

Publikasjon nr. 29

Veiledning for produksjon og bruk av selvkompriimerende betong

Forbehold om ansvar

Denne publikasjonen fra Norsk Betongforening er utarbeidet av en prosjektgruppe sammensatt av fagpersoner utnevnt av publikasjonskomiteen i foreningen.

I prosessen med utarbeiding av publikasjonen, er det lagt vekt på å sikre at innholdet er i samsvar med kjent viten og de standarder som var gjeldende da arbeidet ble avsluttet. Publikasjonen har vært på høring i fagmiljøet.

Noen feil eller mangler kan likevel forekomme.

Norsk Betongforening forutsetter at publikasjonen brukes av personer med den nødvendige faglige kompetansen, og med forståelse for de begrensningene og forutsetningene som er lagt til grunn. Feil tolking og bruk av innholdet i publikasjonen er ikke Norsk Betongforening sitt ansvar.

Norsk Betongforening, eller medlemmer i prosjektgruppen og publikasjonskomiteen, har ikke ansvar for direkte eller indirekte følger av eventuelle feil eller mangler i publikasjonen, eller bruken av innholdet i publikasjonen.

Høringsutkast-brukes kun til høring formål

Forord

Selvkomprimerende betong (SKB) er en betegnelse for betongtyper som tillater at støpearbeider kan gjennomføres uten tilførsel av komprimeringsenergi i form av f. eks stavvibrator. Motivasjonen for å innføre SKB i norsk og internasjonal byggeindustri har vært:

- Bedre arbeidsmiljø
- Økt produktivitet
- Økt kvalitet

Denne utgaven av NB 29 erstatter forrige utgave fra 2007. Hovedendringene er:

- Publikasjonen er harmonisert med gjeldende regelverk
- Publikasjonen er tilpasset til dagens kunnskap og erfaringer
- Publikasjonen har fått ny oppbygging. Forklaringskapittelet er bakt inn i spesifikasjons- og veiledningskapittelet. Betongteknologisk bakgrunn er lagt som vedlegg

Komiteen har bestått av:

Magnus Gade Skjeggerud, NorBetong (leder fra desember 2017 – november 2020)
Britt Blom Marstrander, Multiconsult/Spenncon (leder fra november 2020 - juli 2021)
Bjarne Fossum, Skanska
Berit Gudding Petersen, Unicon
Frode Skåttun, Veidekke
Helga Synnøve Kjos-Hanssen, Veidekke
Thomas Beck, Normet/Mapei
Even Eriksrud, AF Gruppen
Øystein Mortensvik, Ribe Betong

Innhold

STIKKORDLISTE MED FORKLARING	4
1. INNLEDNING	6
2. SPESIFIKASJON	8
2.1 GENERELT	8
2.2 KLASSIFISERING OG SAMSVARSKRITERIER	8
2.3 PRODUKSJONSKONTROLL	10
2.4 SPESIFIKASJON VED BESTILLING	10
2.5 MOTTAKSKONTROLL	10
2.6 PRØVEUTTAK OG HYPPIGHET AV PRØVING	10
2.7 PRØVING AV FERSKE EGENSKAPER I SKB	11
3. VEILEDNING	13
3.1 INNLEDNING	13
3.2 PROPORSJONERING AV SKB	13
3.3 PRODUKSJON AV SKB	15
3.4 TRANSPORT AV SKB	17
3.5 UTFØRELSE MED SKB	18
3.6 EGENSKAPSUTVIKLING	29
3.7 HMS	30
REFERANSER	32
VEDLEGG A	33
1. BETONGTEKNOLOGISK BAKGRUNN	33
1.1 INNLEDNING	33
1.2 PARTIKKEL- MATRIKSMODELLEN	33
1.3 DELMATERIALER VED PROPORSJONERING AV SKB	42

Stikkordliste med forklaring

Stikkordslisten dekker en del begrep og uttrykk som er knyttet til selvkomprimerende betong (SKB). I tillegg er det tatt med noen generelle forklaringer slik at ansatte fra råvareleverandører, betongprodusenter, entreprenører og konsulenter skal kunne lese alle kapitler med et godt utbytte.

Amerikaner: Avrettingsutstyr for betong i dekkestøp, plate ca. 60*80 cm festet på stang

Blokkering: Tendens til at grovt tilslag henger i armering.

Dissestav: Utstyr for avretting som består av 1,5 - 2 m lang (25x50 mm) trelekt festet på lang stav med 2 støtter.

Filler: I denne publikasjonen antatt å være naturlig eller industrielt framstilt pulver med korndiameter $< 0,125$ mm

FlowCyl: Utstyr for måling av flytmotstand i matriks

Flyteskjærspenning: Den spenning som må påføres materialet før materialet flyter, Vedlegg A.

Flytmotstand: Tallverdi mellom 0 og 1 som karakteriserer flyteevnen til en matriks. Praktisk flytmotstand øker fra ca. 0,2 opp mot 0,8 med økende partikkelkonsentrasjon. Selvkomprimerende betong har typisk flytmotstand i området 0,55 til 0,75. Til sammenligning ligger vann på flytmotstand i området rundt 0,06.

J-ring: Målemetode for å måle blokkeringsegenskaper for SKB

Konsistensfunksjon: Kurve som beskriver sammenhengen mellom matriksmengde og konsistens målt som synk, utbredelse eller synkutbredelse,

Matriks / matriksfase: Den flytende komponent i Partikkel-matriksmodellen. Alle materialer i en mørtel eller betong (inklusive væske) med korndiameter $< 0,125$ mm

Matriksdominans: Overskudd av matriks i betongen, noe som er karakteristisk for SKB

Matriksmengde / Matriksvolum: Matriksinnhold i 1 m^3 betong. Luft i betongen regnes ikke med i matriksen

OKB: Ordinær konstruksjonsbetong, en betegnelse for betonger som vibreres.

Partikkeldominans: Betong med overskudd av tilslag og lite matriks

Partikkelfasen: Tilslagspartikler i betong $> 0,125$ mm

Partikkel-matriksmodell: Modell for beskrivelse av betongens egenskaper ved hjelp av egenskapene til matriksen, partikkelfasen og deres volumforhold

Plastisk viskositet: Proporsjonalitetskoeffisient mellom skjærspenning og skjærhastighet for et Bingham's materiale. Ofte betegnes betongens «plastiske viskositet» kun som «viskositet». I betongsammenheng forbindes denne parameteren med betongens «seighet»

Pulver: Alle partikler < 0,125 mm

Separasjon: Partikler synker pga. gravitasjon. Resulterer i vannansamling på overflaten og/eller at forholdet mellom mørtel og grovt tilslag varierer over dybden, (mørtelseparasjon)

Segregering: Grovt tilslag synker ned i betongen (mørtelseparasjon)

Silika: Amorft SiO_2 -pulver som filtreres ut fra avgass fra ferrosilisium-/silisiummetallproduksjon. Silika benyttes som et pozzolansk tilsetningsmateriale i betong.

Slodd: Avrettingsutstyr bestående av ca. 2 m lang og 15 cm bred aluminiumsplate festet i stang. Brukes for viskøs betong hvor "amerikaner" blir for tung å dra. Kortslodd ned til 0,5 m kan også lages i tre.

Stabilitet: Betongens evne til å bevare sin homogenitet med tiden fram til avbinding

SU: Synkutbredelse. Mål for utflytningsevne. SU angis i mm som middel av to diagonale målinger.

Tilsetningsstoff: Kjemikalie i flytende- eller pulverform som tilsettes for å kontrollere betongens ferske eller herdede egenskaper.

t₅₀₀: Mål for utflytningstid. Tid i sekunder det tar for betongfronten å flyte ut til 500 mm merket.

SU_J: Mål for utflytningsevne gjennom hinder (J-ring). SU_J angis i mm som middel av to diagonale målinger.

v/c-forhold: vektforholdet mellom vann og sement i betong

v/b-forhold: vektforholdet mellom vann og bindemiddel i betong

v/p-forhold: vektforholdet mellom vann og pulver i betong

1. Innledning

Selvkomprimerende betong (SKB) er betong som kan flyte ut og komprimeres ved hjelp av egenvekten. Den fyller forskaling med armering, kanaler, utsparinger osv., samtidig som den fortsetter å være homogen.

De mekaniske egenskapene og bestandigheten for SKB i Norge er tilsvarende som for ordinær konstruksjonsbetong (OKB). I mange tilfeller kan en konstruksjon derfor støpes med OKB eller SKB etter entreprenørens ønske. Valg av SKB må gjøres basert på en helhetlig vurdering for utførelsen. Overordnet kan man peke på fire fordeler ved å benytte SKB:

HMS:

Redusert behov for vibreringsutstyr og manuell håndtering av betong gir positiv effekt for arbeidsbelastningen på fagarbeiderne. Dette gjelder både vibrasjon, støy og tunge løft. I tillegg reduseres HMS-risiko som følge av færre arbeidsoperasjoner og en mer ryddig arbeidsplass.

Tilkomst:

SKB gir fordeler ved støp av konstruksjoner der det er vanskelig tilkomst for fagarbeidere, utstyr eller betongen i seg selv. I konstruksjoner som er tett armert eller har vanskelig geometri vil SKB-egenskapene gi betongen evne til å bevege seg forbi tett armering, under/rundt utsparinger og fyller forskalingen på egenhånd. Det er allikevel viktig å fokusere på riktige utførelse av lagskjøter og fyllingspunkter for å hindre mangelfull utstøping. Ved støp mot eksisterende konstruksjoner kan SKB i mange tilfeller sikre bedre støperesultat da det ofte kan være utfordrende å få til skikkelig vibrering i disse områdene.

Bemanning:

Det er ikke nødvendigvis slik at det går raskere å støpe med SKB enn OKB. Dersom forskalingens kapasitet for støpetrykk er begrensende for støpehastigheten kan ikke fyllingstakten økes utover dette. Bruk av SKB-betong kan allikevel redusere arbeidsomfanget i form av redusert bemanning.

Overflater:

Bruk av SKB gir større potensiale for å oppnå betongoverflater med krav til estetiske kvaliteter. Det er allikevel viktig å presisere at betongoverflater uten skjemmende porer og skjolder krever at også forskalingen, utførelsen (oppstart og utstøpingen), herdetiltak og etterbehandlingen gjøres på beste måte. Dette gjelder generelt for både SKB og for OKB. Dersom formålet med bruk av SKB er å oppnå overflater med gitte estetiske krav, må derfor hele utførelsesprosessen planlegges og følges opp grundig. Både fagarbeiderne og arbeidsledelsen må forstå viktigheten av de enkelte elementene i utførelsen, og ha disiplin til å gjennomføre den. Arbeider for eksponert betong er nærmere beskrevet i NB-publikasjon nr. 9.

Miljø (ulempe):

Grunnet behov for større matriksvolum kan det være utfordrende å oppnå strenge krav til klimagassregnskap ved bruk av SKB. Det vil være nødvendig å ta stilling til dette dersom prosjektet har strenge krav til miljø. Les mer om lavkarbonbetong i NB37.

Høringsutkast-brukes kun til høringsformål

2. Spesifikasjon

2.1 Generelt

Kravene til betong og betongproduksjon som er gitt i standardene listet under gjelder med de tillegg og avvik som er gitt i denne publikasjonen.

NS-EN 13670+NA Utførelse av betongkonstruksjoner

NS-EN 206+NA Betong – Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar

NS-EN 1992-1-1+NA Prosjektering av betongkonstruksjoner - Allmenne regler og regler for bygninger

NS-EN 12350-6 Prøving av fersk betong - Del 6: Densitet

NS-EN 12350-7 Prøving av fersk betong - Del 7: Luftinnhold - Trykkmetoder

NS-EN 12350-8 Prøving av fersk betong - Del 8: Selvkompimerende betong - Synkutbredelsesmetode

NS-EN 12350-9 Prøving av fersk betong - Del 9: Selvkompimerende betong – V-traktmetode

NS-EN 12350-10 Prøving av fersk betong - Del 10: Selvkompimerende betong – L-boksmetode

NS-EN 12350-11 Prøving av fersk betong - Del 11: Selvkompimerende betong –

Segregeringsmotstand ved sikteprøving

NS-EN 12350-12 Prøving av fersk betong - Del 12: Selvkompimerende betong – J-ringmetode

NS-EN 12390-2 Prøving av herdnet betong - Del 2: Støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving

Denne publikasjonen tar for seg spesielle krav og spesifikasjoner til produksjon og bruk av SKB.

Spesifikasjonene er basert på klassifiseringssystemet for støpelighetsegenskaper gitt i NS-EN 206+NA.

Det anbefales å benytte tilsiktede verdier fremfor klassene angitt i NS-EN 260+NA, da klassene gitt i NS-EN 206+NA generelt er dårlig tilpasset norsk praksis og i liten grad er egnet til bruk ved spesifisering og bestilling av betong.

Kravene omfatter både betongprodusentens klassifisering og produksjonskontroll samt entreprenørens mottakskontroll.

2.2 Klassifisering og samsvarskriterier

2.2.1 Klassifisering av støpelighetsegenskapene

Betongprodusenten klassifiserer støpelighetsegenskapene i henhold til klassene gitt i Tabellene 2.1 og 2.2 der det er spesifisert i bestillingen.

Klassifiseringen skal som et minimum omfatte synkutbredelse. Betongprodusenten skal vurdere betongens stabilitet visuelt i forbindelse med måling av synkutbredelse selv om det ikke spesifiseres krav til viskositet, passeringsevne eller segregeringsmotstand i bestillingen.

Tabell 2.1. Klasser og prøvingsmetoder for ferske egenskaper til SKB

Egenskap	Klassebetegnelse	Prøvingsmetode
Synkutbredelse ¹⁾	SF	NS-EN 12350-8
Viskositet ¹⁾ , t ₅₀₀	VS	NS-EN 12350-8
ELLER Viskositet ²⁾ , t _v	VF	NS-EN 12350-9
Passeringsevne, L-boks	PL	NS-EN 12350-10
ELLER Passeringsevne ³⁾ , J-ring	PJ	NS-EN 12350-12
Segregeringsmotstand ¹⁾	SR	NS-EN 12350-11

¹⁾ Klassifiseringen gjelder ikke betong med Dmax større enn 40 mm

²⁾ Klassifiseringen gjelder ikke betong med Dmax større enn 22,4 mm

³⁾ Klassifiseringen gjelder ikke betong med en største tilslagsstørrelse større enn 40 mm

Tabell 2.2. Klasseinndeling, klassegrenser og toleranser ved tilsiktede verdier i henhold til NS-EN 206+NA

Egenskap, klasse	Klassegrense	Tilsiktet verdi
Synkutbredelse, SF1	$550 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 650 \text{ mm}$	Egenskapen bør angis ved en tilsiktet verdi uavhengig av klasse. Ved bruk av tilsiktet verdi er toleransen: ± 50 mm
Synkutbredelse, SF2	$660 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 750 \text{ mm}$	
Synkutbredelse, SF3	$760 \text{ mm} \leq \text{SF} \leq 850 \text{ mm}$	
Viskositet, VS1	t ₅₀₀ < 2,0 sekunder	Egenskapen kan angis ved en tilsiktet verdi med toleransen: ± 1 sekund
Viskositet, VS2	t ₅₀₀ ≥ 2,0 sekunder	
Viskositet, VF1	t _v < 9,0 sekunder	Egenskapen kan angis ved en tilsiktet verdi med toleransen: ±3 ved t _v < 9,0 sekunder ±5 ved 9,0 ≤ t _v < 25,0 sekunder
Viskositet, VF2	9,0 ≤ t _v < 25,0 sekunder	
Passeringsevne, PL1	≥ 0,80 med 2 armeringsjern	Egenskapen kan angis ved en minimumsverdi
Passeringsevne, PL2	≥ 0,80 med 3 armeringsjern	
Passeringsevne, PJ1	≤ 10 med 12 armeringsjern	Egenskapen kan angis ved en maksimumsverdi
Passeringsevne, PJ2	≤ 10 med 16 armeringsjern	

Segregeringsmotstand, SR1	≤ 20 %	Egenskapen kan angis ved en maksimumsverdi
Segregeringsmotstand, SR2	≤ 15 %	

2.3 Produksjonskontroll

Betongprodusentens produksjonskontroll skal som et minimum omfatte prøving av synkutbredelse. Hvis viskositet, passeringsevne eller segregeringsmotstand er spesifisert skal disse også prøves. Produsenten skal kunne redegjøre for hvilke endringer i egenskaper som kan forventes under transport, og dermed sannsynliggjøre at betongen vil ha egenskaper som tilsvarer spesifisert støpeligheidsklasse ved mottak på byggeplass. Omfang og hyppighet av prøvingen er gitt i Tabell 2.3.

2.4 Spesifikasjon ved bestilling

Spesifikasjonen ved bestilling skal som et minimum omfatte synkutbredelse. Konsistens kan angis som tilsiktet verdi eller synkutbredelsesklasse iht. tabell 2.2.

Når det ikke spesifiseres krav til viskositet, passeringsevne eller segregeringsmotstand, skal betongleverandøren allikevel levere stabil betong.

2.5 Mottakskontroll

Entreprenøren skal utføre mottakskontroll som minimum skal omfatte visuell kontroll og prøving av synkutbredelse. Når det spesifiseres krav til viskositet, skal denne kontrolleres ved oppstart og ved stikkprøvekontroll. Omfang og hyppighet av prøvingen er gitt i Tabell 2.3. NS-EN 13670+NA pålegger entreprenøren å foreta måling av konsistens ved mottakskontroll kun i utførelsesklasse 3. Skjerpningen anbefalt i denne publikasjonen har sammenheng med viktigheten av riktig konsistens for å få en god utstøping.

2.6 Prøveuttak og hyppighet av prøving

Minimums omfang og hyppighet av kontrollene er gitt i tabell 2.3. Kontrollintervallene som gir den hyppigste kontrollen skal velges.

Tabell 2.3 Kontrollhyppighet og -omfang av SKB

Type kontroll	Spesifisert undersøkelse	Minimums hyppighet	Minimums omfang
Innledende prøving	<u>Minimum:</u> -Synkutbredelse -Stabilitet (visuelt)	Ved alle større endringer av: -Betongsammensetning -Produksjonsforhold -Utstyr	Minst tre uavhengig uttak
	<u>Tillegg:</u> -Viskositet (t_{500}) -Passeringsevne -Segregeringsmotstand		

Produksjonskontroll	<u>Minimum:</u> -Synkutbredelse -Stabilitet (visuelt)	-Ved oppstart av leveranse og inntil stabilt resultat er oppnådd	Ett prøveuttak
	<u>Tillegg:</u> -Viskositet	-Periodisk hver 50 m3 produsert betong -Om visuell kontroll indikerer avvik	
Mottakskontroll	<u>Minimum:</u> -Synkutbredelse -Stabilitet (visuelt)	-Ved oppstart av leveranse -Periodisk hver 50 m3 mottatt betong -Om visuell kontroll indikerer avvik	Ett prøveuttak
	<u>Tillegg:</u> -Viskositet	Stikkprøvekontroll	

2.7 Prøving av ferske egenskaper i SKB

2.7.1 Måling av synkutbredelse

Prøvingsmetoden for kontroll av synkutbredelse er angitt i NS-EN 12350-8. Hos produsenter og ute hos entreprenører brukes kjeglen i praksis begge veier. Den riktige kjegleretningen er når det minste hullet er vendt opp. Dette er den mest kontrollerte måten å måle utbredelse på, og er iht. standarden. Metoden er riktig for å måle utbredelse i forhold til bestilt konsistens. Om kjeglen vendes opp-ned, vil den i tillegg til å stride med standarden, ha økt risiko for menneskelig påvirkning, og gi større feilkilde; Styre strålen, hvor høyt den løftes. Den minsker sammenligningsgrunnlag til bestilt konsistens. Metoden kan være god nok for å se etter separasjonstendens og omtrentlig utbredelse.

2.7.2 Visuell vurdering av stabilitet



Figur 2.1 Ustabil, stabil og meget stabil betong målt med synkutbredelsesmetoden.

Stabiliteten kan vurderes ut fra betongkaken etter synkutbredelsesmålingen, ved å se om det oppstår en ring med sementlim eller slamvann langs periferien av kaken, og evt. bredden av ringen. Figur 2.1 viser eksempel på ustabil, stabil og meget stabil SKB. De to siste er typisk for $t_{500} > 2$ sekunder. Ustabil SKB karakteriseres ofte ved at betongen "bobler" like etter blanding eller tømning. Det sammenfaller typisk med slamlag på overflaten av stillestående betong. I slike tilfeller kan det forventes at ringen rundt betongkaken etter SU-måling blir mer enn noen millimeter bred.

2.7.3 Støping av prøvelegemer

I utgangspunktet skal SKB støpes uten komprimering og vibrering av betongen. Dette prinsippet gjelder også ved støping av prøvelegemer. Ved støping av prøvelegemer for fasthetsprøving, og ved måling av densitet og luftinnhold på fersk betong, kan det allikevel være hensiktsmessig å gjøre enkelte tiltak for å få betongen til å fylle de små formene godt nok. SKB omfatter et vidt spekter av synkutbredelse, og det kan være nødvendig å gjøre tiltak som er noe forskjellig avhengig av synkutbredelse.

Betong med synkutbredelse 500-600 mm kan støpes på følgende måte:

Betongen fylles i beholderen i to omtrent like tykke lag. Hvert lag kan bearbeides med 10 støt av stålstangen. Støtene skal plasseres jevnt fordelt på overflaten av hvert lag. Bearbeidingen av hvert lag avsluttes med 10 lette slag med trekøllen mot beholderens ytterside.

Topplaget bearbeides slik at stangen akkurat når ned til det nederste laget. Når topplaget er bearbeidet, avrettes overflaten langs beholderens overkant.

Betong med synkutbredelse 600-700 mm SU kan støpes på følgende måte:

Betongen fylles i beholderen i to omtrent like tykke lag. Hvert lag kan avsluttes med 10 lette slag med trekøllen mot beholderens ytterside. Deretter avrettes overflaten med stålstangen langs beholderens overkant.

Betong med synkutbredelse ≥ 700 mm SU skal ikke komprimeres. Overflaten avrettes, for eksempel ved å trekke stålstangen langs beholderens overkant.

3. Veiledning

3.1 Innledning

Dette kapittelet omhandler proporsjonering, produksjon, transport og utførelse med SKB. For mer utdypende informasjon om betongteknologisk bakgrunn, henvises det til Vedlegg A. Der kan man finne mer utdypende informasjon rundt partikkel-matriksmodellen og hvordan denne kan brukes på SKB, i tillegg til en beskrivelse av delmaterialene og deres effekt på egenskapene i SKB.

3.2 Proporsjonering av SKB

SKB proporsjoneres etter de samme grunnleggende prinsippene som OKB. Detaljene i proporsjoneringsprosessen kan imidlertid avvike en del. Partikkel- matriksmodellen er godt egnet som grunnlag for å beskrive effekten av de ulike materialparametrene på betongens egenskaper. Vi velger derfor å beskrive proporsjoneringsprosessen med dette utgangspunktet. Rasjonell håndtering av størrelser som matriksvolum, vann/pulver - forhold osv. krever bruk av regneverktøy. Regneark er godt egnet.

Trinn 1: Innhenting av spesifikasjoner og funksjonskrav for fersk og herdet betong

SKB er som all annen OKB underlagt krav til fasthetsklasse og bestandighetsklasse. Andre krav til herdet betong, slik som E-modul, svinn, farge osv. kan også ha betydning for materialsammensetningen, og må kartlegges. Betongens bruksområde må være kjent før proporsjonering, slik at de aktuelle støpelighetegenskapene kan fastsettes. Støpelighetsegenskapene beskriver betongens ønskede bruksegenskaper, og påvirker dermed både materialvalg og – sammensetning.

Trinn 2: Innhenting av data om tilgjengelige materialer

De fleste betongprodusenter har et svært begrenset utvalg av råvarer. Et vanlig utvalg kan være en eller to sementtyper, silikastøv, en sandtype, i beste fall maskinsand eller en annen sekundærsand, samt pukk splittet i to eller tre fraksjoner slik at det er mulig å velge største steinstørrelse i området 16-22 mm. Det er vanlig å holde seg til en leverandør av tilsetningsstoff.

Begrensede valgmuligheter gjør ofte proporsjoneringsprosessen til et spørsmål om å hente det beste ut av et snevert utvalg tilgjengelige ressurser. Mange betongleverandører arbeider med å utvide råvaregrunnlaget, og innretter samtidig eksisterende utvalg mot produksjon av SKB, f.eks. ved å benytte mer finstoffrike grustyper i all produksjon.

Produktdatablad, ytelseserklæringer, siktekurver og andre tilslagsdata, samt erfaringstall om matriksbehov fra egen produksjon er nødvendige inngangsdata i proporsjoneringsprosessen.

Trinn 3: Valg av tilslagssammensetning

Ønsket om å få et tilstrekkelig stort fillerbidrag fra sanden bidrar ofte til å senke steinandelen i SKB. Steinandeler i området 40 % er ikke uvanlig ved største steinstørrelse 16 mm. Steinandelen kan økes noe ved større steinstørrelse. Dersom det kan tilsettes industrielle fillere, f.eks. kalksteinsfiller, kan steinandelen økes til normalt nivå, dvs. 45-50 % ved største steinstørrelse 16 mm. Hvilken

sand/stein-fordeling som gir lavest hulrom kan bestemmes ved måling. Se vedlegg A for utdypende informasjon om tilslagets effekt på egenskapene til SKB.

Det er mulig å beregne den teoretisk optimale sammensetningen av grus og stein ved hjelp av pakningsprogrammer for PC. Bruken av slike programmer forutsetter at hulromsverdiene for hver tilslagsfraksjon er kjent. Ved proporsjonering velges ofte steinandeler som er litt lavere enn det som måling eller beregning av hulrom skulle tilsi. Dette kommer av at minimalt hulrom også gir størst partikkelkontakt, og dermed størst friksjon mellom partiklene. En reduksjon av steinandelen kan da gi positivt utslag på partikkelkontakten, men knapt målbar effekt på matriksbehovet.

Trinn 4: Sammensetning av bindemiddel og matriks

Kravene til fasthets- og bestandighetsklasse, evt. faren for alkalireaksjoner, har størst betydning for valget av sementtype og masseforhold både for OKB og SKB.

Dersom det tilgjengelige tilslaget har stort finstoffinnhold kan det være aktuelt å velge en sementtype som gir lavere flytmotstand i matriksen. I motsatt fall, ved bruk av tilslag med lite finstoffinnhold, kan det være aktuelt å bruke en sementtype som gir økt flytmotstand og dermed har gunstig effekt på stabiliteten. I slike tilfeller må man være ekstra oppmerksom på at det er samsvar mellom prosjektert fasthet og den fasthet som oppnås. Unødvendig stor overfasthet kan gi underdimensjonert svinnfordelende armering.

Silikastøv er vanlig som stabiliserende element i SKB uten andre fillertilsetninger. Doseringer opp til 5 % av sementmengden er stort sett uproblematisk, men høyere doseringer kan gi redusert flyteevne, spesielt i betong i lave fasthetsklasser.

Mengden SP-stoff velges iht. produsentens anbefalinger. Bruk av stabiliserende tilsetningsstoff (VMA) er et hjelpemiddel for å få økt stabilitet.

Vi må bestemme fillerens bidrag til matriksegenskapene og matriksvolumet. Hvis vi f.eks. antar at sanden har et fillerinnhold på 8 %, sanden utgjør 60 % av tilslaget, volumet sementlim er 300 liter/m³ betong og luftinnholdet er 2 %, vil filleren utgjøre 88 kg/m³, eller 33 liter/m³ (antatt tilslagsdensitet 2700 kg/m³).

Matriksens egnethet kan vurderes grovt ved hjelp av vann/pulver forholdet (v/p). Pulver defineres som alle faste materialer i matriksen unntatt tørrstoffet i tilsetningsstoffet, dvs. sement, pozzolaner og filler. v/p-forholdet er derfor nært beslektet med v/c-forholdet, og forskjellen mellom disse forholdstallene er liten når betongen eller matriksen inneholder lite filler. v/p-forholdet uttrykker indirekte forholdet mellom vannmengden og det overflatearealet som skal fuktes i matriksen. Denne sammenhengen er nokså grov, fordi de ulike materialene i matriksen kan ha svært variabel finhet. Silikastøv har f.eks. mye større overflate enn sement. Fillerens finhet har også stor betydning for det totale overflatearealet. I praksis dominerer sementen tallverdien på v/p-forholdet, og det kan derfor være fornuftig likevel å bruke denne tallverdien som en rettesnor.

I eksemplet over kan vi f.eks. forutsette at masseforholdet er 0,50. Da blir v/p-forholdet 0,40. Norske erfaringer viser at v/p-forholdet bør ligge i området 0,30-0,45 for betonger uten spesielle stabiliserende virkemidler. Når v/p-forholdet er større enn ca. 0,45 har det vist seg vanskelig å oppnå høy nok flytmotstand i matriksen, og god nok stabilitet i betongen. For betonger med

masseforhold på for eksempel 0,60 må det da enten tilsettes industrielle fillere for å redusere v/p-forholdet nok, eller brukes spesielle virkemidler som store mengder silikastøv eller stabiliserende tilsetningsstoff. Ved v/p-forhold lavere enn 0,30 blir matriksbehovet svært stort, og betongen seig og tungtflytende.

På grunn av separasjonsfaren bør ikke flytmotstanden være lavere enn ca. 0,55 dersom betongen skal ha full flyteevne, tilsvarende synkutbredelse 650+. Når flytmotstanden er større enn ca. 0,75 kan betongen få en svært seig oppførsel.

Generelt vil høyere flytmotstand i matriksen gi større stabilitet og mindre fare for segregering, mens lav flytmotstand gir mindre stabil, men smidigere betong som lar seg bearbeide manuelt. For dekkebetong, synkutbredelse 550, er det derfor aktuelt å holde flytmotstanden relativt lav, men samtidig "holde igjen" flyteevnen i betongen ved å begrense matriksmengden.

Flytmotstand er beskrevet nærmere i Vedlegg A.

Trinn 5: Valg av matriksvolum, prøveblanding og justering

Totalt matriksvolum i eksemplet under Trinn 3 blir 333 l/m³. Om dette er tilstrekkelig kan kun vurderes ut fra erfaringstall for lignende materialsammensetninger, eller ved prøveblanding. Mengden matriks foreslås endret i trinn på 10 eller 15 liter/m³, fortrinnsvis nedenfra og oppover. Dette sikrer at matriksmengden ikke blir større enn nødvendig. Når sand/stein - forholdet og bindemiddelsammensetningen er gitt, kan matriksmengden kun økes ved å øke volumet sementlim. Dette gir samtidig en liten reduksjon av fillermengden i matriksen, fordi tilslagsandelen går ned. Det er vanlig å neglisjere denne effekten ved små justeringer av volumet sementlim.

Dersom prøving av trykkfasthet viser avvik fra den planlagte middelfastheten, må bindemiddelsammensetningen justeres. Dersom justeringen er liten, tilpasses kun matriksmengden for å ta vare på endringen i matriksens egenskaper (reduisert masseforhold krever litt større matriksvolum pga større flytmotstand). Ved større justeringer må proporsjoneringsprosedyren gjennomføres på nytt fra Trinn 3 til Trinn 5.

Justering av luftmengden ved avvik fra spesifisert verdi gjøres som i OKB. Dersom denne justeringen innebærer at tilslagsammensetningen må korrigeres, eller at matriksens sammensetning endres, må proporsjoneringsprosedyren gjennomføres på nytt fra Trinn 3 til Trinn 5. Volumkorreksjoner etter måling av luft og densitet på fersk betong gjøres som for OKB.

3.3 Produksjon av SKB

3.3.1 Generelt

SKB ligger i et konsistensområde som gjør at endringer i delmaterialer og produksjonsforhold kan gi større fare for utilsiktet konsistensendring sammenlignet med OKB. Ekstra fokus på stabile grunnresepter, fuktkontroll, blandetid og blandesekvenser er derfor spesielt viktig for å oppnå et stabilt produkt. Tilslag bør lagres under forhold som beskytter mot værforhold som gir utilsiktede variasjoner i fukt og som samtidig forhindrer forurensning mellom fraksjonene. For å oppnå

tilfredsstillende leveringssikkerhet, bør lagerbeholdningen være tilstrekkelig stor for å unngå forsinkelser og stopp i betongleveransene.

3.3.2 Utrustning

SKB kan produseres i alle typer blandere. Det er imidlertid spesielt viktig at blanderen og oppveiingsutstyret er godt vedlikeholdt, slik at alle materialer blir godt blandet og tilsatt i riktige mengdeforhold. Det kan være mer tendenser til klumper i SKB sammenlignet med stivere betonger, noe som kan forverres ved slitte skover. Det er også viktig at tvangsblandere tetter godt i tømmeluka, fordi SKB vil renne lettere ut enn ordinær betong.

For å gi tilstrekkelig stabilitet i SKB kan man bruke virkemidler som fillertilsetning, tilsetning av fillerrik sekundærsand og kjemiske stabilisatorer. Dette skaper ofte behov for ekstra utrustning i form av ekstra siloer og vekter.

3.3.3 Fuktkontroll i tilslag

En viktig enkeltfaktor som påvirker egenskapene hos SKB er den totale vannmengden i resepten. SKB kan være mer følsom for svingninger i vanninnhold enn OKB. Det må imidlertid påpekes at det er mulig å proporsjonere meget robust SKB ved bruk av virkemidler som gir tilstrekkelig matriksvolum og en matriksfase som er tilstrekkelig viskøs.

Kontroll på fukt i tilslaget er uansett en viktig suksessparameter ved produksjon av SKB. Det kan være en fordel å bruke automatiske fuktmålere, som raskt vil fange opp endringer i fukt. Det er svært viktig at automatiske fuktmålere vedlikeholdes nøye og kalibreres regelmessig.

Ved bruk av stikkprøvekontroll i form av tørking av tilslag må omfanget tilpasses lokale forhold som silostørrelse, gjennomstrømningshastighet, klimatiske forhold etc. Generelt er det vanskelig å oppnå større grad av nøyaktighet på fuktmåling enn $\pm 0,5$ % av virkelig fukt i sand. I tillegg må man regne med en viss grad av unøyaktighet i fukt også for singel. Total usikkerhet må derfor antas å være i størrelsesorden $\pm 6-7$ liter/m³. SKB må derfor proporsjoneres slik at den er robust nok til å tåle en slik variasjon i vannmengde og likevel tilfredsstillende konsistenskravene som settes i hvert enkelt tilfelle.

Fuktmålingsmetoden spiller også en avgjørende rolle for om man får riktige fuktverdier i tilslaget ved prøvingen. Uttørkingen i panne eller mikrobølgeovn til konstant vekt gir det totale fukttinnholdet i grusen, inklusiv absorbert fukt.

3.3.4 Blandesekvens

SKB produseres på tilsvarende måte som OKB, dvs. at man benytter den doseringsrekkefølgen som fungerer godt i blanderen til vanlig. Hva som fungerer best er avhengig av blandertypen og oppbyggingen av blandeverket. Feil doseringsrekkefølge og innslippstider i blanderen kan også skape klumper i SKB.

Ved store problemer med klumper, spesielt i truckmixere og frittfallsblandere, kan det være en mulig løsning å blande betongen til en lavere konsistens ved å holde igjen noe vann og SP-stoff, for så å dosere alt inn etter hvert. Dette går ut over produksjonskapasiteten.

3.3.5 Blandetid

Den selvkomprimerende betongen har meget lav konsistens i starten av blandingen. Det tar tid for å oppnå full effekt av de relativt store mengdene superplastiserende tilsetningsstoffene. En effektiv blander er derfor en fordel. Erfaringene har vist at blandetiden må økes vesentlig for å komme frem til de endelige egenskapene. Blandetiden bør være på minimum **90 -120 sekunder**, avhengig av blandertype, og type SP-stoff.

3.3.6 Produksjonsplanlegging

En jevn leveringstakt ut til byggeplass er en forutsetning for god utstøping. Det er derfor viktig med god produksjons- og transportplanlegging av leveransen for å unngå opphold i produksjonen samt mangel på transportkapasitet, ivareta kø-problematikk etc. Produksjonsplanlegging bør omfatte tilstrekkelig tilførsel av nødvendige delmaterialer samt tiltak for å unngå at produksjon til andre leveranser gir unødvendige opphold i SKB-leveransen.

3.4 Transport av SKB

3.4.1 Generelt

Transport av SKB krever mer oppmerksomhet enn OKB på grunn av:

- den høye flyteevnene gjør normalt betongen mer ømfintlig for separasjon i automixeren
- den høye flyteevnene kan føre til betongsøl, spesielt i ved kjøring i motbakke
- konsekvensen ved forsinkelser i transporten som fører til stopp i støpeoperasjonen kan bli større

Remixing av betongen ved ankomst byggeplass er generelt viktigere enn ved leveranse av OKB og bør utføres i ett minutt pr m^3 , minimum 5 minutter.

3.4.2 Etterdosering

Etterdosering av SP-stoff på byggeplass må utføres med varsomhet pga. stoffenes store effekt selv ved små doseringer samt deres lange innblandingstid.

I den grad etterdosering er nødvendig, skal betongen forflyttes helt bak i trommelen ved dosering. Betongen må deretter remikses i minimum 1 minutt pr m^3 , minimum 5 minutter.

3.4.3 Avlessingsutstyr

Ved stabil SKB kan alt relevant avlessingsutstyr benyttes. Ved mindre stabil SKB bør man være forsiktig med å benytte transportbånd da den lettere separerer, men dette kan bedres ved å kjøre med en lav båndhastighet.

3.4.4 Opphold i leveringen

Et godt støperesultat med SKB er avhengig av jevn påfylling av fersk betong. Forsinkelser underveis i støpearbeidet kan medføre at gammel og ny betong ikke blander seg tilfredsstillende. Hvor langt opphold som kan tolereres vil avhenge av betongens tendens til tiksotropisk tilstivning, temperatur, luftfuktighet etc.

Et godt støperesultat forutsetter:

- Jevn leveringsfrekvens fra betongleverandøren
- Styrte avlessingshastighet fra entreprenørens side for å tilpasse avlessing til leveringskapasiteten.
- Risikoanalyse av stopp i leveranse som følge av produksjonsstopp/-forsinkelser på blandeverk eller andre uforutsette hendelser

3.5 Utførelse med SKB

3.5.1 Generelt

Generelt sett må enhver betong håndteres slik at dens potensielle egenskaper ikke forringes. Dette er spesielt viktig for SKB, fordi betongen ofte har mindre motstand mot separasjon sammenliknet med OKB. Den kan også være mindre robust i forhold til naturlig variasjon i temperatur og utstøpingstid. Det er også viktig å være bevisst på SKB sin generelle tiksotropiske egenskap for å unngå utfordringer i støpearbeidet.

Under støp bør det kontrolleres visuelt at støpelighetsegenskapene holder seg konstant fra tømning begynner til lasset er levert. Erfaringer viser at når synkutbredelsen reduseres til under 600 mm, kan betongen miste noe av sin selvkomprimerende evne. Hvorvidt selvkomprimeringsevnen er i behold, avhenger av om det er partikkelinterferens eller matrikskonsistens som begrenser utflyttingen (se Vedlegg A). Tap av selvkomprimeringsevne kan medføre at betongen verken fyller formen eller omslutter armeringen skikkelig. Remiksing underveis i tømmingen kan være nødvendig, spesielt dersom arbeidet går sakte og/eller lufttemperaturen er høy.

SKB skal i prinsipp fylles tilsvarende som OKB. Man støper lagvis oppover for å sikre jevn last på forskaling, utsparinger, innstøpningsgods etc. Selv om SKB har høyere flyteevne og større mobilitet enn OKB, er det også for denne betongen viktig å utføre støpen slik at luftlommer og utilstrekkelig utstøping unngås. Støpearbeidet bør planlegges slik at strømningsretningen i formen blir mest mulig ensartet. Dette bidrar til å fjerne eventuelle luftlommer langs forskalingsflatene, sikrer god omstøping av armeringsstål og hindrer at luft lukkes inne ved at utflytingsfronten møter en motstrøm. **Avstanden mellom fyllingspunktene bør typisk være ca. 5 meter**, selv om betongen i praksis flyter lengre enn dette. Større avstand gir større fare for steinseparasjon i utflytingsfronten.

For SKB anbefales **maksimal slipphøyde på 0,5 meter**. En fallhøyde høyere enn dette kan i seg selv fremprovosere separasjon. Dersom betongen også «siktet» gjennom armering kan en del av matriksmengden henge igjen på armeringen. Dette vil redusere eller eliminere betongens evne til å være selvkomprimerende. Tap av selvkomprimeringsevne kan medføre at betongen verken fyller formen eller omslutter armeringen skikkelig. Resultatet kan være store steinreir og støpesår. Det skal benyttes slange, trakt, strømpe eller rør for å unngå fallhøyde over 0,5 meter.

Betongoverflater uten skjemmende porer og skjolder krever at ikke bare betongen, men også forskalingen, støpeutførelsen og etterbehandlingen er i orden. Dersom formålet med bruk av SKB er

å oppnå pene overflater, må derfor hele utførelsesprosessen planlegges og følges opp. Både fagarbeiderne og arbeidsledelsen må forstå betydningen av de enkelte elementene i utførelsen, og ha disiplin til å gjennomføre den. Anbefalinger for eksponerte betongoverflater med krav til estetisk kvalitet er nærmere beskrevet i NB. 9 Betongoverflater.

3.5.2 Valg av støpelighetsegenskaper

SKB må spesifiseres med egnet omfang avhengig av arbeidets behov og konsekvens av avvik. Nødvendige støpelighetsegenskaper avhenger av anvendelse, og spesielt på følgende områder:

- Tendens til blokkering på grunn av konstruksjonens geometri, type forskaling, plassering av armering, innstøpningsgods, overdekning og fordypninger.
- Utstyr og metode for utstøping
- Etterbehandling

Klassifiseringssystemet i NS-EN 206+NA er basert på europeiske retningslinjer, og etablert i den hensikt å kunne spesifisere SKB på en god måte. Klassegrenser for egenskapene synkutbredelse, viskositet, passeringsevne og segregeringsmotstand gitt. Klassegrensene er imidlertid ikke tilpasset norsk bransje og tradisjoner for SKB-proporsjonering, og gir et dårlig utgangspunkt for valg av støpelighetsegenskaper i Norge. Støpelighetsegenskaper burde derfor spesifiseres med tilsiktet verdi, uavhengig av klasseinndelingen i NS-EN 206+NA.

Ved valg og spesifisering av betongegenskaper burde kun spesielt nødvendig egenskaper for utførelsen spesifiseres. Støpelighetsegenskapene skal som minimum spesifiseres med tilsiktet synkutbredelse eller synkutbredelseskasse. Motstand mot separasjon og blokkering blir da ikke spesielt hensyntatt i proporsjonering hos betongleverandøren, og betongen kan ikke forventes å tilfredsstille spesielle krav og behov i forhold til dette. Overspesifisering av betongen burde imidlertid unngås da det begrenser produsentens mulighet til å produsere rimelig og miljøvennlig SKB med normalt robuste egenskaper. Nedenfor er SKB's egenskaper beskrevet med fokus på tilsiktede verdier, og egenskapens mulighet for tilpasning til forskjellige produksjonsforhold. For spesielt komplekse og kritiske konstruksjoner kan prøvoforsøk være fornuftig.

3.5.2.1 Synkutbredelse

Synkutbredelsen beskriver den ferske betongens flyteevne uten blokkeringseffekter. Metoden er beskrevet i NS-EN 12350-8. All SKB skal som et minimum spesifiseres med ønsket synkutbredelse, slik at betongprodusent kan levere betong med flyteevne tilpasset bestillers behov.

Følgende er typiske verdier for synkutbredelse ved forskjellige formål:

- SU = 550 mm er egnet for plater-/dekker og liknende konstruksjoner
- SU = 650 mm er egnet for vegger/søyler og liknende konstruksjoner
- SU > 650 mm kan være egnet for konstruksjoner med krav til eksponert betong, eller høy blokkeringstendens. Det er viktig å ha et spesielt fokus på stabilitet når man benytter tilsiktet konsistens over 650mm, da det ofte krever spesielle resepttekniske tiltak for å oppnå stabil SKB med høy synkutbredelse.

I likhet med andre målemetoder har synkutbredelsesmetoden også svake sider som gjør at det er en fordel med erfaring og trent øye for å finne riktig synkutbredelse for riktig jobb. I flere tilfeller kan

også mellomliggende verdier være fornuftig å benytte. Justering er mulig basert på entreprenørens egen erfaring og metode for utførelse.

Under synkutbredelsestesten kan man også visuelt vurdere viskositet og separasjonstendens. Dette gir informasjon om betongens segregeringsmotstand og om betongleveransen er stabil over flere lass. Når det ikke spesifiseres krav til viskositet, passeringsevne eller segregeringsmotstand vil betongprodusenten allikevel vurdere betongens stabilitet på denne måten. Se kapittel 2.7.2.

3.5.2.2 Viskositet

Viskositet kan bestemmes ved måling av t_{500} . Dette er metoden vi har erfaring med i Norge. Metoden er beskrevet i detalj i NS-EN 12350-8. Dette er tiden det tar fra opptrekk av betongkjeglen til synkutbredelseskaken oppnår en diameter på 500 mm. Tiden som måles gir ikke en direkte beskrivelse av betongens viskositet, men er relatert til viskositeten ved å beskrive betongens flythastighet. Betong med lav viskositet vil ha rask flyt fra start. Bevegelsen vil deretter stoppe relativt raskt. Betong med høy viskositet vil ha roligere flyt fra start, men kan flyte utover over en betydelig lengre periode.

Slik som nevnt nedenfor:

- $t_{500} = 1-2$ sekunder: Spesifiseringer for å sikre at bestiller ikke mottar SKB med spesielt lav motstand mot separasjon. Betonger med slik viskositet skal fortsatt ha god evne til å fylle forskalingen også ved tett armering. Betongen har evne til å være selvutjevne og har god evne til å skape gode overflater med krav til eksponert betong.
- $t_{500} > 2$ sekunder: Betonger med høy flyteevne kan ha behov for høy viskositet for å sikre tilstrekkelig motstand mot separasjon. SKB med spesielt høy viskositet gir høyere risiko for ufullstendig utfylling av forskalingen mot overflater og hjørner. Spesielt i forbindelse med tett armering. Økt viskositet øker også sannsynligheten for tiksotropisk tilstiving og risikoen for synlige støpefloer i overflaten. Tiksotropisk tilstiving kan imidlertid bidra til å redusere støpetrykket og øke segregeringsmotstanden.

Spesifisering med hensyn på viskositet burde kreves i tilfeller der viskositeten vurderes å være spesielt viktig for utførelsen.

3.5.2.3 Passeringsevne

Passeringsevne beskriver kapasiteten SKB har til å flyte gjennom begrensede åpninger og rom uten blokkering eller tap av ensartethet. Både J-ringmetoden etter NS-EN 12350-12 og L-boksmetoden etter NS-EN 12350-10 benyttes i Norge. Resultatet benyttes til å vurdere passeringsevne uten at betongen vanligvis klassifiseres etter klassegrensene.

Ved støp av tett armerte konstruksjoner eller liknende, vil en betong med redusert største tilslagsdiameter fra 22 mm til 16 mm bidra til redusert blokkeringstendens. Forutsetningene i prosjekteringsstandardene tillater ikke reduksjon av maksimal tilslagsstørrelse under 16 mm uten avklaring med ansvarlig prosjekterende. Under normale forhold vil man derfor ikke velge mindre tilslagsstørrelse enn dette. Motstand mot segregering kan også økes ved hjelp av økt viskositet.

Normalt vil konstruksjonens armeringstetthet være styrende for i hvilken grad betongen må ha god passeringsevne, men det kan også være andre vanskelige geometriske forutsetninger eller

innstøpningsgods. Man vil normalt ikke vurdere overdekningen som en utfordring for passering av betong, ettersom betongen kan omringe armeringsstengene uten direkte flyting i overdekningssonen.

Krav til passeringsevne burde spesifiseres i tilfeller der egenskapen vurderes å være spesielt viktig for utførelsen.

3.5.2.4 Segregeringsmotstand

Mostand mot segregering/separasjon er fundamentalt for SKB sin homogenitet og kvalitet. SKB kan lide av segregering under støp ved glidning, eller etter støp, før avbinding, grunnet gravitasjon. Segregering av betongen etter utstøping vil gi størst skader for høye elementer og dekker, og kan føre til overflateavvik som eksempel sprekker eller redusert fasthet. Vurdering av segregeringsmotstand er viktigst for betong med høy synkutbredelse og i konstruksjoner som fremmer sannsynligheten for segregering eller ved behov for lang flyteevne uten separasjon.

NS-EN 206+NA beskriver at segregeringsmotstand måles ved hjelp av sikteprøving iht. NS-EN 12350-11. I denne publikasjonen anbefales det at vurdering av betongens viskositet og segregeringsmotstand begge gjøres ved måling av t_{500} . Dette anbefales med følgende begrunnelse:

- Det finnes i skrivende stund ingen god og samtidig enkel prøvemethode for segregeringsmotstand som er egnet til praktisk bruk og godkjenningsskontroll.
- Generelt sett er det en viss sammenheng mellom segregeringsmotstand og viskositet ved at økende viskositet vanligvis gir økende stabilitet (dog ikke entydig).
- Synkutbredelse og t_{500} kan til sammen gi indikasjon på stabilitet ved at for eksempel høy synkutbredelse (som i utgangspunktet gir stor fare for separasjon) bør kombineres med relativt høy t_{500} .
- Segregeringsmotstanden kan i tillegg vurderes ut fra betongkaken etter synkutbredelsemålingen som beskrevet i kapittel 2.7.2

Krav til verdi for t_{500} med hensyn til segregeringsmotstand burde spesifiseres i tilfeller der egenskapen vurderes å være spesielt viktig for utførelsen.

3.5.3 Plate-/dekkestøp med SKB

Plate- og dekkeliknende konstruksjoner er godt egnet for utførelse med SKB, både i høye og lave fasthetsklasser, og med ulike dekketørrelser og -tykkelser. Utleggingshastigheten kan bli meget stor ved bruk av SKB. Dette er muligens det bruksområdet der SKB har størst potensiale både med hensyn til HMS og effektivitet. Bruk av SKB i dekker gir også bedre mulighet til å overholde toleransene, og reduserer forbruk av avrettingsmasser.

Ved støp av plate- og dekkekonstruksjoner må flyteevnen til SKB begrenses sammenliknet med vegger, fordi støpefloen ellers blir så stor at avrettingen må utsettes til det meste av betongen er lagt ut. Dette kan gi problemer med ulik grad av tilstivning av betongen i dekket og lite forutsigbarhet ved overflatebehandling som eksempel skuring og glatting. Typisk synkutbredelse for SKB til dekke og gulv er derfor anbefalt med synkutbredelse 550-600 mm. Se anbefalte støpelighetsverdier i kapittel 3.5.3.

En tommelfingerregel er at støpefloen skal ha en utstrekning på 1,5 - 2 meter. Dette tilsvarer at betongen skal kunne stå i et fall på ca. 3-5 % ved støp av et 200 mm dekke eller 2-4 % ved et 150 mm dekke. Tilsvarende SU-mål kan for eksempel være 550 mm og 600 mm. Betongen kan dermed legges ut og avrettes felt for felt.

Avretting utføres ved hjelp av lett dissing med "amerikaner", slodd (se figur 3.5) eller dissestav. Avrettingskontrollen skjer på tradisjonell måte med laser eller "spion". Dette gir tilstrekkelig komprimeringsarbeid, uten at det oppstår uønsket steinseparasjon. Riktig støpelighet og bearbeiding gir plan, glatt flate uten anrikning av matriks i overflaten. Denne teknikken forutsetter imidlertid at betongen ikke er for seig eller klebrig slik at den henger på avrettingsutstyret. Fillerrike betonger eller betonger med lave masseforhold kan være vanskelige å håndtere på denne måten. Bruk av luftinnførende tilsetningsstoff gir økt smidighet og redusert seighet, og har i noen tilfeller vist seg å gi dekkebetongen de ønskede egenskapene.

Det kan være vanskelig å oppnå overhøyder i dekker der det brukes SKB. For å oppnå dette må flyteeвне begrenses så langt det går, og avrettingen må gjøres mot høybrekk.

Etterbehandling i form av stålglatting eller brettskuring kan stort sett foregå som normalt. Det skal likevel ikke underslås at SKB må forventes å være noe seigere enn OKB, og at dette kan være gjøre pussing og glatting mer utfordrende.

Problemer knyttet til overflatebehandling av SKB kan for en stor del løses ved riktig valg av konsistensklasser og tilsetningsstoffer. Stålglatting og brettskuring av SKB bør derfor kunne betraktes som helt ordinære oppgaver.



Fig 3.5 Avretting av SKB med slodd

3.5.4 Vegg-/søylestøp med SKB

Ved støp av vegger og søyler og lignende er det ikke behov for avretting og bearbeiding av overflaten i samme omfang som for plate- og dekkstøp. Det er derfor ingen utfordring med for rask støpeflo, og betongens flyteevne kan økes. Høyere flyteevne vil gi mulighet for mer effektiv produksjon og vil i større grad sikre fullstendig utstøping av konstruksjonen. Det er allikevel svært viktig å flytte med seg fyllingspunktet slik at avstanden ikke overstiger anbefalt avstand på 5 m mellom hvert fyllingspunkt. Dette kan fremprovosere separasjon. Se anbefalte støpelighetsverdier i kapittel 3.5.2. I noen tilfeller kan det være ønskelig med spesielt bløt konsistens (tynne vegger, undrestøp, etc.), dvs. konsistens høyere enn $SU=650-700$ mm. Det er viktig å ha et spesielt fokus på stabilitet når man benytter tilsiktet konsistens 660 og høyere, da dette ofte krever helt spesielle resepttekniske tiltak for å oppnå stabil SKB.

Støpetakten bør være så stor som mulig innenfor grensen for tillatt støpetrykk. Langsom støpetakt gir økt fare for lagdeling pga tiksotropisk tilstivning. Dersom det er nødvendig å begrense støpetakten av hensyn til støpetrykket bør støpetakten være så jevn som mulig. Det er ikke hensiktsmessig å tømme en bil raskt for deretter å ta pause fram til neste bil kommer. Det er normalt ikke nødvendig å begrense støpehastigheten pga faren for setning. Dersom formen er tilstrekkelig stiv gir SKB sjelden setningsproblemer, selv ved tverrsnittsendringer eller store utsparinger.

Bruk av SKB muliggjør alternative metoder for støp. To forskjellige metoder er nevnt i enkelhet nedenfor:

Rask stige-hastighet:

Ved bruk av SKB kan forskalingen i prinsippet fylles rett opp med rask stige-hastighet uten avbrett. Hastigheten begrenses imidlertid av betongtrykket forskalingen er dimensjonert for og hvor fort man greier å støpe. Ved rask stige-hastighet må det forventes at forskalingen belastes med fullt hydrostatisk trykk. Forskalingens høyde og kapasitet må dimensjoneres slik at det ikke er risiko for lekkasjer eller brudd. Konsekvensen kan være alvorlig hvis forskalingen ryker.

Støp med ventiler:

SKB er godt egnet for bruk i kombinasjon med ventiler. Bruk av ventil gjør det mulig å støpe konstruksjoner der tilkomsten er vanskelig fra topp, eksempelvis vegg støpt mellom to dekker. Ventiler monteres langt ned på forskalingen og flere oppover og langsetter avhengig av høyder og lengder. Betongen pumpes gjennom ventilene og stiger i forskalingen. Stige-hastigheten er begrenset av forskalingens kapasitet for støpetrykk. Støp med formventil kan i verste fall gi støpetrykk litt større enn hydrostatisk trykk. Lengre vertikal avstand mellom ventilene vil bidra til økt trykk. Støpetakten må også i dette tilfelle tilstrebes å være jevn for å unngå risiko for tiksotropisk tilstivning, lokal økning i støpetrykk, lagdeling og redusert overflatekvalitet. Støp med ventiler gir større risiko for separasjon, og krever derfor en stabil betong.

3.5.5 Kombinasjon av SKB og OKB

I noen tilfeller kan det være aktuelt å kombinere SKB og OKB i samme støp, for eksempel når en høy vegg, eller et tett armert fundament, skal avsluttes med en skrå toppflate. Dette løses ved å vibrere sammen lagene på vanlig måte. Den selvkomprimerende betongen må være stabil nok til å tåle påvirkningen fra nedstikk av vibratoren gjennom overliggende lag av OKB.

3.5.6 Støpemetode og utstyr

Støp med pumpe

Støping av SKB med pumpe er den vanligste metoden i dag. Pumping av SKB gir stor kapasitet og fleksibilitet, og er normalt en robust måte for transport av SKB. Metoden holder også betongen i bevegelse slik at tiksotropisk tilstivning unngås.

En stor del av støpefeil med SKB og pumpe skyldes slurv i oppstart støp. Før oppstart må pumpe og slanger smøres for å sikre at betongstrømmen blir jevn og homogen. SKB kan i seg selv fungere som smøring av pumpe, rør og pumpeslanger. Det er i så fall viktig at betongen som har gitt fra seg «smøremiddel» ikke går i formen. Betongen må tømmes utenfor formen eller pumpes tilbake på bil for remiksing. Ved lange slangeutlegg kan det være behov for eget smørelass.

Dersom det har vært lengre stopp i en støp kan betongen som står i pumpe og slange ha mistet mye av sin selvkomprimerende egenskap. I dette tilfellet må betongen pumpes utenfor formen.

Pumping av SKB kan påvirke betongens synkutbredelse og stabilitet. Dette kan føre til steinreir og mangelfull utstøping. Synkutbredelsen for SKB bør derfor kontrolleres etter pumpe der dette er mulig. Ved kontroll av konsistens før og etter pumpe kan det ved stabile resultater vurderes om kontroll før pumpe er tilstrekkelig. Endring i konsistens/synk før og etter pumpe vil variere avhengig av betong, pumpeutstyr og pumpe lengde mm.

Ved støp med pumpe anbefales det neddykket slange slik at betongen stiger jevnt i formen. Dette fører til god omstøping av armeringsjern, og vil redusere innpisket luft i betongen. Dykket slange vil gi en liten økning i støpetrykket. Dette bidrar til god utfylling, og gjør utstøpingen mindre følsomt for variasjon i betongens flyteevne. I tillegg bidrar økningen i støpetrykket til redusert mengde luftporer i betongen og betongoverflaten. Slangen burde i utgangspunktet ikke dykkes dypere enn 0,5 meter, da dette vil skape unødvendig stort støpetrykk på forskalingen. Dersom betongen har lav viskositet og stabilitet vil dykket slange gi større risiko for separasjon. Ved vanskelig hinder, som for eksempel utsparinger eller tett armering, kan slangen dykkes opptil 1 meter ned i betongen for å sikre god utstøping. Dette vil dermed øke støpetrykket i en kortere periode og område. Dette forutsetter at forskalingen er tilstrekkelig dimensjonert, og at betongen er robust og uten tegn til separasjon.

Støp med tobb

Kran og tobb kan benyttes ved støp med SKB. Betongen føres ned og slippes 0-0,5 meter over eksisterende betonglag for å hindre separasjon. Det vil som regel være behov for å bruke trakt, slange eller strøpse for å hindre at fallhøyden bli høyere enn dette.

Støping med tobb gir normalt lavere og mer ujevn støpehastighet enn pumpestøp. Dette gir økt fare for tiksotropisk tilstivning og lagdeling. Dette kan unngås ved regelmessig flytting og kortere avstand mellom fyllingspunktene. Dette vil holde betongen i bevegelse. Regelmessig flytting av fyllingspunktene og fallhøyde opptil 0,5 meter vil gi god omrøring av betongmassen i fyllingspunktet og bidra til grovt tilslag i støpefronten.

Det finnes eksempler på at betong har separert i tobben på grunn av risting og vibrasjoner. Ved

spesielt langt eller tidkrevende kranløft, eller SKB med synkutbredelse over 650 mm, er alternative metoder å foretrekke. En SKB med høy viskositet er en forutsetning for sikker utstøping uten separasjon.

Støp med renne

Transport i renne eller på bånd gir økt fare for steinseparasjon. Disse metodene anbefales ikke for SKB. Renne kortere enn 5 meter kan brukes. Fallhøyden må evt. begrenses ved hjelp av trakt og strømppe.

3.5.7 Krav til forskaling

Forskalingshud

SKB har potensiale til å gi et perfekt avtrykk av forskalingen, og vil derfor avsløre enhver feil eller svakhet ved denne. Forskalingshuden må være feil- og skadefri, og med en slik struktur/slikt mønster som ønskes.

Tetthet av forskalingen

Tettheten av formen må være bedre for SKB enn for OKB. På grunn av konsistensen har SKB lettere for å gi lekkasje, og hvis formen har små hull eller åpne spalter, bør disse tettes på forhånd med mineralull/laftevatt eller fugeskum. Dette stiller krav til hjørner, tilslutninger etc. for forskalingen. Lekkasje gir sår og reir, som vist i figur 3.6.



Figur 3.6. Sår pga. lekkasje i formen, Levanger sykehus.

Dimensjonering av forskaling, støpetrykk

Det er ofte nødvendig å dimensjonere forskalingen kraftigere ved støp med SKB enn ved støp med OKB. Dette kan skyldes både høyere flyteevne, tregere avbindingstid og raskere stigehastighet. Stigehastigheten har lett for å bli høy fordi støpearbeidet er mindre krevende enn for OKB. SKB sin høye flyteevne og tregere avbindingstid kan føre til at betongen holder seg flytende lengre, og gir bidrag til støpetrykket nedover i konstruksjonen. Alle detaljer ved forskalingen må være dimensjonert tilstrekkelig, også endesteng, utsparinger, lokal overforskaling etc. Det har vist seg

arbeidskrevende og til tider umulig å stoppe lekkasjer som oppstår på grunn av deformasjon som følge av støpetrykket. Det er derfor viktig at forskalingen ikke kun er sterk nok, men også tilstrekkelig stiv. Det er alltid en god regel å plassere forskalingsstag nær støpeskjøtene mot tidligere støpeavsnitt, og dette er spesielt viktig ved bruk av SKB.

SKB har oppførsel som en væske, og vil i prinsipp gi et støpetrykk som tilsvarer det hydrostatiske trykket. Måling av støpetrykk på byggeplass har imidlertid vist at SKB ofte ikke gir større trykk enn OKB ved samme støpehastighet. Dette skyldes sannsynligvis betongens evne til tiksotropisk tilstivning. Det er i praksis ikke mulig å forutsi og ta hensyn til denne effekten, og det er derfor sikrest å dimensjonere forskalingen for fullt hydrostatisk trykk. Bruk av formventiler eller neddykket pumpe slang gir som regel noe større støpetrykk enn fritthengende slang eller strøp. Støp med formventil kan i verste fall gi støpetrykk litt større enn hydrostatisk trykk.

Ved store støpeavsnitt eller høye vegger er det fornuftig å registrere støpetrykket ved hjelp av stagmålere. Dette gir mulighet for å tilpasse forskalingen til det reelle støpetrykket. En ulempe med en slik framgangsmåte kan være at når målingene brukes for å styre støpehastigheten kan man risikere periodevis opphold i støpen, tiksotropisk tilstivning og dermed fare for synlig lagdeling. Lagdelingen kan ved noen tilfeller reduseres og/eller unngås ved lett vibrering eller staging mellom nytt og gammelt lag ved oppstart etter opphold. Støpetrykket kan også hensyntas gjennom forhåndstesting av betongens konsistenstap og følgende endring i støpetrykk. Konsistenstapet kan også til en viss grad reguleres ved hjelp av akselerator slik at ønsket stige-hastighet blir mulig.

3.5.8 Separasjon

SKB kan være svært separasjonsømfintlig. Separasjon kan skje ved fritt fall, slag mot armering etc., ved glidning på skråplan, og ved lang utflyting i formen.

SKB er alltid sammensatt med et stort matriksoverskudd, se Tabell A2. Når betongen flyter langt, kan det grove tilslaget synke eller støte mot hindringer, mens matriksfasen flyter videre.

Matriksoverskuddet skilles dermed ut og blir anrikt i utflytingsfronten. Jo lenger betongen flyter ut, desto mindre blir det av grove tilslagspartikler i fronten. Den utstøpte betongen kan bli inhomogen. Dette kan kun motvirkes ved å flytte fyllingspunktet fram mot utflytingsfronten. En inhomogen betong vil påvirke konstruksjonens fasthet- og bestandighetsegenskaper i tillegg til økt sannsynlighet for plastiske svinnriss og uttørkingsriss i overflaten. Separasjon vil også øke sannsynligheten for steinreir og mindre pen overflate.



Figur 3.7. SKB med stor steinseparasjon

3.5.9 Tiksotropisk tilstivning, lagskjøter

All betong med høy viskositet viser tendens til tiksotropisk tilstivning, dvs. den mister flyteevnen når den ligger i ro, men gjenvinner flyteevnen når den røres om. SKB vil være utsatt for dette (spesielt når masseforholdet er lavt, som i bestandighetsklassene M40 og M45). Dette må det tas hensyn til under støpeutførelsen. Det finnes ingen egnede målemetoder for karakterisering av tendensen til tiksotropisk tilstivning, derfor må kontrollen skje visuelt.

Ulempene ved tiksotropisk tilstivning unngås ved remiksing av hvert lass ved ankomst byggeplass, ved kontinuerlig utstøping uten avbrudd, og ved hyppig skifte av fyllingspunkt. Utstøping med dykket pumpe slang kan også bidra til å holde en større del av betongvolumet i bevegelse, og dermed redusere tendensen til tiksotropisk tilstivning.

Når SKB har ligget i ro en tid, kan den ha fått en viss tiksotropisk tilstivning. I tørt vær kan betongen også få en hardere overflateskorpe pga. uttørking. Når ny, fersk SKB flyter ut oppå en slik skorpe, skjer ingen sammenblanding av lagene. På overflaten vil en få synlige streker som viser lagskjøtene, slik figur 3.8 viser. I verste fall kan en få noen millimeter manglende utfylling, som vist på figur 3.9. Det er ikke påvist at slike lagskjøter har gitt svekkelse eller redusert tetthet i konstruksjonen.

Tiksotropisk tilstivning er en fordel med hensyn til støpetrykk. Det har vist seg at man sjelden kan måle støpetrykk som tilsvarer hydraulisk trykk, selv ved ganske stor støpehastighet.



Figur 3.8 Støpeflo som flyter over et lag med tiksotropisk tilstivning, Nye Tyin Kraftverk, Øvre Årdal



Figur 3.9 Synlig sjiktdannelse pga tiksotropisk tilstivning. Bunnplaten, Rica Seilet Hotel, Molde

3.5.10 Herdetiltak

SKB har stort sett samme behov for temperatur og fuktighet i herdeperioden som OKB.

Herdetiltakene vil derfor stort sett være de samme, men på grunn av faren for plastisk svinriss vil hurtig tildekking være enda viktigere for SKB enn for OKB. Minimumskrav til herdetiltak er gitt i NS-EN 13670+NA.

3.6 Egenskapsutvikling

De mekaniske egenskapene og bestandigheten til SKB er ikke prinsipielt forskjellige fra de samme egenskapene for OKB, og er derfor ikke omtalt videre her.

3.6.1 Varmeutvikling

Varmeutvikling i SKB styres av de samme parametrene som for betong som må vibreres. Dvs. at økt innhold av reaktivt materiale gir økt herdetemperatur og ved et gitt innhold av reaktivt materiale er det i hovedsak sementtypen som bestemmer hvor mye varme som avgis. For OKB er det tidligere funnet at tilsetning av silikastøv på erstatningsbasis med sement i liten grad påvirker temperaturutviklingen. Om varmeutviklingen blir høyere i SKB enn betong som vibreres, er derfor avhengig av om den økte matriksmengden i SKB medfører økt mengde reaktivt materiale (gir mer varme) eller bare mer inert filler (gir uendret varme).

3.6.2 Risstendens i plastisk fase

Plastisk svinn og setning er hovedårsaken til opprissing i plastisk fase. Årsaken til plastisk svinn er avdamping og etterfølgende uttørking av betongoverflaten. Når overflaten blir tørr utvikles kapillært undertrykk i betongens porevann - som er drivkraften for plastisk svinn. Betongoverflaten blir tørr når avdampingen er større enn betongens bleeding. Bleeding er derfor en positiv egenskap i denne forbindelse fordi det gir et «vannreservoar» på overflaten som beskytter mot uttørking. Det kapillære undertrykket øker når partikkelavstanden avtar.

Det vanligvis høye finstoffinnholdet i SKB bidrar til både redusert bleeding og redusert partikkelavstand. Erfaring fra praksis og laboratorieforsøk bekrefter da også at SKB kan være mer følsom for opprissing i plastisk fase enn betong som må vibreres. For SKB er det derfor enda viktigere å forhindre avdamping i de første timene fra umiddelbart etter utstøping.

3.6.3 Risstendens i herdefasen

Ytre fastholdning

Det er fare for opprissing i betongens avkjølingsfase når betongens termiske sammentrekning er utsatt for ytre fastholdning (fra underlag, fra tilstøtende konstruksjoner, etc.). Dette er en situasjon som ofte gir alvorlige og gjennomgående riss.

For et gitt masseforhold viser resultatene at SKB ikke har høyere risstendens enn OKB så lenge SKB ikke innebærer vesentlig økning i mengden sementlim /7/. Dette indikerer dermed for SKB, at bruk av superplastiserende tilsetningsstoff (+ stabiliserende tilsetningsstoff) og tilhørende ekstrem flyteevne i fersk fase i seg selv ikke har noen negativ effekt på risstendensen i herdefasen. I dette ligger også at både normale mengder silikastøv (på erstatningsbasis med sement) og kalkfiller (innblanding), kan brukes uten å endre risstendensen i vesentlig grad.

Resultater fra målinger med SKB, samt tidligere resultater på OKB /8-10/, viser at normal tilsetning av silikastøv som erstatning av sement ikke gir vesentlig endret risstendens. Hovedtrekket er at bruk av

silikastøv først og fremst medfører økning av betongens strekkfasthet (positivt), og økning av autogent svinn (negativt), og at de to effektene opphever hverandre.

Indre fastholding

En annen type opprissing i herdefasen er overflateopprissing på grunn av indre fastholding. Generelt sett, for både SKB og OKB, vil alle proporsjoneringsmessige tiltak som medfører økt varmeutvikling gi økt fare for slik opprissing fordi mer varme gir økte temperaturdifferanser over tverrsnittet (varm kjerne og et kaldere ytre). Dette må vurderes for hver enkelt resept.

Uttørkingssvinn

Uttørkingssvinn er forbundet med den volumreduksjonen som skjer når vann forlater kapillærporene (samme prinsipp som for plastisk svinn). Uttørkingssvinnet er avhengig av dimensjonen og om uttørking foregår fra en eller flere sider. Det kan pågå over flere år, men ved normale dimensjoner skjer det meste i løpet av et eller to år. Siden tilslaget betraktes som dødt, dvs at det kun er reaktivt materiale som endrer volum, er volumandel av reaktivt materiale en viktig materialparameter. Laboratorie-undersøkelser bekrefter det: En økning av andelen reaktivt materiale med ca 13 % ga ca 13 % høyere svinn etter 6 måneders uttørking (50 % RF) /8/.

3.7 HMS

Målsetningen for ethvert arbeid er at det skal gjennomføres uten skade på personer eller det ytre miljø. For å sikre dette skal byggeplassen planlegges, organiseres og kontrolleres iht. regler i Byggeforskriftene – dvs. «Forskrift om sikkerhet, helse og arbeidsmiljø på bygge- eller anleggsplasser».

SKB er et viktig og svært positivt bidrag til arbeidsmiljøet. Betongvibrering, slik vi kjenner den, er en støyende og slitsom jobb med tungt utstyr i vanskelige arbeidsstillinger. Så vel byggherren som entreprenøren har betydelig HMS-gevinst ved å benytte SKB. Gevinsten er hovedsakelig et resultat av det unngått bruk av komprimeringsutstyr og spesielt vibrator. Bruk av vibrator medfører støy, tunge løft, vibrasjon og større sikkerhetsrisiko.

Støy

Når det gjelder støy er effekten av å ta bort vibreringsverktøyet kanskje størst i elementproduksjon bl.a. fordi den vanligvis foregår innendørs (resonans forsterker lyden). En dansk undersøkelse viser at lydnivået fra bruk av håndholdte vibratorer på byggeplass ofte overstiger de maksimumskravene som det danske arbeidstilsynet har satt /12/. Konklusjonen er at slik støy kan medvirke til hørselsskader om ikke hørselsvern benyttes.

Tunge løft

Oftest er det slik at de som bruker stavvibratoren må stå fremoverbøyd uten mulighet for støtte foran overkroppen. Tungt løfte- og draoperasjoner med armene, ugunstig arbeidsstilling og lang vektarm til skuldre og rygg gir meget stor belastning på nakke, skuldre og rygg. Spesielt korsryggen blir utsatt for slitasje som altfor ofte fører til alvorlige skader som prolaps.

Omformerne veier opp mot 40-50 kg. De blir stort sett forflyttet manuelt av en eller to personer, og bæreb belastningen er stor. Her kan man lett løfte på seg ett "kink", som starten på en rygglidelse.

Slangen på stavvibratoren blir fort sleip, og det er vanskelig å holde et godt tak. Dermed blir totalbelastningen på muskel- og skjelettapparatet større.

En dansk undersøkelse bekrefter at belastningene som er beskrevet over er skadelige /9/.

Vibrasjon

Håndholdt vibrasjonsutstyr generelt kan medvirke til utvikling av betydelig slitasje i finger- og håndledd, albue og skulder/nakke. Vibrasjonen reduserer blodgjennomstrømmingen, og mange opplever problem med "likfingre" dvs. kalde og stive fingre med nedsatt følsomhet. En slik skade er varig. En dansk undersøkelse viser imidlertid at normal bruk av håndholdte betongvibrasjoner tilsvarer et vibrasjonsnivå som er under kravet til maksimalt vibrasjonsnivå gitt av det danske arbeidstilsynet /9/. Men ved overdreven bruk og/eller bruk sammen med vibrasjonsbelastning fra andre kilder må bruk av betongvibrasjoner likevel kunne betraktes som en kilde til slike skader.

Sikkerhetsrisiko

Ved bruk av SKB oppnår man også fordeler som økt sikkerhet og samtidig større tempo i jobben:

- Redusert fare for ulykker, da det blir mindre aktiviteter fra stillaser etc.
- Mer ryddig arbeidsplass, med mindre ledninger og utstyr som skal fraktes rundt omkring.
- Mer oppmerksom fordi støy fra vibratoren kan virke stressende/sløvende.

Referanser

- /1/ Maage, M.: "Betong – regelverk, teknologi og utførelse", Byggenæringens forlag, 2015
- /2/ Mørtzell E.: "Modellering av delmaterialenes betydning for betongens konsistens" Dr. ing avhandling, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTH, Trondheim 1996.
- /3/ Mørtzell E., Smeplass S., Maage, M.: "Karakterisering av flyteegenskapene i betongens matriksfase", Betongindustrien, oktober 1995.
- /4/ Mørtzell E., Maage M. and Smeplass S.: "A Particle-Matrix Model for Prediction of Workability of Concrete", Proceedings from the International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete", Glasgow, Scotland 1995.
- /5/ Smeplass S., Fredvik T I.: "SKB - Tilpasning av partikkel-matriksmodellen", FoU-prosjektet "Konkurransedyktige betongløsninger i nærings- /industribygg og boliger", DP1 "Selvkomprimerende betong", Norcem-rapport 9D4/R01012, Brevik.
- /6/ Smeplass S., Fredvik T I.: "SKB - Effekt av materialsammensetningen på matriksens flytmodstand", FoU-prosjektet "Konkurransedyktige betongløsninger i nærings- /industribygg og boliger", DP1 "Selvkomprimerende betong", Norcem-rapport 9D4/R01011, Brevik 2001.
- /7/ Bjøntegaard Ø. (2001) Volumendringer, spenningsoppbygging og risstendens i selvkomprimerende betong i SV40- og NA-kvalitet. NOR-IPACS rapport. DP2 Mekaniske egenskaper og spenningsoppbygging. NTNU Inst. for Konstruksjonsteknikk.
- /8/ Bjøntegaard, Ø. (1999) Thermal Dilation and Autogenous Deformation as Driving Forces to Self-Induced Stresses in High Performance Concrete. Doctoral thesis, NTNU, Dept. of Structural Eng., Dec. 1999, ISBN 82-7984-002-8.
- /9/ Kanstad T., Bjøntegaard Ø., Sellevold E.J., Hammer T.A. and Fidjestøl P. (2001) Effects of Silica Fume on Crack Sensitivity, Concrete International, vol. 23, 12, pp. 53-59
- /10/ Bjøntegaard Ø. and Sellevold E.J. (2004) Young high performance concrete with w/b=0.40 and varying silica fume content: Experimental test results and 1-dimensional restraint stress calculations. Evaluation of new results on hot climate conditions and previous results. NOR-CRACK report #3.1, Subtask 3 Parameter studies, STF22 A04616, ISBN 82-14-02588-5
- /11/ Hammer TA.: "Plastisk svinn og uttørkingssvinn: Effekt av materialsammensetning av SKB. SINTEF-rapport xx, 2007 og Norcem-rapport yy, 2007 (*ferdig i løpet av våren 2007*)
- /12/ Teknologisk Institutt: "Arbeidsmiljø og SCC". SCC-Konsortiet, Delprosjekt D12. Teknologisk Institutt, Betoncentret. Taastrup, april 2006.
- /13/ European Project Group: "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use", 2005.

Vedlegg A

1. Betongteknologisk bakgrunn

1.1 Innledning

Selvkomprimerende betong (SKB) skal fylle forskalingen og omslutte armeringen uten behov for vibrering eller annet komprimeringsarbeid, uten at det oppstår separasjon i et omfang som har betydning for konstruksjonens funksjon eller levetid. Slike betonger må nødvendigvis ha spesielle støpelighetsegenskaper, men skiller seg likevel lite fra OKB med hensyn til materialsammensetning og egenskaper i herdnet tilstand. Mye av den kunnskapen vi har om sammenhengen mellom materialsammensetning og støpelighet kan også overføres direkte.

Både norsk og internasjonal litteratur kan gi inntrykk av at selvkomprimerende betong er et nytt og annerledes materiale, fordi betongens oppførsel i fersk tilstand er fokusert så sterkt, og krever innføring av en del «nye» begreper som vanligvis ikke brukes om vibrert betong. Det er ingen grunn til å underbygge denne myten. Selvkomprimerende betong er ikke en ny materialtype, og den «gamle» betongteknologien er fortsatt gyldig, riktignok etter oppdatering med en del ny kunnskap.

I denne publikasjonen har vi valgt å ta utgangspunkt i en material-modell som kan brukes på både vibrert konstruksjonsbetong og selvkomprimerende betong. Ved hjelp av denne kan vi beskrive forskjellen mellom disse betongene på en entydig og oversiktlig måte, både med hensyn til sammensetning og egenskaper. Denne materialmodellen kalles «partikkel- matriksmodellen», eller PM-modellen.

1.2 Partikkel- matriksmodellen

En betongsammensetning kan ofte bestå av 7-8 delmaterialer. Det er ikke enkelt å danne seg et bilde av hvordan disse komponentene hver for seg og sammen bestemmer betongens støpelighetsegenskaper. De empiriske metodene som finnes for å settes sammen betong for å oppnå bestemte egenskaper hjelper heller ikke særlig på forståelsen, selv om mange av dem (f.eks. Thaulows metode) gir fornuftige resultater under gitte forhold.

Partikkel-matriksmodellen er et forsøk på å skape et enklere bilde av disse sammenhengene, ved at materialene sorteres i to grupper avhengig av sine egenskaper. Den ferske betongen blir da et tokomponent-materiale sammensatt av en **matriksfase** og en **partikkelfase**. Dersom disse fasene lar seg beskrive på en entydig måte, vil dette være et mye enklere utgangspunkt enn å betrakte alle 8 delmaterialene enkeltvis.

I partikkel- matriksmodellen er matriksfasen den flytende komponenten som omslutter den faste partikkelfasen og fyller alle hulrom. Egenskapene til partikler under en viss størrelse vil være styrt av overflateegenskapene til materialet, ikke tyngden eller formen av partiklene. Dette gjelder i særlig grad når partiklene er omsluttet av vann. Det er derfor naturlig å la de små partiklene rent definisjonsmessig tilhøre væskefasen, dvs. matriksen.

1. **Matriksfasen** er den tungflytende væsken som fyller partikkelens hulrom. Den inneholder vann, tilsetningsstoffer og alle faste materialer med partikkelstørrelse mindre enn 0,125 mm, dvs. sement, tilsetningsmaterialer og tilslagets filler.
2. **Partikkelfasen** er alle faste materialer med partikkelstørrelse større enn 0,125 mm. Absorbert vann i tilslaget regnes formelt som en del av partikkelfasen.

Når egenskapene til de to fasene er bestemt på en entydig måte, vil betongens konsistens være bestemt av disse egenskapene, og **volumforholdet** mellom fasene. Dette er vist på en enkel måte i figur A1.



Figur A1 Partikkel-matriksmodellen

1.2.1 Matriksfasens egenskaper

Funksjonen til matriksen er å omslutte den faste partikkelfasen, og fylle hulrommet mellom partiklene. Forholdet mellom matriksmengde og hulromvolum har stor innvirkning på betongens synk og synkutbredelse.

Matriksen defineres som en viskøs væske. Egenskapen karakteriseres gjennom hvor lett eller vanskelig den strømmer/flyter. Matriksen flyteegenskap er avhengig av tre faktorer:

- Andelen partikler i blandingen, f.eks. ved å endre på masseforholdet eller tilsette filler (partikler <0,063mm).
- Bruken av spesielt fine partikler/finstoffer, f.eks. finmalt sement, silikastøv eller flyveaske
- Bruken av tilsetningsstoffer

Faguttrykket for denne flyteegenskapen heter flytmotstand, som betegnes med en faktor mellom 0 og 1. Der flytmotstanden er nærmere 0, vil det tilsvare vanlig vann - ingen særlig forstyrrende partikler der som endrer flyteegenskapen. Derav flytmotstand på 1 vil si en så tungflytende væske som siger sakte utover.

Eksempler på flytmotstand i ulike væsker:

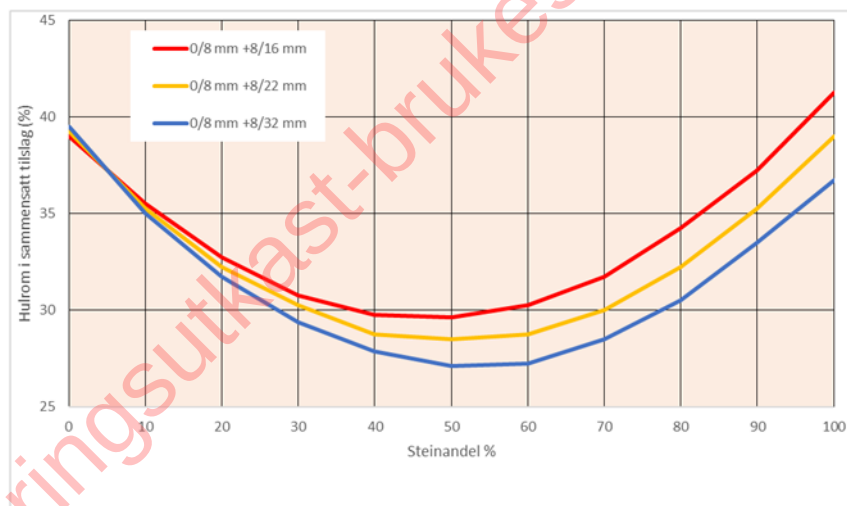
Tabell A11: Typiske verdier for flytmotstand

Materiale	Flytmotstand, λ_Q
Vann	ca. 0,06
Matriks i M60-betong	0,30 - 0,40
Matriks i M40 / MF40-betong	0,50 - 0,60
Matriks i selvkompimerende betong	0,55 - 0,75

1.2.2 Partikkelfasens egenskaper

Partikkelfasen består av tilslaget med partikkelstørrelse større enn 0,125 mm. Partikkelfasen kan defineres som et friksjonsmateriale, som vil si at egenskapene til denne fasen er dominert av partikkelegenskapene, som gradering (hvor mye det er av hver fraksjon) og kornform (kantet eller rund form), og avhenger mindre av mineralogi (hvilken type stein det er) og overflatekrefter (kreftene mellom partiklene, som gjør at partiklene kan 'flyte' i væsken).

Hulrommet mellom partiklene er avhengig av partikkelstørrelsesfordelingen, partiklenes kornform, om prøven er løst lagret eller komprimert, og om partiklene er tørre eller fuktige. Hvis vi ønsker å sammenligne hulromsvolumet i ulike tilslag som skal brukes til betong, er det best å måle bulkdensiteten på en fuktig, godt komprimert prøve, selv om dette kanskje ikke tilsvarer partikkelfasens tilstand i vanlig konstruksjonsbetong.



Figur A2 Hulrom i sammensatt tilslag

Partikkelfasen til en OKB kan ha et hulromsvolum på f.eks. 25%. Dette tilsvarer at matriksvolumet minst må fylle 250 liter per kubikk betong. Matriksvolumet i betong må imidlertid alltid være litt større enn det beregnede hulromsvolumet i partikkelfasen for at partiklene skal kunne bevege seg i forhold til hverandre, og at betongen skal kunne bearbeides. Forskjellen på partiklenes

hulromsvolum og det matriksvolumet vi faktisk bruker i betongen, kalles betongens 'matriksoverskudd'.

Selvkomprimerende betong (SKB) er helt flytende. Partikkelkontakten må dermed være liten, og betongen har derfor et matriksoverskudd som er ytterligere større enn i OKB. Et enkelt eksempel på matriksvolum som varierer mellom hvilken egenskap som ønskes i betongen vises i Tabell A2.

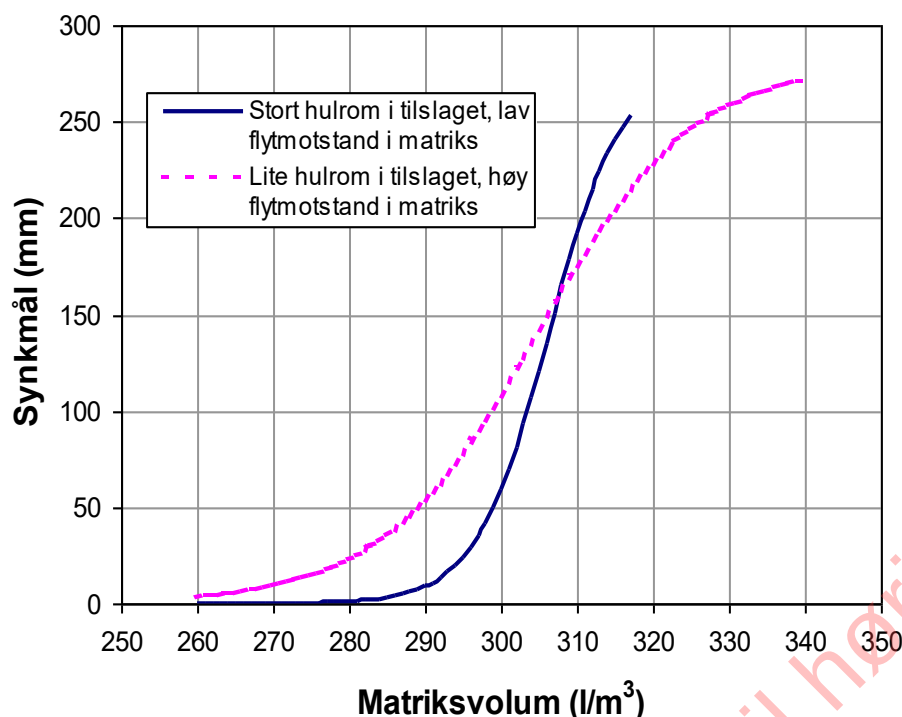
Tabell A2: Matriksvolum

Betongtyper	Nullkonsistens betong 0-20 mm	Ordinær komprimerbar betong 200-220 mm	Selvkomprimerende betong
Matriksoverskudd over 250 L/m ³	+ 20-40 L/m ³	+ 50-80 L/m ³	+ 80-120 L/m ³
Total matriksvolum	= 270-290 L/m ³	= 300-330 L/m ³	= 330-370 L/m ³

1.2.3 Sammenhengen mellom matriksvolumet og betongs støpelighet

Dersom vi setter sammen en betong med en bestemt matriks og et bestemt partikkelsystem får vi en entydig sammenheng mellom matriksvolumet og betongens støpelighet.

Litt forenklet kan vi si at partikkelsystemets hulromsvolum bestemmer startpunktet for kurvene i figuren, mens matriksens flytmotstand bestemmer helningen. I figuren tilsvarer den stiplede kurven betonger basert på et partikkelsystem med lavt hulromsvolum og en matriks med høy flytmotstand, mens den heltrukne kurven tilsvarer betonger basert på et tilslag med høyt hulromsvolum, og en matriks med lav flytmotstand.



Figur A3. Sammenhengen mellom matriksvolum og oppnådd synkmål for betonger basert på to ulike matrikssammensetninger og to ulike tilslagssammensetninger

Betongens luftinnhold er partikkel-matriksmodellens «stebarn», ettersom det er vanskelig å inkludere luft ved måling av matriksegenskapene. Luften spiller en viktig rolle for betongens konsistens, og kan godt betraktes som en del av matriksvolumet. Luftporer må imidlertid oppfattes som »»leksible partikler», og gir ikke samme effekt som en økning av matriksvolumet ved tilsetning av vann og sement, eller fillere. En økning i luftporevolumet fra 2 til 5% dvs. 30 liter/m³, kan gi en effekt på betongens støpelighet som tilsvarer en økning i matriksvolumet på ca 15 liter/m³.

1.2.4 Partikkel- og matriksdominans

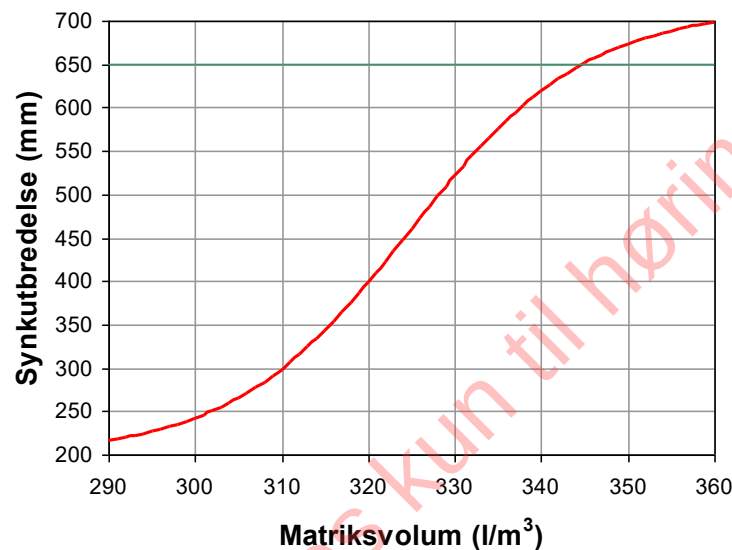
Fra synkmål på ca. 150 mm vil betong etter hvert skifte karakter fra å være *partikkeldominert* til *matriksdominert*. Grensen mellom partikkel- og matriksdominert betong er ikke fast, det avhenger av hvilken fasthetsklasse og bestandighetsklasse betongen skal være i.

- **Matriksdominans** betyr at matriksvolumet er stort nok til å øke avstanden mellom tilslagspartiklene, redusere kontakten mellom dem, og dermed redusere kontakttrykk, friksjon og blokkeringseffekter. Partikkelegenskaper som f.eks. kornform får da mindre innflytelse på betongens oppførsel.
- **Partikkeldominans** betyr at betongens konsistens er preget av kontakten mellom partiklene. I dagligtale brukes ofte ord som 'fet' om matriksdominert betong, mens partikkeldominert betong er 'mager'.

Selvkomprimerende betong er alltid matriksdominert, om enn i varierende grad. Disse betongene har synkmål større enn 250 mm, og befinner seg dermed langt ute til høyre i figur A.3. Synkmålet er egentlig dårlig egnet for å beskrive den selvkomprimerende betongens støpelighet.

Synkutbredelsesmålet, dvs. diameteren på synkprøven er bedre egnet. Denne metoden brukes derfor også ved klassifisering av støpelighetsegenskapene.

Figur A4 viser et eksempel på sammenhengen mellom betongens matriksvolum og synkutbredelsesmålet. Synkutbredelsesmålet er mindre følsomt for endringer i matriksvolum enn synkmålet. Samtidig er flytmotstanden i matriksen større i selvkompimerende betong enn i ordinær OKB. Kurven i figur A4 blir derfor mer langstrakt enn kurvene i figur A3.



Figur A4 Eksempel på sammenhengen mellom matriksvolum og synkutbredelsesmålet for selvkompimerende betong.

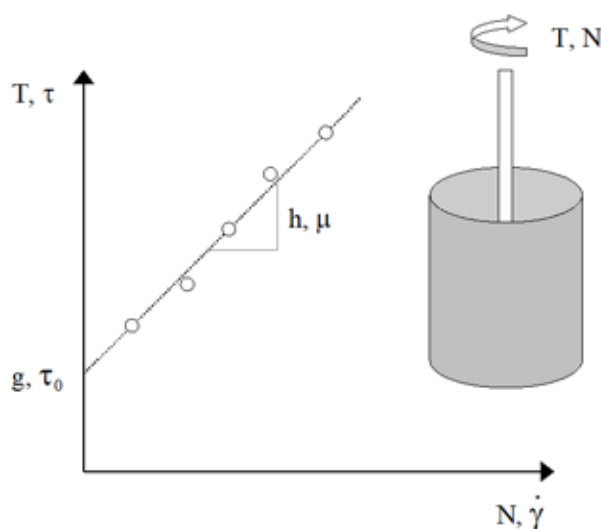
En ulempe med partikkel-matrismodellen er at den sier lite eller ingenting om betongens stabilitet, dvs. evne til å motstå separasjon. Ofte er betongens separasjonstendens det største hinderet for å oppnå selvkompimerende egenskaper. Dette gjelder særlig dersom matriksens flytmotstand er lav. Bare en liten økning i matriksvolum, eller en marginal senkning av matriksens flytmotstand (f.eks. ved tilsetning av SP-stoff), kan endre betongen fra å være stabil og støpelig til ustabil og separerende.

I praktisk betongproduksjon vil det alltid være variasjoner i delmaterialenes egenskaper, og ikke minst i tilslagets overflatefukt. Det er vanskelig å ha fullstendig kontroll på alle delene, men om betongprodusenten tar sine kontrollprøver for slike variasjoner, skal ikke støpeligheten variere for mye. Matriksdominert betong er generelt mer robust enn partikkeldominert betong både ved variasjon i fukt og finstoffinnhold i tilslaget.

1.2.5 Bingham's væskemodell brukt på fersk betong

For å kunne beskrive forskjellen på støpelighetsegenskapene i OKB og SKB kan det være en fordel å kjenne noen sentrale reologiske begreper.

Fersk betong har egenskaper som ligger tett opp mot Bingham's væskemodell. Hvis vi plasserer en prøve av betongen i en sylindrisk beholder med en symmetrisk formet visp, og roterer vispen i betongen, får vi en sammenheng mellom torsjonsmomentet T og rotasjonshastigheten N som vist i figur A5. Betongen må påføres et minste torsjonsmoment, g , før den i det hele tatt kan settes i bevegelse, og deretter er sammenhengen mellom momentet og hastigheten tilnærmet lineær, karakterisert ved stigningstallet h .



Figur A5 Bingham's væskemodell brukt på fersk betong

Dersom geometrien på beholderen og vispen er enkel, kan torsjonsmomentet, T , regnes om til skjærspenning, τ , i betongsjiktet mellom vispen og veggen i beholderen. Rotasjonshastigheten, N , regnes om til skjærhastighet $\dot{\gamma}$. Minimum torsjonsmoment, g , tilsvarer nå «flyteskjærspenningen», τ_0 , og stigningstallet h tilsvarer «viskositeten», μ . Vi har nå følgende sammenheng:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Flyteskjærspenning og viskositet er karakteristiske egenskaper for betongmaterialet, dvs. disse størrelsene er i prinsipp uavhengig av geometrien på prøvingsutstyret. I daglig tale tilsvarer flyteskjærspenningen betongens «stivhet» og viskositeten betongens «seighet».

1.2.6 Selvkomprimerende betong

Som nevnt kan SKB alltid beskrives som en **matriksdominert betong**, dvs. betongen har en stor og relativt viskøs matriksfase, og effekten av «partikkelinterferens» er liten. Matriksfasen er egenstabil, dvs. vannutskillelse forekommer i praksis ikke. Matriksen er samtidig viskøs nok til å forhindre mørtelseparasjon.

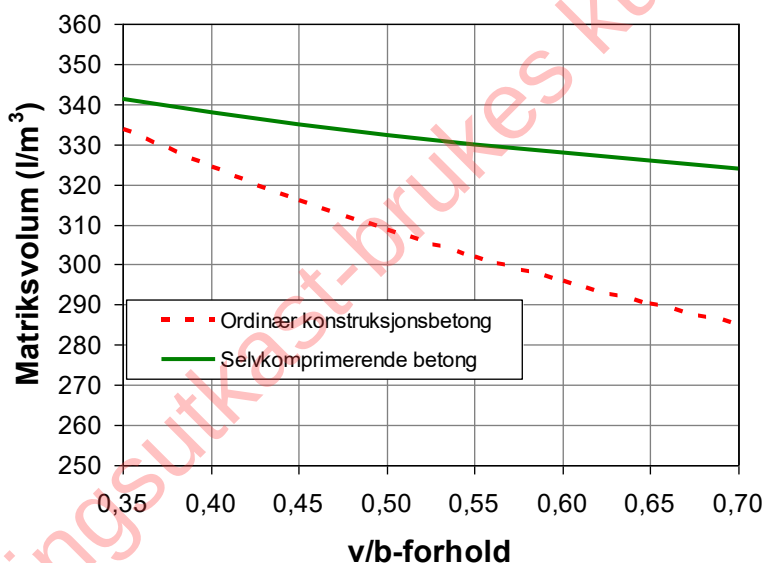
Den store matriksfasen, og bruken av SP-stoffer, gir betong med svært lav flyteskjærspenning, dvs. uten motstand mot begynnende bevegelse, men med relativt høy viskositet, dvs. indre

strømningsmotstand eller seighet. Overført til praktisk betongarbeid kan vi si at betongens flyteevne styres av flyteskjærspenningen, mens flytehastigheten styres av viskositeten.

Flyteegenskaper som beskrevet ovenfor har vi tradisjonelt forbundet med høyfast betong, fordi lavt v/b-forhold i seg selv skaper viskøs oppførsel, og framtvinger et stort matriksvolum dersom betongen skal ha god mobilitet. (Liknende egenskaper finner vi også i undervanns-betong, men da først og fremst på grunn av bruken av det tilsetningsstoffet som skal hindre utvasking.)

I litteraturen kan vi også se at det i mange tilfeller settes likhetstegn mellom SKB og høyfast betong, dvs. det er tatt som en selvfølge at de karakteristiske støpelighetsegenskapene er oppnådd ved å bruke et lavt v/c-forhold og dermed automatisk et stort matriksvolum. Ved proporsjonering av SKB er det generelt enklere å ta utgangspunkt i et lavt v/b-forhold enn i et høyt, fordi det er behov for færre spesielle virkemidler for å gi tilstrekkelig matriksvolum, og samtidig sikre tilstrekkelig stabilitet.

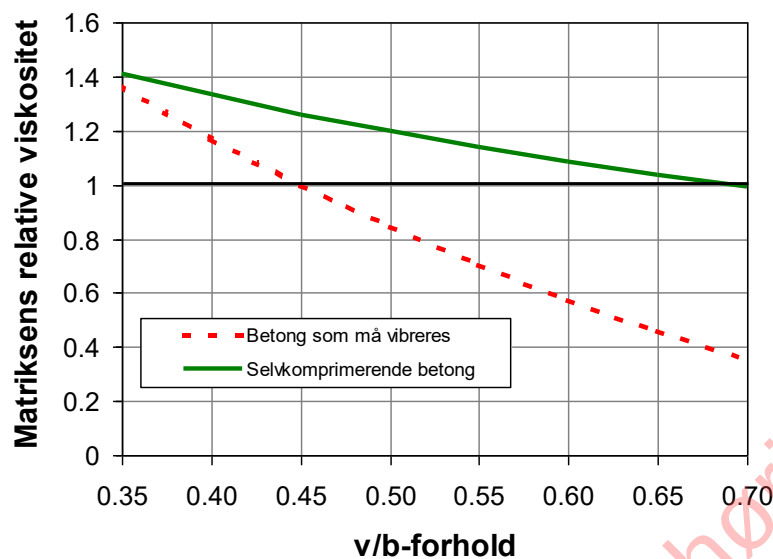
Figur A6 viser hvordan matriksvolumet i OKB normalt øker med avtagende v/b-forhold (figuren er en prinsippskisse, i praksis vil parametere som største steinstørrelse, tilslagetets gradering, sementtype og bruk av tilsetningsstoffer også påvirke betongens matriksvolum). Samme figur angir også typisk matriksvolum for selv-komprimerende betong. For denne typen betong er matriksvolumet mindre avhengig av v/b-forholdet. De angitte kurvene representerer matriksvolum ved maksimalt oppnåelig støpelighet, begrenset oppad av faren for separasjon.



Figur A6 Matriksvolum som funksjon av v/b-forhold, betong som må vibreres og selvkomprimerende betong, prinsippskisse

Figur A7 indikerer at matriksens viskositet (strømningsmotstand) generelt vil være høyere i SKB enn i OKB. I vibrert betong vil matriksens viskositet avta kraftig ved økende v/b-forhold. I SKB er det

nødvendig å beholde en relativt høy viskositet i matriksen også ved høye v/b-forhold for å sikre at betongen er stabil nok til å kunne tåle den store flyteevnene.

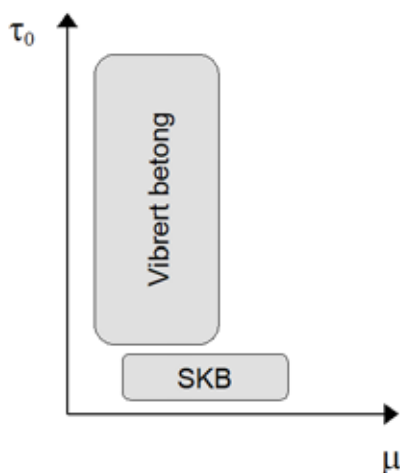


Figur A7 Matriksens viskositet som funksjon av v/b-forhold, betong som må vibreres og SKB, prinsippskisse

Ved høye v/b-forhold kan nødvendig matriksvolum i den selvkomprimerende betongen bare oppnås ved å bruke tilslag med høyt finstoffinnhold, evt. tilsetning av ren filler. Dette gir også økning i matriksens viskositet, og dermed det nødvendige bidraget til betongens stabilitet.

Det er også mulig å øke matriksens viskositet og betongens stabilitet ved hjelp av spesielle tilsetningsstoffer, stabilisatorer. Enkelte stabilisatorer ser også ut til å ha en gunstig effekt på betongens stabilitet uten at betongen samtidig blir seig, dvs. betongen beholder sin smidighet, men får begrenset flyte- og fyllingsevne. Dette kan f.eks. være gunstig ved dekkstøp, men mindre heldig ved veggstøp, se senere kapitler. Effekten av stabilisatorer er generelt svært avhengig av betongens sammensetning. Stabilisatorer brukes som regel bare der mer tradisjonelle virkemidler ikke gir tilstrekkelig effekt.

Figur A8 viser variasjonsområdet for flyteskjærspenning for vibrert betong og SKB. Vibrert betong har et stort variasjonsområde for flyteskjærspenningen, tilsvarende variasjons-området for synkmålet (50-230 mm). SKB har lavere flyteskjærspenning enn vibrert betong (dvs. ingen «stivhet»), men til gjengjeld kan viskositeten («seigheten») være mye større. Økt viskositet er ofte ønskelig av hensyn til betongens stabilitet. Tabell A3 viser typiske verdier for flyteskjærspenning og viskositet i ulike M45-betonger, målt i et BML viskosimeter.



Figur A8 Variasjonsområde for flyteskjærspenningen, τ_0 , og viskositeten, μ , i vibrert betong og i SKB. Prinsskisse.

Tabell A3 Typiske verdier for flyteskjærspenning og viskositet, målt i et BML viskosimeter

Betongsammensetning	Flyteskjærspenning	Plastisk viskositet
	(Pa)	(Pas)
M45 betong, synk 100 mm	700	40
M45 betong, synk 200 mm	300	20
SKB M45 betong, synkutbredelse 650 mm	20	30

SKB har i mange tilfeller vist seg å ha såkalte «tikotropiske» egenskaper, dvs. betong som står i ro ser ut til å miste sin flyteevee etter kort tid, men vinner den tilbake ved lett omrøring. Denne oppførselen har en viss analogi til moderne malings typer, som henger godt på penselen, men som samtidig er lette å stryke ut. Tikotropisk oppførsel er gunstig med hensyn til utvikling av formtrykk, se senere kapitler, men kan også gi sjiktdeling ved opphold og pauser under veggstøp. Det er foreløpig ikke klart hvordan tikotropi kan styres ved hjelp av materialsammensetningen, men v/b-forhold, sementtype og type tilsetningsstoff er parametere som har vist seg å påvirke denne egenskapen. Det finnes ikke målemetoder for å karakterisere betongens tikotropi på byggeplass. Det er derfor ikke enkelt å identifisere og karakterisere denne spesielle oppførselen.

1.3 Delmaterialer ved proporsjonering av SKB

I SKB med lavt masseforhold kan tilstrekkelig matriksvolum ofte oppnås ved å øke sandandelen i betongen. For eksempel ved bruk av silikastøv i noe større mengder enn normalt, kombinert med en liten økning i mengde tilsetningsstoff kan det gi de ønskede støpelighetsegenskapene uten at det er gjort store forandringer i betongsammensetningen. I SKB med høyere masseforhold er det nødvendig å gjøre større endringer i resepten for å øke matriksvolumet, og samtidig holde matriksens viskositet på et høyt nok nivå til å unngå separasjon.

Matriksvolumet kan i prinsipp økes ved å øke sementmengden i betongen. Dette er imidlertid som regel uøkonomisk, og kan gi tekniske ulemper som:

- **Overfasthet.** Dersom økt sementmengde ikke kompenseres med økt vannmengde senkes masseforholdet, og fastheten øker. Dette kan gi misforhold mellom oppnådd fasthet og prosjektert minimumsarmering.
- **Dårligere stabilitet.** Dersom økt sementmengde følges av økt vannmengde slik at masseforholdet holdes konstant, vil vann/pulver (v/p) - forholdet øke svakt og matriksen bli mer tyntflytende samtidig som matriksvolumet øker. Dette gir dårligere stabilitet. Som regel vil en økning i matriksvolumet kreve mer tyktflytende matriks for at stabiliteten skal opprettholdes.
- **Økt plastisk svinn**
- **Økt herdevarme**
- **Økt uttørkingssvinn** (forutsatt at økt sementmengde følges av økt vannmengde slik at masseforholdet holdes konstant)

Matriksvolumet bør derfor først og fremst økes ved å øke fillerinnholdet i betongen. Dette kan gjøres på følgende måter:

- **Bruk av sand med større finstoffinnhold**
- **Større sandandel.** Sandandelen kan kun økes inntil en viss grense, fordi en stor andel øker tilslagets samlede hulrom (dvs. større matriksbehov). Samtidig gir større andel sand en tendens til økt flyteskjærspenning i betongen, og dermed dårligere flyteegenskaper.
- **Bruk av sekundær sand** med stort finstoffinnhold (maskinsand/ fillersand). Bruk av maskinsand har en tendens til å gi større viskositet enn ønskelig. Vasket maskinsand kan være å foretrekke.
- **Bruk av fillere**, f.eks. kalksteinsfiller.

I tillegg kan matriksens egenskaper modifiseres ved å endre sammensetningen av bindemidlet uten å påvirke masseforholdet:

- **Sement.** Sementens finmalingsgrad, kjemiske sammensetning og innholdet av pozzolane materialer som for eksempel flyveaske kan påvirke både stabilitet og flyteevne i betongen. Forskjellene mellom sementtypene med hensyn til betongens støpelighet er generelt større i SKB enn i OKB.
- **Silikastøv.** Silikastøv har en gunstig effekt på betongens stabilitet. Store volum silikastøv (f.eks. mer enn 5 % av sementmengden) kan imidlertid gi en markert dårligere flyteevne i betongen (økt flyteskjærspenning).
- **Luftinnførende tilsetningsstoff.** Økt luftinnhold gir i praksis både større matriksvolum og redusert viskositet i matriksen, men også bedre stabilitet (økt kohesivitet).

Det kan være vanskelig å kontrollere luftinnholdet i betong med høyt finstoffinnhold. Dersom luftinnholdet økes til mer enn ca. 5 %, kan det være vanskelig å oppnå god nok flyteevne pga. økt kohessivitet. (Betongens luftinnhold regnes ofte ikke inn i matriksvolumet, heller ikke i figur A6. Ved bruk av luftinnførende tilsetningsstoff for å forbedre betongens støpelighet er det likevel naturlig å betrakte det økte luftinnholdet som en del av matriksvolumet).

- **Stabilisator (VMA).** Bruk av stabilisator er først og fremst aktuelt i betonger med høyt masseforhold og/eller fillerunderskudd, der det kan være vanskelig å oppnå stort nok matriksvolum uten at det oppstår separasjon.
- **Tilsetning av flygeaske** kan være et effektivt virkemiddel, både med hensyn til økning av matriksvolum og stabilitet.

1.3.1 Sement

De fleste konstruksjonssementene i det norske markedet er egnet til bruk i SKB. Det er vesentlige forskjeller i bruksegenskapene, og sementtypene kan ikke uten videre erstatte hverandre uten at det gjøres andre endringer i resepten. Forskjellene i bruksegenskaper er generelt større i SKB enn i OKB.

Bruksegenskapene er svært avhengig av både klinkersammensetning, tilsetningsmaterialer i sementen og finmalingsgrad. Finmalte sementer gir høy flytmotstand i matriksen, og dermed stort matriksbehov, men til gjengjeld meget stabil betong. Grovmalte sementer gir lavere flytmotstand, dårligere stabilitet i SKB, og er derfor ofte mindre egnet til betong i bestandighetsklasse M60 og lave fasthetsklasser, spesielt dersom betongene ellers har lite finstoff.

1.3.2 Silikastøv

Nesten all SKB produsert i Norge, både høye og lave fasthetsklasser, inneholder silikastøv. Silikastøvet bidrar til betydelig bedre stabilitet mot vannutskillelse og steinseparasjon. Dersom mengden silikastøv blir for stor øker betongens flyteskjærspenning uten at dette enkelt kan kompenseres ved hjelp av tilsetningsstoffer. Dette fører til at flyteevnen avtar, og betongen mister noe av sin selvkomprimerende evne. Grenseverdien for mengden silikastøv avhenger sterkt av matrikssammensetningen. I lave og moderate fasthetsklasser er det vanlig å bruke maksimalt 4-5 % silikastøv. Det finnes likevel eksempler på bruk av inntil 10 % silikastøv i lave fasthetsklasser, men dette er først og fremst aktuelt når det ikke er mulig å redusere vann/pulverforholdet tilstrekkelig ved hjelp av filler fra tilslaget eller tilsatt filler. I høye fasthetsklasser kan mengden ofte økes til 8-10 % uten at dette går ut over betongens flyteevne i for stor grad.

1.3.3 Flygeaske

Flygeaske brukes typisk for å redusere sementforbruket, men kan også brukes for å øke matriksvolumet og stabiliteten. I tillegg kan flygeaske bidra til reduksjon av maksimal temperaturutvikling i kjerner på konstruksjoner som reduserer spenninger som kan føre til riss. Flygeaske er også en meget effektiv filler, og kan tilsettes direkte i betongen.

1.3.4 Tilsetningsstoff

Superplastiserende tilsetningsstoff

All SKB inneholder superplastiserende tilsetningsstoff (SP-stoff). Når man skal produsere SKB er det en stor fordel å ha tilgang til et SP-stoff som gir full effekt ganske raskt, slik at blandeoperatøren ser virkningen av SP-stoffet i blandemaskinen, både på kamera og wattmeter.

Det er en god regel å prøve og unngå etterdosering av SP-stoff på byggeplass, særlig i SKB. Faren for separasjon er ofte større i SKB. SP-stoffet som sendes med betongbilen kan gjerne være fortynnet 1:1 med vann eller være av en noe mindre effektiv type, nettopp for å unngå for høy etterdosering og separasjon.

Stabiliserende tilsetningsstoff

Stabiliserende tilsetningsstoffer påvirker viskositeten til pasta- og matriksfasen i betongen. Som navnet tilsier, så øker betongens stabilitet ved økende dosering stabiliserende tilsetningsstoff. Man kan dermed si at stabiliserende tilsetningsstoff virker motsatt av SP-stoffer.

Stabiliserende tilsetningsstoff kan være aktuelt å benytte i SKB når tilslaget man benytter har utfordringer/begrensninger og gir økt risiko for separasjon i betongen.

Stabiliserende tilsetningsstoff som benyttes i moderate doseringer vil som regel gi mindre utslag på flytegenskaper så lenge betongen er i bevegelse. Effekten vises best når betongen står i ro i forskalingen og gir tydelig effekt på separasjonsevne.

Retarderende tilsetningsstoff

Ved lang transport eller i varme perioder kan det være aktuelt å benytte retarder i SKB. Vær klar over at de fleste retarderende stoffer også gir litt vannreduksjon og bidrar med flyt i betongen.

Luftinnførende tilsetningsstoff

Luftinnførende tilsetningsstoff (L-stoff) omdanner luft til små mikroporer, og disse gir stabilitet i betongen og kan forbedre pumpbarheten av SKB. L-stoff kan derfor også benyttes i SKB som ikke er beskrevet som frostbestandig. Det advares mot å bruke L-stoff i betong til gulv som skal stålglattes.

Akselererende tilsetningsstoff

Det finnes en rekke akselererende tilsetningsstoffer på markedet. Noen akselererer størkning av betong, og andre akselererer herding av betong. Noen tilsetningsstoffer kan også være en kombinasjon av størknings- og herdningsakselerator. Disse kan med fordel utnyttes til å redusere trykk på forskaling ved f.eks. støp av vegger med SKB. SKB er mer flytende en OKB og trykk på forskaling vil som regel være høyere når SKB benyttes. Ved bruk av denne teknologien er det viktig å vite hva man gjør og eventuelt gjennomføre forsøk i forkant for å finne optimal dosering. Kostnadene ved bruk av akselerator øker noe, men dette vil kunne resultere i raskere fremdrift.

Herdningsakselerator vil i tillegg gjøre det mulig å støpe i kalde omgivelser og samtidig unngå frostskafer og kunne rive forskaling neste dag. Dosering bør tilpasses temperaturforhold på den aktuelle støpedagen/-perioden. Betongprodusent må ha kunnskap og erfaring om doseringsbehov i forhold til temperatur.

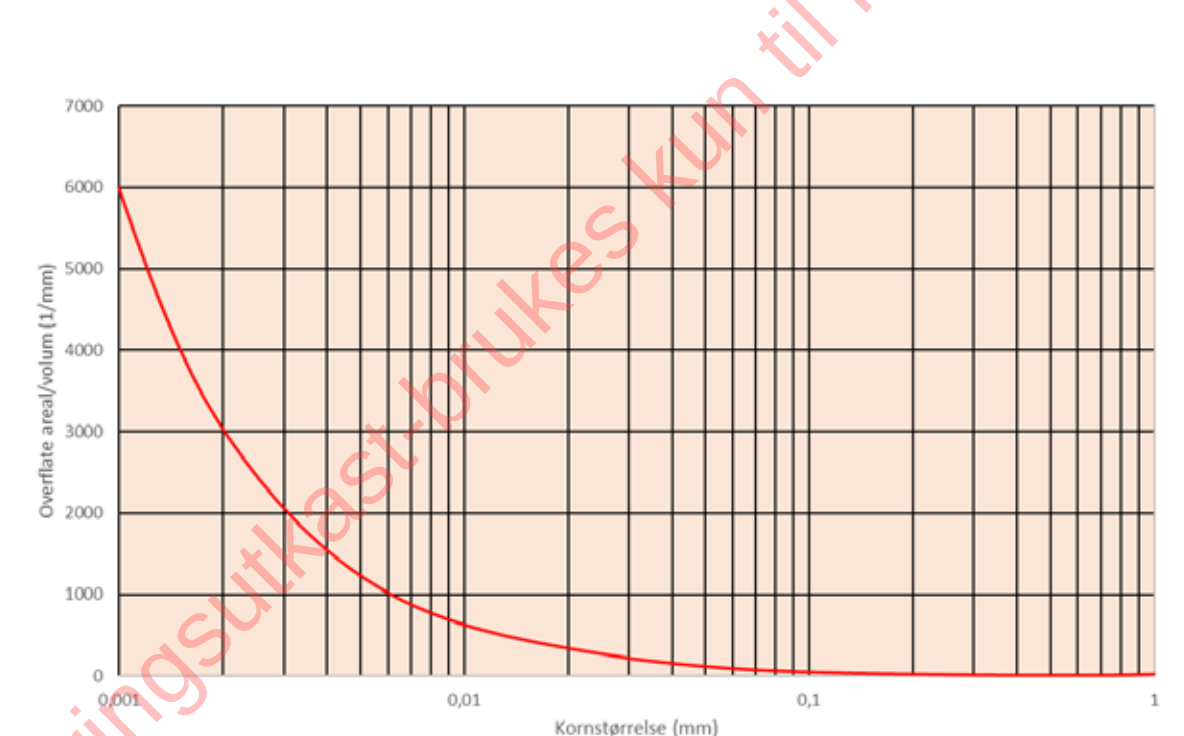
Svinnreduserende tilsetningsstoff

Svinnreduserende tilsetningsstoffer reduserer overflatespenningen til vannet i betongporene, og reduserer derfor uttørkningssvinn. Effekten av stoffene kan variere mellom ulike leverandører, så følg leverandørens anbefalinger om bruk og dosering.

1.3.5 Finstoff og fillere

I henhold til NS-EN 12620 er filler tilslag som passerer kornsikten 0,063 mm. Denne publikasjonen velger å bruke matriksdefinisjon (tilslag <0,125 mm) fordi partikler mellom 0,063-0,125 mm påvirker egenskapene til betongen i tilnærmet samme grad.

Tilslagets filler trenger ikke å utgjøre mer enn 50 kg/m³ betong, likevel representerer det 80-90 % av tilslagets samlede overflateareal. I SKB tilsvarer dette i størrelsesorden 10-20 % av sementens overflateareal. En økning i fillermengden gir økning i matriksvolumet, men også økt flytmotstand i matriksen, fordi det store overflatearealet binder vann. Den totale effekten av en slik økning i fillermengden på flyteevnen i SKB avhenger av hvilken flytmotstand matriksen har i utgangspunktet. En kan forbedre stabiliteten til betongen ved å tilsette filler i finstofffattige betonger, mens i fillerrike vil tilsetning av filler gjøre betongen seig. Større svingninger i filler- og finstoffvolumet endrer egenskapene til betongen betraktelig (se figur A9).



Figur A9 Overflateareal som funksjon av kornstørrelse

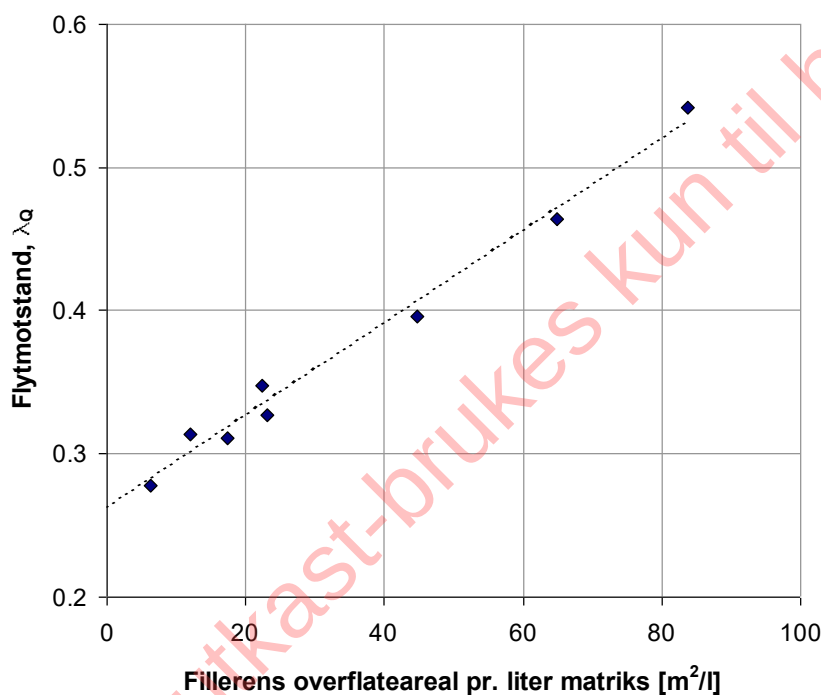
Hvordan en partikkel under en viss størrelse opptrer når den er omsluttet av vann er styrt av overflateegenskapene, og ikke tyngden eller formen av partikkelen.

Økt overflatevolum skaper tilsvarende et økt vannbehov for betongen. Et tilslag med store variasjoner i finstoffvolumet, vil gjøre det vanskelig å skape en forutsigbar SKB med riktige egenskaper.

For å unngå store svingninger i egenskapene til en SKB kan det være hensiktsmessig å følge SVV R762 Prosesskode 2 sine skjerpede krav for avvik fra siktestørrelse.

Ulike fillere har egenskaper som spanner over et bredt register, alle typer fillere er ikke like godt egnet til SKB. Fillernes egenskaper i fersk betong bestemmes av finheten (overflatearealet), partikkelstørrelsesfordelingen, partikkelform og mineralogi.

Figur A10 viser eksempel på sammenhengen mellom matriksens flytmotstand og fillerens overflateareal pr. liter matriks. Sementens overflateareal er ikke regnet med. I figuren er det kun fillerens finhet som er variert. I praksis kan overflatearealet økes ved enten å tilsette mer filler, eller ved å bruke en mer finkornet filler. Begge deler gir en entydig økning i flytmotstanden.



Figur A10 Effekten av fillerens finhet på matriksens flytmotstand.

Bruk av kalkfiller eller tilsvarende type fillere gir en meget effektiv økning i matriksvolumet, og kunne vært et alternativ for produsenter som har et stort produksjonsvolum SKB. Bruk av slike fillere vil i de fleste tilfeller gi bedre materialtekniske og økonomiske løsninger enn bruk av andre tilsetningsmaterialer eller tilsetningsstoffer for å bedre flyteevnen og/eller øke stabiliteten. Verken bruk av silikastøv eller stabilisatorer gir økning i matriksvolumet av betydning, og den økte stabiliteten må derfor nødvendigvis føre til redusert flyteevne i betongen, og dermed økt forbruk av superplastiserende tilsetningsstoff. I Sverige er bruk av industrielle fillere (ulike typer kalkfiller,

Microfiller, Minifiller) mer utbredt. Svenskene har delvis brukt store volum fillere også i høykvalitets SKB, og får dermed stort matriksoverskudd og meget viskøse (seige) betonger.

Figur A6 indikerer at matriksvolumet i en OKB med masseforhold 0,60 må økes med bortimot 40 liter for at betongen skal kunne bli selvkomprimerende. Dersom 15 liter oppnås ved økning av betongens luftinnhold må fillervolumet i betongen økes med 25 liter. Dette er normalt for mye til å kunne oppnås ved økning i sandmengden. Her er det derfor aktuelt å øke matriksvolumet ved både å øke grusmengden og kombinere med en fillerrik «sekundærsand», eventuelt tilsette ren filler.

Dersom man ved proporsjonering av en selvkomprimerende M60-betong tar utgangspunkt i en høyfast betong med tilfredsstillende støpelighetsegenskaper, kan man rent hypotetisk betrakte bruk av rene fillere som en sementerstatning. Under gitte forutsetninger kan man f. eks erstatte 100 kg av sementen i en M40-betong med like stort volum filler (f.eks. ca. 85 kg kalksteinsfiller), og dermed få en M60-betong med selvkomprimerende egenskaper. Dette forutsetter at filleren har like gode egenskaper i støpelighetsmessig forstand som sementen. Sement har imidlertid vist seg å være en meget god «filler», og de færreste fillermaterialene kan brukes som ren «sementerstatning». Grove fillere gir dårligere stabilitet enn sement, og finkornete fillere gir seigere betong. Fillertype og -volum må derfor velges med omhu, og helst kombineres med andre virkemidler for å gi et godt resultat.

Bruk av «sekundærsand», dvs. sand med stor finstoffandel, er ofte et godt alternativ til rene fillere. Dersom vi erstatter 30% av sanden i en betong med en sand med et finstoffinnhold på 20%, får vi en effektiv økning i matriksvolumet på ca. 35 liter/m³. Sammen med en effektiv co-polymer kan dette kan være nok til å gi betongen selvkomprimerende egenskaper.

Det å ha sekundærsand tilgjengelig gir også en ekstra frihetsgrad i produksjon av ordinær betong. Fordelene er spesielt synlige ved produksjon av f.eks magerbetong eller gulv-betong. Dette betyr at rigg- og materialkostnadene kan fordeles på flere produktgrupper enn SKB, og produksjonskostnadene går ned.

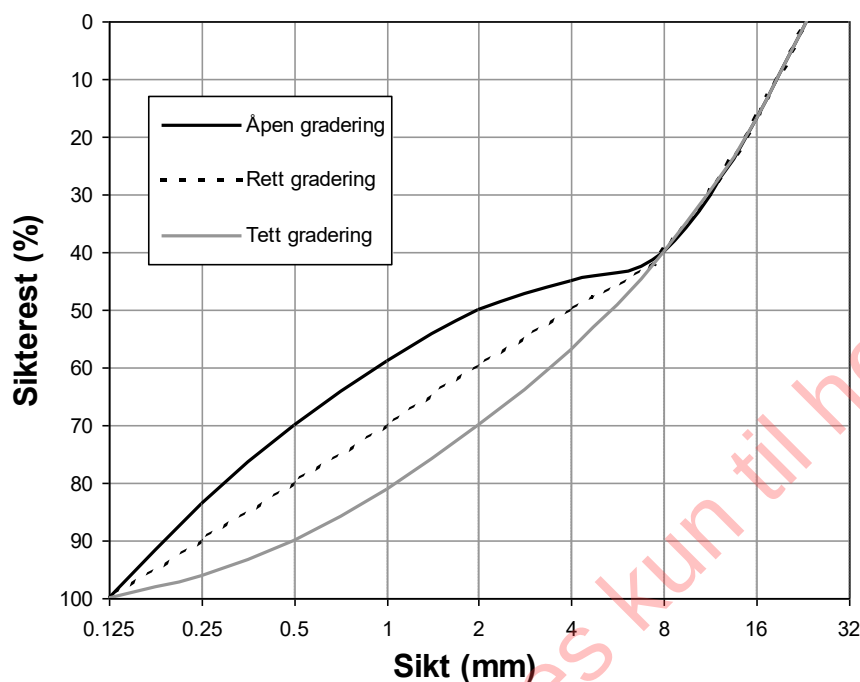
En annen gunstig bi-effekt av bruk av «sekundærsand» er at partikkelstørrelsene over fillerområdet, dvs. 0,125- 2 mm motvirker tendensen til separasjon dersom matriksen ikke har tilstrekkelig flytmotstand.

1.3.6 Sand (0/8 mm)

Sandens gradering har betydning for tilslagets samlede hulrom. En åpen gradering (pukkel) gir større hulrom enn en tett gradering, se figur A11. En åpen gradering er imidlertid ikke like følsom for kornform og overflatestruktur som en tett gradering, rett og slett fordi partikkel-kontakten er mindre når hulrommet øker. Legg merke til at graderingene i figur A11 gjelder tilslag uten filler, dvs. partikkelsystemer iht. partikkel-matriksmodellen.

For OKB vil et tilslag med en rett kurve og god kornform ofte være å foretrekke, dersom betongen er partikkeldominert. For matriksdominerte betonger, som SKB, kan man med fordel velge en tett gradering, fordi partikkelkontakt og friksjon spiller en mindre rolle når matriksoverskuddet sikrer avstand mellom partiklene. Tett gradering gir dermed det mest «effektive» matriksoverskuddet, fordi hulrommet i det samlede tilslaget er lavt.

Forskjellen i samlet hulrom mellom de tre graderingene som er vist i figur A11 er ca. 3 %, tilsvarende 30 liter matriks pr m^3 betong. I følge figur A3 kan dette utgjøre forskjellen på helt stiv betong (50 mm synk) og flytbetong (250 mm synk). I SKB kan 30 liter matriks tilsvare forskjellen på en betong med synkutbredelse på 500 mm, og en på 700 mm (forutsatt at matriksens flytmotstand er i området 0,50-0,60).



Figur A11 Åpen, rett og tett tilslagsgradering (filleren utelatt).

1.3.7 Grovt tilslag (8/16 og 16/22mm)

Sand /stein - fordelingen og største steinstørrelse påvirker det samlede tilslagets hulrom. SKB har ofte større sandandel og redusert steinstørrelse sammenlignet med OKB. Større sandandel gir mer filler, større matriksvolum og bedret stabilitet, mens redusert steinstørrelse gir mindre blokkeringsfare og mindre fare for segregering av grovt tilslag.

Steinandelen (av totalt tilslag) i SKB er gjerne noe mindre enn i OKB basert på det samme tilslaget. Samtidig kan største steinstørrelse være redusert fra f.eks. 22 mm til 16 mm. Dette kan ifølge figur A2 gi en økning i tilslagets samlede hulrom på ca. 1,5 %. Endringen i tilslagssammensetning alene tvinger dermed fram en økning i matriksvolumet på 15 l/m^3 , uavhengig av hvor stort matriksoverskudd som må til for å gi betongen selvkomprimerende evne.

Dersom betongen har tilstrekkelig fillerinnhold, matriksen har høy flytmotstand og blokkeringsfaren er liten, bør både steinandelen og største steinstørrelse velges slik at nødvendig matriksvolum holdes på et moderat nivå. Ved proporsjonering av SKB ligger en av de største utfordringene nettopp i å finne en tilfredsstillende balanse mellom tilslagssammensetningen og matriksvolumet.

Mange velger å redusere steinstørrelsen ved produksjon av SKB. I de fleste tilfellene vil det imidlertid være fordelaktig å beholde den grove steinen. Tilslagets samlede hulrom er lavere ved bruk av grov stein, og steinfordelingen blir mer gunstig, dvs. vi får færre stein i samme størrelsesområde. Økt matriksoverskudd og redusert partikkelinterferens vil dermed gi bedre flyteegenskaper i betongen med samme matriksvolum.

Høringsutkast-brukes kun til høringsformål

Høringsutkast-brukes kun til høringformål