som er benyttet i de 53 konstruksjonene. I tabellen er også konstruksjonenes alder og antatt alkaliinnhold angitt.

Tabell 3.1 Oversikt over opplysninger mottatt fra ressurspersonene om 53 konstruksjoner

Antall konstr.	Sand		Singel		Pukk		Total <sup>2</sup> ca % r.b.	Alkali- <sup>3</sup> innhold (kg/m <sup>3</sup> )	Alder (gj.snitt)
	Lokalitet	ca % r.b. <sup>1</sup>	Lokalitet	ca % r.b. <sup>1</sup>	Lokalitet	ca % r.b. <sup>1</sup>			
15	Svelvik	30	Svelvik	30	Langøya "kalkstein"	0-50	15-40?	3,3-6,0	26-40 (29)
7	Storsand	35	Storsand	35	---	---	35	4,0-6,0	26-32 (30)
17	Nenseth	18	Nenseth	18	Dalen "hornfels"	0-100	10-50?	3,7-5,5	12-38 (24)
3	Brumundal	80	Brumundal	80	---	---	80	4,6-4,8	13-52
3	Elverum	42	---	---	"kalkstein"/ Helgøya "kvartsitt"	0	23(2stk) 60(1stk)	4,0-6,0	27-35
5	Oreid	8-14	Oreid	13-15?	---	---	10-12	3,5-5,5	21-24
3	Andre	?	Andre	?	---	---	?	?	10-35

<sup>1)</sup> Antatt % risikobergarter i de aktuelle tilslagene (ut fra mottatte opplysninger fra "ressurspersonene")

<sup>2)</sup> Antatt totalt innhold av risikobergarter i konstruksjonene med de aktuelle tilslagene

<sup>3)</sup> Antatt totalt innhold av alkalier (Na<sub>2</sub>O-ekvivalent) i de aktuelle konstruksjonene

*Silika* ble vanlig i bruk i betong fra ca 1980. Ut fra våre opplysninger ble det enkelte steder først på 80-tallet benyttet inntil ca 10-12 % silika av sementvekten. Vi har ikke brukt ressurser på å finne konstruksjoner bygd i denne perioden, hvor det samtidig ble benyttet både alkalireaktivt tilslag, høyt alkaliinnhold og høyt silikainnhold. Å foreta felt- og laboratorieundersøkelser av slike konstruksjoner (for eksempel i Trondheims-området) anser vi imidlertid som høyst relevant med tanke på å vurdere de "kjørereglene" som er gitt i Norsk Betongforenings publikasjon nr. 21 (jfr kapittel 3.4).

### 3.3.2 Innhentning av erfaringsdata fra 4 laboratorier

#### 3.3.2.1 Generelt

Som beskrevet foran, ble det lagt vekt på å hente inn og sammenstille erfaringsdata fra konstruksjoner der det allerede har vært utført felt- og laboratorieundersøkelser (strukturanalyser). Det ble derfor sendt ut en forespørsel (*brev datert 23.03.98*) til NORCEM, NBI, NOTEBY og SINTEF, der de (mot betaling) ble oppfordret til å sende inn relevante opplysninger fra sine arkiv. Det ble utarbeidet egne skjema til formålet (jfr vedlegg 3.3.2), og det ble poengtert at data fra fortrolige oppdrag ville bli anonymisert i den videre behandling av dem i delprosjektet.

#### 3.3.2.2 Mottatte opplysninger

På bakgrunn av innkomne svar, var det tydelig at SINTEF sitter inne med majoriteten av feltregistreringer med tilhørende laboratorieundersøkelser av betongkjerner fra ulike konstruksjoner. Av et totalt antall på ca 750 betongkonstruksjoner som er feltbefart og inkludert i SINTEFs database, er det også foretatt strukturanalyser av 96 av dem (inkludert 13 konstruksjoner der undersøkelsene er foretatt av 3 diplomstudenter ved NTNU).

NORCEM og NBI gav tilbakemelding om at de ikke hadde noen relevante data å tilføre delprosjektet, mens NOTEBY sendte inn opplysninger om 11 konstruksjoner. Totalt er det fra SINTEF og NOTEBY mottatt opplysninger om 107 konstruksjoner over hele Norge.

Som nevnt foran har det i praksis vært vanlig å kun bore ut betongkjerner fra konstruksjoner som har vist en betydelig opprissing i felt. Disse konstruksjonene er gjerne relativt gamle (eldre enn 20 år). Som regel er det derfor sparsomt med opplysninger om betongsammensetning og tilslagslokalitet for disse konstruksjonene. Av de 107 konstruksjonene har vi kun mottatt opplysninger om antatt tilslagslokalitet for 7 stk og om antatt sementinnhold for 7 stk. De mest håndfaste opplysningene om betongsammensetningen har man imidlertid fra strukturanalysene, der både v/c-tallet (bestemt i tynnslip) og reagerte bergartstyper normalt er angitt. SINTEF har oppgitt v/c-tall for 91 av 96 sine konstruksjoner, mens NOTEBY har angitt v/c-tall for én av sine 11 konstruksjoner.

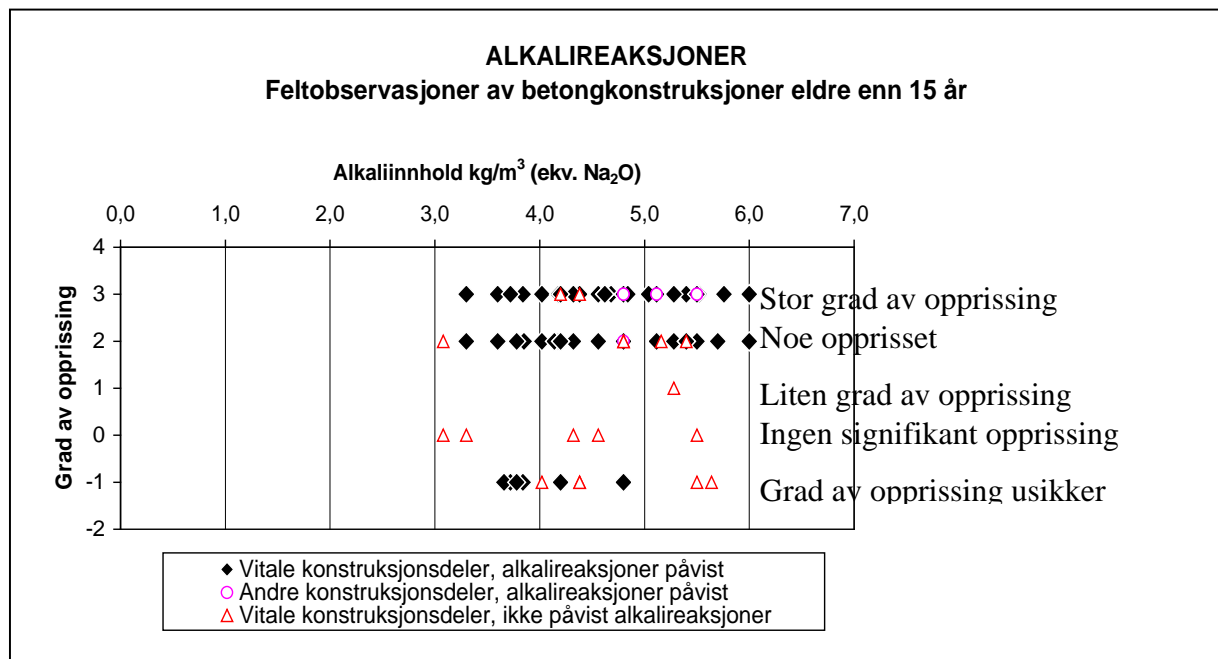
#### 3.3.2.3 Sammenstilling av opplysningene

Relevante opplysninger om de 107 konstruksjonene er sammenstilt og lagt inn i et *Excel regneark*. For å prøve å få mest mulig ut av disse delvis mangelfulle opplysningene, har vi ut fra konstruksjonstype, erfaringsresepter og antatt vannbehov for tilslagene i de aktuelle geografiske områdene (jfr vedlegg 3.3.3), samt oppgitte v/c-tall (fra tynnslipanalyse) stipulert et sementinnhold i de ulike betongene. For alle konstruksjonene har vi så ut fra alkaliinnholdet i NORCEMs sementer i de aktuelle periodene, gjort et overslag over *totalt alkaliinnhold* i betongene. I disse beregningene ble det ikke inkludert bidrag fra *tilsetningsstoffer* i betong produsert før 1980 (jfr kommentar i vedlegg 3.3.3).

SINTEF har delt de fleste av sine konstruksjoner inn i skadeklasser fra 0 til 8 ut fra målt rissvidde og -areal i felt (i hht et system utviklet av Viggo Jensen, 1993). NOTEBY har for sine konstruksjoner vurdert tilstanden i felt i generelle vendinger. For å prøve å vurdere alle dataene samlet, er det forsøkt å dele konstruksjonene inn i 5 klasser avhengig av *grad av opprissing i felt*;

- 0: Ingen signifikant opprissing
- 1: Liten grad av opprissing (SINTEF klasse 1)
- 2: Noe opprisset (SINTEF klasse 2-6)
- 3: Stor grad av opprissing (SINTEF klasse 7-8)
- 1: Grad av opprissing er usikker

Figur 3.1 viser et samlet oversikt over 103 av konstruksjonene som er eldre enn 15 år (4 av de 107 konstruksjonene er yngre enn 15 år og 5 er mellom 15 og 20 år), der antatt totalt alkaliinnhold ( $\text{Na}_2\text{O}$ -ekv.) er plottet mot grad av opprissing i felt. De fleste av konstruksjonene er bruer og dammer. I figuren er det skilt mellom *vitale* konstruksjonsdeler (viktige for bæreevne og funksjonalitet) og *andre* konstruksjonsdeler (mindre viktige deler av byggverket, f.eks. stabbesteiner o.l.). Der vitale konstruksjonsdeler viste høyere eller lik grad av opprissing i forhold til andre konstruksjonsdeler, er grad av opprissing av andre konstruksjonsdeler ikke inkludert i figuren. I figuren er det også skilt mellom konstruksjoner hvor det er påvist alkalireaksjoner (i tynnslip) og hvor det ikke er påvist.



Figur 3.1 Sammenstilling av antatt alkaliinnhold mot grad av opprissing i felt for de 103 konstruksjonene som er eldre enn 15 år (5 av disse er mellom 15 og 20 år)

### 3.3.3 Diskusjon

Som figur 3.1 viser er det for de fleste av de 103 konstruksjonene (som SINTEF og NOTEBY har gitt opplysninger om) observert noe – eller betydelig opprissing i felt. For majoriteten av disse er det senere også påvist at rissene (i større eller mindre grad) har sammenheng med alkalireaksjoner i betongen (påvist ved strukturanalyser i laboratoriet). Det er naturlig av hovedtyngden av konstruksjonene ligger i denne øvre delen av figuren, siden de fleste strukturundersøkelsene er foretatt etter at man på forhånd har registrert en viss grad av opprissing på konstruksjonene.

Figuren viser også at for de konstruksjonene der det ikke er observert noen signifikant opprissing i felt, er det heller ikke påvist alkalireaksjoner i betongen. Dette kan ha sammenheng med at det ikke er benyttet alkalireaktivt tilslag i betongen (noe våre opplysninger ikke sier noe om) eller at betongsammensetningen for øvrig ikke har ført til alkalireaksjoner for den gitte konstruksjonen (i det aktuelle miljøet) på tidspunktet da undersøkelsen ble foretatt.

Ut fra figur 3.1 ser man at for de konstruksjonene hvor det er påvist alkalireaksjoner, varierer det totale innhold av alkalier mellom 3,3 og 6,0 kg Na<sub>2</sub>O-ekv. per m<sup>3</sup> betong (med de antagelsene som er gjort vedr. beregning av totalt alkaliinnhold i de ulike betongene). Opprinnelsen til de ulike tilslagene (dvs lokalitet av forekomst) og innhold av risikobergarter mht alkaliaktivitet er imidlertid ukjent for de alle fleste konstruksjonene. Dette kan man forsøke å bestemme i ettertid, enten ved at man for enkelte konstruksjoner via byggherrenes - eller andre arkiver klarer å spore seg tilbake til opplysninger fra byggeperioden eller at man legger ressurser ned i å telle innhold av risikobergarter i uttatte betongkjerner ved plan- og tynnslip-analyser (jfr kapittel 3.2). Uten at dette gjøres, har man heller ikke ut fra disse opplysningene fra laboratoriene et tilstrekkelig grunnlag for å kunne vurdere grensekriteriene for petrografi- og mørtelprismemetoden ut fra feltefaringer. Den samme konklusjonen ble også trukket ut fra de opplysningene som ressurspersonene klarte å fremskaffe.

De sammenstilte opplysningene fra ”ressurspersonene” og fra laboratoriene har vist at for tilslag med ”lik reaktivitet”, betyr betongsammensetning (alkaliinnhold, silika, ...) og lokalt miljø (fukt og temperatur) mye for om skadelige alkalireaksjoner vil utvikles. I det etterfølgende er det vist noen eksempler på dette:

#### *Innhold av risikobergarter:*

- Fra ”ressurspersonene” er det rapportert om krakeleringsriss på enkelte konstruksjoner med et antatt innhold av risikobergarter ned mot 20 % (for de fleste konstruksjonene med innhold av risikobergarter i området 10-30 % er imidlertid skadegraden i felt ukjent)

#### *Alkaliinnhold:*

- Det er foretatt undersøkelser av en ca 25 år gammel støttemur i Oslo med tilslagsmateriale fra Storsand (med ca 35 % risikobergarter). Betongen inneholder henholdsvis ca 3,3 og 5,4 kg alkalier per m<sup>3</sup> betong i to ulike deler av muren der det er boret ut kjerner (anslått på grunnlag av strukturanalyse). Fuktforholdene var tilnærmet

like på disse to stedene. Det ble påvist alkalireaksjoner kun i den delen av konstruksjonen der betongen inneholder mest alkalier, og her var også opprissingen størst i felt.

- Det er registrert opprissing på ca 30 % av overflatearealet av ei betongplate til ei bru der betongen inneholder ca 23% risikobergarter og 4 kg alkalier pr m<sup>3</sup>. I en annen bru med tilsvarende tilslagssammensetning og alder er det imidlertid registrert kun ubetydelig opprissing av betongplaten, til tross for at betongen i denne konstruksjonen har et betydelig høyere alkaliinnhold (ca 6 kg alkalier pr m<sup>3</sup>). Eventuelle forskjeller i fuktforhold mellom disse konstruksjonene er uklar. Det er heller ikke boret ut kjerner fra konstruksjonene.

#### *Silika:*

- Det er registrert noe krakeleringsriss på 18 år gamle prefabrikerte betongelementer med 4-5 % silika og alkaliinnhold 4,2 – 4.7 kg pr m<sup>3</sup>. Det er ikke boret ut kjerner fra noen av elementene. Rissene kan imidlertid indikere at 4-5 % silika ikke er tilstrekkelig til å forhindre utvikling av alkalireaksjoner (jfr Norsk Betongforenings publikasjon nr. 21).

#### *Miljø:*

- For flere konstruksjoner (deriblant flere vegbruer) med en ”potensielt alkalireaktiv betongsammensetning” er det registrert høy rissintensitet i felt og sterkt fremskredne alkalireaksjoner (ut fra strukturanalyser i laboratoriet) på de delene av konstruksjonene der overflata er eksponert for rennende vann.
- I en snart 30 år gammel konstruksjon i Nordsjøen, er det registrert at et tilslagsmateriale som inneholder gneis/granitt har reagert (påvist gel i tynnslip). Reaksjoner er observert i konstruksjonsdeler der betongen har vært utsatt for svært høye temperatur (50-60°C) i hele levetiden. Dette indikerer muligheten for at alle kvartsholdige bergarter er disponible for reaksjoner, dersom forholdene for dette er tilstede (eksempelvis ”ekstremt høye” temperatur slik som her). Rissintensitet i felt for denne konstruksjonen er ikke kjent.

I kapittel 2.6 ble det presentert resultater fra 3 forsøk med *sandstein* i hht Canadisk Betongprismememotode. Det ble der konkludert med at sandsteinen fra Lillehammer-området gav nesten dobbelt så høy 12 måneders ekspansjon som sandsteinen fra Finnmark, uten at de innledende undersøkelsene (petrografisk analyse og mørtelprismeforsøk) kunne forklare denne store forskjellen. Det var derfor av interesse å undersøke om det var mulig å se noen forskjell i reaktivitet (dvs. rissintensitet i felt) av sandstein fra disse regionene i virkelige konstruksjoner.

- I SINTEFs database er det totalt inkludert informasjon om 13 konstruksjoner i Finnmark der hovedsakelig sandstein har reagert. Antatt innhold av alkalier var ca 3,5-5,5 kg per m<sup>3</sup>. Av disse hadde 8 stk skadegrad 7 eller 8, og 5 stk skadegrad 2-6. Gjennomsnittalderen for de 13 konstruksjonene var 32 år (16-46).

- I den samme databasen er det totalt inkludert informasjon om 7 konstruksjoner i Hedmark /Oppland der hovedsakelig sandstein har reagert. Alkali-innholdet var omlag det samme som for konstruksjonene i Finnmark. Alle de 7 konstruksjonene hadde skadegrad 7 eller 8. Gjennomsnittalderen var 46 år (21-72), dvs ca 15 år høyere enn for konstruksjonene i Finnmark.

Disse erfaringene viser at sandstein fra begge de to områdene kan føre til stor opprissing i felt. At noen av konstruksjonene i Finnmark har lavere skadegrad i felt (skadegrad 2-6) kan ha sammenheng med at gjennomsnittalderen for disse kun var ca 25 år.

### **3.3.4 Konklusjon**

I dette delprosjektet er det først og fremst foretatt en sammenstilling av eksisterende felldata.

På bakgrunn av et begrenset omfang av delprosjektet, har det ikke vært mulig å benytte de innsamlede- og sammenstilte felldata til en konklusiv vurdering av dagens grenseverdier.

Til tross for den mangelfulle konkluderingen, har arbeidet i delprosjektet resultert i følgende:

- Det er opparbeidet en oversikt over mange konstruksjoner på Østlandet med innhold av risikobergarter i størrelsesorden 10-30 %, som senere kan feltbefares
- Det foreligger et godt grunnlag for å finne tilsvarende konstruksjoner med tilslag fra Østfold (Oreid og Monaryggen)
- Det foreligger et grunnlag for å telle andel risikobergarter i utborede betongkjerner
- Det foreligger et godt og realistisk grunnlag for å gå spesifikt ut i felt for å besvare opprinnelige målsetning vedrørende vurdering av dagens kritiske grensekriterier.

### **3.4 Forslag til videre undersøkelser**

Grunnet et begrenset budsjett innenfor dette delprosjektet har det dessverre ikke vært mulig å fremskaffe et tilstrekkelig datagrunnlag med hensyn til felterfaringer for å vurdere "riktigheten" av dagens grensekriterier (for petrografisk analyse og Mørtelprismemetoden). De erfaringsdata som er innhentet og sammenstilt i dette prosjektet vil imidlertid utgjøre et svært viktig og godt grunnlag i en eventuell videreføring av dette viktige arbeidet. Det er her nødvendig å ha klart for seg at laboratoriemetoder og kritiske grensekriterier må gjenspeile det som virkelig skjer i felt. Sammenheng mellom testmetodene i laboratoriet er viktig, men sier ikke nødvendigvis noe om det som skjer i virkelige konstruksjoner.

Kort oppsummert bør et videre prosjekt bestå i å fremskaffe flere opplysninger om et utvalg av de konstruksjonene som allerede er inkludert i sammenstillingene. For konstruksjonene som "ressurspersonene" har gitt tilbakemeldinger om er det i første omgang skadegrad i

felt, samt delvis betongsammensetning som er ufullstendig og delvis usikker i dag. I tillegg bør det inkluderes opplysninger om konstruksjoner med tilslag fra Østfold (Oreid og Monaryggen), som har et innhold av risikobergarter i området 10-30 %.

For konstruksjonene som laboratoriene har gitt opplysninger om er det i første rekke tilslags- og betongsammensetning som er mangelfull og usikker. For mange av konstruksjonene som de ulike personene/instansene har gitt opplysninger om, antas det imidlertid å være mulig å fremskaffe noe mer arkivdata (tilslags- og betongsammensetning), f eks fra arkivene til de ulike vegkontorene.

Foruten ytterligere innsamling og sammenstilling av flere relevante data, vil arbeidet i et eventuelt nytt prosjekt i stor grad bestå i feltbefaringer. For de befarte konstruksjonene vil grad av reaksjon i felt beskrives kvantitativt med hensyn til omfang (rissintensitet, eventuelle ekspansjoner, etc.), i tillegg til at andre relevante opplysninger vil bli forsøkt fremskaffet (betongsammensetning, alkaliinnhold, eksponeringsbetingelser, alder og lokalt miljø). Fra et utvalg av konstruksjonene vil det bli boret ut betongkjerner. Disse skal benyttes til å kvantifisere grad av reaksjon ved vurdering av rissintensitet o.l. (i planslip). Det vil også bli produsert tynnslip av kjernene for videre undersøkelser.

Det vil også bli forsøkt å gjøre et overslag over innhold av risikobergarter, både ut fra planslip og tynnslip (jfr kapittel 3.2). Ut fra tynnslipanalysene kan en også undersøke eventuelle spesielle mikrostrukturelle trekk i bergartene.

Hvorvidt det også bør inkluderes forsøk med utseparering av tilslag fra noen av konstruksjonene for senere mørtelprismeforsøk i laboratoriet er usikkert (jfr kapittel 3.2).

I et eventuelt nytt prosjekt kan målsetningen bestå i å kun vurdere grenseverdiene ut fra felterfaringene (slik som opprinnelig planlagt i dette delprosjektet). Det kan imidlertid også være aktuelt å inkludere en verifisering av de "kjørereglene" som er gitt i Norsk Betongforenings publikasjon nr 21 (primært grenseverdiene for tillatt alkaliinnhold og nødvendig innhold av silikastøv). Det anses også som meget interessant å se nærmere på sammenhengen mellom det lokale miljøet (fukt, f eks rennende vann) og rissintensitet i felt.



## 4. DISKUSJON

Prosjektets hovedmålsetting har vært å utarbeide et tilstrekkelig vitenskapelig grunnlag for å kunne legge frem et forslag til revisjon av dagens grensekriterier, slik de er frosset i regi av Kontrollrådet, klasse P.

For å oppnå en strukturert diskusjon vedrørende grensekriteriene, er påfølgende diskusjon lagt opp ut fra følgende utgangspunkt:

- Bestemmelser av grensekriteriene - **påliteligheter** for petrografisk metode og akselerert mørtelprismetest
- **Sammenhenger** mellom grensekriteriene
- Grenseverdienes relevans til **felterfaringer**

### 4.1 Petrografisk metode

#### 4.1.1 Pålitelighet

Det er for bransjen i utgangspunktet ønskelig med en petrografiske metode som på en rask og effektiv måte anslår tilslagsmaterialers potensielle alkalireaktivitet. Spørsmålet er om det er mulig, på et vitenskapelig grunnlag, å oppfylle dette ønsket.

Metodens pålitelighet avgjøres bl.a. av med hvilken grad av nøyaktighet andel risikobergarter kan anslås. I dag er situasjonen at Kontrollrådet, klasse P, har satt en administrativ grense ved 20% risikobergarter. Dette har i praksis ført til at produsenter som har fått anslått innholdet av risikobergarter til 19%, har hatt et stort konkurransefortrinn fremfor naboen som eventuelt får 21% i sine analyser. Om tilslagsmaterialer klassifiseres som alkalireaktive eller ikke kan også ha variert mellom ulike prøvninger av tilslagsmateriale fra samme lokalitet.

I forprosjektrapporten ble usikkerheten ved selve punkttelling i den petrografiske metoden vurdert. Det antydes der at en statistisk kan forvente at rundt grenseverdien på 20%, gir selve metoden en usikkerhet på  $\pm 3\%$  risikobergarter. Dette er vel og merke dersom operatørene har en "rett" forståelse av hvordan risikobergartene skal klassifiseres. Som det allerede ble poengtert i forprosjektrapporten, og som dokumenteres i dette hovedprosjektet, vil den største usikkerheten derimot ligge i identifiseringen av bergartene og derved være avhengig av operatøren. Det ble i dette prosjektet avdekket til dels store variasjoner mellom operatørene, der hovedårsaken tydeligvis var mangel på samkjøring, og et ikke nøye nok fastsatt bergartsklassifiseringsskjema. Gjennom en grundig diskusjon i dette prosjektet har det derimot vært mulig å forklare de fleste større variasjonene. Alle operatørene har blitt enige om hvordan ulike tvilstilfeller skal klassifiseres. Men da det ikke er foretatt noen ringprøvning etter denne diskusjonen, vet man egentlig ikke helt hvilken usikkerhet man bør

operere med. Et annet viktig poeng er at selv om operatørene kommer frem til full enighet om hvordan ulike bergarter skal klassifiseres, så er det ikke sikkert at dette samsvarer med felterfaring og hvordan de ulike bergartene reelt reagerer i betong.

#### 4.1.2 Metodens evne til å gi et klart svar

Man kan ennå ikke uttrykke den absolutte usikkerheten ved analyseresultatene i den petrografiske metoden.

Men det er viktig å poengtere metodens overordnede målsetning, som er å anslå om et tilslagsmateriale er **reaktivt (JA)** eller **ikke reaktivt (NEI)**. Den statistiske usikkerheten bør derved reduseres til å vurdere påliteligheten vedrørende metodens evne til å gi et klart "**JA**" eller "**NEI**". Med utgangspunkt i resultatene fra ringprøvningen, kunne man for 12 av de 16 prøvene åpenbart observere om prøvene lå langt under 20% ("**NEI**"), eller langt over 20% ("**JA**"). Dermed viser ringprøvningen at for 4 av de 16 prøvene klarte ikke operatørene samlet å gi et klart svar. Det skal imidlertid presiseres at ringprøvningen ble foretatt før detaljert samkjøring og felles diskusjon av prøvene.

Ut fra den overstående diskusjonen og de empiriske erfaringene i dette prosjektet, er det dermed nødvendig å ha klart for seg når metoden evner å gi et pålitelig svar, og når metoden ikke er kapabel til å skille mellom reaktive- eller ikke reaktive tilslagsmaterialer:

- For tilslagsprøver der petrografisk metode angir **tilstrekkelig<sup>1</sup> lav** andel risikobergarter, tilsier erfaringen at metoden gir et pålitelig resultat, og tilslaget klassifiseres som **ikke reaktivt**.
- Tilsvarende vil det være der petrografisk metode angir **tilstrekkelig<sup>1</sup> høy** andel risikobergarter. Det vil da være riktig å klassifisere tilslagsprøver som **reaktive**.
- Problemet vil derimot være dersom andel risikobergarter er i en **gitt gråsoner<sup>1</sup>** rundt fastsatt kritisk grense. Grunnet en usikkerhet, som ennå ikke er definert, kan man ikke med sikkerhet si om tilslagsmaterialet skal klassifiseres som reaktivt eller ikke reaktivt. I slike tilfeller bør den petrografiske metoden vurderes som ikke kapabel til å gi et pålitelig svar på tilslagsmaterialets potensielle alkalireaktivitet. Akselerert mørtelprisme-metode (trinn 2) kan da utføres for å gi klarere svar.

Vi har med andre ord en situasjon der den petrografiske metoden fungerer godt som et første trinn for å skille tydelig reaktive tilslagsmaterialer fra tydelig ikke reaktive. For tilfeller der tilslagsmaterialer ligger nær kritisk grense for andel risikobergarter, vil metoden derimot ikke kunne gi klare faglige svar alene. Klassifiseringen av slike materialer bør derved avgjøres etter utførelse av trinn 2; akselerert mørtelprismetesting.

---

<sup>1</sup> Vurderinger vedrørende **tilstrekkelige** lave- eller høye andeler risikobergarter, og en **gitt gråsoner**, henger sammen med kritiske grenseverdier. Relevante kvantitative felterfaringer må legges til grunn for fastsettelse av eventuelle nye grenseverdier.

Ved en eventuell fremtidig etablering av en ny supplerende kvantitativ metode, og rutinemessige ringprøvninger og samkjøring, vil man eventuelt kunne redusere noe på antallet tilslagsmaterialer som ikke kan klassifiseres ved petrografisk metode. I tillegg vil en ny kvantitativ metode kunne bidra med økt vektlegging av grad av reaktivitet for ulike bergarter med ulike mikrostrukturelle trekk.

#### **4.2 Akselerert mørtelprisme metode - pålitelighet**

Ringprøvningen for den akselererte metoden viste at ekspansjonsresultater etter 14 døgns prøvningstid varierer med inntil 0,03% ekspansjon. Dette tilsvarer variasjoner som tidligere er funnet i omfattende studier foretatt av Oberholster (1987) og Wigum et al. (1997). Ved dagens håndtering av grensekriteriene for den akselererte mørtelprismemetoden er det ikke tatt hensyn til denne variasjonen.

Viktigheten av å følge nøyaktige prosedyrer er registrert. Det bør nå være muligheter for en mer ensartet utførelse ved de tre godkjente laboratoriene, men det ligger her et ansvar for Kontrollrådet med oppfølgende kontroller.

Ekspansjon foreslås heretter kalkuleres ut fra effektiv lengde mellom måleknaster (slik det gjøres internasjonalt), noe som fører til at den tidligere grenseverdien på 0,10 nå tilsvarer 0,11%. Dette må tas hensyn til i den endelige vurderingen av grensekriteriene. Foreløpig gjelder gammel prosedyre for utregning av ekspansjon.

#### **4.3 Sammenhenger mellom grensekriteriene**

I en diskusjon om revisjon av dagens grensekriterier er det nødvendig å ha klart for seg bakgrunnen for etableringen av de grenseverdier som vi i dag finner i Norge. Det er opprinnelig kritisk grense for mørtelprismeeksponasjon etter 14 døgns prøvningstid som har vært den styrende for å forsøke å differensiere tilslagsmaterialer mht alkalireaktivitet. Internasjonalt er kritiske ekspansjonsgrenser etablert på bakgrunn av erfaringer for hvordan utvalgte bergarter (både langsomt- og hurtigreagerende) har reagert i konstruksjoner. Ut i fra dagens internasjonale standarder vedrørende de akselererte mørtelprismemetodene, er dagens norske kritiske grense muligens konservativ. Grundige utredninger vedrørende bakgrunn og status for internasjonale standarder og kritiske grensekriterier er gitt i forprosjektrapporten (NORMIN 1996) og i Wigum et al. (1997).

Som grunnlag for å etablere et grensekriterium for ekspansjon, ble det i Norge foretatt undersøkelser for å forsøke å finne en kritisk grense for andel reaktive bergarter som samsvarte med ekspansjonsgrensen. På bakgrunn av en enkeltstående forsøksserie med iblanding av ulike andeler reaktiv ryolitt, i et ikke reaktivt materiale, ble det foreslått en kritisk grense på 20% risikobergarter. Det er senere antydnet at denne grensen stemmer noenlunde med det som er erfart fra undersøkelser av konstruksjoner. Ingen kvantitativ undersøkelse er foretatt. Men det er foretatt kritiske undersøkelser som har forsøkt å verifisere sammenhengene mellom de to grensene statistisk, men som ikke har kunnet komme med klare konklusjoner.

I dette prosjektet er det ved en omfattende sammenstilling av parametre fra petrografiske analyser og akselererte mørtelprimeforsøk vist et kurveforløp der man observerer økende ekspansjon ved økende innhold av risikobergarter, og senere en utflating eller reduksjon i ekspansjon ved innhold av risikobergarter over et visst nivå (40-60%). Det er ikke mulig å bestemme om dette er en reell pessimaleffekt, eller om dette skyldes selve laboratoriemetoden. En endelig avklaring på dette kan best bestemmes gjennom innsamling av omfattende feltefaringer med bestemmelse av andel risikobergarter i feltekspontert betong med påviste alkalireaksjoner.

Det observeres ingen signifikante forskjeller mellom naturlig sand eller knust stein, og det er heller ikke observert at spesielle bergartstyper skiller seg ut fra de øvrige med hensyn til økt eller redusert ekspansjon. Dette må vurderes nærmere ved en fremtidig revisjon av Norsk betongforenings publikasjon nr. 21.

Undersøkelser i dette prosjektet viser at grensen for kritisk andel risikobergarter (20%) ikke samsvarer med kritisk ekspansjon etter 14 døgn (0,10%).

#### **4.4 Grenseverdier - feltefaringer**

Da det har kommet frem at dagens to kritiske grenseverdier ikke er samsvarende, er det en utfordring hvordan dette skal håndteres videre. Spørsmålet er om 20%-grensen for andel risikobergarter skal justeres ned og 0,10%-grensen for ekspansjon fastholdes, eller 20%-grensen fastholdes og 0,10%-grensen justeres opp.

Grunnlaget for fastsettelse av "riktige" grensekriterier må bygge på de erfaringer som etableres for hvorledes ulike tilslagsmaterialer opptrer i betongkonstruksjoner, dvs. grenseverdiene må verifiseres nærmere ved kvantitative feltundersøkelser.

Delprosjektet vedrørende feltefaringer er gjennomført med et lavere ambisjonsnivå enn det som ut fra et faglig synspunkt hadde vært ønskelig. Dermed har det ikke vært mulig å fremskaffe et tilstrekkelig datagrunnlag i dette prosjektet for å vurdere "riktigheten" av dagens grensekriterier. Imidlertid har innsamlingen og sammenstillingen av eksisterende felldata vært et fundamentalt grunnlag for å forberede et nytt prosjekt som kan gi konklusive vurderinger vedrørende dagens grensekriterier. Det ligger dermed en svært viktig utfordring i å planlegge og gjennomføre et slikt prosjekt med ytterligere innsamling og sammenstilling av kvantitative felldata

#### **4.5 Canadisk betongprismememotode - sandsteinsproblematikk**

Årsaken til at det nå ble oppnådd en svært høy ekspansjon for sandsteinen fra Lillehammerområdet etter 52 ukers eksponering i forhold til erfaringene fra tidligere forsøk, er uklar. En av årsakene kan være noe forskjellige egenskaper for "tidligere" og "dagens" sandstein, da forsøkene er utført på sandstein fra to vidt forskjellige uttak. Det er imidlertid sterke indikasjoner på at resultatene kan være påvirket av at lagringsbetingelsene for prismene er noe endret i forhold til tidligere praksis.

## 5. KONKLUSJON

De gjennomførte undersøkelser i dette prosjektet gir grunnlag for å trekke følgende konklusjoner.

### 5.1 Petrografisk analyse

- Ringprøvningen avdekket tildels store variasjoner i registrert andel risikobergarter mellom de ulike operatørene, forut for detaljert samkjøring. Metoden er nå forbedret betydelig gjennom felles diskusjon og samkjøring, med forslag til revidert bergartsklassifiseringsskjema. I tillegg er det utgitt et omfattende bildeatlas.
- Dagens petrografiske metode vurderes derfor å være egnet som trinn 1, dersom analysene utføres av erfarne og samkjørte operatører.
- Det har ikke vært mulig å bestemme en statistisk usikkerhet for den petrografiske metoden definitivt. I tilfeller der andel risikobergarter i tilslagsmaterialer oppgis til å ligge nær kritisk grense, vil metoden ikke kunne gi et klart faglig svar alene. Akselerert mørtelprismetesting (trinn 2) kan da utføres for å gi klarere svar.
- Supplerende undersøkelser ved hjelp av en mulig ny kvantitativ metode ville kunne bidra til en mer nøyaktig petrografisk vurdering, der det også vil være mulig med en bedre vektlegging av grad av reaktivitet for ulike reaktive bergarter (spesielt knust stein) med ulike mikrostrukturelle trekk.

### 5.2 Akselerert mørtelprismememotode

- Det er lagt frem forslag til spesifisering og modifisering av den akselererte mørtelprismemetoden.
- Ekspansjonsresultater etter 14 døgns eksponering viser variasjoner mellom laboratoriene på inntil 0,03% ekspansjon.
- Viktigheten av å følge nøyaktige prosedyrer er registrert.
- Ved eventuell innføring av ny prosedyre for utregning av ekspansjon, tilsvarer den tidlige grenseverdien på 0,10 % nå 0,11% (pga. endret målelengde).
- Dagens norske kritiske grense på 0,10% ekspansjon etter 14 døgn er muligens konservativ i forhold til internasjonale standarder.
- Det er registrert økende ekspansjon ved økende innhold av risikobergarter, og senere en utflating eller reduksjon i ekspansjon ved innhold av risikobergarter ut over et visst nivå (40-60%).

- Det har ikke vært mulig å bestemme om norske tilslagsmaterialer viser en reell pessimaleffekt, eller om dette er et metodefenomen. (Det arbeides videre med dette fenomenet, men dette vil gå utenfor den ordinære prosjektrammen og -tilknytning).
- Det er ikke observert signifikante forskjeller i ekspansjon mellom naturlig sand eller knust stein.
- Det er ikke observert at spesielle bergartstyper skiller seg ut fra de øvrige med hensyn til økt eller redusert ekspansjon.

### **5.3 Feltefaringer - og eventuell revisjon av grensekriteriene**

- Grensen for kritisk andel risikobergarter (20%) samsvarer ikke med kritisk ekspansjon etter 14 døgn (0,10%).
- Det har ikke vært mulig i dette prosjektet å fremskaffe et tilstrekkelig datagrunnlag, med hensyn til feltefaringer, for å vurdere "riktigheten" av dagens grensekriterier. Men sammenstilte data gir et svært godt grunnlag for gjennomføring av et nytt prosjekt vedrørende feltefaringer.
- Gjennomføring av et nytt prosjekt med kvantitativ vurdering av felldata er en forutsetning for å kunne evaluere dagens grensekriterier.

### **5.4 Canadisk betongprismememotode - sandsteinsproblematikk**

- Betongprismemotodens egnethet mht karakterisering av alkalireaktivitet for sandstein eller betongblandinger inneholdende sandstein vurderes som like god som for karakterisering av andre reaktive tilslag.
- Sammenhengen mellom mørtelprisme- og betongprisme-ekspansjon for sandstein (jfr NB publ. nr 21) ser heller ikke ut til å være dårligere enn for andre reaktive tilslag.

## 6. REFERANSER

- ASTM 1994: C 1260-94, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). *Annual book of ASTM Standards, Volume 04.02, Concrete and Aggregates*, 648-651.
- ASTM 1986: C 227-90, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method). *Annual book of ASTM standards. ASTM, Part 14: Concrete and mineral admixtures*, sidene 157-162.
- Berra, M., De Casa, G. & Mangialardi, T., 1986: Evolution of Chemical and Physical Parameters of Blended Cement Mortars Subjected to the NaOH bath Test. *Proceedings of the 10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Aug. 18-23, 1996, Melbourne, Australia. Sidene 483-491.
- Berra, M., Mangialardi, T., & Paolini, A.E. 1994: Application of the NaOH Bath Test Method for assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures against Reaction of Alkali with Artificial Siliceous Aggregate. *Cement & Concrete Composites*, Vol 16 (1994), sidene 207-218.
- Bérubé, M.A., Carles-Gibergues, A., Duchesne, J. & Naproux, P., 1995: Influence of Particle Size Distribution on the Effectiveness of Type F Fly Ash in Suppressing Expansion due to Alkali-Silica Reactivity. *Proceedings 5th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, Wisconsin, USA, SP 153-10, sidene 177-192.
- Bérubé, M.A., Duchesne, J. & Chouinard, D. 1995: Why the Accelerated Mortar Bar Method ASTM C 1260 is Reliable for Evaluating the Effectiveness of Supplementary Cementing Materials in Suppressing Expansion Due to Alkali-Silica Reactivity. *Cement, Concrete and Aggregates*, June 1995, sidene 26-34.
- Blackburn, WH, & Dennen, WH, 1997: Encyclopaedia of mineral names. *Mineralogical Association of Canada, Special Publication (1)*: side 360.
- Bleszynski, R.F. & Thomas, M.D.A., 1998: Microstructural studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions. *Advanced Cement Based Materials*, 1998, No. 7, sidene 66-78.
- Broekmans, MATM, & Jansen, JBH., 1997: ASR in impure sandstone: mineralogy and chemistry. I: Sveinsdóttir, EL (redaktør): *Proceedings of the 6th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Reykjavik: sidene 161-176.
- Broekmans, MATM, & Jansen, JBH., 1998: Silica dissolution in impure sandstone: application to concrete. I: Vriend, SP, og Zijlstra, JJP (redaktører): *Geochemical Engineering: Current Applications and Future Trends*, Conference Proceedings. *Journal of Geochemical Exploration*, Special Volume (62): sidene 311-318.
- Dott, RH., 1964: Wacke, greywacke and matrix - what approach to immature sandstone classification? *Journal of Sedimentary Petrology* (34): sidene 625-632.
- Dove, P.M., 1995: Kinetic and thermodynamic controls on silica reactivity in weathering environments. I: White, AF, og Brantley, SL (redaktører): *Chemical weathering rates of silicate minerals. Reviews in Mineralogy* (31): sidene 235-290.
- Dove, P.M., & Rimstidt, J.D., 1994: Silica-water interactions. I: Heaney, PJ, Prewitt, CT, & Gibbs, GV (redaktører): *Silica. Reviews in Mineralogy* (29): sidene 259-308.
- Fournier, B., Langley, W.S. & Malhotra, V.M., 1995: Effectiveness of Fly Ash in Reducing Expansion of Concrete Made with Reactive Aggregates from New Brunswick, Canada. *Proceedings 5th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1995. SP 153-32, sidene 561-590.
- Gillot, J.E. & Rogers, C.A., 1994: Alkali-aggregate reaction and internal release of alkalis. *Magazine of Concrete Research* (46): sidene 99-112.
- Gjelle, S. & Sigmond, E.M.O., 1995: Bergartsklassifikasjon og kartfremstilling. *Norges Geologiske Undersøkelse Skrifter* (113): 77 sider.

- Goguel, R., 1995: Alkali release by volcanic aggregates in concrete. *Cement & Concrete Research* (25): sidene 841-852.
- Grattan-Bellew, PE, & Beaudoin, J.J., 1980: Effect of phlogopite mica on alkali-aggregate expansion in concrete. *Cement & Concrete Research* (10): sidene 789-797.
- Gudmundsson, G. & Möller, J., 1997: Intermilled Silica Fume in Cement and Concrete. *Proceedings of the 19th International Conference on Cement Microscopy*, April 27th - May 1st, 1997, Cincinnati, Ohio, USA, sidene 86-92.
- Hadley, D.W., 1961: Alkali reactivity of carbonate rocks - expansion and dedolomitization. *Highway Research Board, Proceedings* (40): sidene 462-474.
- Heaney, P.J., 1994: Structure and chemistry of the low-pressure silica polymorphs. I: Heaney, PJ, Prewitt, CT, og Gibbs, GV (redaktører): Silica: physical behavior, geochemistry and materials applications. *Reviews in Mineralogy* (29): sidene 1-40.
- Helmuth, R., Stark, D., Diamond, S. & Moranville-Regourd, M., 1997: Alkali-Silica Reactivity: *An overview of Research*, SHRP-C-342, National Research Council, Washington DC.
- Hooton, R.D., 1996: Recent Developments in Testing for ASR in North America. *Proceedings of the 10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Aug. 18-23, 1996, Melbourne, Australia, sidene 280-287.
- Howarth, R.J., 1998: Improved Estimators of Uncertainty in proportions Point-Counting, and Pass-fail Test Results. *American Journal of Science*, Vol. 298, Summer 1998, pp 594-607.
- Jensen, V. 1993: *Alkali Aggregate Reactions in Southern Norway*. Doctor Technicae Thesis 1993. The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Norway. 262 pp.
- Jensen, V. & Haugen, M., 1996: Alkalireaksjoner i Nord-Norge. Rapport nr 2: Løsmasseforekomster og petrografiske analyser. *SINTEF rapport STF22 A96806*, 37 sider.
- Kastner, M., 1979: Silica polymorphs. I: Burns, RG (redaktør): Marine minerals. *Reviews in Mineralogy* (6): sidene 99-107.
- Kretz, R., 1983: Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* (68): sidene 277-279.
- Lagerblad, B. & Trägårdh, J., 1994: Alkali-Silica Reaction in High Strength Concrete, *Proceedings of Rilem International Workshop "Durability of High Performance Concrete"*, Vienna February 14-15, 1994, 22 sider.
- Lindgård, J, Dahl, P.A, & Jensen, V., 1993: Bergartssammensetning - reaktivt tilslag. Beskrivelse av prøvningsmetoder og krav til laboratorier. *Rapport STF70 A93030*, SINTEF Trondheim: 9 sider.
- Meland, I., et.al., 1993: Alkalireaksjoner i betong. Rapport nr 3: Tilslag og prøvingsmetoder, *SINTEF-rapport nr STF70 A93112*, Trondheim.
- Norsk Betongforening, 1996: *Publikasjon nr.21, Bestandig betong med alkalireaktivt tilslag*. Oslo, 5 sider + vedlegg.
- Normin 2000, 1996: *Alkalireaksjoner i betong*. Forprosjektrapport Normin 2000, Norges Forskningsråd, 86 sider.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. & Siever, R., 1987: *Sand and sandstone*. 2. utgave, Springer Verlag, München: 553 sider.
- Spry, A., 1969: *Metamorphic textures*. Pergamon Press, New York: 350 sider.
- Streckeisen, A., 1979: Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks: recommendations and suggestions of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geology* (7): sidene 331-335.

- Thaulow, N., Jakobsen, U.H. & Clark, B., 1996: Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses. *Cement & Concrete Research* (26): sidene 309-318.
- Van der Plas, L. & Tobi, A.C., 1965: A chart for judging the reliability of point counting results. *American Journal of Science* (263): sidene 87-90.
- Wigum, B.J. & Lindgård, J., 1994: Test Methods for Alkali-Aggregate Reactions in Norwegian Aggregates: Petrographic Examination and the South African NBRI Mortar-Bar Test. *Proceedings 3rd. International Conference on Durability of Concrete*, Nice, France 1994, ACI SP-145, sidene 781-791.
- Wigum, B.J., 1995a: *Alkali-Aggregate Reactions in Concrete; Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks*. Dr.ing. avhandling 1995:98, Inst. for Geologi og Bergteknikk, NTNU, Trondheim 1995, 227 sider.
- Wigum, B.J., 1995b: Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. *Engineering Geology* (40): sidene 195-214.
- Wigum, B.J. & French, W.J., 1996: Sequential Examination of slowly Expanding Alkali-Reactive Aggregates in Accelerated Mortar Bar testing. *Mag. of Concrete Research*, vol. 48, No. 177, Dec., sidene 281-292.
- Wigum, B.J., French, W.J., Howarth, R.J. & Hills, C., 1997: Accelerated Tests for Assessing the Potential Exhibited By Concrete Aggregates for Alkali-Aggregate Reaction. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, sidene 451-476.
- Wilkins, R.W.T. & Sabine, W., 1973: Water content of some nominally anhydrous silicates. *American Mineralogist* (58): sidene 508-516.
- Wimmenauer, W., 1985: *Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart: 382 sider.
- Winkler, H.G.F., 1979: *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 5. utgave, Springer Verlag, New York: 348 sider.

***For vedlegg; se papirkopi***