

Självkompakterande betong

Rekommendationer för användning

Betongrapport nr 10, utgåva 2

Svenska Betongföreningen

SBUF stödjer
forskning & utveckling

som leder till
praktisk handling

Betongrapport nr 10, utgåva 2 - 2020
Svenska Betongföreningen
100 44 Stockholm

ISSN
ISRN SBF
ISBN

Självkompakterande betong

Rekommendationer för användning

Betongrapport nr 10, utgåva 2

Förord

Kommittén har utgjorts av en arbetsgrupp om sex personer och en större referensgrupp. I vanlig ordning har kommittén haft att följa Betongföreningens policy att skapa konsensus om rapportens innehåll. Arbetsgruppen har berömvärt hanterat dessa skilda synpunkter. Det har krävt en betydande insats. Betongföreningen vill därför tacka såväl arbetsgrupp som referensgrupp för ett väl utfört arbete. Ett särskilt tack riktas till

Denna rapport har tillkommit genom bidrag från Abetong, BASF AB, Cements AB, Grace AB, SBUF, Sika Sverige samt Trafikverket. Därutöver har kommittémedlemmarnas arbetsinsatser till stor del bekostats av respektive arbetsgivare. Till dessa finansierare riktar Svenska Betongföreningen sitt djupt kända tack.

Stockholm i juni 2020

Henrik Vinell

Ordförande i Svenska Betongföreningen

Hösten 2014 tillsatte Svenska Betongföreningen en kommitté för att revidera betongrapport nr 10 om självkompakterande betong från 2002. Arbetet har bedrivits i en stor arbetsgrupp bestående av ett 15-tal experter inom området. De flesta av experterna har också varit författare till olika kapitel eller avsnitt i rapporten. P.g.a. olika omständigheter har arbetet bedrivits olika snabbt. En del kapitel skrevs redan under 2015 och 2016 medan andra kommit långt senare. Denna rapport innehåller huvudsakligen nya texter, medan några är mer eller mindre återgivningar av texten i utgåva 1.

Stockholm i juni 2020

Johan Silfwerbrand

Ordförande i Svenska Betongföreningens kommitté för revidering av SKB-rapporten

Innehåll

Förord	3
Innehåll	5
Sammanfattning	9
Introduktion	11
I Bakgrund	11
II Kommitténs sammansättning	11
III Kommitténs uppgift	12
IV Rapportens avgränsningar	12
V Finansiering	12
VI Referenser	12
1. Inledning	13
1.1 Historik	13
1.2 Materialfrågor	13
1.3 Konstruktionsfrågor	14
1.4 Produktionsfrågor	15
1.5 Arbetsmiljöfrågor	16
1.6 Referenser	16
2 Begrepp	17
2.1 Inledning	17
2.2 Delmaterial och sammansättning	17
2.3 Reologiska begrepp	18
2.4 Arbetbarhetsbegrepp	19
2.5 Mätmetodsbegrepp	20
2.6 Referens	21
3. Krav	23
3.1 Allmänt	23
3.2 Krav på materialet	23
3.3 Krav på konstruktionen	24
3.4 Krav på utförandet	25
3.5 Referenser	25
4. Reologi	27
4.1 Definitioner	27
4.2 Skjuvhastighet och skjuvspänning	27
4.3 Newtons vätskemodell	28
4.4 Bingham's vätskemodell	29
4.5 Herschel-Bulkley-modellen	30
4.6 Tixotropi	31
4.7 Strukturuppbyggnad	31
4.8 Referenser	33
5. Delmaterial	35
5.1 Ballast	35
5.2 Tillsatsmaterial	35

5.3	Cement.....	36
5.4	Tillsatsmedel.....	37
5.5	Blandningsvatten	38
5.6	Referenser	38
6.	Proportionering av SKB.....	39
6.1	Krav för att uppnå SKB.....	39
6.2	Krieger-Dougherty-ekvationen.....	41
6.3	Reologiskt målområde för SKB.....	43
6.4	Styrning av reologin hos SKB	46
6.5	Beräkningsmodell för passeringsförmåga.....	48
6.6	Referenser	51
7.	Blandning och transport.....	53
7.1	Allmänt.....	53
7.2	Blandning.....	53
7.3	Kontroll av den färska betongen	55
7.4	Transport och före lossning	56
7.5	Referenser	56
8.	Fiberbetong	59
8.1	Inledning	59
8.2	Stabilitet och separation	59
8.3	Fibernas orientering.....	59
8.4	Referenser	60
9.	Konstruktiva aspekter.....	63
9.1	Allmänt.....	63
9.2	Hållfasthet.....	63
9.3	Krympning	64
9.4	Krypning	65
9.5	Förankring av armering.....	65
9.6	Vidhäftning mellan betong och SKB	65
9.7	Täckande betongskikt.....	66
9.8	Minsta avstånd mellan armeringsenheter	66
9.9	Tvärkraftskapacitet	67
9.10	Referenser	67
10.	Beständighet.....	69
10.1	Karbonatisering.....	69
10.2	Kloridinträngning.....	70
10.3	Sulfatbeständighet.....	71
10.4	Frostbeständighet.....	71
10.5	Alkali-silikareaktioner (ASR)	72
10.6	Motstånd mot kemisk nedbrytning	73
10.7	Referenser	73
11.	Brand.....	77
11.1	Fenomenet brandspjälkning	77
11.2	SKB och brandspjälkning.....	78
11.3	Pp-fibrer som effektiv åtgärd mot brandspjälkning.....	78
11.4	Proportionering	80

11.5	Tillgängliga rekommendationer.....	80
11.6	Referenser.....	81
12.	Formtryck.....	83
12.1	Betydelsen av korrekt formbyggnad.....	83
12.2	Parametrar som inverkar på formtryck.....	83
12.3	Beräkningsmodeller för formtryck.....	85
12.4	Rekommendationer.....	93
12.5	Referenser.....	93
13.	Estetiska aspekter.....	97
13.1	Inledning.....	97
13.2	Form.....	97
13.3	Yta.....	97
13.4	Betonggolv.....	97
13.5	Referens.....	98
14.	Arbetsmiljö.....	99
14.1	Allmänt om arbetsmiljö på byggarbetsplatsen.....	99
14.2	Självkompakterande betong.....	103
14.3	Referenser.....	104
15.	Mottagningskontroll och lossning.....	107
15.1	Allmänt.....	107
15.2	Provtagning.....	107
15.3	Lossning.....	109
15.4	Justering av konsistens.....	109
15.5	Referenser.....	110
16.	Pumpning och gjutning.....	111
16.1	Allmänt.....	111
16.2	Inverkan av reologiska egenskaper.....	111
16.3	Beräkning av pumptryck.....	113
16.4	Gjutteknik.....	115
16.5	Referenser.....	116
17.	Numerisk modellering av färsk betongs rörelse.....	119
17.1	Numerisk simulering av SKB.....	119
17.2	DEM.....	119
17.3	CFD.....	120
17.4	Modeller.....	121
17.5	Simulering av kanalströmning och reologi på arbetsplatsen.....	122
17.6	Referenser.....	125
18.	Gjutveck.....	127
18.1	Orsaker bakom gjutveck.....	127
18.2	Konsekvenser av gjutveck.....	128
18.3	Undvikande av gjutveck.....	129
18.4	Referens.....	130
19.	Gjutning mot form, formrivning och ytor.....	131

20.	Efterbehandling	133
Appendix A – Praktikfall Stäket		
A.1	Spännande utveckling av SKB för tunnelling i Stäket	135
A.2	Utmaningen 1999	135
A.3	Krav på betongen	136
A.4	Lining av monolit 6 i Stäkettunneln	136
A.5	Slutsatser 1999 och i dag	137
A.6	Referenser	140
Appendix B – Praktikfall Kapellskär		
B.1	Beskrivning av projektet och erfarenheter från det	141
B.2	Utförande	143
B.3	Referenser	145
Appendix C – Vanliga provningsmetoder		
C.1	Flytsättnått	146
C.2	L-lådan	147
C.3	Referenser	148

Sammanfattning

Självkompakterande betong (SKB) utvecklades på 1990-talet och vårt land var ett av föregångsländerna. Stora forskningsprojekt drogs igång, dåvarande Vägverket var tidigt framme och göt en bro i SKB och den första internationella konferensen inom området arrangerades i Stockholm 1999. Svenska Betongföreningen gav ut betongrapport nr 10 om just SKB redan 2002. Förhoppningen var att den skriften skulle underlätta användningen av detta material.

Nu har det gått nästan 20 år sedan betongrapport nr 10 gavs ut. Användningen av SKB har ökat, men är ojämn. Materialet används mycket inom förtillverkad betong men betydligt mer sällan inom platsgjuten betong. En orsak är svårigheterna att tillverka en SKB med de stora krav på robusthet som byggarbetsplatsen ställer för att minimera riskerna för fel och omgjutning.

Denna andra utgåva av betongrapport nr 10 är väsentligt omarbetad och innehåller dessutom flera nya kapitel. Kapitlen om reologi och proportionering är gedigna och lägger grunderna till gjutning av SKB. Utan förståelse av den färiska självkompakterande betongens egenskaper i färiska stadiet ökar risken för fel. Vi behöver beakta både tixotropi och tillstyvnande.

Fiberbetong har utvecklats parallellt med SKB och kombinerar man SKB med fibrer finns potential för ett verkligt rationellt betongbyggande. Ifall spännvidderna är stora behövs fortfarande konventionell armering men självkompakterande fiberbetong vinner terräng och det behandlas i ett annat nyskrivet kapitel.

Sedan utgåva 1 trycktes har kunskapen om beständighet och brandbeständighet ökat kraftigt vad gäller SKB. Man har observerat problem som thaumasit och brandspjälkning men också tagit fram lösningar så att dessa problem kan bemästras.

När den självkompakterande betongen var ny fanns det farhågor för stora formtryck i närheten av fullt vätsketryck för en vätska med densiteten 2,4 gånger vattnets. Forskningen visar dock att formtrycket i allmänhet inte blir lika stort som befarat. Internationellt har ett antal modeller för beräkning av formtryck utvecklats och de sammanfattas i det nya kapitlet om formtryck.

I denna utgåva finns även nya kapitel om mottagningskontroll, lossning, pumpning och gjutning; alla viktiga moment för att nå ett gott resultat. Sedan några år tillbaka finns det även möjlighet att numeriskt beräkna självkompakterande betongens flöde i formen. I en inte alltför avlägsen framtid kan numeriska beräkningar underlätta proportioneringen av betongen och utformningen av formen och armeringen så att betongen och dess omgivning harmonierar med varandra.

Rapporten avslutas med två praktikfall, ett äldre från Stäket och ett nyare från Kapellskär. Det är erfarenheterna från praktiken som ger oss möjligheter att skapa den bästa självkompakterande betongen.

Introduktion

I Bakgrund

Självkompakterande betong introducerades i vårt land under mitten av 1990-talet.

År 2002 publicerade Svenska Betongföreningen en rapport innehållande rekommendationer för användning (Betongrapport nr 10). Kommittéarbetet leddes av Åke Skarendahl med Peter Billberg som sekreterare och utredningsman. Sverige var en pionjär för SKB i Europa och rapporten översattes därför direkt till engelska (Betongrapport nr 10E). Nu har det gått 12 år sedan publiceringen och utvecklingen har gått framåt. Inom segmentet förtillverkad betong utförs nästan allt utom det som skapas med jordfuktig konsistens (håldäck och marksten, t.ex.) med SKB. Inom segmentet platsgjuten betong har det gått trögare. En viktig orsak är att entreprenörerna upplever en stor osäkerhet i hur befintliga referenser skall omsättas i rekommendationer för utförande av platsgjutna konstruktioner i SKB. Användningen av SKB inom platsgjuten betong varierar över vårt land. Det finns geografiska områden där användningen är hög medan SKB knappast används alls i andra områden. En hög lokal användning beror i sin tur på ett framgångsrikt samarbete mellan en lokal betongfabrik och entreprenör. Här gäller det att dra nytta av dessa erfarenheter och söka sätta dem på pränt i en ny rekommendationsrapport.

Sedan den tidigare SKB-rapporten gavs ut har ny kunskap tagits fram bl.a. om nya tillsatsmedel, stabilitet, robusthet och formtryck (Billberg, 2013; McCarthy & Silfwerbrand, 2014, är två svenska exempel). Det finns även nya provningsmetoder och längre erfarenhet av dem som togs fram först. Helt nytt sedan publiceringen är forskning som handlar om numerisk simulering av den färskas betongens rörelse (Gram, 2009). Syftet med den numeriska simuleringen är att skapa verktyg med vars hjälp man i förväg kan analysera och optimera gjutningen i en komplicerad och kraftigt armerad armeringskonstruktion.

II Kommitténs sammansättning

Svenska Betongföreningens kommitté för revidering av SKB-rapporten har haft följande utseende (kapitel- och avsnittsförfattare har markerats med *):

Arbetsgrupp

David Bergschöld, APJ

Peter Billberg, Swerock (numera Nordcert)*

Jonas Carlswärd, Betongindustri

Mats Emborg, Betongindustri & LTU

Oskar Esping, Thomas Betong

Annika Gram, CBI Betonginstitutet (numera KTH)

Hans Hedlund, Skanska, LTU & SBUF

Robert Jansson McNamee, SP Brandteknik (numera Brandskyddslaget)

Ingemar Löfgren, Thomas Betong & Chalmers*

Richard McCarthy, CBI Betonginstitutet (numera Linotolgov)

Håkan Nykvist, BASF*

Johan Silfwerbrand, KTH*

Peter Simonsson, Trafikverket*

Jan Trägårdh, CBI Betonginstitutet (numera RISE)*

Kjell Wallin, Projektengagemang (numera Bostek)*

Mikael Westerholm, Cementa

Referensgrupp

Arbetsgruppen samt
Hans-Erik Gram, Cementa
Markus Peterson, Svensk Betong
Iad Saleh, NCC

Ledamöterna i kommittén har i första hand deltagit i egenskap av enskilda personer med specifika erfarenheter och ett specifikt kunnande från problemområdet, och inte speciellt i rollen som företrädare för sina arbetsgivare.

III Kommitténs uppgift

Målet med kommittéarbetet är att revidera Svenska Betongföreningens rapport nr 10 om självkompakterande betong. Syftet med revideringen är att främja utvecklingen av självkompakterande betong, lyfta fram dess arbetsmiljömässiga, tekniska och ekonomiska fördelar samt öka användningen av SKB genom råd och rekommendationer för entreprenörer.

IV Rapportens avgränsningar

Kommittéarbetet syftar till att sammanställa och presentera dagens kunskap på ett tydligt och pedagogiskt sätt. Det kommer däremot inte att innehålla några nya FoU-projekt.

V Finansiering

Svenska Betongföreningen har fått ekonomiskt stöd för kommittéarbetet från Abetong, BASF, Cementa, Grace, SBUF, Sika, Trafikverket. Enskilda arbetsinsatser från kommittémedlemmarna har dessutom i stor utsträckning bekostats av respektive arbetsgivare.

VI Referenser

Billberg P: Utvärdering av formtrycksmodeller vid gjutning med SKB. Stockholm: CBI Betonginstitutet. Teknisk rapport, 2013, 46 s.

Gram A: Numerical Modelling of Self-Compacting Concrete Flow. Stockholm: KTH, Skolan för arkitektur & samhällsbyggnad, institutionen för byggvetenskap, avdelningen för betongbyggnad, 2009. Licentiatavhandling, Bulletin nr 99.

McCarthy R & Silfwerbrand J: Självkompakterande betong i anläggningsbyggandet – fullskaleförsök. Stockholm: CBI Betonginstitutet, 2014. SBUF-rapport, 24 s.

Självkompakterande betong – Rekommendationer för användning. Stockholm: Svenska Betongföreningen, 2002. Betongrapport nr 10, 2002, 82 s.

1. Inledning

1.1 Historik

Självkompakterande betong har potential att revolutionera betongbyggnadstekniken. Vibrering av betongmassan kan utelämnas vilket radikalt förbättrar arbetsmiljön vid platsgjutning och i elementfabrik. Byggproduktionen kan effektiviseras genom förenklade och snabbare gjutningsförfaranden. Den färdiga konstruktionens kvalitet kan förbättras genom ökad homogenitet hos den hårdnade betongen. Det är svårt att finna ett nytt område inom stombyggnadstekniken som har så stor potential till förbättringar av produktivitet och kvalitet som den självkompakterande betongen.

SKB, som ursprungligen är en japansk idé, började studeras och användas i Sverige i mindre skala under 1990-talets senare hälft. Ett flertal fullskaleprojekt, bl.a. av broar, genomfördes på ett framgångsrikt sätt och skapade grund för en bredare användning. Trots detta, och trots alla potentiella fördelar, har SKB fått en förvånansvärt liten marknadsandel i Sverige. I genomsnitt utgör SKB enbart 5-10 % av den totala svenska fabriksbetongproduktionen. Stora lokala variationer finns dock. Enstaka betongföretag har lokalt lyckats få upp andelen till 30 à 50%. Användningen vid prefabtilverkning är betydligt mer utbredd – mellan 40 och 70 % av all prefabbetong vid de olika produktionsenheterna utgörs av SKB.

Inom prefab utgör SKB i princip 100 % för alla produkter där SKB är det bästa alternativet. Undantag utgörs av t.ex. håldäck och marksten.

Det finns flera orsaker till den begränsade användningen av självkompakterande fabriksbetong. Kunskapsbrister, såväl teoretiska som praktiska, när det gäller sammansättning, produktion och gjutning av den färska betongmassan är stora. Detta har medfört ett antal misslyckanden som hållit tillbaka användningen. Det finns även kunskapsbrister när det gäller väsentliga materialegenskaper, t.ex. mekaniska egenskaper, långtidsegenskaper och beständighet vilket gör att man visar en viss tveksamhet till SKB i avancerade konstruktioner. En annan viktig anledning till den mindre omfattande användningen av SKB är okunskap hos materialleverantörer, betongtillverkare, beställare och entreprenörer om materialets möjligheter.

Här bör man nog lägga till bristande robusthet, större risk för problem vid gjutningen, osäkerhet kring formtryck samt högre materialkostnad.

1.2 Materialfrågor

SKB innehåller normalt stor mängd filler. Ofta består denna av kalksten som kan vara av olika ursprung. Sådan filler anses ofta vara inert, dvs. den deltar inte i cementreaktionen. Å andra sida är det rätt väl belagt att hållfastheten vid konstant v_{ct} är betydligt högre i SKB med kalkstensfiller än i motsvarande betong utan filler. Orsaken är inte helt klarlagd. Den kan bero på någon fysikalisk effekt, t.ex. förbättrad materialstruktur med mindre naturliga defekter (jfr. s.k. *Defect Free Cement Paste* som bara genom förbättrad mikrostruktur gav tryckhållfasthet av storlek kring 150 MPa) eller förbättrad vidhäftningszon mellan grov ballast och cementpasta. Det finns även andra möjligheter av fysikalisk karaktär, t.ex. en förtätning av cementpastans struktur samt fillermaterialets kornstorlek och kornform. Ökningen av hållfasthet kan också bero på kemisk reaktion mellan cementkomponenter och filler vilken i sin tur ger tätare porstruktur och mindre porositet.

Det är otillfredsställande att vi inte vet bakgrunden till observerade hållfasthetseffekter hos SKB och effekter på andra egenskaper, t.ex. transportegenskaper. Eftersom förklaringen till

observationerna med all säkerhet ligger i materialstrukturen är det viktigt att utreda vad som sker med denna när stor mängd ”inert” fyller tillsätts betong.

Även andra med säkerhet reaktiva fyller används i SKB, t.ex. glasfiller (fungerar endast i de fall, t.ex. inomhus, där risken för alkalikiselreaktion kan uteslutas). Dessa påverkar med all säkerhet materialstrukturen och materialegenskaperna. Även s.k. konsistensförbättrande och stabiliserande tillsatsmedel kan tänkas påverka strukturen.

Här behöver vi göra en uppdatering. En hel del forskning har ju ägnats åt SKB med stabiliserande tillsatsmedel (VMA), inte minst vid CBI Betonginstitutet genom P Billberg & M Westerholm.

Förutsättningen för användning av självkompakterande betong är att förmågan hos betongen att kompaktera sig själv är tillräckligt hög och kvarstår under tillräckligt lång tid. Betongens egenskaper i dessa avseenden beror på dess sammansättning, där framförallt samspelet mellan bindemedel, tillsatsmedel och fyller är fundamentalt. Små variationer hos någon av dessa komponenter kan få avgörande betydelse för betongmassans självkompakterande egenskaper. Det är viktigt att den färska betongen är robust, dvs. att den tål variationer i transporttid och temperatur och att den kan användas i olika typer av konstruktionsdelar med olika armeringsföring etc.

SKB innehåller normalt så stor mängd finmaterial att vattenseparation blir liten eller obefintlig (om man inte överdoserar flytmedlet). Detta medför mycket stor risk för plastisk krympning på grund av tidig uttorkning. Samspelet mellan betongsammansättning och plastisk krympning och krympsprickbildning måste klarläggas. Verktöget för detta bör vara studier av hur undertryck i betongen utvecklas vid olika betongsammansättning och under olika yttre klimatförutsättningar. Dessutom genomförs direkta mätningar av plastisk krympsprickbildning.

Mer om plastisk krympning och SKB finns att läsa i två doktorsavhandlingar, en från Chalmers (Esping, 2007) och en från LTU (Sayhai, 2019).

1.3 Konstruktionsfrågor

Den säkerhetsfilosofi som används för att dimensionera betongkonstruktioner bygger på att utifrån statistiskt underlag bestämma säkerhetskoefficienter. De faktorer som används för att bestämma dimensionerande materialvärden för betong är tänkta att beakta systematiska skillnader mellan de materialegenskaper som fås vid provning och den verkliga konstruktionens egenskaper. Betong har relativt stor spridning i materialegenskaper vilket delvis beror på naturlig spridning hos ingående delmaterial. Men även förfarandet på arbetsplatsen, t.ex. inverkan av komprimeringsgraden, har stor påverkan på den hårdnade betongens egenskaper.

Försök visar att hållfasthetens spridning i höjddled i en konstruktionsdel (t.ex. en vägg) är mindre ifall konstruktionsdelen är gjuten med SKB än vibrerad betong. Denna mindre spridning borde kunna utnyttjas till att reducera storleken på den säkerhetskoefficient som beaktar skillnader i hållfasthet mellan provkropp och färdig konstruktion. Syftet med denna säkerhetskoefficient (som normalt inte uttrycks explicit, utan ingår i beräkningsmodellen) är att ta höjd för denna variation.

Kvaliteten hos SKB bör vara mindre beroende av arbetsförfarandet än normalbetong. Detta bör medföra mindre skillnader mellan de materialegenskaper som erhålls vid provning av gjutna provkroppar och de som konstruktionen har. Den förväntade förbättrade materialstrukturen, t.ex. den homogenera fördelningen av ballasten och den förbättrade vidhäftningszonen mellan grov ballast och cementpasta, bör innebära mindre variation hos olika materialegenskaper. Därför borde partialkoefficienterna med avseende på bärförmåga kunna reduceras.

Den ofta framförda hypotesen att vidhäftningen mellan armering och betong är högre hos SKB har inte bekräftats på ett tillfredsställande sätt. Det har även framförts hypotesen att vidhäftningen kanske försämras eftersom betongmassan inte vibreras. Vidhäftningsegenskaper mellan olika typer av SKB och olika typer av armeringsstål bör därför undersökas.

Vet vi något mer här?

1.4 Produktionsfrågor

SKB baseras på hypotesen att man utan tillförd yttre komprimeringsenergi kan få en betong med stor homogenitet och god kringgjutning av armeringsjärnen. Denna hypotes har inte bekräftats vilket gör det tämligen riskabelt att använda SKB för betong till konstruktioner i svår miljö.

Det finns fördelar med att kombinera SKB med fiberarmering. De produktionstekniska fördelarna är att tunga och arbetskrävande moment, vibrering och montering av armering, försvinner helt eller minskar i omfattning. Det har observerats att det även finns konstruktionstekniska fördelar. En sådan är att det visat sig finnas en möjlighet att orientera fibrerna så att dessa får mera optimal fördelning. Den täta strukturen hos SKB innebär även att fibrerna kan få bättre vidhäftning.

Om en hög utnyttjandegrad av SKB också i platsgjutet betongbyggande utgör första steget i en rejäl förbättring av produktiviteten torde fibrer som ersätter konventionell armering vara det andra. Inläggning av konventionell armering är ett arbetskrävande moment både tidsmässigt och ergonomiskt. Kan vi styra fiberriktningen genom en lämplig gjutningsmetod kommer fler fibrer att göra nytta vilket medför att den totala fibermängden kan reduceras och fiberbetongen ett konkurrenskraftigare alternativ. I vissa fall kan man kombinera slakarmering och fibrer. Ett exempel är balkar där slakarmeringen inläggs för böjande moment och fibrerna för tvärkraft. Då kan momentet med inläggning av byglar elimineras och detta moment är än mer arbetskrävande än inläggning av böjarmering. Här kan även nämnas armering som rullas ut för att armera betongplattor och -bjälklag.

SKB kan ha egenskaper som påverkar produktionstekniken. Således kan den höga fillerhalten komma att öka risken för tidig krympning och sprickbildning. Vid olämplig betongsammansättning kan formtrycket komma att öka radikalt. Det är viktigt att ta fram kunskap så att dessa negativa effekter kan begränsas.

Formtryck påstås ibland bli lägre och ibland högre än hos normalbetong. Risken för höga formtryck har varit en orsak till att användningen av SKB begränsats. Med tanke på SKB:s vätskeliknande konsistens har man antagit ett formtryck motsvarande en vätskepelare med höjden lika med formens höjd och densiteten $2,4 \text{ ton/m}^3$. Inom detta område har mycket forskning under de senaste decennierna bedrivits i ett flertal länder. Forskningen visar att SKB:s tixotropi och strukturuppbyggnad innebär att man i praktiken sällan får så stora formtryck. Genom att begränsa stighastigheten kan formtrycket begränsas. Det finns empiriskt bestämda ekvationer som kan användas för dimensioneringen av formen. Ett alternativ är att mäta formtrycket med givare eller mätklockor på de stag som håller ihop formen och styra stighastigheten med utgångspunkt från uppmätt formtryck jämfört mot ett beräknat maximalt värde som formen håller för.

Ett annat produktionstekniskt problem rör betongytans egenskaper, speciellt vertikal ytor; utseende, porighet, färgskiftningar. Det är idag oklart huruvida mekanismer såsom materialegenskaper, gjutmetoder, gjutförhållande och form påverkar ytors struktur och färg.

1.5 Arbetsmiljöfrågor

En av de största fördelarna med SKB är en bättre arbetsmiljö. Genom att vibreringen blir överflödigt kan åtminstone tre konkreta förbättringar vinnas: (1) vita fingrar och andra skador förknippade med vibreringsmomentet försvinner, (2) ljudmiljön förbättras kraftigt eftersom vibreringen är kraftigt bullrande och (3) säkerheten på arbetsplatsen förbättras eftersom man hör varandra bättre. Man kan fråga sig om huruvida inte de arbetsmiljömässiga fördelarna borde väga tyngre än de nackdelar som brukar föras fram såsom bristande robusthet, större risk för problem vid gjutningen, osäkerhet kring formtryck samt högre materialkostnad. I denna rapport har arbetsmiljöfrågorna (se kapitel 15) givits stort utrymme och förhoppningen är att argumentationen för användning av SKB ur ett arbetsmiljöperspektiv skall bära frukt.

1.6 Referenser

Esping O. Early age properties of self-compacting concrete - Effects of fine aggregate and limestone filler. Göteborg: Chalmers tekniska högskola, institutionen för bygg- och miljöteknik, avdelningen för byggnadsteknologi, 2007. Doktorsavhandling.

Sayhai F. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete. Mitigation and Modelling. Luleå: Luleå tekniska universitet, institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser, avdelningen för byggkonstruktion och brand, 2019. Doktorsavhandling.

2 Begrepp

2.1 Inledning

Självkompakterade betong (inledningsvis även kallad vibreringsfri betong) är till sin principiella uppbyggnad, sitt funktionssätt och sina egenskaper i de flesta avseenden lik vanlig betong som kompakteras genom vibrering. Den för betong traditionella begreppsapparaten kan därför i stort användas men det finns behov av att använda några ytterligare begrepp som främst har att göra med delmaterial, egenskaper i det färska stadiet och provningsmetoder. De viktigaste av dessa begrepp anges nedan tillsammans med vissa redan tidigare etablerade begrepp som har betydelse för diskussionen i denna rapport. I de fall begreppen är definierade i *Betongteknisk ordlista* (Betongrapport nr 17) är de definitioner som anges nedan citat. De är dessutom markerade med en asterisk (*).

Självkompakterande betong*	betong som enbart med hjälp av gravitationskraften förmår flyta ut och fylla en form samt med god vidhäftning omsluta all armering och ingjutningsgods utan separation. Engelsk term: <i>self-compacting concrete</i> .
SKB*	synonym till självkompakterande betong. Engelsk term: <i>SCC</i> .

2.2 Delmaterial och sammansättning

Effektivitetsfaktor*	faktor som uttrycker graden av effektivitet för ett tillsatsmaterial som delvis ersätter cement. Engelsk term: <i>k-value</i> .
Ekvivalent vattencementtal*	effektiv vattenhalt dividerad med summan av cementhalt och halten tillsatsmaterial multiplicerad med effektivitetsfaktorn för respektive tillsatsmaterial. Engelsk term: <i>equivalent water-cement ratio</i> .
Filler*	ballast eller tillsatsmaterial av typ I, bestående till största delen av finmaterial. Engelsk term: <i>Filler aggregate</i> .
Finmaterial*	<om ballast> kornfraktion bestående av korn mindre än 0,063 mm. Engelsk term: <i>finer</i> .
Flyttillsatsmedel*	tillsatsmedel avsett att åstadkomma ökad smidighet och arbetbarhet hos betong. Engelsk term: <i>superplasticizer</i> .
<i>k</i>	synonym till effektivitetsfaktor.
Mikrobruk*	material bestående av en blandning av pulver, vatten, luft och eventuella tillsatsmedel. Engelsk term: <i>micromortar</i> .
Pulver*	<i betong> partiklar med maximal kornstorlek 0,125 mm. Engelsk term: <i>powder</i> .
Tillsatsmaterial*	<i betong> finfördelat oorganiskt material. Kommentar: Tillsatsmaterial kan i viss utsträckning ersätta portlandcement samt användas för att erhålla speciella egenskaper hos betong. Tillsatsmaterial förekommer i två olika typer med olika egenskaper. Tillsatsmaterial av typ I deltar inte alls eller endast

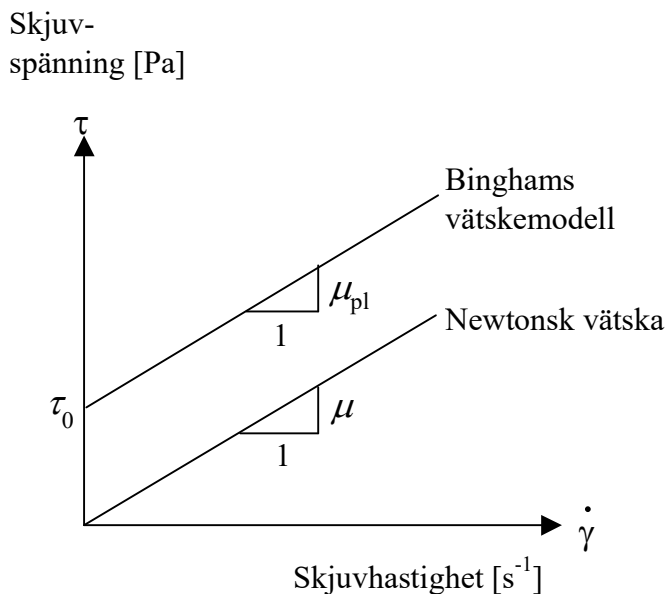
i ringa grad i cementets kemiska reaktion med vatten. Exempel på sådana tillsatsmaterial är filler och pigment. Tillsatsmaterial av typ II deltar i cementets kemiska reaktion med vatten. Exempel på sådana tillsatsmaterial är flygaska, silikastoft och mald granulerad masugnsslagg. Engelsk term: *addition*.

Vattenpulvertal*	kvot mellan effektiv vattenhalt och pulverhalt. Engelsk term: <i>water/powder ratio</i> .
$v_{t_{ekv}}$	synonym till ekvivalent vattencementtal
Viskositetsmedel	tillsatsmedel som består av långa kedjeformade polymerer som gör betongens vattenfas mer gelartad och därför ökar betongens viskositet.
v_{pt}	synonym till vattenpulvertal.

2.3 Reologiska begrepp

Binghamvätska	modellmaterial vars reologiska beteende bl. a. betong liknar (se figur 2.1).
Flytgränsspänning	skjuvspänning i ett material som måste överskridas för att materialet skall börja flyta. (Se figur 2.1).
Newtonvätska	modellmaterial vars reologiska beteende bl.a. vatten liknar (se figur 2.1).

Plastisk viskositet*	viskositet efter uppnådd flytgräns. Engelsk term: <i>plastic viscosity</i> .
Reologi	läran om materials deformationer och flytegenskaper.
Tixotropi	egenskap hos en tjockflytande eller gelartat uppbyggd vätska som innebär att den blir alltmer lättflytande ju längre tid och ju kraftigare den deformeras, t.ex. genom omrörning. Tixotropin orsakas av tids- och kraftberoende strukturförändringar i vätskan. När deformationen upphör återgår vätskan till sitt ursprungliga viskösa eller gelartade tillstånd. Processen är tidsberoende.
Viskositet*	egenskap som anger hur trögflytande en vätska eller blandning är. Anmärkning: För färsk betong där skjuvspänningen vanligen ökar linjärt med skjuvhastigheten vid exempelvis omrörning definieras viskositeten som kvoten mellan skjuvspänning och skjuvhastighet. Engelsk term: <i>viscosity</i> .



Figur 2.1 - Samband mellan skjuvspänning och skjuvhastighet definierar flytgränsspänning τ_0 , viskositet μ och plastisk viskositet μ_{pl} för två vätskemodeller.

2.4 Arbetbarhetsbegrepp

Arbetbarhet*	<hos färsk betong> den lätthet varmed den kan gjas, kompakteras och bearbetas med bibehållen homogenitet. Anmärkning: För SKB är det vanligt att man söker beskriva arbetbarheten med de mätbara termerna flytgränsspänning och plastisk viskositet. Engelsk term: <i>workability</i> .
Flytbarhet*	<hos färsk betong> förmåga att flyta ut och förflytta sig i sidled med bibehållen stabilitet. Engelsk term: <i>mobility</i> . Engelsk synonym: <i>flowability</i> .

Flytförmåga*	synonym till flytbarhet.
Gjutveck	estetisk ytdefekt mellan två på varandra följande gjutpallar.
Passeringsförmåga*	förmåga hos färsk betong att utan vibrering flyta genom trånga öppningar utan att blockering uppstår som hindrar flödet. Engelsk term: <i>passing ability</i> .
Robusthet	<för betong> tålighet i såväl färskt som hårdnat tillstånd mot avvikelser i delmaterialens dosering, och egenskaper liksom i variationer i produktionsparametrar. Engelsk term: <i>robustnes</i> .
Stabilitet*	<hos färsk betong> förmåga att under tillverkning, transport, gjutning och bearbetning förbli en homogen massa utan att delmaterialen separerar. Engelsk term: <i>stability</i> .
Öppethållandetid*	<för färsk betong> den tid som förflyter från blandningstillfället fram till dess att arbetbarheten fortfarande är acceptabel. Engelsk term: <i>working time</i> .

2.5 Mätmetodsbegrepp

Blockering	tillstånd som uppkommer i den färska betongen då grövre ballastkorn blockerar betongen vid passering genom tät armering eller smal sektion. Anmärkning: Termen används specifikt vid provning i L-lådan och då vid passering genom dess armeringslager.
Blockeringskvot	kvoten mellan slutliga betonghöjden i framkant och bakkant vid prov i L-låda.
Flytsättnmätt*	mått som anger hur mycket färsk betong, som fyllts i en sättkon, flyter ut på en flat platta efter att sättkonen avlägsnats. Engelsk term: <i>slump-flow</i> .
L-låda	L-formad låda där betong fylls i dess vertikala del och passerande ett armerings-lager rinner ut i den horisontella delen. Anmärkning: Används ofta vid receptutveckling och anläggningsbyggande.
Separationszon	yttersta randen som fås vid mätning av betongens flytsättnmätt och som inte innehåller någon grov ballast.
T20, T40	tiden för betongfronten att nå 200 respektive 400 mm från luckan ut i den horisontella delen på L-lådan mätt efter att luckan lyfts.
t_{500} *	mått som anger hur snabbt självkompakterande betong, som fyllts i en sättkon, flyter ut till en diameter på 500 millimeter efter att sättkonen avlägsnats. Engelsk term: t_{500} .
V-tratt	V-formad tratt som fylls med betong varefter tiden för betongens uttrinning mäts. Engelsk term: <i>V-funnel</i> .

V-trattvärde*

mått på viskositet som anger den tid det tar för färsk betong att rinna igenom en speciell tratt (s.k. V-tratt). Engelsk term: *V-funnel flow time*.

2.6 Referens

Betongteknisk ordlista – svensk-engelsk. Stockholm: Svenska Betongföreningen & TNC Terminologicentrum, 2012. Betongrapport nr 17, 127 s.

3. Krav

3.1 Allmänt

Självkompakterande betong har en sammansättning som är framtagen så att betongen inte behöver vibreras vid gjutning.

För en beställare är det den slutliga produkten som är viktig. Att styra själva utförandet av betongkonstruktionen är inte det primära utan det är krav på lastbärande förmåga, funktion, beständighet, estetik etc. som beställaren är mest intresserad av. Eftersom det saknas metoder för verifiering att funktionskrav uppnås, så kan det ibland vara lämpligt att styra utförandet och betonginnehållet (typ av delmaterial) så att den slutliga konstruktionen uppfyller de önskemål på konstruktionen som en beställare har.

I vårt land regleras betongproduktionen av standarderna SS-EN 206 ”Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse”, SS 137003 ”Betong – Användning av EN 206 i Sverige”, SS-EN 13670 ”Betongkonstruktioner – Utförande” samt SS 137006 ”Betongkonstruktioner – Utförande – Tillämpning av SS-EN 13670 i Sverige”. I SS-EN 206 finns en informativ bilaga G med rubriken ”Riktlinjer för krav på självkompakterande betong i färskt tillstånd”. Standardernas fullständiga namn innehåller även ett årtal men det har inte tagits med i löptexten eftersom standarderna uppdateras mer eller mindre regelbundet och därmed får nya årtal. I referenslistan anges dock de utgåvor som gäller när denna rapport skrivs.

Dimensionering av betongkonstruktioner regleras av eurokoderna, där SS-EN 1992-1-1 ”Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggande” är den viktigaste. Eurokoderna skiljer inte mellan vibrerad och självkompakterad betong.

3.2 Krav på materialet

Krav på betongmaterialet ställs i standarderna SS-EN 206 ”Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse” och SS 137003 ”Betong – Användning av EN 206 i Sverige”. Konventionella konsistensklasser för vibrerad betong kan inte tillämpas för självkompakterande betong. I stället anges klasser för flytsättningsförmåga, viskositet, passeringsförmåga och separationsmotstånd. Tillsammans täcker de den självkompakterande betongens tre egenskaper i det färska stadiet: flytförmåga, passeringsförmåga och stabilitet. EN 206 hänvisar i sin tur till provningsstandarder. För flytsättningsförmåga: SS EN 12350-8, för viskositet: SS EN 12350-8 (t_{500} , tid till utbredningen 500 mm) eller SS EN 12350-9 (V-tratt), för passeringsförmåga: SS EN 12350-10 (L-låda) eller SS EN 12350-12 (J-ring) och för separationsmotstånd: SS EN 12350-11. Kriterier för överensstämmelse rörande riktvärden för konsistens och viskositet ges i EN 206, tabell 23. För flytsättningsförmåga anges toleransen till ± 50 mm och för viskositeten uttryckt som t_{500} till ± 1 s.

Den informativa bilagan G till EN 206 ger riktlinjer gällande konsistens, viskositet, passeringsförmåga och separationsmotstånd. I ett inledande stycke anges att man kan behöva ställa specifika krav med hänsyn till betongelementets geometri, armering och ingjutningsgods, pump, bask eller annan gjutningsutrustning, gjutningsförfarande samt ytbearbetningsmetod.

För att producera självkompakterande betong krävs lämpliga delmaterial och en adekvat proportionering. SKB innehåller alltid moderna flyttillsatsmedel, ofta ett fillermaterial och ibland stabiliserande och/eller viskositetsmodifierande tillsatsmedel. EN 206 innehåller generella krav på delmaterial med hänvisningar till standarder för cement, ballast, vatten,

tillsatsmedel och tillsatsmaterial men specifika krav på de delmaterial som behövs eller kan behövas i SKB anges inte.

3.3 Krav på konstruktionen

Som nämnts ovan skiljer inte EK 2 mellan vibrerad och självkompakterad betong. Däremot finns ett kapitel om lättballastbetong vilket understryker att normförfattarna inte ser någon skillnad på betong utifrån hur man gjuter. Man kan dock göra följande kommentarer relaterade till EK 2 (avsnittsnummer i EK 2 inom parentes):

3.3.1 Betongens krympning och krypning (3.1.4)

Om betongens krympning och/eller krypning har stor betydelse för konstruktionens verkningssätt och funktion bör den provas för aktuell betongsammansättning. I annat fall kan beräkningsmetoden i avsnitt 3.1.4 användas.

3.3.2 Minsta avstånd mellan parallella armeringsstänger (8.2)

Speciell hänsyn till vibrering är inte nödvändigt.

3.3.3 Förankring genom vidhäftning (8.4.2)

Inverkan av undergjutningshöjd borde inte behöva beaktas, d.v.s. vidhäftningen för ospänd armering behöver inte reduceras. Faktorn $\eta_1 = 1,0$, som gäller zoner med ”goda” vidhäftningsförhållanden, borde kunna tillämpas över hela konstruktionshöjden (i stället för $\eta_1 = 0,7$ som används i zoner med ”dåliga” vidhäftningsförhållanden).

3.3.4 Buntning av armering (8.9)

Buntning av fler än två stänger bör undvikas.

3.3.5 Kontroll av betonghållfasthet (i färdig konstruktion)

(Behandlas ej i EK 2)

Av naturliga skäl är det inte lika viktigt att styra hållfasthetsprovningen till zoner där hållfastheten vid konventionell gjutning med vibrering kan förväntas vara reducerad (t.ex. överdelen av väggar och andra höga konstruktioner), eller till särskilt hårt utnyttjade områden. Orsaken är att SKB ger en mer likformig hållfasthetsnivå i hela gjutetappen. Detta gäller under förutsättning att det inte är just misstanke om hållfasthetsvariationer som föranleder provningen. I fallet med SKB skulle en sådan misstanke kunna uppkomma i fall där osäkerheter råder om betongens stabilitet och flytförmåga. Om t.ex. flytförmågan är otillräcklig kan utfyllnaden i trånga eller tätt armerade sektioner bli ofullständig.

Om man vid projektering av en betongkonstruktion använder någon eller några gynnsamma avvikelser från gängse regler enligt ovan skall användning av självkompakterande betong föreskrivas på ritning. Om det vid projekteringen är tveksamt huruvida det finns betongleverantörer i byggplatsens närhet som kan leverera SKB, så rekommenderas att man projekterar enligt regler för normal betong; detta lämnar frihet för entreprenören att välja antingen SKB eller normal betong som uppfyller aktuella krav. Tänk på att krympningen kan bli större (avsnitt 5.3) och formtrycket annorlunda (kapitel 12).

3.4 Krav på utförandet

SS 137003, som kompletterar EN 206 i vårt land, behandlar självkompakterande betong specifikt när det gäller krav på kompetens. Den som leder och övervakar tillverkning av självkompakterande betong skall ha kompetensklass I-T, oavsett betongens hållfasthetsklass.

I den svenska tillämpningsstandarden till EN 13670 anges att den som leder och övervakar utförandet av konstruktioner i självkompakterande betong skall ha kompetensklass I-U eller (för vissa fall) II-U.

3.5 Referenser

SS 137003:2015 Betong – Användning av EN 206 i Sverige. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2015, 52 s.

SS 137006:2015 Betongkonstruktioner – Utförande – Tillämpning av SS-EN 13670:2009 i Sverige. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2015, 24 s.

SS EN 12350-8:2019 Provning av färsk betong – Del 8: Självkompakterande betong – Flytsättningsmått. Utgåva 2. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2019, 20 s.

SS EN 12350-9:2010 Provning av färsk betong – Del 9: Självkompakterande betong – V-tratt. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2010, 20 s.

SS EN 12350-10:2010 Provning av färsk betong – Del 10: Självkompakterande betong – L låda. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2010, 20 s.

SS EN 12350-11:2010 Provning av färsk betong – Del 11: Självkompakterande betong – Siktseparation/ Bruksseparation. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2010, 20 s.

SS EN 12350-12:2010 Provning av färsk betong – Del 12: Självkompakterande betong – J-ring. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2010, 20 s.

SS-EN 13670:2009 Betongkonstruktioner – Utförande. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2010, 76 s.

SS-EN 206:2013+A1:2016 Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2018, 104 s.

SS-EN 1992-1-1:2005/AC:2010 Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggande. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2008, 232 s.

4. Reologi

4.1 Definitioner

Reologi är en vetenskap som beskriver materials deformation och flytegenskaper. Nationalencyklopedins (1989-1996) definition av reologi lyder:

Reologi, (av reo- sammansättningsform av grekiska rhe'os "ström", "flöde" och logi), vetenskapen om vätskors och fasta materials tidsberoende deformationsegenskaper

Reologi används i många olika branscher som exempelvis målarfärg, polymerteknologi, kosmetika, mat och medicin. Dessa material beter sig reologiskt mycket skiftande och därför finns en lång rad olika reologiska modeller som beskriver dem, Barnes m.fl. (1989). Av dessa modeller skall här fokuseras på den enkla newtonska modellen samt på dem som är mest använda för färsk cementbundna material, dvs. Bingham's vätskemodell (Tattersall & Banfill, 1983) och Herschel-Bulkley-modellen (Herschel & Bulkley, 1926).

Även tixotropi ingår i vetenskapen reologi och har sedan SKB introducerades kommit att bli av stort intresse eftersom denna egenskap inverkar på formtryck och gjutmetodik. Ordet tixotropi härrör från grekiskans *thi'xis* (beröring) och *tropē'* (vändning, förändring). Detta indikerar att det handlar om förändring hos en vätskas egenskaper orsakad av beröring vilket förtydligas i Nationalencyklopedins (1989-1996) definition av tixotropi:

Egenskap hos en viskös eller gelartad produkt som innebär att den blir alltmer lättflytande ju längre tid och ju kraftigare den deformeras. När deformationen upphör återgår produkten till sitt viskösa eller gelartade tillstånd.

Det skall också nämnas att en tixotrop process är såväl isotherm som reversibel samt tidsberoende, Mewis (1979). Den praktiska betydelsen av detta i relation till SKB är att denna flytande och vätskelika betong kan styvna till och gela sig med tiden när den får vila vilket visar sig som att den blir betydligt trögare i konsistensen. Innebörden av att processen är reversibel är att man får tillbaka betongens flytegenskaper om man rör om den tillräckligt mycket och således bryter ner den tixotropa strukturen. Med isotherm process menas att den tixotropa egenskapen hos ett material förekommer utan inverkan av temperaturvariationer.

För att kunna beskriva reologiska modeller och samband skall först några grundläggande parametrar beskrivas och klargöras.

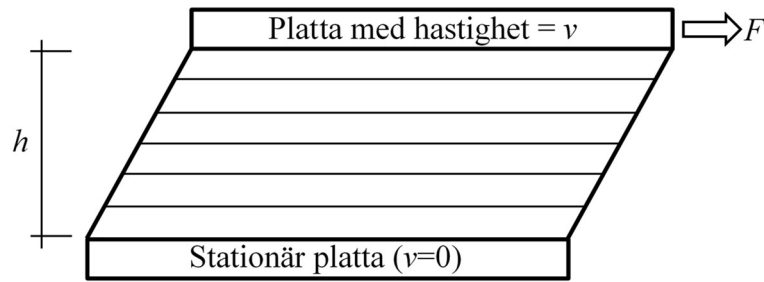
4.2 Skjuvhastighet och skjuvspänning

En av de grundläggande parametrarna är skjuvhastighet (s^{-1}) vilken relaterar till den hastighet med vilket materialet deformeras. I princip samtliga reologiska modeller bygger på hur skjuvspänningen, motståndet i materialet, beror av skjuvhastigheten. Kurvan som beskriver detta samband kallas flytkurva.

Anta att vätskan befinner sig mellan två plattor enligt figur 4.1, varav den ena plattan är stationär medan den andra har hastigheten v (m/s). Båda plattorna har arean A (m^2) och de är separerade med avståndet h (m). Vidare gäller att denna hastighet uppstått på grund av en kraft F (N) och att vätskan inte glider mot ytorna. Då gäller följande samband:

$$\text{Skjuvhastighet, } \dot{\gamma} = \frac{v}{h}, \text{ med enheten: } \frac{m/s}{m} = s^{-1} \quad (4.1)$$

$$\text{Skjuvspänning i vätskan, } \tau = \frac{F}{A}, \text{ med enheten: } \frac{N}{m^2} = \text{Pa} \quad (4.2)$$



Figur 4.1: Princip för skjuvhastighet samt skjuvspänning.

Det finns en rad olika sätt att skapa parallella och kontinuerliga ytor mellan vilka man kan skjuva material. En vanlig geometri är koncentriska cylindrar, dvs. cylindrar med olika diametrar så att ett gap uppstår mellan dem. Även parallella och cirkulära plattor skilda åt med ett gap förekommer som geometri hos reometrar (instrument som mäter reologi). Rotation av den ena plattan kommer då att skjuva materialet i gapet. Denna geometri kallas platta-platta.

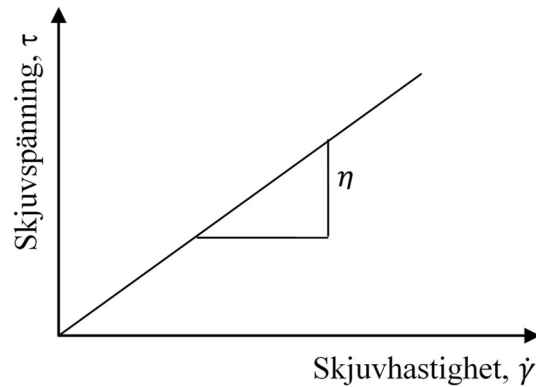
Samband mellan skjuvhastighet och skjuvspänning kan erhållas genom att antingen påföra en känd kraft/vridande moment på ena cylindern/plattan (jfr med exemplet i figur 4.1) och registrera den skjuvhastighet som uppstår eller att istället kontrollera skjuvhastigheten, dvs. rotationshastigheten, på cylindern och registrera viken skjuvspänning som då uppstår. De moderna reometrarna som används för cementpasta kan ofta genomföras med båda typerna av förfaranden medan de anpassade för bruk och betong oftast genomförs med styrning av deformationen.

Med befintliga reologiska instrument kan man varken direkt styra skjuvhastighet eller direkt mäta materialets skjuvspänning. Istället kontrolleras rotationen av den ena ytan (cylinder eller platta) och motståndet mäts som reaktion i form av vridmoment hos den del som är stationär. Med beaktande av geometrin hos systemet, och med vissa villkor på detta, kan omräkning ske till fundamentala enheter. Omvänt kan alltså reometrarna via geometrin styra rotationen så att avsedd skjuvhastighet erhålls under mätningen.

4.3 Newtons vätskemodell

Det enklaste sambandet mellan skjuvhastighet och skjuvspänning är linjärt och startar/slutar i origo. Ett sådant samband visas i figur 4.2 och denna enkla modell kallas newtonsk vätskemodell efter sin upphovsman sir Isaac Newton (1642-1727). Relationen mellan skjuvspänning och skjuvhastighet för newtonska material är konstant och linjens lutning motsvarar materialets viskositet η (Pa·s) enligt följande ekvation:

$$\text{Viskositet } \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \text{ med enheten } \frac{\text{Pa}}{1/s} = \text{Pa}\cdot\text{s} \quad (4.3)$$

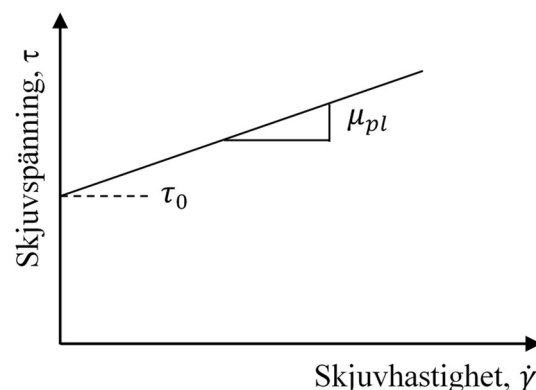


Figur 4.2: Newtonsk vätskemodell.

Newtons vätskemodell beskriver reologin hos material såsom vatten och oljor. De karakteriseras av att flyta långt om de får rinna ut på en plan yta, dvs. endast utsatta för gravitationskraften. Det som begränsar hur långt de flyter är deras ytspänning.

4.4 Bingham's vätskemodell

I jämförelse med newtonska material flyter inte färsk cementbundna material på samma enkla sätt. I flytande tillstånd betraktas cementbundna material som partikelsuspensioner, dvs. partiklar i en vätska. I fallet med betong är det grus, sten, cement samt eventuellt filler som är uppblandade i vatten. Dessa materials flöde stannar i regel upp tidigare men i olika grad beroende på olika faktorer. Konventionell betong som kräver vibrering vid gjutning flyter i så ringa grad att dess konsistens istället karakteriseras av en standardiserad kons vertikala sättning som mäts i form av sättmått. I båda fallen finns det en skjuvspänningskapacitet i materialet som sätter en gräns för hur mycket betongen kan deformeras under inverkan av endast gravitationen. Skjuvspänningskapacitet benämns inom reologin som flytgränsspänning τ_0 (Pa). Figur 4.3 visar Bingham's modell vilken skiljer sig från Newtons modell genom att den räta linjen inte går genom origo utan har ett positivt skjuvspänningsvärde vid skjuvhastigheten lika med noll.



Figur 4.3: Bingham's vätskemodell.

Linjens skärning (*intercept*) med skjuvspänningsaxeln motsvarar den nämnda flytgränsspänningen τ_0 som styr i vilket läge det flytande materialet som saktar in stannar. Eller, som för konventionell betong, till vilken nivå betongen förmår sjunka vid mätning av sättmått. För färsk cementbundna material fungerar Bingham's modell mycket väl och den har också fördelen av att endast två parametrar bestämmer dess utseende. Modellen bestäms förutom av

den nämnda flytgränsspänningen också av materialets plastiska viskositet μ_{pl} (Pa·s) vilket motsvarar linjens lutning. Formeln för Bingham's vätskemodell lyder:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (4.4)$$

Det nämndes tidigare att styrning av reometrar inte kan göras utifrån de fundamentala storheterna skjuvspänning eller skjuvhastighet. Istället styrs oftast ena ytans rotation och den andra ytans motstånd mäts. För Bingham's vätskemodell motsvaras skjuvspänningen av T (vridmoment) och flytgränsspänningen av G -värdet, båda med enheten Nm. Skjuvhastigheten motsvaras av antingen varv per sekund eller radianer per sekund och benämns N . Således motsvaras den plastiska viskositeten av H -värdet med enheten Nms. Formeln lyder då:

$$T = G + H \cdot N \quad (4.5)$$

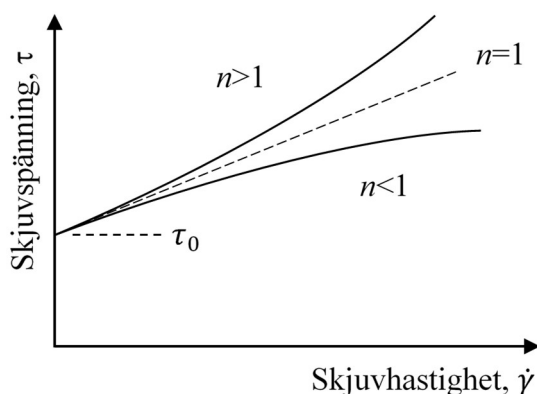
För den intresserade kan sägas att relativt tidigt, under mitten av 1900-talet och framåt togs mycket kunskap fram om färsk betongs arbetbarhet och reologi av fysikern Geoffrey Howarth. Tattersall (Tattersall 1976, Tattersall & Banfill 1983, Tattersall 1991). (Notera hans initialer, G och H, på konstanterna i ekv. 4.5.)

4.5 Herschel-Bulkley-modellen

Om gensvaret från betongen inte blir linjärt som i fallet med Bingham's vätskemodell utan istället olinjärt som exemplet i figur 5.4 visar följer materialet istället modellen enligt Herschel och Bulkley (1926):

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4.6)$$

Modellen karakteriseras av att materialet har en flytgränsspänning τ_0 (Pa) en konsistensfaktor, k (Pa sⁿ) som indikerar materialets viskositet samt exponenten n (-) som beskriver flytkurvans kurvatur. När $n > 1$ benämns materialet skjuvförtjockande och när $n < 1$ benämns det skjuvförtunnande. Notera att då $n = 1$ blir modellen identisk med Bingham's vätskemodell samt om samtidigt $\tau_0 = 0$ så blir modellen identisk med Newton's vätskemodell.



Figur 4.4: Herschel-Bulkley-modellen.

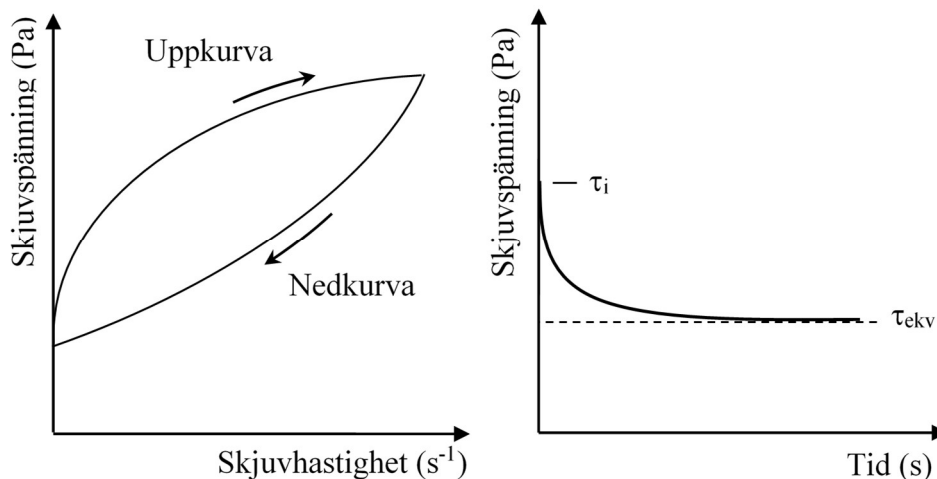
Förklaringar till ett olinjärt beteende kan vara att antingen påverkas partikelsystemet av ett ökande flöde så att aggregat (attraherade hopslagna partiklar) gradvis slås isär vid ökat flödeshastighet och motståndet minskar relativt en linjär ökning, dvs. $n < 1$. Detta leder till ett skjuvförtunnande beteende. Omvänt kan täta partikelsystem (lågt vct eller vpt) istället skapa relativt ökat motstånd, $n > 1$, ju snabbare flödet är och därmed avvika från det linjära sambandet mellan skjuvhastighet och skjuvspänning så att materialet blir skjuvförtjockande. Normalt sett är dessa fenomen i praktiken av mindre vikt, men vid pumpning kan framförallt

skjuvförtjockning inverka på pumptryck, Feys (2009). I regel är det dock så att SKB följer Bingham's linjära vätskemodell.

4.6 Tixotropi

Med reometrar eller viskometrar kan man mäta tixotropi genom att konfigurera variationen av skjuvhastigheten på olika sätt. I figur 4.5 visas två traditionella sätt att kvantifiera tixotropi hos ett material.

Mätförfarandet vars skjuvspänningsrespons visas i den vänstra figuren (figur 4.5) innebär att man linjärt med tiden ökar skjuvhastigheten till ett visst maximalt värde och därefter direkt minskar skjuvhastigheten på samma tid. Metoden kallas hysteres-loop eftersom skjuvspänningarna i materialet när skjuvhastigheten ökas, dvs. uppkurvan, är högre än de som registreras i nedkurvan. Måttet på graden av tixotropi utgörs av arean mellan kurvorna. Orsaken till att kurvorna går olika vägar när skjuvhastigheten ökar respektive minskar är att när materialet skjuvas med ökande hastighet bryts strukturen successivt ner, men när sedan skjuvhastigheten gradvis sänks byggs strukturen upp. Men strukturuppbyggnaden går långsammare än motsvarande nedbrytning som skett vid skjuvhastighetsökningen varvid kurvorna tar olika vägar i diagrammet.



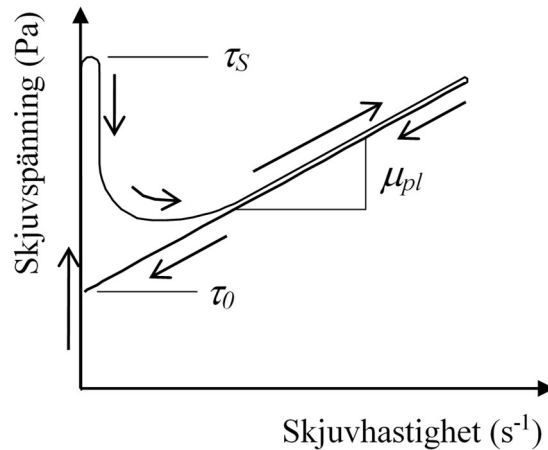
Figur 4.5: Metodik för provning av tixotropi: till vänster så kallad hysteres-loop och till höger skjuvnedbrytning.

Ett annat sätt visas till höger i figur 4.5. Den skjuvspänningsrespons vi ser här kommer av att man utsatt materialet för en konstant skjuvhastighet. Responsen karakteriseras av ett högre initialt skjuvspänningsvärde τ_i (Pa) som med tiden sjunker till ett asymptotiskt jämviktsvärde τ_{ekv} (Pa). Måttet på graden av tixotropi motsvarar den struktur som bryts ned under mätningen, dvs. differensen $\tau_i - \tau_{ekv}$ (Pa). Det högre skjuvspänningsvärdet vid start av mätningen indikerar den struktur som byggts upp i vilan före provningen. När materialet skjuvas med konstant hastighet bryts strukturen gradvis ner mot ett jämviktsläge där strukturnedbrytning och strukturuppbyggnad balanseras vilket resulterar i en konstant skjuvspänning. Notera att värdena på såväl τ_i som τ_{ekv} beror av skjuvhastigheten.

4.7 Strukturuppbyggnad

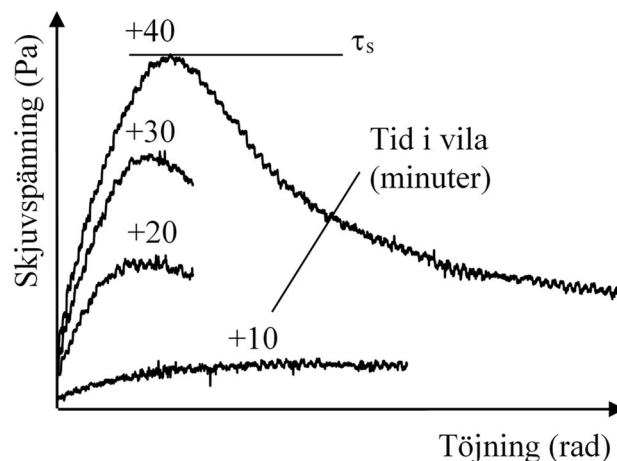
Flytgränsspänning enligt Bingham-modellen diskuterades i avsnitt 4.4 liksom att denna parameter visar god korrelation med flytsättningsmått, dvs. den spänning som bestämmer när en

betongs fria flöde, under inverkan av gravitationskraften stannar upp. Vi går alltså från högre skjuvhastigheter ner mot lägre för att till slut nå vila. Men om vi istället går från vila till rörelse måste en högre spänning än denna flytgränsspänning överskridas för att materialet skall börja flyta. Detta visas i Figur 4.6 där förloppet beskrivs med pilarna som indikerar att det går från vila till rörelse. Denna högre spänning kallas den statiska flytgränsspänningen τ_s (Pa) och motsvarar betongens struktur vars styrka ökar med tiden i vila.



Figur 4.6: Skjuvspänningar i materialet som går från vila till rörelse och tillbaka till vila.

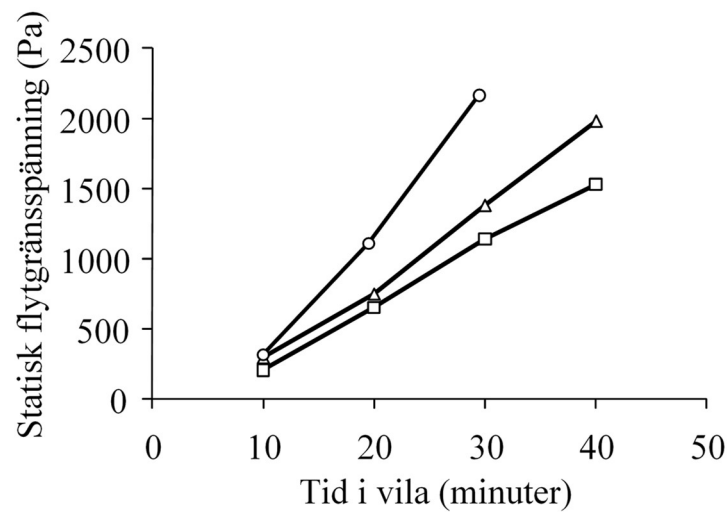
Billberg (2006) använde sig av en betongviskometer för att mäta betongens strukturuppbyggnad i vila och konfigurerade den för att skapa mycket liten och konstant skjuvhastighet i betongen. Genom att avbryta skjuvningen innan hela strukturen brutits ner kunde ökningen av strukturen med tiden i vila registreras. Exempel på en sådan mätning redovisas i figur 4.7. Fyra olika kurvor visas och de motsvarar mätningar efter 10, 20, 30 respektive 40 minuters vila. Det är uppenbart att betongen bygger starkare och starkare struktur ju längre den får vila.



Figur 4.7: Mätning av den statiska flytgränsspänningens ökning i vila hos en SKB, Billberg (2006).

Figur 4.7 indikerar att den statiska flytgränsspänningen ökar lika mycket mellan mätningarna då tidsintervallet är konstant 10 minuter. Detta linjära beteende visas tydligt i figur 4.8 där strukturuppbyggnaden för tre SKB redovisas, Billberg (2006). Det som skiljer betongerna åt är partikkelkoncentrationen i pastafasen, eller med andra ord deras vattenpulvertal, vpt . Ju högre koncentration partiklar desto större blir strukturuppbyggnaden. Per definition är strukturuppbyggnaden linjernas lutning och benämns $\tau_s(t)$ eller $\dot{\tau}_s$ (Pa/s). Noterbart är nivån på den statiska flytgränsspänningen som kan ligga på runt 1000 Pa efter endast 20 minuter i vila

medan en betong som hålls i rörelse har en dynamisk flytgränsspänning på under 100 Pa (se figur 4.8).



Figur 4.8: Tre SKB som visar olika linjära ökningar av den statiska flytgränsspänningens med tid i vila, dvs. strukturuppbyggnaden i vila, Billberg (2006).

4.8 Referenser

Barnes H A, Hutton J F & Walters K. An Introduction to Rheology. Amsterdam: Elsevier, 1989.

Billberg P. Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete – Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest. Stockholm: KTH, institutionen för byggvetenskap, avdelningen för betongbyggnad. Doktorsavhandling, 2006.

Herschel W & Bulkley R. Koll Z., 1926, 39, s. 291-300.

Mewis J. Thixotropy – A General Review. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1979, Vol. 6, Elsevier, Amsterdam, s. 1-20.

Nationalencyklopedin (1989-1996): Ett uppslagsverk på vetenskaplig grund utarbetat på initiativ av Statens kulturråd, Höganäs: Bra böcker.

Tattersall G H & Banfill P F G. The Rheology of Fresh Concrete. London: Pitman Books Ltd, 1983.

Tattersall G H. Workability and Quality Control of Concrete. London: E & FN Spon. 1991. (ISBN 0-419-14860-4).

Tattersall G H. The Workability of Concrete. London: Cement and Concrete Association, 1976, 138 s.

5. Delmaterial

5.1 Ballast

Med val av olika ballast kan självkompakterande betongs egenskaper påverkas i hög grad. Nedan berörs främst partikelstorlekens inverkan på den färska SKB-massan. Skillnaden mellan naturballast och krossballast berörs inte. Det skall dock påpekas att erfarenhet finns av att tillverka självkompakterande betong med såväl natur- som helkrossballast med utmärkta resultat.

Av kostnadsskäl strävar man normalt efter att minimera volymen mikrobruk i SKB eftersom de största delmaterialkostnaderna hänför sig dit. Betongens passeringsförmåga påverkas främst av de grövsta ballastfraktionerna och volymen mikrobruk. Orsaken är att de största partiklarna lättast bildar de bryggor som blockerar betongens strömning genom en passage. En relativ minskning av mängden av dessa partiklar innebär att deras inbördes avstånd ökas och sannolikheten att de skall bilda bryggor minskar. Eftersom det är förhållandet mellan partiklarnas storlek och ett karakteristiskt öppningsmått som är kritiskt för bryggbildningen, är det i de flesta fall vid tillverkning av anläggningsbetong som frågan om blockering blir aktuell. Således är det viktigt att studera hur siktcurvan för stenfraktionen man normalt använder ser ut. Exempelvis kan det vara fördelaktigt att i förekommande fall välja en stenfraktion med $d_{\max}=12$ mm istället för 16 mm, om detta är ett tillgängligt alternativ. En sådan skenbart liten ändring kan resultera i ett icke obetydligt reducerat krav på erforderlig volym mikrobruk.

Även de finaste partiklarna i ballasten påverkar proportioneringen av självkompakterande betong. Den del av ballasten med partikelstorlekar $< 0,125$ mm benämns i betongsammanshang ofta som filler (men termen "filler" finns inte i standarden). Mängden filler påverkar mikrobruksvolymen och vattenpulvertalet. Med andra ord kan betongens reologi, främst viskositeten, varieras genom val av grussort men också genom val av relativa grus- och stenandelar. En grusfraktion med relativt sett större andel partiklar $< 0,125$ mm kan således minska kravet på tillsatt mängd fillermaterial. Om fillermängden i form av andelen ballast $< 0,125$ mm ökas så minskas vattenpulvertalet och därmed ökas mikrobrukets, och betongens, viskositet. Detta kan naturligtvis också åstadkommas genom att byta ut en del av stenfraktionen mot grus.

Det är dock inte bara den procentuella andelen partiklar som passerar sikten $0,125$ mm som är av intresse. Även kornstorleksfördelningen samt partiklarnas kornform inom fraktionen $< 0,25$ mm inverkar starkt på mikrobrukets viskositet. Därför bör man skaffa sig kunskap om dessa fysikaliska egenskaper för aktuella ballastmaterial. Analysmetoder kan vara okulära studier i mikroskop eventuellt kompletterade med bildanalys, partikelstorleksfördelning genom lasersiktning och med hjälp av reologimätning av mikrobruketsfasen.

5.2 Tillsatsmaterial

Tillsatsmaterial definierade som filler och ämnade för självkompakterande betong bör väljas omsorgsfullt. När proportioneringen baseras på partiklar innebär det inte nödvändigtvis att ett material som är optimalt för en typ av applikation behöver vara det för en annan. Principiellt är ett finare malt tillsatsmaterial lämpligare vid vattenrika betonger med relativt högt v_{pt} medan ett grövre malt material är lämpligare vid betong med lågt v_{pt} . Orsaken är att en vattenrik betong behöver en relativt sett större partikelyta (om totala fillermängden hålls konstant) för att binda vattnet så att en tillsättning av flytmedel inte leder till en separerande betong innan tillräcklig flytförmåga erhålls. En ökning av partikelytan kan naturligtvis också i dessa fall åstadkommas genom att helt enkelt öka andelen filler i mikrobruketsfasen.

För betonger med lågt v_{pt} , exempelvis som en följd av krav på lågt v_{ct} , där det samtidigt ställs ett ökat krav på passeringsförmåga behöver i många fall totala mikrobruksvolymen ökas. Denna volymökning åstadkoms ofta genom tillsättning av ett tillsatsmaterial (företrädesvis typ I för att inte påverka betongens värmeutveckling). Härvid gäller att ett mindre vattenkrävande fyllermaterial, d.v.s. jämförelsevis grövre malt, kan vara mer optimalt så att den relativt ringa vattenhalten inte binds hårdare än nödvändigt med följd att en ökad mängd flytmedel erfordras.

Tillsatsmaterial kan mycket väl även utgöras av restprodukter från olika industriella processer. Här får, från fall till fall, utvärderas lämpligheten ur såväl beständighets- som produktionstekniskt perspektiv. Även inverkan av eventuella variationer i kornstorleksfördelningen hos tillsatsmaterialen bör beaktas.

Beprövade och väl fungerande material idag är kalkstensfiller (sedimentärt och kristallint), dolomitfiller, finmalet förpackningsglas, silikastoft och malad granulerad masugnsslagg. I andra länder finns också god erfarenhet av flytgaska som filler i SKB.

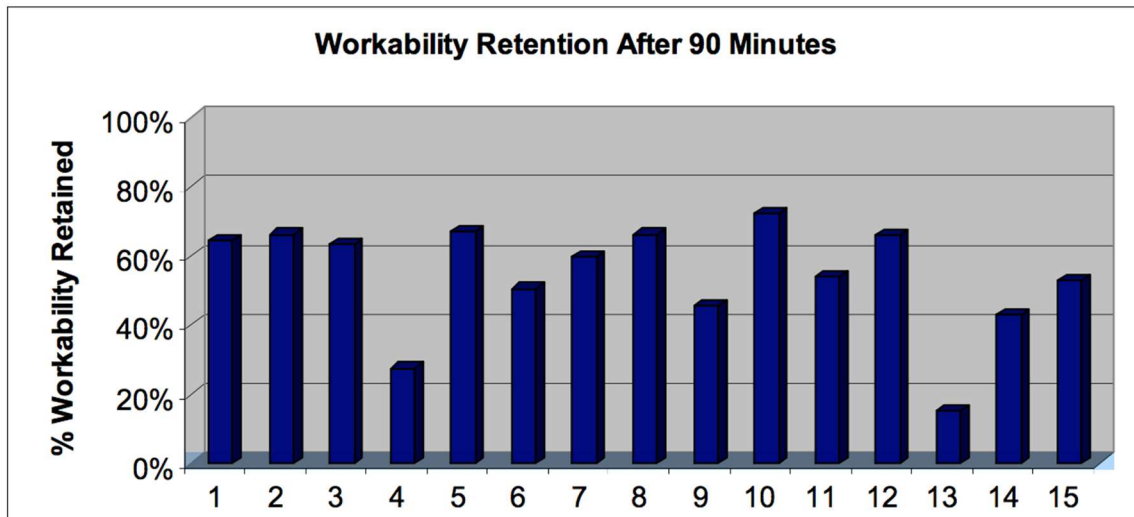
5.3 Cement

Alla på marknaden i Sverige tillgängliga standardiserade cement är möjliga att använda i SKB. Skillnader i cementegenskaper bör beaktas vid proportioneringen. Cementets fysikaliska egenskaper som finhet, partikelstorleksfördelning och densitet påverkar i varierande grad betongens färska egenskaper. Cements finhet anges traditionellt med den specifika ytan mätt enligt Blaine- metoden i SS-EN 196-6. De flesta cement har en specifik yta i spannet mellan 300 och 550 m²/kg. Vid lika förhållanden ökar generellt vatten- och flytmedelsbehovet med ökande specifik yta. Det förklarar delvis varför snabbhårdnande cement har ett större vatten- och flytmedelsbehov än det grövre anläggningscementet.

Cementets klinkersammansättning och porlösningens kemi, t.ex. mängden alkali och lösliga sulfater, är också av betydelse för vatten- och tillsatsmedelsbehovet. I synnerhet kan kompatibiliteten mellan cement och tillsatsmedel påverkas av porlösningens kemi. Bristande kompatibilitet kan medföra att öppethållandetiden och konsistensens utveckling får ett oönskat förlopp. Interaktionerna mellan flytmedel och cement är mycket komplexa och påverkas av både flytmedlets uppbyggnad och cementets kemi. I Griesser (2002) anges att aluminaternas (C_3A) reaktivitet och mängden lättillgängliga sulfationer är mycket viktiga parametrar i detta avseende. Klinkermineralet C_3A har även generellt en större benägenhet att adsorbera flytmedel än kalciumsilikaterna (C_2S , C_3S) varför cement med hög C_3A -halt kan förväntas ha ett större flytmedelsbehov än motsvarande cement med låg C_3A -halt.

I figur 5.1 ges ett exempel på hur kompatibiliteten mellan ett flytmedel och 15 olika cement kan påverka betongs konsistensförlust.

Val av cement baseras oftast på krav i gällande regelverk eller väljs ur andra produktionstekniska aspekter än dess inverkan på konsistens eller öppethållandetid. Tillgången på olika cementtyper är också oftast begränsad lokalt.



Figur 5.1. Konsistensförlust för betong tillverkat med 15 olika cement och en flytmedelstillsats. Angivet som % av initial konsistens (Daczko, 2010).

5.4 Tillsatsmedel

Ett väl fungerande flyttillsatsmedel är ett ofrånkomligt krav vid tillverkning av självkompakterande betong. Det är främst flyttillsatsmedel baserade på s.k. karboxylater, (PCE), som uppfyller de fordringar som ställs. Dessa har aktiva molekyler som i huvudsak är uppbyggda av långa kolkedjor med en elektrostatiske vidhäftande del samt en sterisk, d.v.s. en rent mekaniskt dispergerande, del. Den steriska delen kan beskrivas som ett "ludd" som förhindrar att partiklarna i betong hakar i varandra. De verkar inte bara effektivt dispergerande utan möjliggör även lång öppethållandetid utan att menligt retardera korttidshållfastheten. Graden av dispergering och öppethållandetid i betongen avgörs av längden på den dispergerande delen, samt typ av cement och vatteninnehåll.

Då moderna flyttillsatsmedel baserade på PCEér oftast är skraddarsydda mot specifika egenskaper såsom en viss typ av cement, öppethållandetid, kross- eller naturballast så är det viktigt att hänsyn tas till detta vid årstidsbundna variationer i temperatur.

Äldre flyttillsatsmedel (dispergerare) av typen melamin- eller naftalenbaserade medel behöver ofta tillföras i relativt höga doser för att nå erforderad flytförmåga varför lång retarderande verkan både avseende efterbearbetning och hållfasthet erhålls. De moderna flyttillsatsmedlen baserade på PCEér ger vidare betongen en bättre grundläggande, sammanhållande effekt jämfört med melamin- eller naftalenbaserade flyttillsatsmedel. Därmed inte sagt att dessa medel inte kan användas. Men man bör vara uppmärksam på erforderlig dos, öppethållandetid samt värmeutveckling/hållfasthetstillväxt.

Det förekommer idag ett flertal produkter av den nyare typen flyttillsatsmedel, baserad på PCEér, varför rekommendationen måste bli att välja det medel eller den kombination av medel som passar respektive betongfabriks specifika förhållanden såsom cementtyp, tillsatsmaterial, ballast och blandare mm. Det kan konstateras att viskositetshöjande tillsatsmedel finns på marknaden men att de i dagsläget inte används särskilt frekvent.

Viskositetsmedel, som också benämns stabilisatorer, är uppbyggda av polymerer som gör vattenfasen i SKB gelertad. Således kan den för betongen nödvändiga och stabiliserande viskositeten uppnås även med tillsats av denna typ av kemiska medel. Emellertid saknas i Sverige idag erfarenhet och kunskap att endast använda viskositetsmedel istället för filler i

SKB. Det kan noteras att viskositetsmedel inte bidrar till någon ökad mikrobruksvolym vilket kan inverka på betongens passeringsförmåga när blockeringsfrågan är aktuell som exempelvis för de flesta konstbyggnader.

Luftporbildare skall vara kompatibla med flyttillsatsmedlet. Är inte luftporbildare och flyttillsatsmedel kompatibla kan detta att ge stora variationer i lufthalt men också instabil luft. Kombinationen luftporbildare och ett modernt flyttillsatsmedel, baserat på PCE, kräver en reducerad mängd luftporbildare för att skapa en viss lufthalt i betongen. Orsaken är att de nya flyttillsatsmedlen är luftindragande. För att motverka detta är flyttillsatsmedlen skumdämpade, men de bidrar lika fullt med att ge en viss luftporvolym. Inverkan av en sänkt dos luftporbildare har dock inte kunnat konstateras ge SKB någon påvisbar försämrad frostbeständighet. Luftporsystemets stabilitet bör dock alltid verifieras.

Accelererande och retarderande tillsatsmedel kan på samma sätt som för konventionell betong användas för styrning av självkompakterande betongs öppethållande, värmeutveckling och/eller hållfasthetstillväxt.

5.5 Blandningsvatten

Om återvunnet blandningsvatten avses användas för tillverkning av SKB bör det kontrolleras om det innehåller rester i form av ytaktiva medel eller finpartiklar som skulle kunna påverka betongens reologi. I övrigt hänvisas till prEN 1008, ”*Mixing water for concrete*”.

5.6 Referenser

Griesser A. Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures - Rheology, Phase Composition, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems. Zurich, Switzerland: ETH. Dissertation No. 14820, 2002.

Daczko J A. Innovative New Admixture for Flexible Slump Flow Retention in SCC Mixtures. Ur: Proceedings, 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete & 4th North American Conference on the Design and Use of SCC, Montreal, Quebec, Kanada, 2010, s. 287-293.

6. Proportionering av SKB

De flesta proportioneringsmodeller bygger på att betongen betraktas som ett tvåfasmaterial, dvs. en partikelsuspension med en fast fas och en vätskefas. Den fasta fasen utgörs av all ballast med partikelstorlekar över 0,125 mm medan vätskefasen utgörs av vatten och alla partiklar mindre än 0,125 mm samt eventuell luft. Vätskefasen utgörs alltså i princip av cementpastan plus luft, de finaste partiklarna från ballasten samt eventuellt tillförda fillermaterial. Eftersom den finare ballasten ingår i vätskefasen benämns den ibland som betongens mikrobruksfas istället för pastafas. Liksom de allra flesta proportioneringsmodeller syftar de som fokuserar på SKB också till att minimera denna mikrobruksfas eftersom de för betongen mest kostsamma delmaterialen ingår i den.

Kraven som ställs på betongen för att kunna erhålla de egenskaper som SKB skall ha diskuteras övergripande i avsnitt 6.1.

Minimering av mikrobruksfasen innebär omvänt att ballastens packningsegenskaper bör optimeras. Diskussion kring hur partikelsystemet påverkar en suspensions viskositet görs i avsnitt 6.2 kring Krieger-Dougherty-ekvationen.

SKB:s karakteristiska reologiska målområde diskuteras i avsnitt 6.3 och styrning av reologin hos SKB i avsnitt 6.4.

Volymen på mikrobruksfasen påverkar också passeringsförmågan. Beräkningsmodell för att erhålla denna egenskap redovisas i avsnitt 6.5.

6.1 Krav för att uppnå SKB

Proportionering av SKB skall ske så att tre grundkrav uppfylls; flytbarhet, stabilitet och passeringsförmåga. Dessa krav beskrivs övergripande i de följande avsnitten.

6.1.1 Flytbarhet

Med flytbarhet menas i princip det att betongen har en förmåga att flyta ut tillräckligt långt vilket verifieras genom prov av exempelvis flytsättningsmått, dvs. oförhindrat flöde.

För att skapa flytbarhet hos en betong så att den blir en väl fungerande SKB behövs generellt ett väl fungerande flytmedel. Flytmedel dispergerar partikelsystemet och frigör blandningsvattnet. Mer om hur flytmedel påverkar reologin diskuteras i avsnitt 6.4.

En annan starkt bidragande orsak till flytförmåga är betongens volym av vätska, dvs. mikrobruksfasen som nämnts tidigare i detta kapitel. En ökad volym mikrobruk separerar de större ballastpartiklarna och bryter såväl partikelstrukturen som den inre friktionen vid flöde. Med andra ord reducerar en ökad mikrobruksvolym både flytgränsspänningen och den plastiska viskositeten.

I princip kommer såväl större mikrobruksvolym som ökad flytmedelsmängd att krävas ju större flytbarhet betongen skall ha. Om man syftar till att skapa en SKB utifrån en konventionell husbetong med exempelvis 320 kg cement per m³ samt med $v_{ct} = 0,55$ (dvs. 176 l vatten per m³ och totalt ca 300 liter pasta per m³) genom att endast tillsätta flytmedel kommer man att skapa en separerande betong långt innan man når en flytbarhet som svarar mot SKB. Om man däremot utgår ifrån en konventionell anläggningsbetong med exempelvis 430 kg cement per m³ med $v_{ct} = 0,4$ (dvs. 172 l vatten per m³) och med 6-7 % lufthalt, vilket ger ca 370 liter pasta per m³, kan man bara genom att tillsätta lämpligt flytmedel komma mycket närmare en flytförmåga

som svarar mot SKB utan separation. Naturligtvis bidrar även det lägre vattencementtalet hos anläggningsbetongen till att stabilitet erhålls vid större flytförmåga. Om man når ända fram till en SKB beror i hög grad på vilken typ av ballast man har (kornform och gradering) vilken i sin tur styr hur stor mikrobruksvolym betongen behöver.

6.1.2 Stabilitet

I fråga om SKB kan man inte bara nöja sig med att diskutera dess stabilitet efter att den vid gjutning stannat upp i formen, dvs. dess statiska stabilitet. SKB:s förmåga att gjutas utan mekanisk kompaktering medger att betongen kan gjutas både snabbt och på ett sätt som gör att den flyter relativt långt från punkten där den släpps ner i formen, men hur långt betongen skall tillåtas flyta begränsas av dess dynamiska stabilitet.

Statisk stabilitet hos SKB skapas av betongens plastiska viskositet, flytgränsspänning samt tixotropi (se kapitel 4). Samspelet mellan plastisk viskositet och flytgränsspänning diskuteras vidare i avsnitt 6.3. Ju mer flytande en SKB skall vara (låg flytgränsspänning) desto högre bör plastiska viskositeten vara. En högre viskositet håller de grövre ballastpartiklarna flytande tillräckligt länge för att tixotropin skall kunna stabilisera partikelsystemet. Viskositet och tixotropi är inte synonyma begrepp, men om man exempelvis sänker vattenpulvertalet i syfte att öka den plastiska viskositeten så ökar ofta även tixotropin.

Om man istället syftar till en SKB med låg plastisk viskositet måste man tillse att betongen har en tillräckligt hög flytgränsspänning, eller med andra ord: att den inte får ha ett för stort flytsättningsmått. En viss nivå på flytgränsspänningen behövs för att stabilisera partikelsystemet.

Liksom för konventionell betong kan SKB råka ut för vattenseparation. Detta uppstår om cementet och sandmaterialet är för grovkornigt, eller framförallt om den totala mängden finmaterial är så liten att betongen inte förmår hålla kvar allt blandningsvatten. Även överdosering av flytmedle kan ge separation. Notera att risken finns att vattenseparation inte uppdagas vid exempelvis prov av flytsättningsmått eftersom det kan ta ett antal minuter innan vattnet kryper upp på betongytan. Det kan alltså vara värt att låta den utflutna betongen ligga kvar en stund på flytbrädan vid prov av flytsättningsmått.

Dynamisk stabilitet innebär att betongen har förmåga att flyta längre utan att den separerar. Under flöde, liksom under vibrering, förekommer inte någon flytgränsspänning som kan stabilisera systemet, utan mikrobruksfasen måste istället ha en tillräcklig viskositet för att orka förhindra att större ballastpartiklar sedimenterar. I princip måste man verifiera med provning hur långt olika SKB kan flyta och samtidigt vara stabila. Med andra ord kan dynamisk separation undvikas genom att man tar hänsyn till hur långt betongen tillåts flyta i formen.

6.1.3 Passeringsförmåga

Med passeringsförmåga menas att betongen skall kunna flyta genom trängre passager i formen utan att dess flöde hindras. Trängre passager kan vara varierande geometri hos formens sektioner, ingjutningsgods eller armeringslager. Innebörden av otillräcklig passeringsförmåga är att betongens flöde hindras på grund av att grövre ballast stockar sig vid hindret. Detta benämns blockering.

Blockering kan orsakas av att betongen separerar, dvs. att mikrobruksfasen inte förmår hålla de större ballastkornen flytande eller att de inte förmår dra med sig dessa i flödet. Blockering kan även bero på att betongens mikrobruksfas är alltför viskös och bidrar till att grövre ballastkorn inte enkelt nog kan omformas sinsemellan och ta sig igenom trånga passager. Men i detta kapitel

skall dessa fenomen inte diskuteras vidare eftersom att vi dels kan tillåta oss utgå från att betongen är stabil, dels att den inte är så viskös att detta orsakar blockering. En sådan hög viskositet är inte att rekommendera ur flera andra aspekter såsom att den förhindrar snabb gjutning och att den starkt påverkar betongens förmåga att släppa ut överskottsluft, vilket leder till sämre ytor. Det fall som är av intresse istället är när betongens passeringsförmåga beror på hur den från början är proportionerad. Exempel på hur man kan proportionera SKB utifrån passeringsförmåga redovisas i avsnitt 6.5

6.2 Krieger-Dougherty-ekvationen

Krieger-Dougherty-ekvationen (ekv 6.1) beskriver hur partikelsystemets fysikaliska egenskaper påverkar viskositeten, η , hos en partikelsuspension och är således användbar även för cementbundna material, Krieger och Dougherty (1959). Notera dock att de kolloidala interaktionerna, exempelvis van der Waals-krafter, hos små partiklar ($\leq 1 \mu\text{m}$) inte tas hänsyn till i ekvationen och inte heller inverkan av ytaktiva, kemiska, tillsatsmedel.

$$\eta = \eta_s \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{-[\eta]\phi_m} \quad (6.1)$$

där:

η = suspensionens viskositet (Pa·s)

η_s = lösningsvätskans viskositet (Pa·s)

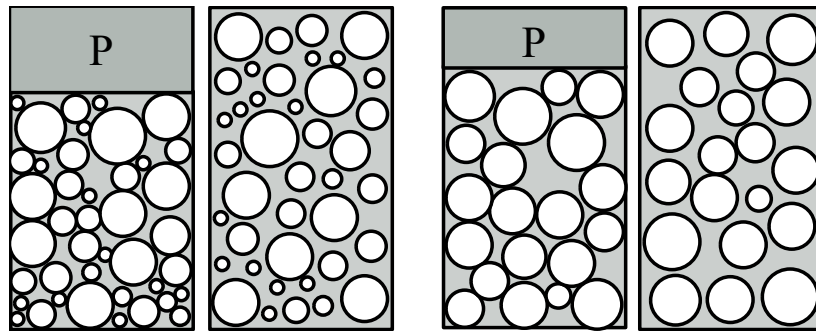
ϕ = aktuell partikelkoncentration (-)

ϕ_m = maximal partikelkoncentration (-)

$[\eta]$ = inre viskositet (Pa·s)

Genom att studera ekvationen kan vi se vilka parametrar som för optimering av betongrecept är av vikt rent reologiskt. Ekvationen uttrycker hur de i lösningsvätskan inblandade partiklarna påverkar dess viskositet, η_s . För cementbundna material såsom pasta och mikrobruk är vätskefasen vatten medan för betong kan vätskefasen sägas vara pasta eller mikrobruk.

Vi kan börja med förhållandet $\frac{\phi}{\phi_m}$ som relaterar aktuell volym ballast i en given volym, ϕ , till den som maximalt får rum i samma volym, ϕ_m . Denna kvot handlar alltså om ballastens packningsegenskaper. Varje given mängd ballast som packas lämnar hålrum mellan partiklarna. För betong skall inte endast detta hålrum fyllas med pasta, utan ett överskott av pasta behövs. Om inte ett överskott av pasta skapas, dvs. om endast hålrummet fylls, bildar de packade partiklarna fortsatt en rigid struktur som omöjliggör ett flöde. Det inses då att ju bättre maximal packningsförmåga ballasten har, desto mindre hålrum och därmed också mindre erfordrad volym pasta som behövs för att separera partiklarna så att flöde medges. Detta illustreras i figur 6.1 där två betonger med samma pastavolym men med olika ballast jämförs. Ballasten i fall a) har bättre packningsförmåga än ballasten i fall b) vilket leder till att betong a) får ett större pastaöverskott, P, och därmed bättre flytförmåga.



a) God ballastpackning

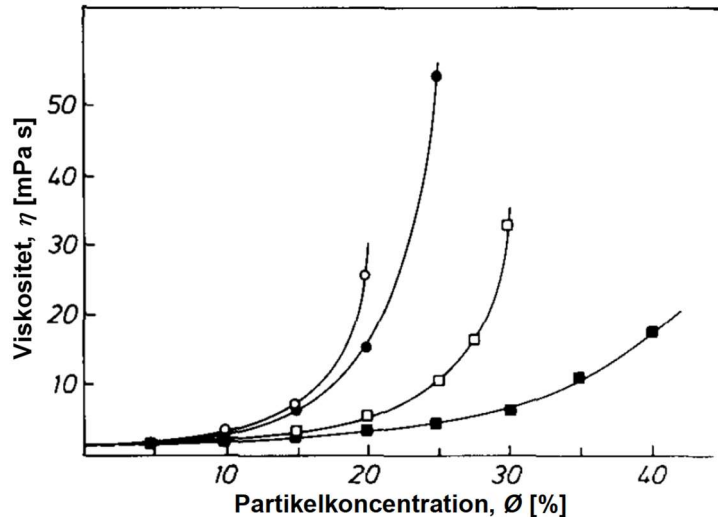
b) Sämre ballastpackning

Figur 6.1: Överskott av pasta för två betonger med ballast som har olika packningsförmåga.

Det indikeras i figur 6.1 att bättre packning av ballasten erhålls då man går från ensartad storlek som i fall b), dvs. en eller få fraktioner, till bredare partikelfördelning som i fall a) genom att använda fler fraktioner. Orsaken är att mellanrum mellan större ensartade partiklar kan fyllas med mindre partiklar, och mellanrummen mellan de mindre av ännu mindre partiklar osv. Sammansättning av total ballastkurva är därför mycket viktig för att skapa en optimal betong med minsta nödvändiga pastavolym. Med optimal menas inte bara arbetbarhet utan även ur ett kostnadsperspektiv eftersom de mest kostsamma delmaterialen i en betong återfinns i just pastafasen.

Men eftersom pasta- eller mikrobruksfasen utgör vätskan i betongen bör även denna fas optimeras på i princip samma sätt. Sammansättningen av ballast $< 125 \mu\text{m}$ och cement samt andra tillsatsmaterial bör göras så att de inte skapar för ensartade partikelstorlekar som krockar i vissa storleksintervall (jämför med figur 6.1).

Den parameter i ekvation 6.1 som beror av partiklarnas form benämns inre viskositet $[\eta]$. Ett utgångsvärde för perfekta sfärer i låga koncentrationer är $[\eta]=2,5$ vilken bevisades av Einstein (1906). Detta värde ökar med ökad asymmetri hos partiklarna och så också suspensionens viskositet. Figur 6.2 visar hur viskositeten hos suspensioner ökar med partikelkoncentrationen ϕ för olika typer av partikelformer. Partiklarna är suspenderade i vatten vars viskositet är lika med $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, vilket framgår av figur 6.2 vid $\phi = 0$. Viskositeten är utvärderad vid skjuvhastigheten 300 s^{-1} . Resultaten är anpassade till Krieger-Dougherty ekvationen (ekv 6.1) och visar hur viskositeten ökar med ökad partikelkoncentration. Ökningen sker vid lägre och lägre värden på ϕ då partikelformernas asymmetri gradvis ökar.



Figur 6.2: Inverkan av partikelform och partikelkoncentration ϕ på suspensioners viskositet η .

Symboler för partikelform: ■ = sfärisk, □ = kvartskorn (asymmetriska men varken flakiga eller stängliga), ● = flakig, ○ = stänglig (Clarke, 1967).

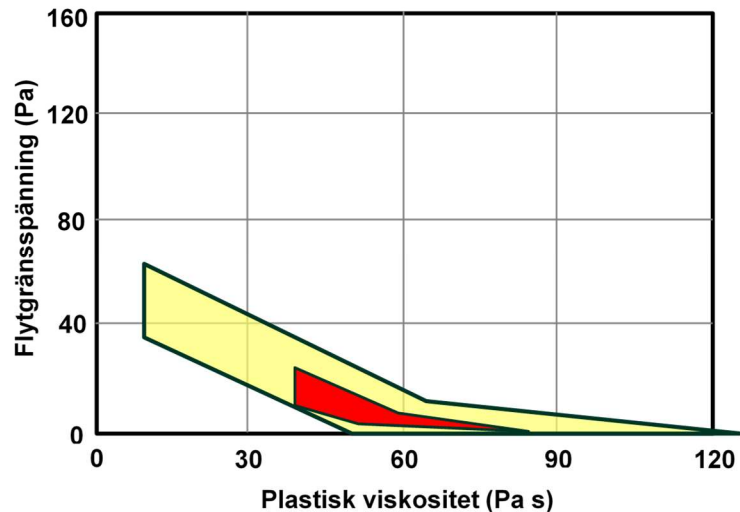
Notera också att formen på partiklarna inte bara påverkar viskositeten, utan ofta även packningsegenskaperna. Partikelpackningen ϕ_m indikeras i figur 6.2 i det att viskositeten går mot oändligheten när värdet på ϕ närmar sig ϕ_m , dvs. den asymptot som respektive kurva närmar sig vid högre ϕ . Resultaten i figur 6.2 visar att respektive materials värde på ϕ_m sjunker vid ökande partikelasymmetri.

Krossad ballast har principiellt alltid mer asymmetriska partiklar än naturballast. Med beaktande av diskussionen om partikel- respektive vätskefaser kan därför sägas att inverkan av flakiga eller stängliga partiklar blir svårare att parera i de mindre partikelfraktionerna ingående i mikrobruksfasen, Westerholm (2006). En mindre bra mikrobruksfas kan inte räddas av bra större partiklar, men med utgångspunkt från en bra mikrobruksfas kan sämre ballast i de större partikelfraktionerna enklare accepteras.

6.3 Reologiskt målområde för SKB

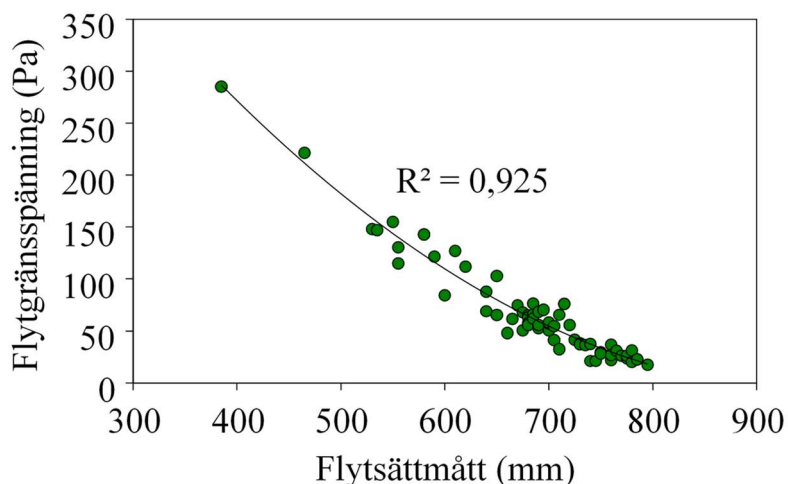
Eftersom SKB beter sig som ett Bingham-material så följer av diskussionen i avsnitt 4.4 att dess flytgränsspänning måste sänkas för att betongen skall flyta. Hur man i praktiken gör detta liksom hur man skapar en stabil betong diskuteras i detta avsnitt.

I figur 6.3 (översatt till svenska från originalet) visas målområde för SKB i ett diagram med plastisk viskositet på x-axeln och flytgränsspänning på y-axeln. Det röda området skall ses som mer optimerat medan det gula i praktiken fungerar väl. Notera hur brett det gula området är och hur det är utformat. Principen är att ju högre värde på flytsättningsmått, eller reologiskt: lägre flytgränsspänning, desto högre plastisk viskositet (t_{500} -värde) bör betongen ha. Detta i syfte att skapa stabilitet för en mycket flytande SKB. Om man istället väljer att skapa en SKB med lågt flytsättningsmått runt 550-600 mm, dvs. med relativt hög flytgränsspänning, så skall en lägre plastisk viskositet eftersträvas. En SKB med hög flytgränsspänning och hög plastisk viskositet, dvs. ett lågt flytsättningsmått och samtidigt högt t_{500} -värde upplevs svår att bearbeta och har med andra ord en sämre arbetbarhet. För att skapa en stabil SKB vid en låg viskositet måste flytgränsspänningen vara högre så att stabilitet erhålls med hjälp av partikelstrukturen.



Figur 6.3: Reologiskt målområde för SKB, från Wallevik & Wallevik (2011).

Eftersom betong utan partiklar endast utgörs av vatten, med andra ord en newtonsk vätska, så är det uppenbart att såväl flytgränsspänningen som den plastiska viskositeten påverkas av partiklarna. Betong som är i rörelse, dvs. påverkad av endast gravitationskrafter såsom vid mätning av sättmått, flytsättmått eller vid utflytning på horisontell yta vid gjutning, påverkas av att de grövre partiklarna ($> 1 \mu\text{m}$) krockar sinsemellan samt att de mindre partiklarna ($\leq 1 \mu\text{m}$) också attraherar/repellerar varandra pga. av kolloidala krafter. Dessa partikelinteraktioner skapar en inre friktion som påverkar motstånd i flödet och därmed betongens plastiska viskositet. Då rörelsen saktar in, interagerar partiklarna på ett sådant sätt att de skapar en tredimensionell struktur som gör att rörelsen helt stannar upp när skjuvspänningarna i materialet underskrider dess flytgränsspänning. Figur 6.4 visar resultat från laboratorieförsök som påvisar just denna korrelation mellan uppmätt flytgränsspänning och till vilken diameter betongen flutit ut vid prov av flytsättmått. De reologiska resultaten är uppmätta med en betongviskosimeter.



Figur 6.4: Exempel på korrelation mellan flytsättmått och flytgränsspänning (Billberg 2011).

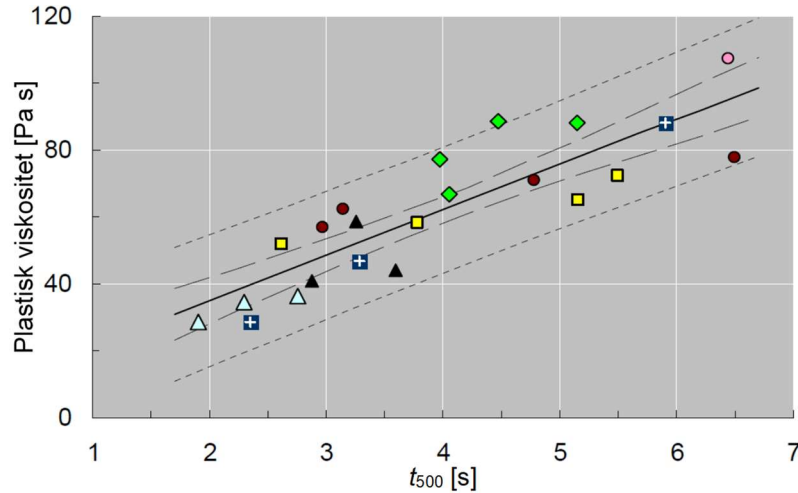
Roussel och Coussot (2005) har analytiskt visat att det finns ett teoretiskt samband mellan flytsättmått (uttryckt som diametern D) och flytgränsspänning τ_0 :

$$\tau_0 = \frac{225\rho g^2}{4\pi^2 D^5}, \quad (6.2)$$

där ρ är densiteten (kg/m^3), g är gravitationskonstanten (m/s^2) och Ω är volymen (m^3).

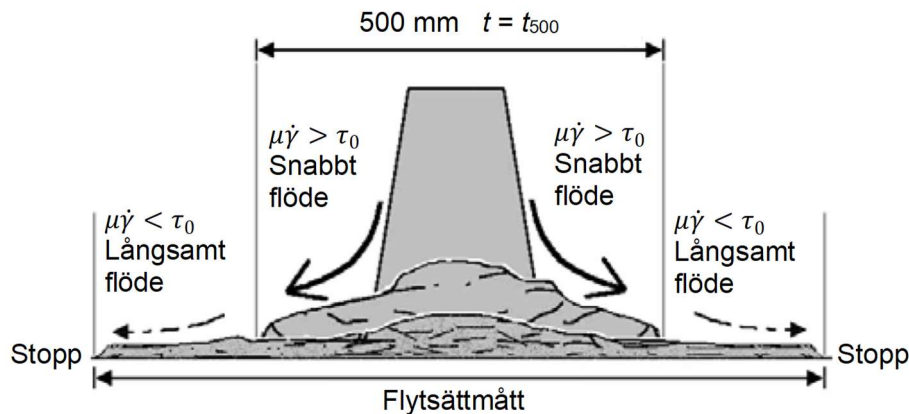
Observera att sambandet i ekv. 6.2 endast gäller då $H \ll R$, dvs. då den utbredda betongens höjd, H , är avsevärt mindre än radien på utbredningen, R .

t_{500} motsvarar den tid det tar för betongen att, efter det att sättkonen lyfts, nå 500 mm diameter. Då en mer trögflytande betong, dvs. en mer viskös betong, tar längre tid på sig att flyta en viss sträcka än en betong med lägre viskositet så bör t_{500} -värdet därmed korrelera mot betongens plastiska viskositet. Ett exempel på denna korrelation visas i figur 6.5.



Figur 6.5: Samband mellan betongs t_{500} -värde och plastiska viskositet (Testing SCC, 2005).

Något analytiskt samband mellan t_{500} -värdet och betongens plastiska viskositet finns inte eftersom också flytgränsspänningen påverkar t_{500} . En illustration till det komplexa sambandet ges i figur 6.6. Betongens flöde är ett dynamiskt förlopp som bl.a. påverkas av tröghetsmomentet som förändras i och med att flödets tvärsnittsarea formförändras allteftersom betongen flyter ut.



Figur 6.6: Princip för olika skjuvhastigheter i betongen under deformationsförlopp vid prov av flytsättmått (Översatt till svenska från Testing SCC, 2005).

I praktisk mening är dock t_{500} -värdet en relativt god indikator för betongens plastiska viskositet. Sambandet mellan olika SKB:s t_{500} -värden mätta enligt SS-EN 12350-8:2019 och deras plastiska viskositet gäller endast då sättkonen används med basen nedåt. Om man använder en upp- och nervänd kon påverkar betongens viskositet hur lång tid det tar för betongen att rinna ur konen och detta påverkar då tiden tills 500 mm utbredning nås.

För detaljer kring provningsmetoden för flytsättmått och t_{500} hänvisas till SS-EN 12350-8:2019.

6.4 Styrning av reologin hos SKB

En av de viktigaste parametrarna har SKB gemensamt med konventionell betong, dvs. hur bra packningsförmåga ballasten har. Detta diskuterades i avsnitt 6.1 i relation till Krieger-Dougherty-ekvationen. Ju mindre hålrum som en ballast bestående av två eller fler storleksfraktioner ger vid packning desto mindre volym mikrobruk behövs för att fylla hålrummet. Sedan behövs ett överskott av mikrobruk, utöver hålrumsvolymer, för att separera ballastpartiklarna och skapa möjlighet för dem att röra sig sinsemellan utan att skapa för stort motstånd då betongen skall flyta. Hur stor överskottsvolym i form av mikrobruk som behövs beror på vilken typ av betong man syftar till. Exempelvis krävs en betydligt mindre mikrobruksvolym om man vill proportionera en väl fungerande vältbetong eller en betong för håldäckstillverkning jämfört med en konventionell betong med exempelvis konsistensklass S3. I princip behövs en större volym ju mer flytande en betong skall vara, så kravet är störst om en SKB skall fungera väl.

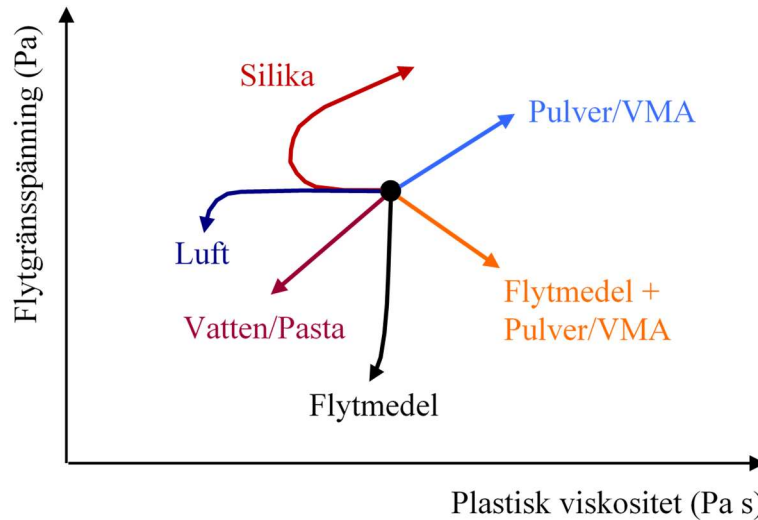
Reologiskt bör man, som visas i figur 6.3, sikta på att nå målområdet för SKB. Oavsett var i diagrammet man utgår ifrån med ett konventionellt betongrecept kan man på olika sätt styra mot detta målområde. I figur 6.6 visas hur olika delmaterial principiellt påverkar reologin. Exakt hur riktning och längd blir beror på de specifika egenskaperna hos olika typer av pulver, olika typer av flytmedel etc.

Flytmedel påverkar flytgränsspänningen i långt högre grad än den plastiska viskositeten eftersom betongens vattenmängd inte påverkas och därav i mindre grad den inre friktionen vid flöde. Vatten liksom ökad mikrobruksvolym separerar de grövre ballastpartiklarna och påverkar därför båda reologiska parametrarna ungefär lika mycket.

Luft genererad av luftporbildare fungerar som kullager vid flöde och minskar således den inre friktionen mellan partiklarna och sänker därmed viskositeten. Luftbubblorna påverkar dock inte partikelstrukturen i vila och därmed inte heller flytgränsspänningen.

På samma sätt som luft påverkar silikastoft reologin vid tillsättning i mängder motsvarande upp till ca 5 % av cementmängden, dvs. silikapartiklarna fungerar som kullager vid flöde. Vid större mängder slår vattenbehovet dock igenom och pilen får motsatt riktning än den som visar tillförsel av vatten (eller pasta/mikrobruk). Tillförsel av pulver, såsom exempelvis kalkfiller, slagg eller flygaska, ökar generellt, men i olika grad, vattenbehovet vilket ökar både flytgränsspänning och plastisk viskositet. Framförallt flygaska och slagg kan, pga. rundare partiklar, påverka reologin mer positivt i det att såväl flytgränsspänning som plastisk viskositet påverkas i mindre grad.

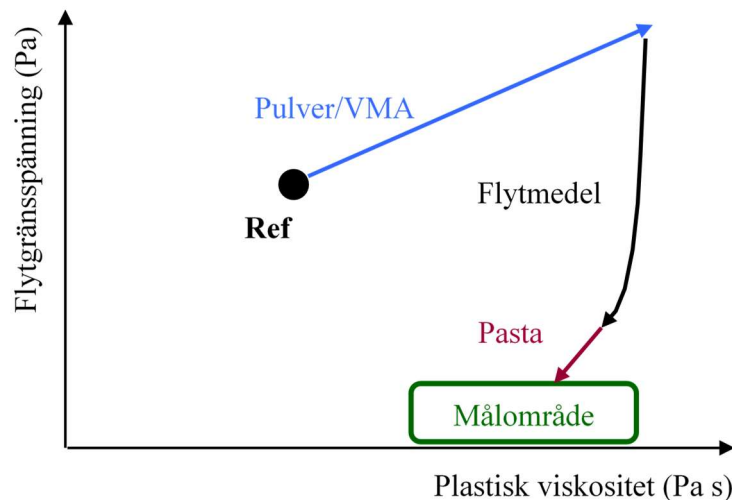
Viskositetsreglerande medel (VMA), också kallade stabilisatorer, påverkar betongens reologi på samma sätt som pulver eftersom vatten binds upp.



Figur 6.6: Olika och principiellt viktiga sätt att styra reologin hos betong, Wallevik (2003).

Om man syftar till att skapa en SKB utifrån en konventionell betong vars reologi visas i figur 6.7, kan man i princip gå till väga på följande sätt:

- Tillsatt pulver. Flytgränsspänning och plastisk viskositet ökar pga. ökat vattenbehov.
- Flytmedel tillförs för att återfå flytförmågan. Flytgränsspänningen sänks.
- Genom att tillföra pulver har man samtidigt ökat mikrobruksvolymen (vilket inte sker om man använder VMA). Flytgränsspänning och plastiska viskositeten sänks.
- Nu har man har nått målområdet.



Figur 6.7: Princip för hur man skapar en SKB utifrån en konventionell betong.

Noterbart är att VMA kan fungera på i princip samma sätt som pulver, men fördelen med ökad pastavolym uteblir. En ökad pastavolym påverkar flytegenskaperna positivt och dessutom betongens passeringsförmåga (se avsnitt 6.5).

Ett resonemang kring proportionering av SKB och styrning av de viktigaste färskas egenskaperna är betydligt enklare om man gör det utifrån ett reologiskt synsätt. Därför relaterar detta kapitel till kapitel 4 om reologi där viktigaste begreppen beskrivs.

6.5 Beräkningsmodell för passeringsförmåga

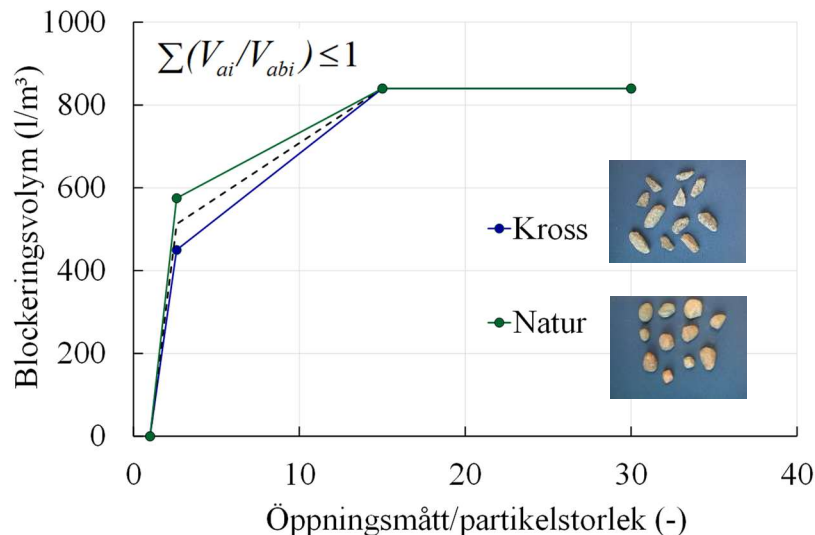
6.5.1 Allmänt

Krav på passeringsförmåga diskuterades i avsnitt 6.1.3. Här skall exempel på hur man kan proportionera SKB för att undvika blockering redovisas.

För att proportionera en SKB med hänsyn till passeringsförmåga skall hänsyn tas till det öppningsmått betongen skall kunna passera, största partikelstorlek (d_{\max}) och pastavolym.

Med utgångspunkt från forskning genomförd på Tokyo University, Ozawa m.fl. (1992) vidareutvecklade CBI, Petersson m.fl. (1996), en modell för beräkning av erforderlig mikrobruksvolym för att skapa passeringsförmåga hos SKB.

Principen bygger på att det för varje ensartad ballastfraktion finns en maximal volym som skapar blockering vid ett karakteristiskt öppningsmått, dvs. om betongen tänks innehålla endast denna fraktion. Vid detta betraktelsesätt är alltså kvoten mellan öppningsmättet (C , mm) och respektive ballastfraktions storlek (D_{af} , mm) viktigt. Med dessa kvoter (C/D_{af}) som ingångsvärden ger kurvorna i figur 6.8 blockeringsvolymen (V_{abi}) för respektive fraktion. Notera att man skiljer här på naturligt rundad ballast respektive krossballast.



Figur 6.8: Samband mellan kvoten öppningsmått och partikelstorlek och volym ballast som orsakar blockering.

En ballastfraktion kan exempelvis vara en som passerar en sikt i en standardsiktserie men stannar på den närmast mindre sikten. Fraktionens karakteristiska storlek blir då:

$$D_{af} = \phi_{i-1} + 0,75 \cdot (\phi_1 - \phi_{i-1}), \quad (6.3)$$

där

D_{af} är fraktionens karakteristiska partikelstorlek

ϕ_{i-1} är siktvidden för den sikt fraktionen stannar

ϕ_1 är siktvidden för den sikt fraktionen passerar

Den ballast som finns i en m^3 SKB kan således fraktioneras upp enligt en standardsiktserie, deras verkliga volym i en m^3 beräknas och blockeringsvolym för respektive fraktion tas fram med figur 6.8. Summerar man sedan alla ingående fraktioners kvoter mellan verklig volym per m^3 (V_a) och blockeringsvolym (V_{abi}) säger kriteriet (ekv 6.4) att summan skall vara 1 eller mindre. Notera att fraktionerna under $125 \mu m$ inte skall ingå i blockeringsberäkningen eftersom

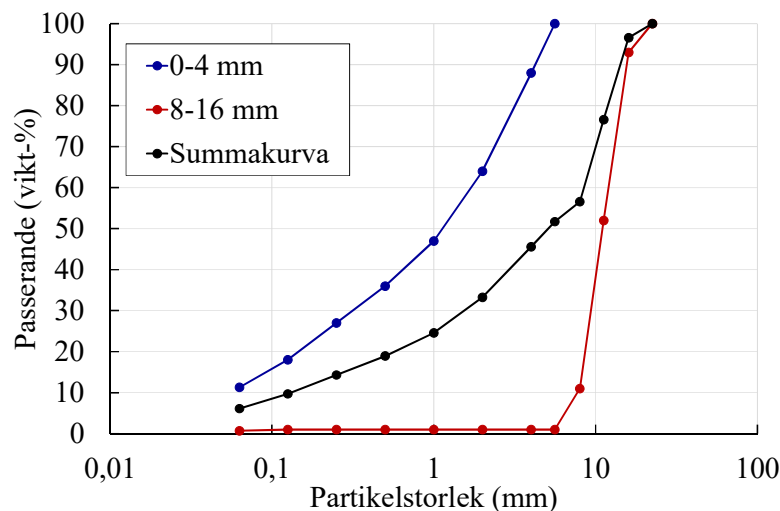
de istället ingår i mikrobruksvolymen. Optimering av ett SKB-recept innebär givetvis att kvoten bör vara så nära, men under, 1 som möjligt.

$$\sum_{i=1}^n \frac{v_{ai}}{v_{abi}} \leq 1 \quad (6.4)$$

6.5.2 Exempel på blockeringsberäkning

Förutsättningar:

1. Front- och vingmurar hos en plattrambro skall gjutas uppifrån med SKB. Tätast armering konstateras vara där fundament, vingmur och frontmur möts och dimensionerande öppningsmått, C, bedömdes vara 35 mm.
2. Betongen är en SKB i konsistensklass SF2 (målvärde 700 mm flytsättningsmått) med hållfasthetsklass C35/45 som uppfyller exponeringsklasserna XC4, XS3 XD3, XF4 och XA3. Betongrecept per m³ som uppfyller dessa krav är sammansatt med 430 kg anläggningscement, vct 0.40 (172 l vatten), 120 kg kalkfiller samt 4,6 % luft. Ballasten med d_{\max} 16 mm är kubiserad helkross med siktkurvor enligt figur 6.9. Total mängd ballast är 1604 kg/m³ varav 48,7 % utgörs av sten vilket resulterar i den sammansatta ballastkurvan i figur 6.9. Ballastens densitet är 2660 kg/m³.



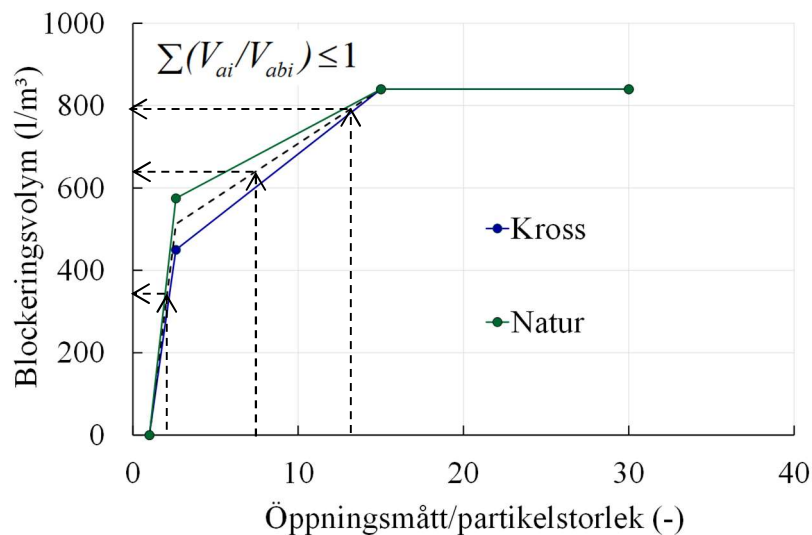
Figur 6.9: Ballastkurvor.

Med kunskap om ballastens siktkurvor, andel sand respektive sten samt dess densitet kan man räkna ut volymer, V_{ai} , för respektive fraktion. Karakteristisk partikelstorlek för respektive fraktion, D_{af} , räknas också ut enligt ekv. 6.3. Resultat från dessa uträkningar visas i tabell 6.1. Notera att den del av ballasten som har storlekar $\leq 0,125$ mm (skuggad i tabellen) inte ingår i blockeringsuträkning utan istället i betongens mikrobruksfas.

Tabell 6.1: Uträkning av fraktionernas storlekar samt volymer

Sikt, mm	Daf, mm (ekv 6.3)	stannar-%		Volymer, l/m ³	
		0-4	8-16	0-4	8-16
22,4		0,0	0	0	0
16	20,8	0,0	7	0	21
11,2	14,8	0,0	41	0	121
8	10,4	0,0	41	0	121
5,6	7,4	0,0	10	0	29
4	5,2	12,0	0	37	0
2	3,5	24,0	0	74	0
1	1,75	17,0	0	53	0
0,5	0,875	11,0	0	34	0
0,25	0,438	9,0	0	28	0
0,125	0,219	9,0	0	28	0
0,063	0,110	6,7	0,3	21	1
< 0,063	0,04725	11,3	0,7	35	2

Nästa steg är att för vardera fraktionen beräkna öppningsmått i relation med partikelstorlek, dvs. C/D_{af} . Med dessa värden används sedan kurvorna i figur 6.8 för att få fram de blockeringsvolymer, V_{abi} , som respektive fraktion har. Exempel på detta visas i figur 6.10 där det bör noteras att kurvan som används ligger mellan den som representerar natur och den för kross. Denna bedömning är gjord eftersom ballasten är kubiserad och alltså varken stänglig eller flakig.

Figur 6.10: Princip för framtagning av fraktionernas blockeringsvolymer, V_{abi} .

Nu har alla indata tagits fram (D_{af} , C/D_{af} , V_{ai} samt V_{abi}) och risken för blockering kan beräknas. Denna beräkning visas i tabell 6.2 där resultat visas för både bedömning av ballastens kornform såsom helkross samt dito för bedömning som kubiserade korn. Kriteriet i ekv 6.4 säger att summan av varje fraktions bidrag till blockering skall vara ≤ 1 och detta uppfylls då vi betraktar den krossade ballasten som kubiserad vilket resulterar i $\Sigma=0,95$. Om däremot ballasten betraktas som mer stänglig och/eller flakig så uppfylls inte kriteriet utan $\Sigma=1,04$.

Tabell 6:2: Exempel på beräkning av blockering

Sikt	Daf	C/Daf	Bidrag till blockering – Helkross, V_{ai}/V_{abi}			Bidrag till blockering – Kubiserad kross, V_{ai}/V_{abi}		
			V_{abi}	0-4	8-16	V_{abi}	0-4	8-16
22,4								
16	20,8	1,68	192	0,00	0,11	218	0,00	0,09
11,2	14,8	2,36	384	0,00	0,31	437	0,00	0,28
8	10,4	3,37	474	0,00	0,25	532	0,00	0,23
5,6	7,4	4,73	517	0,00	0,06	567	0,00	0,05
4	5,2	6,73	580	0,06	0,00	619	0,06	0,00
2	3,5	10,0	683	0,11	0,00	704	0,11	0,00
1	1,75	20,0	840	0,06	0,00	840	0,06	0,00
0,5	0,875	40,0	840	0,04	0,00	840	0,04	0,00
0,25	0,438	80,0	840	0,03	0,00	840	0,03	0,00
Bidrag från sand resp. sten				0,31	0,73		0,30	0,65
Total blockeringsrisk				1,04			0,95	

6.6 Referenser

Billberg P. Influence of Powder Type and VMA Combination on Certain key Fresh Properties of SCC. Ur: Proceedings, 9th International Symposium on High Performance Concrete – Design, Verification and Utilization, Rotorua, New Zealand, August 8-12, 2011.

Clarke B. Rheology of coarse settling suspensions”, Trans. Inst. Chem. Eng., 1967 (V. 45), s. 251-256.

Einstein A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. Annalen der Physik, 1906 (V. 19), s. 289-306.

Krieger I M & Dougherty T J. A Mechanism for non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres. Trans. Soc. Rheol., 1959 (V. 3), nr. 1, s. 137-145.

Ozawa K, Maekawa K & Okamura H. Development of High Performance Concrete. Journal of the Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo (B), 1992 (V. 41), nr. 3.

Petersson Ö, Billberg P & Van B K. A Model for Self-Compacting Concrete. Ur: Proceedings, RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, Skottland, 1996, s. 483-492.

Roussel N & Coussot P. Fifty-cent Rheometer for Yield Stress Measurements; from Slump to Spreading Flow. J. Rheol., 2005 (V 49), nr 3, s. 705-718.

SS-EN 12350-8:2019 Provnig av färsk betong – Del 8: Självkompakterande betong – Flytsättnmätt. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2019, 10 s.

Testing SCC. Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete. Paisly, Skottland: ACM Centre, Univ. of Paisly, 2007. Final Report, European Union Growth Contract No. G6RD-CT-2001-00580.

Wallevik O H & Wallevik J E. Rheology as a Tool in Concrete Science: The Use of Rheographs and Workability Boxes. Cement and Concrete Research, 2011 (V. 41), s. 1279-1288.

Wallevik O H. Rheological Properties of Mortar and Concrete, Including Measurements and Differences of SCC in Several Countries. Lyngby, Danmark: DTU, 2003. Lecture notes, RILEM-DTU course on the rheology of cement based materials.

Westerholm M. Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate. Luleå: LTU, institutionen för kemiteknik & geovetenskap, 2006. Licentiatavhandling 2006:06.

7. Blandning och transport

7.1 Allmänt

Tillverkning av SKB skiljer sig från tillverkning av konventionell betong genom att:

- (1) Hela tillverkningsprocessen kräver större noggrannhet och precision.
- (2) Eventuella variationer i delmaterialens egenskaper (t.ex. fuktkvot, finmaterialhalt och -kvalitet) påverkar den färska betongens egenskaper mer än de gör för konventionell betong.
- (3) Variationer i uppvägda delmaterial, vid tillverkning, har större inverkan på SKB än på konventionell betong.
- (4) Konsistensområdet där SKB uppfyller kriterier för flytförmåga, stabilitet och passeringsförmåga är mycket snävt i jämförelse med det område där konventionell betong är gjut-och kompakteringsbar.

Det färdiga gjutresultatet påverkas i likhet med gjutning med normal betong av flera faktorer: den färska betongens konsistens, formmaterialets beskaffenhet, formsläppningsmedlet, använd utläggningsteknik, med vilken kontinuitet gjutningen kan bedrivas (stighastighet, pallhöjder) m.m. Konsistensens inverkan på gjutresultatet är dock större med SKB vilket ökar behovet av kontroll och styrning både vid tillverkning och på arbetsplats.

Proportionering av SKB (kapitel 6) är därför ett viktigt delmoment då ju robustare betong som proportionerats, desto mindre känslig blir betongen för variationer i delmaterial och uppvägda delmaterialmängder. Före leverans skall framtagna recept testas (förprovning) i full skala på fabrik. Dessutom bör inverkan av transport och helst även pumpning undersökas och vid särskilt komplicerade projekt kan provgjutning behöva genomföras. En klar bild av hur det totala systemet "tillverkning -transport -pumpning" påverkar betongens egenskaper bör skaffas för varje betongkvalitet på respektive fabrik. Detta kan dessutom behöva göras vid varierande årstider/väder.

7.2 Blandning

7.2.1 Blandare

SKB kan tillverkas i samma blandartyper som används för konventionell betong och såväl frifallsblandare som olika typer av tvångsblandare kan användas; se Daczko (2012) och De Schutter m.fl. (2008). SKB har inledningsvis en mycket trög konsistens, p.g.a. den ökade finmaterialhalten, och har högre viskositet än konventionell betong, och därför behöver mer blandningsenergi tillföras för dispergering, se t.ex. Chopin m.fl (2004). Tvångsblandare är därför generellt bättre lämpade för SKB. Tvångsblandare har också den fördelen att de enklare kan förses med system för bestämning av reologiska egenskaper, se t.ex. Cazacliu (2008) och Cazacliu & Roquet (2009). För frifallsblandare krävs en väsentligt ökad blandningstid, oftast minst den dubbla, för att skapa en homogen och väldispergerad massa som är färdigblandad, se De Schutter m.fl. (2008). Den färska betongen är färdigblandad när konsistensen inte förändras vid ökad blandningstid vilket indikeras av att effektmätaren, som används för att kontrollera konsistensen, vid blandning har stabiliserats och effektbehovet är konstant. När det gäller frifallsblandare ger effektmätaren osäkra svar på konsistensen.

Blandningstiden påverkas inte bara av blandarens effektivitet utan också mycket av aktuellt *vct*, finmaterialmängd, flyttillsatsmedlets effekt och inblandningstid, mm. Erforderlig blandningstid

behöver därför verifieras för olika betongrecept på respektive fabrik. Hur blandnings-effektiviteten påverkar den färska betongens reologiska egenskaper har t.ex. Takada (2004) undersökt.

7.2.2 Blandningsordning

Blandningsordningen, dvs. i vilken ordning/sekvens som delmaterialen tillsätts, är viktig. Den lämpligaste blandningsordningen påverkas av flera parametrar såsom flödet av delmaterialen ner i blandaren, blandarens utformning och innandöme, använda delmaterial (inklusive tillsatsmedel), etc. Det är svårt att ange någon allmängiltig optimal blandningsordning och ofta kan samma blandningssekvens som används för vanlig betong användas för SKB med tillfredsställande resultat. Torrblandning någon minut före vattentillsats, vilket ofta används vid laboratorieblandning, har dock visat sig vara en olämplig metod p.g.a. kraftig påbyggnad av finmaterial i blandaren och ökat slitage och metoden är särskilt olämplig för frifallsblandare.

Flyttillsatsmedel bör tillsättas tidigast med blandningsvattnet. En fördröjd tillsättning ger oftast en bättre effekt, men leder till ökad blandningstid. Viskositetsmedel tillsätts fördelaktigast efter flyttillsatsmedlet, gärna med viss fördröjning.

Varje anläggning är unik och därför bör varje fabrik själv utprova lämplig blandningsordning och följa tillsatsmedelsleverantörens rekommendationer vad gäller lämplig doseringsordning. En blandningsordning som i många fall visat sig vara lämplig och som reducerar påbyggnad av finmaterial i blandaren är blandningssekvensen:

1. vatten + sten + fingrus
2. cement + filler
3. flytmedel

med viss fördröjning mellan de olika stegen.

Ett annat exempel är följande sekvens:

1. vatten + cement + filler
2. sten och fingrus
3. flytmedel

med 20 sekunders fördröjning mellan de olika stegen.

Ett tredje exempel är:

1. ballast + vatten + 1/2 flytmängden och ev. andra tillsatsmedel
2. cement + filler
3. resterande flytmedel

med 5-10 sekunder mellan steg 1 och 2 och 30 sekunder mellan steg 2 och 3.

Cementkornen måste vätas innan flytmedlet släpps ner i blandare. Vidare bör flytmedlet vara omsorgsfullt omrört före inblandning. Såväl de aktiva komponenterna i dispergeringsmedlet som skumdämpdelen kan separera och därför skall förvaring och hantering av flyttillsatsmedlen följa leverantörens anvisningar.

Eventuella luftporbildande tillsatsmedel kan antingen blandas tillsammans med vatten + sten + fingrus eller direkt därefter. Luftporbildare skall aldrig tillsättas tillsammans med flyttillsatsmedel då skumdämparen i den senare kan påverka luftporbildaren negativt.

7.2.2 Blandning

Vid blandning av SKB bör om möjligt allt vatten tillsättas på en gång eftersom detta förkortar blandningstiden. En fördröjd tillsättning (som spädvatten) ger inte samma effekt. Förfarandet kräver mycket god kontroll på fukttinnehållet i ballastmaterialen, stor noggrannhet vid uppvägning av ingående delmaterial och små variationer i egenskaper hos samtliga delmaterial. Men under sådana betingelser fås bäst resultat med avseende på både den färska betongens homogenitet och stabilitet och anläggningens produktionskapacitet. Kontroll av ballastens fukttinnehåll är mycket viktigt och en ökad noggrannhet och kontroll krävs. I praktiken kan det vara svårt att uppnå en högre noggrannhet än $\pm 0,5$ % även med fuktgivare installerade. Om fuktkvoten i ballasten är 0,5 % och ballastinnehållet 1800 kg/m³ innehåller ballasten 9 liter vatten per kubikmeter. Om styrning av konsistens behövs i fabrik bör den därför i första hand göras med en begränsad mängd spädvatten. Här kan nämnas att det förekommer att man använder s.k. wattmätare för att bestämma betongens konsistens. I dagsläget (2020) är pålitligheten hos dessa dock otillräcklig.

Okulärbesiktning av varje sats skall enligt SS-EN 206 göras innan den töms i bilen och instruktioner hur den färska betongen skall bedömas måste finnas. Bedömningen kräver såväl erfarenhet och kompetens som stort engagemang.

Blandningen bör helst ske i fulla satser. Blandaren får inte vara torr utan vingar och innandöme bör antingen vara uppfuktade eller vara mättade med cementbruk. Växelvis produktion av normalbetong och SKB kan således vara möjlig utan att blandaren behöver rengöras mellan satserna. Dock är det viktigt att tillse att blandaren är omsorgsfullt tömd innan ny sats av SKB blandas samt att eventuellt tillsatsmedel från föregående sats är kompatibelt med flytmedlet i den självkompakterande betongen. Det har i vissa fall visat sig att olika kombinationer av äldre och nyare flyttillsatsmedel inte är kompatibla utan tvärtom gör det mycket svårt att tillverka SKB.

Diskprogram kan behöva köras oftare än för normalbetong. Påbyggnad av finbruk i blandarkärlet och på vingarna kan bli stor, vilket kan påverka den färska betongens egenskaper i efterföljande satser.

Tillverkning av varmbetong kräver viss uppmärksamhet. Vid tillsättning av varmvatten kräver betongen ofta ökad blandningstid, varför det också här kan rekommenderas att inte styra konsistensen med hjälp av spädvatten. Alltför höga vattentemperaturer bör undvikas, speciellt i samband med vissa luftporbildande tillsatsmedel. I möjligaste mån bör uppvärmd ballast användas. Vid hög betongtemperatur kan konsistensförlusten öka och därför bör förundersökning avseende temperaturinverkan hos SKB med de aktuella materialen (cement och flyttillsatsmedel) utföras.

Inblandning av stålfibrer eller plastfibrer kan göras på liknande sätt och i samma mängder som för vanlig betong.

7.3 Kontroll av den färska betongen

Tillverkning av SKB kräver vanligtvis utökad kontroll i jämförelse med normal betong och vad som fordras enligt SS-EN 206. På fabrik bör den färska betongens egenskaper kontrolleras avseende flytsättningsmått, och även lufthalt då detta är aktuellt, på samtliga lass fram till dess att erhållna värden visar att betongen håller jämn kvalitet och ligger innanför de överenskomna gränsvärdena. Då stabila värden på flytsättningsmått (och lufthalt) kunnat påvisas i flera prover från på varandra följande leveranser, kan provtagningsfrekvensen minskas. Om något – t.ex. ballastens siktkurva eller fukthalt – däremot ändras bör kontrollen återupptas. Omfattning och

frekvens av mottagningskontroll på arbetsplats (se kapitel 15) beror bl.a. på hur betongen skall användas och vilka krav som ställts. Vad som skall provas, vilka kriterier som skall uppfyllas och hur ofta det skall ske skall i förväg bestämmas i överenskommelse med kund.

7.4 Transport och före lossning

SKB transporteras i roterande behållare som bör ha hög effektivitet avseende vingarnas utformning och kondition samt roteraggregatets rotationskapacitet. Behållaren bör vid lastning inte vara torr, men skall vara helt tom på fritt vatten. Under transport skall behållaren rotera på låga varv för att säkerställa homogen betong på arbetsplatsen. Eftersom SKB är tixotrop (se kapitel 4) kan den under transport ha byggt en struktur och före lossning skall därför behållaren roteras minst två minuter på högsta varvtal. Vid kraftigt regn kan bilens påfyllningstratt behöva vara övertäckt för att hindra regnvatten från att rinna ner i roterkärlet.

Det finns forskning som syftar till att kunna kontrollera och mäta betongens konsistens i roterbilen; se t.ex. Daczko (2000), Amziane m.fl (2005 & 2006), Wallevik & Wallevik (2016a & 2016b). Emellertid är detta delområde mycket komplext och det har visat sig svårt att bestämma de reologiska egenskaperna, särskilt den plastiska viskositeten.

7.5 Referenser

Amziane S, Ferraris C F & Koehler E P. Measurement of Workability of Fresh Concrete Using a Mixing Truck. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2005 (V. 110), nr. 1, s. 55-66.

Amziane S, Ferraris C F & Koehler E P. Feasibility of Using a Concrete Mixing Truck as a Rheometer. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2006. (NISTIR 7333).

Cazacliu B & Roquet N. Concrete Mixing Kinetics by Means of Power Measurement. *Cement and Concrete Research*, 2009 (V. 39), s. 182–194.

Cazacliu B. In-Mixer Measurements for Describing Mixture Evolution during Concrete Mixing. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008 (V. 86), s. 1423-1433.

Chopin D, de Larrard L L, & Cazacliu B. Why do HPC and SCC require a longer mixing time? *Cement and Concrete Research*, 2004 (V. 34), nr. 12, s. 2237–2243.

Daczko J A. *Self-Consolidating Concrete – Applying What We Know*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012.

Daczko J A. A Proposal for Measuring Rheology of Production Concrete. *Concrete International*, 2000 (V. 22), nr. 5, s. 47-49.

De Schutter G, Bartos P J M, Dome P & Gibbs J. *Self-Compacting Concrete*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008.

EFNARC. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification-Production and Use*. EFNARC, 2005. (<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.)

Guidelines for Production and Use of Self-Compacting Concrete. Oslo: Norsk Betongforening, 2002. NB-Publikation nr. 29.

SS-EN 206. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute, 2013.

Takada K. Influence of Admixtures and Mixing Efficiency on the Properties of Self Compacting Concrete. Delft, Nederländerna: Delft Technical University, 2004. PhD thesis.

Wallevik J E & Wallevik O H (2016a). Concrete Truck Mixer as a Rheometer – Computational Analysis Using OpenFOAM. Ur: Proceedings, International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, Conference Segment on Fresh Concrete, 22-24 augusti 2016, (Technical University of Denmark, Lyngby, Danmark), s. 185-194.

Wallevik J E & Wallevik O H (2016b). Analysis of Shear Rate inside a Concrete Truck Mixer. Ur: Proceedings, 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - SCC 2016, 15-18 maj 2016, Washington, DC, USA, s. 233-241.

8. Fiberbetong

8.1 Inledning

Självkompakterande betong öppnar stora möjligheter för produktivitets- och arbetsmiljöförbättringar i och med att det arbetsintensiva vibreringsarbetet kan elimineras. Det är ett steg på vägen men inläggningen av armering är ett ännu tyngre och arbetsintensivare moment. Kan vi kombinera självkompakterande betong med fibrer som helt eller åtminstone delvis ersätter konventionell armering när vi minst ett steg till. I konstruktionselement med måttliga böjande moment – som t.ex. industrigolv – har fiberbetong visat sig vara ett konkurrenskraftigt alternativ. I andra tillämpningar – t.ex. balkar och pålunderstödda betongplattor – kan kombinationer av slakarmering och fibrer vara det lämpligaste alternativet. I balkarna kombineras slakarmeringen för böjande moment med fibrer för tvärkraft. Därigenom kan byglarna ersättas och att lägga in byglar är mer komplicerat än att lägga in böjarmering. I pålunderstödda betonggolv används inte sällan en lösning där fiberbetong kompletteras med slakarmering lokalt över pålskallarna.

I vårt land har självkompakterande betong med fibrer inte använts i någon större omfattning. De två största områdena för fiberbetong – bergförstärkning och industrigolv – brukar normalt utföras med sprutbetong resp. vibrerad betong. I Danmark används en form av ”semi-SKB” för industrigolv (då ofta med fiber).

Fibrer tillverkas av många olika material. Stål är det absolut vanligaste men även syntetiska fibrer (normalt polypropylenfibrer) är vanliga. Dessutom förekommer fibrer av glas, kol, cellulosa, hampa och basalt. Densiteten är olika för de olika materialen och spänner från 900 till 7800 kg/m³. I den färska betongen har densitetsskillnaden mellan betong och fiber betydelse. I separationsbenägen betong kommer de lätta fibrerna att flyta upp mot ytan medan de tyngre (främst stål-) fibrerna ansamlas i botten av gjutningen. Skadetredningar från industrigolv i vibrerad stålfiberbetong visar att skillnaden i fiberinnehåll mellan den understa tredjedelen av golvet och den översta tredjedelen kan vara tämligen stor (Khudhair, 2016).

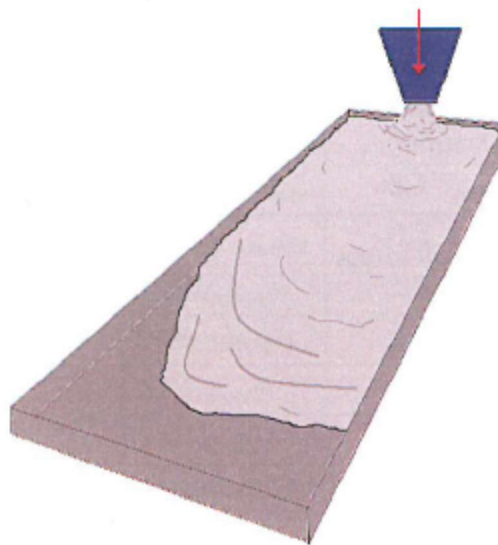
8.2 Stabilitet och separation

En grundförutsättning för självkompakterande betong är att den skall vara stabil, dvs. inte separera. Normalt ligger det ett stort arbete bakom utvecklingen av varje SKB-recept. Man kan inte utan vidare addera fibrer till ett fungerande SKB-recept utan att modifiera det. Ett recept för SKB med fibrer måste därför tas fram. Väl framme bör det fungera utan separation inte bara i laboratoriet utan också i fält under förutsättning att samtliga moment från blandning till gjutning genomförs som tänkt.

8.3 Fibernas orientering

Vid dimensionering av fiberbetongkonstruktioner brukar man ofta beakta fibernas orientering på något sätt. Finns fibrer i alla riktningar i betongvolymen kommer bara ungefär 1/3 att vara verksamma för att ta upp spänningar som ju normalt har en dominerande riktning. I tunnare plattor ligger de flesta fibrerna horisontellt eller nästan horisontellt, det betyder att ungefär hälften av fibrerna är verksamma. Detsamma gäller de mindre balkar som brukar användas för att prova fiberbetong för att bestämma dess böjdraghållfasthet. I svensk standard för dimensionering av fiberbetongkonstruktioner (SS 812310:2014) hanteras fiberorienteringen genom en faktor γ_f . Den är 1,0 för tunna plattor men annars < 1.

Som påpekats i ovanstående stycke är fiberorienteringen en viktig faktor. Kan man styra fiberorienteringen så att merparten av fibrerna riktar in sig parallellt med huvuddragspänningen får man största möjliga nytta av fibrerna. Försök att orientera stålfibrerna har gjorts med magneter men metoden har författarna veterligen inte använts i fält. När man gjuter SKB stör man inte betongen med någon efterföljande vibrering och förutsättningarna att den färska betongens flöde skall stelna i den hårdnade betongen ökar väsentligt. Genom att föra pumpslangens munstycke i ett förutbestämt mönster kan man därför påverka både den färska och hårdnande betongen. Om och hur fibrerna riktar in sig i flödet har därför varit en forskningsfråga som rönt stort intresse. Lyslo Døssland (2008) fann genom försök med stålfiberbetongbalkar att fibrerna riktade in sig längs med flödesriktningen som i sin tur hade styrts i balkens längdändring. I samma avhandling beskrev hon även försök med långsmala, rektangulära plattor där betongen pumpades ut från ena kortsidan (figur 8.1). I en punkt nära pumpmunstycket var ungefär lika många fibrer riktade parallellt med som vinkelrätt mot flödet. På ett större avstånd dominerade riktningen parallellt med flödet.



Figur 8.1 – Gjutning av rektangulär platta med fiberbetong (Lyslo Døssland, 2008).

Genom att gjuta på ett annat sätt kan man få en helt annan fiberorientering. Danska erfarenheter (DTI, 2013) visar att om man gjuter en mer kvadratisk platta genom att pumpa ut betongen i mitten och låta flyta ut mot kanterna kommer fibrerna att ställa in sig i tangentiell riktning, dvs. i ett mer ringformat mönster. Orsaken är att flödeshastigheten är sex gånger större i tangentiell riktning än i radiell riktning (Gram, 2015) och fibrer tenderar att ställa in sig efter den största flödeshastigheten.

8.4 Referenser

Guideline for Execution of Steel Fibre Reinforced SCC. Taastrup, Danmark: Danish Technological Institute, 2013.

Gram A. Modelling Bingham Suspensional Flow – Influence of Viscosity and Particle Properties Applicable to Cementitious Materials. Stockholm: KTH, institutionen för byggvetenskap, avdelningen för betongbyggnad, 2015. Bulletin nr. 128 (doktorsavhandling),

Lyslo Døssland Å. Fibre Reinforcement in Load Carrying Concrete Structures: Laboratory and Field Investigations Compared with Theory and Finite Element Analysis. Trondheim, Norge:

NTNU, Faculty of Engineering Science & Technology, Dept. of Structural Engineering, 2008. Doctoral Thesis, No. 2008:50.

Khudhair A. Fiberfördelning i industrigolv av stålfiberbetong – fältmätningar. Stockholm: KTH, institutionen för byggvetenskap, avdelningen för byggteknik & design, 2016. Examensarbete nr. 479.

SS 812310:2014. Fiberbetong - Dimensionering av fiberbetongkonstruktioner. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2014, 38 s.

9. Konstruktiva aspekter

9.1 Allmänt

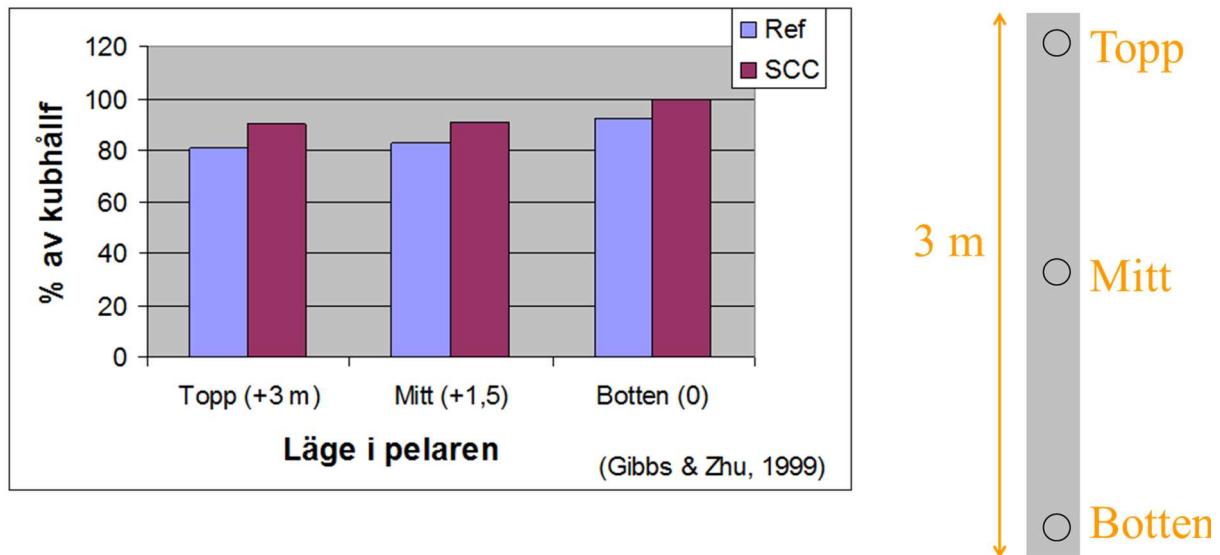
Betongs mekaniska egenskaper beror i huvudsak på betongreceptet och härdningen under förutsättning att produktionen inte sker på ett felaktigt sätt (gjutning från hög fallhöjd, otillräcklig kompaktering och övervibrering är tre exempel på fel). Det betyder att fullgoda resultat kan erhållas med såväl vibrerad som självkompakterande betong. Att man har konstaterat skillnader mellan vibrerad och självkompakterande betong beror främst på att man använder litet olika recept, SKB innehåller oftast filler som leder till ökad täthet i betongen. Ökad täthet betyder i sin tur högre hållfasthet och bättre beständighet. Eftersom man använder olika recept för vibrerad betong och SKB kan det ändå vara lämpligt att reflektera över de skillnader som skillnaden i recept har för betydelse på de konstruktiva aspekterna.

9.2 Hållfasthet

Normalt innehåller SKB mer filler än vibrerad betong vilket innebär en tätare struktur men också en större pastavolym. Tätare struktur innebär högre hållfasthet men eftersom pastafasen normalt är svagare än ballastfasen borde en ökad pastavolym leda till lägre hållfasthet. Det finns dock många försök som visar att hållfastheten hos SKB är större än hållfastheten hos vibrerad betong för samma v_{ct} . RILEM har tagit fram en STAR-rapport som behandlar mekaniska egenskaper hos SKB och där har utnyttjat resultaten från över 1500 recept redovisade i över 250 artiklar (Khayat & Schutter, 2014). I den rapporten finns dock inga diagram som kvantifierar hållfasthetsskillnaden mellan SKB och vibrerad betong men enskilda studier visar att skillnaden i tryckhållfasthet kan vara upp till 10 %. Alternativt kan man uttrycka det så att en normal SKB med $v_{ct} = 0,45$ kan ge lika hög tryckhållfasthet som vibrerad betong med $v_{ct} = 0,40$.

Tryckhållfasthet mäts på såväl kuber som cylindrar och traditionellt brukar man ange att kvoten mellan de båda hållfasthetsvärdena $f_{cc,cube}/f_{cc,cyl} = 1,15$ à $1,25$ (detta spann används t.ex. i EK 2). Enligt RILEM är kvoten avgjort lägre för SKB; 1,1 eller t.o.m. lägre. Eftersom vi vanligen provar kuber men baserar dimensioneringen för cylinderhållfastheten är detta naturligtvis intressant även om det hittills inte påverkat regelverken för dimensionering.

Vibrering påverkar betong lokalt. Vi vet att betongen kan få dålig kvalitet ifall den övervibreras. Betongens egenskaper blir också något annorlunda i de punkter där man fört ned vibrostaven och punkter mellan två nedstick. Vibrering innebär vidare att betongen får olika kvalitet i höjdlid inom en gjutning. Normalt är hållfastheten högre i pelares och väggar under- än överkant. SKB leder till jämnare kvalitet, se figur 9.1.



Figur 9.1 – Relativa hållfasthetsskillnader i vibrerad betong (Ref) och SKB (SCC) p.g.a. läget i gjuten betongpelare (Gibbs & Zhu, 1999).

Betongs draghållfasthet är väsentligt lägre än dess tryckhållfasthet och det finns inga indikationer på att draghållfastheten för SKB skulle vara annorlunda än draghållfastheten för motsvarande vibrerade betong. Detsamma gäller böjdraghållfastheten som är en viktig egenskap vid dimensionering av industrigolv och vägar. Däremot visar RILEM-rapporten att typen av ballast och typen av filler påverkar SKB:s draghållfasthet, men det för långt att gå in på det här.

Betongs elasticitetsmodul påverkas väsentligt av ballastens styvhet. Enligt EK 2 skall man t.ex. reducera tabellvärdet om ballasten består av kalk- eller sandsten och höja det ifall ballasten utgörs av basalt. Ballasten är också styvare än cementpastan varför man kunde förvänta sig en lägre E-modul för SKB än för en vibrerad betong av samma hållfasthetsklass. Litteraturen har dock inte kunnat påvisa några signifikanta skillnader (Khayat & Schutter, 2014).

9.3 Krympning

Det finns huvudsakligen tre olika sorters krympning; plastisk krympning, uttorkningskrympning och autogen krympning. Den tidiga plastiska krympningen kan förväntas vara högre för SKB än för vibrerad betong eftersom man normalt använder recept med lägre v_{pt} och mer filler. Men enligt den ovan citerade RILEM-rapporten (Khayat & Schutter, 2014) har denna teori hittills inte bekräftats experimentellt.

Eftersom ballasten inte krymper bör en betong som SKB som innehåller en större pastavolym än vibrerad betong ha större uttorkningskrympning. Enligt RILEM är fallet också så även om skillnaden inte är stor.

Autogen krympning som sker genom självtorkning vid cementets hydratation ökar med minskande v_{ct} (eller ökande hållfasthet enligt den ekvation som används för beräkning i EK 2). Författarna till RILEM-rapporten menar att eftersom pastavolymen i SKB till betydande del består av mineralogiska, inerta filler som inte bidrar till hydratationen så behöver man inte räkna med en större autogen krympning i SKB än i vibrerad betong.

9.4 Krypning

Krypning och krympning har inte enbart en bokstavlig likhet utan även en fenomenologisk. Många faktorer, t.ex. recept och fukt, påverkar både krympning och krypning och dessutom på ett snarlikt sätt. Det finns två faktorer i receptet som skiljer sig mellan SKB och vibrerad betong; storleken på pastavolymen och pulvertypen. Forskningen, som refereras i RILEM-rapporten, visar att krypningen, normalt uttryckt som kryptalet, vanligen är något större för SKB än för motsvarande vibrerade betong till följd av en något större pastavolym.

Krypningen i SKB beror på vilka bindemedel som används. Används kalkstensfiller har detta enbart en liten inverkan på kryptalet medan slagg och flygaska kan ge en liten reduktion av kryptalet. Författarna till RILEM-rapporten menar att kryptalet blir mindre i en betong som har större hållfasthetstillväxt efter pålastning. Tillsatser av både slagg och flygaska ger en långsammare hydratation och hållfasthetstillväxt vilket samtidigt innebär att hållfastheten kommer att öka mer efter pålastning. Vi får en successivt styvare betong som alltså kommer att krypa något mindre.

9.5 Förankring av armering

Det finns flera försök (t.ex. Khayat m.fl., 1997, & Schießl, 2001) som visar att vidhäftningen mellan armering och SKB är 20, 30 och t.o.m. 40 % högre än vidhäftningen mellan armering och vibrerad betong. En annan forskare (Domone, 2007) fann efter en genomgång av tillgänglig litteratur att vidhäftningen mellan armering och SKB ”väsentligen är lika stor” som den mellan armering och vibrerad betong.

Vid gjutning av konventionell, vibrerad betong blir vidhäftningen mellan armering och betong sämre i överkant balk eller platta än i underkant. Detta har även avspeglats i normerna. Enligt EK 2 gäller detta ifall gjuthöjden överstiger 250 mm. Inom den övre delen – där överkantsarmeringen placeras – skall man reducera vidhäftningshållfastheten mellan kamstänger och omgivande betong med 30 % (genom multiplikation med en faktor $\eta_1 = 0,7$).

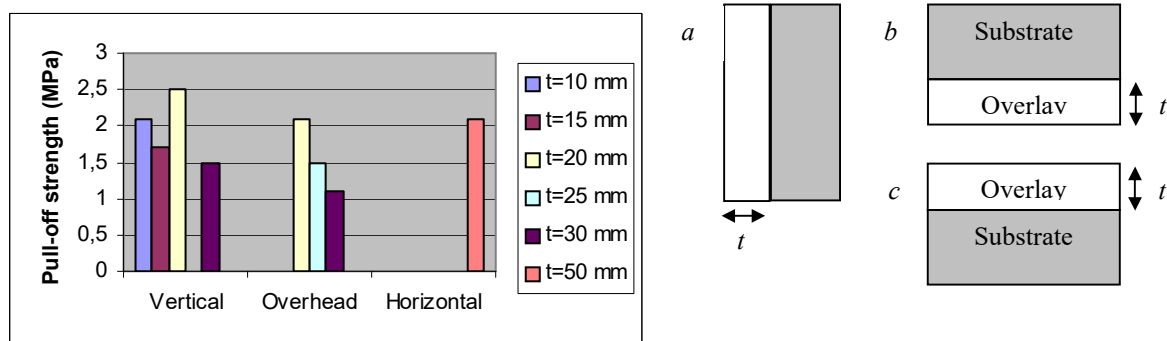
Det högsta värdet (40 %) som Schießl (2001) observerade gällde högre gjuthöjd. Det verkar som om vidhäftningen mellan armering och SKB inte är lika höjdberoende som i fallet med vibrerad betong. Denna reducerade gjuthöjdseffekt har även diskuterats av RILEM-rapporten. Författarna menar att SKB:s goda flytbarhet som gör att den kan omsluta armeringen så väl. Ett krav för att erhålla god vidhäftning är dock att stabiliteten hos den färska självkompakterande betongen är hög. Man skulle kunna tänka sig att i förlängningen höja värdet på reduktionsfaktorn η_1 i EK 2 från 0,7 för SKB men hittills är försöksresultaten för spretiga för att rekommendera det.

9.6 Vidhäftning mellan betong och SKB

God kompaktering är en av de fem viktigaste faktorerna för att främja god vidhäftning mellan gammal betong och pågjutning (frihet från cementhud, frihet från mikrosprickor, renhet och god härdning är de andra, se Betongrapport nr 13, 2008). Traditionellt säkerställs god kompaktering genom vibrering, men erfarenheten visar att SKB också kan ge goda resultat. SKB har dessutom några fördelar jämfört med vibrering; (1) man når ett jämnare resultat (vid ev. stavvibrering blir det lokala skillnader beroende på avståndet till nedsticket), (2) man kan kompaktera alla pågjutningar oberoende av tjockleken, (3) även hårt armerade pågjutningar kan kompakteras och (4) man kan t.o.m. utföra pågjutningar (motgjutning) mot undersidor. Finska

försök (Sistonen m.fl., 2006) visar lovande resultat med medelvärden på vidhäftningen vid ren dragning på över 1,5 MPa för sju av åtta fall (figur 9.2).

I vårt land finns en väldokumenterad reparation från 2005 av en brandskadad bro där pågjutningen utfördes i SKB. Här nådde man medelvärden på vidhäftningen vid ren dragning på mellan 1 och drygt 2 MPa för fem olika konstruktionsdelar (Silfwerbrand, 2007). Även om resultaten inte fullt ut motsvarade beställarens mycket höga krav så måste de anses som lovande. Erfarenheten från vidhäftningsprovar i praktiken visar att värdena brukar variera på broarna (Silfwerbrand, 1990) och att även 1 MPa normalt är tillräckligt för de påkänningar som uppstår.



Figur 9.2 – Vidhäftning som resultat från dragprovning av pågjutningar i SKB med varierande tjocklek t för vertikala fogtyper (a), undersida (b) och horisontell yta (c). Från Silfwerbrand (2007) baserat på Sistonen m.fl. (2006).

9.7 Täckande betongskikt

Det primära syftet med täckande betongskiktet är att ge armeringen tillräcklig förankring i betongen. I aggressiva miljöer har täckskiktet även en uppgift att skydda armeringen mot karbonatisering och kloridinträngning. Eftersom både förankringsförmågan och beständigheten hos SKB är minst lika bra som hos vibrerad betong skulle man kunna tänka sig att minska täckskiktet något ifall man väljer SKB. Skillnaderna är emellertid små och varierar dessutom med betongreceptet varför rekommendationen är att använda samma regler som för vibrerad betong.

Risken för brandspjälkning är normalt litet större i fuktig SKB än i fuktig vibrerad betong (se kapitel 11). Brandspjälkningen sker successivt och det innebär att det tar längre tid innan armering blottläggs om täckskiktet är tjockt. Tid är en viktig faktor för såväl personsäkerhet som möjligheterna att reparera en betongkonstruktion efter brand. Att utöka täckskiktet ifall det finns risk för brandspjälkning är ett alternativ till inblandning av polypropylenfibrer (pp-fibrer, se avsnitt 11.3), men det gäller såväl SKB som vibrerad betong.

9.8 Minsta avstånd mellan armeringsenheter

I normerna regleras minsta avståndet mellan armeringsenheter utifrån krav på förankring av armeringen (beror av stångdiametern) och krav på att ballasten skall kunna passera mellan enheterna vid gjutningen (beror av största stenstorlek). Dessa krav gäller såväl vibrerad betong som SKB.

Utöver dessa krav måste gjutningen naturligtvis kunna genomföras på ett bra sätt. För vibrerad betong måste avståndet mellan armeringsenheterna vara så stort att vibrostaven kan stickas ned. Vid mycket tät armering kan detta krav vara dimensionerande. Kravet på fri passage av

vibrostavens försvinner naturligtvis per definition ifall man väljer SKB. Det finns konstruktörer som ser detta som den stora fördelen med SKB men frågan är ifall mycket tät armering är den bästa lösningen. Kanske är det i stället bättre att öka tvärsnittet.

9.9 Tvärkraftskapacitet

Tvärkraftskapaciteten hos en armerad betongbalk utan tvärkraftsarmering anses bero på tre olika bidrag; (1) en kraft över tryckzonen inom tvärsnittet, (2) friktionsspänningar mellan ballastkornen i skjavsprickan och (3) dymlingskraft i armeringen. Eftersom man normalt använder ballast med mindre stenstorlek i SKB än i vibrerad betong kommer de sprickor som uppkommer sannolikt att vara tätare. Det innebär att både bidragen 2 och 3 sjunker. Trots mer än 100 års forskning om tvärkraftskapaciteten är kunskapen fortfarande otillräcklig samtidigt som spridningen i försöksresultat är stor (även vid identiska balkar gjutna från med samma betong). Detta betyder att de ekvationer som används vid dimensionering ger resultat som är mycket på säker sida. Det är därför meningslöst att differentiera ekvationerna beroende på valet av betongtyp.

Sedan EK 2 introducerades innebär dess krav på minimiarmering att de flesta balkar kommer att innehålla tvärkraftsarmering. Dimensioneringen utförs då enligt fackverksmodell varvid tryckta betongsträvor och dragna armeringsstänger studeras separat. Inverkan av SKB eller vibrerad betong blir då ännu mindre.

9.10 Referenser

Domone P L. A Review of the Hardened Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. *Cement & Concrete Composites*, 2007 (V. 29), nr. 1, 2007, s. 1-12.

Gibbs J C & Zhu W. Strength of Hardened Self-Compacting Concrete. Ur: *Proceedings, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, 1999, s. 199-209.

Khayat K H, Manai K & Trudel A. In Situ Mechanical Properties of Wall Elements Cast Using Self-Consolidating Concrete. *ACI Materials Journal*, 1997 (V. 94), nr. 6, s. 491-500.

Khayat K H & De Schutter G & Audenaert K. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS "Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete". Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2014. RILEM State-of-The-Art Report V. 14

Schießl A: Verbundverhalten von selbstverdichtendem Beton. Ur: *Proceedings, 5. Münchner Massivbauseminars*, München, 2001. (Springer Verlag), s. 177-185.

Silfwerbrand J. Improving Concrete Bond in Repaired Bridge Decks. *Concrete International*, 1990 (V. 12), nr. 9, s. 61-66.

Silfwerbrand J. Use of Self-compacting Concrete for Bonded Overlays. Ur: *Proceedings, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Ghent, Belgien, 3-5 september, 2007, Vol. 2, s. 779-784.

Sistonen E V-P, Püronen J P, Al-Neshawy F M & Huovinen S S. Balcony Repair with Pumped Self-Compacting Concrete'. *Proceedings, 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, Quebec City, Kanada, 11-13 september, 2006.

SS-EN 1992-1-1:2005. Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute, 2005, 244 s.

Industrigolv – Rekommendationer för projektering, materialval, produktion, drift och underhåll. Stockholm: Svenska Betongföreningen, 2008. Betongrapport nr 13, 296 s.

10. Beständighet

10.1 Karbonatisering

En litteraturgenomgång av de forskningsresultat som finns avseende karbonatiseringshastighet och -djup, ger en något osammanhängande bild. I en jämförelse mellan traditionell vibrerad betong (här kallad normalbetong, förkortad NB) och SKB förekommer resultat som pekar åt båda hållen men skillnaderna är små. Generellt kan dock sägas att i de lägre betongkvaliteterna (hållfasthetsklasserna) så framstår skillnaderna tydligare och SKB har då oftast ett mindre karboniseringsdjup på grund av dess tätare struktur vid samma vatten- och cementinnehåll (vattencementtal, *vct*). Däremot är karbonatiseringshastigheter och -djup för både NB och SKB generellt låga respektive små vid låga *vct* eller vattenbindemedelstal, *vbt* ($< 0,45$), vilket gör att signifikanta skillnader inte finns eller är små. Det betyder också att eventuellt små skillnader i dessa betongkvaliteter sannolikt saknar betydelse för en konstruktions korrosionsbeständighet.

Några generella slutsatser kan ges avseende karbonatiseringsprocessen i SKB. Karbonatiseringen påverkas av CO₂-molekylernas diffusionshastighet i cementpastan och mängden karboniseringsbart material i betongen (buffertkapaciteten). Därför kan sägas att följande gäller:

- Diffusionshastigheten av CO₂-molekylen påverkas huvudsakligen av betongens porositet och mängden fukt i porerna. Högre porositet och en mindre mängd fukt i porerna resulterar i en högre diffusionshastighet. Även mängden mikrosprickor och tätheten i övergångszonen mellan ballast och cementpasta (ITZ) kan påverka karbonatiseringshastigheter och -djup lokalt i betongen.
- Generellt kan sägas att SKB har en lägre porositet och tätare struktur i cementpastan och i övergångszonen än NB vid samma *vct*. Det gynnar SKB i en jämförelse. På den negativa sidan för SKB skulle det kunna framhållas att det finns en ökad tendens till mikrosprickbildning på grund av större benägenhet till självuttorkning (autogen krympning). Det ges av att SKB har en större mängd finpartiklar och pastavolym. Det är emellertid oklart hur stor betydelse mikrosprickorna har eftersom diffusionen beror på frekvensen av sprickorna, hur sammanhängande de är och förmågan att självläka.
- Porositeten hos SKB påverkas till exempel av *vct* eller *vbt*, vattenpulvertalet (*vpt*) och finpartiklarnas packning. Härdningsförhållanden (RF, temperatur) kan också ha stor betydelse för porositeten. Beroende på den större mängden finpartiklar, så har SKB ofta en finare och tätare porstruktur än NB. Det kan medföra en lägre diffusionshastighet. Det bör framhållas att bra härdningsförhållanden är viktigt för SKB då betongen är något känsligare för utvecklandet av plastiska krympsprickor.
- Mängden karboniseringsbart material (buffertkapaciteten) är beroende på bindemedelstyp (inklusive filler) och mängden av denna. Ju högre mängd bildad CSH och Ca(OH)₂, ju bättre buffertkapacitet och därmed lägre karboniseringsdjup. Det kan gynna SKB beroende på att en högre bindemedelshalt ofta används i dessa betonger jämfört med NB. Resultat från laboratorieförsök indikerar att en något ökad mottaglighet för karbonatisering finns i SKB med stora mängder kalkstensfiller.
- Bindemedelstypen spelar stor roll eftersom den avgör hur mycket karboniserbart material som finns per enhetsvolym och därmed buffertkapaciteten hos betongen. En betong med alternativa bindemedel (där t.ex. halten Ca(OH)₂ är lägre) kan som en konsekvens av detta ge högre karbonatiseringshastigheter och -djup än en betong som enbart har CEM I portlandcement som bindemedel.

Ovanstående slutsatser sammanfattas av Audenaert & Boel (2007, 2006, 2005) som har visat att karbonatiseringskoefficienten (A) är proportionell mot kapillärporositeten (ϕ) och mängden karbonatiseringsbart material (a) enligt:

$$A \sim \frac{\sqrt{\phi^{1.8}}}{a} \quad (10.1)$$

vilket medför att en ökning av kapillärporositeten eller minskning av karbonatiseringsbart material medför en ökning av karbonatiseringshastigheten, dvs koefficienten. Kapillärporositeten och mängden karbonatiserbart material kan beräknas från aktuell betongreceptur, Powers teori, cementets kemiska sammansättning och Mills ekvation (för mer information se Audenaert: ”*Durability of self-compacting concrete*”, 2007, s. 63-76).

10.2 Kloridinträngning

Diffusionshastigheten för Cl^- -jonen i cementpastans kapillärporer beror, liksom för CO_2 -molekylen, på olika parametrar i betongens sammansättning och materialval. Exempel på faktorer som påverkar kloridinträngningen i betong är:

- Yttre miljöfaktorer t.ex. marin miljö (över och under skvalpzonen), tölsättning, cykliskt regn, uttorkning och temperaturvariationer.
- Materialval och proportionering spelar stor roll för porositeten eller tätheten i cementpastan. Bindemedelstypen kan variera mellan rent portlandcement och en kombination av portlandcement och alternativa bindemedel (t.ex. puzzolaner). Olika bindemedelstyper kan binda Cl^- -jonen mer eller mindre längs porväggar (adsorption) eller i nya mineralfaser (kemisk bindning).

Transporten av kloridjoner i kapillärporerna sker genom olika processer, inte bara ren diffusion. Diffusion påverkas och kombineras med absorption (kapillärsugning), interaktion med andra joner och bindning längs porväggar både fysikaliskt och ytkemiskt genom adhesion. Kloridjonen binds kemiskt huvudsakligen till monosulfat och då bildas Friedels salt. Friedels salt i sin tur kan karbonatisera med tiden och därmed frigörs kloridjonen till bindemedlets porlösning igen.

På samma sätt som det är svårt att generellt hävda att karbonatiseringshastigheten är lägre i SKB än i traditionell betong, så är det likaledes svårt att hävda att kloridinträngningen generellt är mindre i SKB. Det finns dock en del faktorer som talar för SKB. Kloridinträngningen påverkas på följande sätt beroende på faktorer i den aktuella proportioneringen:

- V_{ct} , v_{bt} och v_{pt} påverkar alla kapillärporsystemets finhet och motstånd mot kloridinträngning. Introduktion av fillermaterial i betong, som i SKB, ökar packningsgraden i ballastsammansättningen och ökar tätheten i cementpasta som i sin tur ökar motståndet mot kloridinträngning.
- En ökad cementhalt eller bindemedelshalt ökar kloridbindningsförmågan i cementpastan.
- Användningen av alternativa bindemedel ökar motståndet mot kloridinträngning i cementpastan. Det gäller de flesta kombinationer av portlandcement och alternativa bindemedel, som exempelvis slagg, silika och flygaska.

- Användningen av viskositetsmodifierande tillsatsmedel (VMA) som helt eller delvis ersättning för fillermaterial i SKB, ökar porositeten och kloridinträngningen i betongen.

10.3 Sulfatbeständighet

Initieringstiden för sulfatangrepp är generellt längre i SKB än i traditionell betong vid samma vct eller vbt. Det beror på den tätare kapillärporstrukturen i SKB som i sin tur beror på inblandningen av fillermaterial som ökar partikelpackningen i cementpastan och tätheten i mikrostrukturen. Förutom det ovan nämnda kan vissa faktorer pekats ut som positiva eller negativa för SKB och som påverkar mottagligheten för sulfatangrepp:

- Sulfatangreppets hastighet och omfattning beror först och främst på C_3A -halten (aluminathalten) i cementet. Ett lågt C_3A - innehåll gör cementet mer sulfatresistent. Det gäller både klassiskt sulfatangrepp (ettringitbildning) och thaumasitbildning (TSA).
- Inblandning av stora mängder kalkstensfiller i SKB gör att betongen blir mottaglig för TSA. Om cement med ett lågt C_3A - innehåll används så begränsas omfattningen av TSA betydligt, men hindras inte helt. I sulfatrika miljöer, såsom marina miljöer (havsvatten och sulfidrika sediment) och avloppsreningsverk, är risken för TSA speciellt stor om kalkfiller används i betongen. Därför är rekommendationen att använda ett rent portlandcement (CEM I) i dessa miljöer. Andra alternativa bindemedel än kalkstensfiller kan också ge positiva effekter, se nedan.
- Användningen av alternativa bindemedel (flygaska, slagg, silika) tillsammans med portlandcement ökar tätheten i kapillärporsystemet vilket minskar angreppets hastighet och omfattning. Puzzolana alternativa bindemedel förbrukar kalciumhydroxid och bildar istället mer CSH vilket medför att kalcium/kisel – förhållandet i CSH gelen minskar. Det gör CSH-gelen mer motståndskraftig mot nedbrytning.
- I miljöer där det finns omsättning av sulfathaltigt vatten i kontakt med betongen, kan ett sulfatangrepp fortskrida med lägre sulfathalter, t.ex. i grundvattnet, än under stationära förhållanden.

10.4 Frostbeständighet

Både inre frostmotstånd (fuktmättat tillstånd) och motstånd mot frostavskalning orsakad av saltinträngning skiljer sig inte märkbart åt mellan SKB och traditionell betong. För både SKB och traditionell betong förutsätter det att ett skyddande luftporsystem finns på plats med adekvat lufthalt och avståndsfaktor. Egenskaperna hos ett tillräckligt skyddande luftporsystem kan variera för både SKB och traditionell betong beroende på finheten hos kapillärporsystemet som i sin tur påverkas av faktorer som vct, inblandning av alternativa bindemedel och härdningsförhållande. Ett finare och tätare kapillärporsystem (t.ex. lågt vct, inblandning av puzzolaner) kan innebära ett ökat frostmotstånd eftersom det tar längre tid för fukt och salt att tränga in samtidigt som de mekaniska egenskaperna också förbättras. Det ställer emellertid

större krav på avståndsfaktor och lufthalt hos luftporsystemet eftersom kapillärporernas förbindelse (konnektiviteten) minskar. Det medför att ett tätare kapillärporsystem kräver en mindre avståndsfaktor än ett mer öppet system.

Ett par punkter där SKB och traditionell betong skiljer sig åt och som kan ha betydelse för frostbeständigheten är:

- Det är viktigt att SKB har en proportionering som inte ger tendenser till vattenseparation eller annan segregering (t.ex. sedimentation av ballastmaterial).
- Det ställs ökat krav på luftporsystemets stabilitet i SKB eftersom betongen flyter ut horisontellt och lufthalten kan minska med avståndet från pumpstället eller gjutpositionen. En ökad stabilitet hos luftporsystemet kan uppnås med en högre bindemedelhalt eller ett lägre vct eller vbt. Det finns stöd i litteraturen att inblandning av VMA (*viscosity modifying agent*) också ökar stabiliteten hos luftporsystemet i SKB. Det är dock viktigt att poängtera att VMA inte helt bör användas som ersättning för ett stabiliserande fillermaterial i proportioneringen. Luftporsystemet kan även förändras vertikalt i till exempel en pelare. På grund av det ökade trycket i nedre delen av en pelare eller vägg komprimeras luftporerna, vilket minskar pordiametern och ökar avståndsfaktorn.

10.5 Alkali-silikareaktioner (ASR)

Det finns ingenting som fundamentalt skiljer SKB och traditionell betong åt med avseende på ASR. De faktorer som påverkar gäller generellt. Faktorerna som måste finnas till hands för alla betonger är trefaldig:

En viss kritisk mängd alkalier (Na, K) i betongens porlösningar och ett pH över ca 10. Koncentrationen av alkalier i porlösningen ges av vikt% Na₂O ekvivalent i cementet och cementhalten, vilket kan skrivas:

$$\text{Kg/m}^3 \text{ cement (vikt\% K}_2\text{O} \times 0,658 + \text{vikt\% Na}_2\text{O}) = \text{vikt alkali i betong (kg/m}^3 \text{ betong)}.$$

Ett värde under 3,0 kg/m³ betong anses som för lågt för de flesta ballastkombinationer för att utveckla skadlig ASR. Undantag är flinta och opal sandsten där gränsvärdet ofta sänks till 2,5 kg/m³. Gränsvärdena får anses vara på den säkra sidan eftersom endast ca 80 % av alkalierna i cementet anses vara lösliga och tillförs porlösningen.

Ett reaktivt ballastmaterial. De provningsmetoder som finns för traditionell betong gäller också för SKB.

En tillräcklig mängd fukt i betongen. En relativ fuktighet över 75-80 % anses nödvändig för att utveckla skadlig ASR.

Vissa faktorer i betongens proportionering kan förhindra eller bromsa utvecklingen av skadlig ASR:

Inblandning av alternativa bindemedel i form av puzzolaner kan förhindra utvecklingen av skadlig ASR. Det sker genom en kemisk reaktion som minskar alkalikoncentrationen i porlösningen (puzzolanreaktionen).

En tätare kapillärporstruktur kan bromsa utvecklingen av ASR, vilket generellt kan sägas gynna SKB då dess mikrostruktur oftast är tätare än traditionell betong vid samma vct eller vbt. En

tätare mikrostruktur kan åstadkommas genom ett lägre vct, inblandning av puzzolaner och goda härdningsförhållanden.

I SKB kan även inblandningen av fillermaterial medföra en tätare porstruktur genom att en effektivare partikelpackning ökar densiteten i mikrostrukturen. En tätare mikrostruktur bromsar fukt- och saltinträning. Det kan medföra ett lägre RF i betongen.

Ett välgraderat luftporsystem kan till viss del hjälpa till att mildra expansionen och sprickutvecklingen orsakad av ASR. På samma sätt som luftporerna fungerar som expansionskärl för frysbart vatten i kapillärporerna under frostattack, så kan luftporerna verka som reservoarer för nybildad viskös alkali-silikagel. Effekten på betongens expansion anses dock som liten i de flesta fall.

10.6 Motstånd mot kemisk nedbrytning

Samma faktorer som styr motstånd mot sulfatangrepp kan sägas gälla för motstånd mot kemisk nedbrytning, dvs ett lägre vct eller vbt ökar tätheten i kapillärporsystemet och därmed motståndet mot kemisk nedbrytning. Förutom sulfatangrepp är de vanligaste formerna av kemisk attack mot betong huvudsakligen syraangrepp och angrepp från ammoniumlösningar såsom ammoniumnitrat och ammoniumsulfat. Dessa typer av angrepp är vanliga inom jordbruksindustrin och i avloppsreningsverk. De vanligaste typerna av syraangrepp kommer från svavelsyra och svavelsyrighet (inklusive mikrobakteriell aktivitet), ättiksyra, mjölksyra, fosforsyra (t.ex. kompostanläggningar och gödselplatser). I litteraturen finns ett begränsat antal redovisade undersökningar. Följande slutsatser kan dras:

Generellt så finns det ingenting som tyder på att det finns någon stor skillnad i motstånd mot syraangrepp mellan SKB och traditionell betong.

De skillnader som har rapporterats är:

Inblandning av fingraderad flygaska och kalkstensfiller i betongen tycks leda till en minskning av nedbrytningszonen under angrepp av ättiksyra och mjölksyra.

Svavelsyra ger ett frätande angrepp. Det finns indikationer som tyder på att såväl kalkstensfiller som slagg ökar motståndet mot svavelsyraangrepp, vilket kan gynna SKB. För frätangrepp buffrar kalkstensfillret syraangreppet så att det tar längre tid för frätangreppet att nå ett visst djup från ytan. Ju mer massa syran fräter (konsumerar) per tidsenhet, ju långsammare går det att tränga in. Kalksten är ju lätt att fräta för svavelsyran. (Notera skillnaden mot sulfatangrepp, i synnerhet thamasit, där kalkstensfiller utgör ett problem, se avsnitt 10.3).

10.7 Referenser

10.7.1 Övergripande

Bonen D & Shah S P. Fresh and hardened properties of Self-Consolidating Concrete, progress in structural Engin. Mater. Journal, 2005 (V. 7), s. 14-25.

Durability of Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report. Paris: RILEM, 2007. RILEM Report nr. 38, 185 s. (RILEM Technical Committee 205-DSC: Durability of Self-Compacting Concrete, Edited by G De Schutter & K Audenaert).

Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art Report. Paris: RILEM, 2014, RILEM Report nr. 228, 267 s. (MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete: Edited by K H Khyat & G De Schutter. Springer, 2014, ISBN: 978-3-319-03244-3).

Skarendahl Å, Petersson Ö. (eds.). Self-Compacting Concrete. Paris: RILEM, 2000. State-of-the-Art-Report of RILEM Technical Committee 174-SCC.

Trägårdh J. Microstructural Features and Related Properties of Self-Compacting Concrete. Ur: Proceedings, 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, PRO 7, Stockholm, 1999, s. 175-186.

10.7.2 Karbonatisering

Audenaert K. Transport Mechanisms in Self-Compacting Concrete in Relation with Carbonation and Chloride Penetration. Gent, Belgien: Ghent University, 2006. PhD thesis, 370 s.

Boel V, Audenaert K & De Schutter G. Gas Permeability of Self-Compacting Concrete. Ur: Proceedings, 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Compacting Concrete, Chicago, 2005.

10.7.3 Kloridinträngning

Audenaert K, Boel V & De Schutter G. Chloride Penetration in Self-Compacting Concrete by Cyclic Immersion. Ur: Proceedings, SCC 2005-China, maj 2005, s. 355-362. (RILEM PRO 42).

Tang L, Andalen A, Johansson J O & Hjelm S. Chloride Diffusivity of Self-Compacting Concrete. Ur: Proceedings, 1st Inter. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, sept. 1999, s. 187-198.

Zhu W & Bartos P J M. Permeation Properties of Self-Compacting Concrete. Cem. Conc. Res., 2003 (V. 33), nr. 6, s. 921-926.

Leemann A, Munch B, Gasser P & Holzer L. Influence of Compaction on the Interfacial Transition Zone and the Permeability of Concrete. Cem. Conc. Res., 2006 (V. 36), s. 1425-1433.

10.7.4 Sulfatbeständighet

BRE Special Digest 1: Concrete in Aggressive Ground, Part 1-4. Garston, Watford, UK: Building Research Establishment, 2001.

Brown P W. Thaumasite Formation and Other Forms of Sulfate Attack. Cement and Concrete Composites, 2002 (V. 24), s. 301-303.

Hartshorn S A, Sharp J H & Swamy R N. The Thaumasite Form of Sulfate Attack in Portland-Limestone Cement Composites. Cement and Concrete Composite, 2002 (V. 24), s. 351-359.

Kalinowski M & Trägårdh J. Thaumasite and Gypsum Formation in SCC with Sulfate Resistant Cement Exposed to a Moderate Sulfate Concentration. Ur: Proceedings, 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2005, s. 319-327.

Nobst P. & Stark J. Investigations of the Influence of Cement Type on the Thaumasite Formation. Ur: Proceedings, First International Conference on Thaumasite in Cementitious Materials, Garston, UK, 19-21 juni 2002. (Building Research Establishment).

10.7.5 Frostbeständighet

Boel V & Audenaert K. Behaviour of SCC Concerning Frost Action with Deicing Salts. Ur: Proceedings, 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, augusti 2003, Reykjavik, s. 837-843.

Khyat K H, Bicley J & Lessard, M. Performance of Self-Consolidating Concrete for Casting Basement and Foundation Walls. ACI Materials J., 2000 (V. 97), nr. 3, s. 374-380.

Trägårdh J, Skoglund P & Westerholm M. Frost Resistance, Chloride Transport and Related Microstructure of Field Self-Compacting Concrete. Ur: Proceedings, 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, augusti 2003, Reykjavik.

Leemann A, Munch B, Gasser P & Holzer L. Influence of Compaction on the Interfacial Transition Zone and the Permeability of Concrete. Cem. Conc. Res., 2006 (V. 36), s. 1425-1433.

10.7.6 Alkali-silika reaktioner (ASR)

Leemann A. Alkali-Silica Reaction. Ur: Durability of Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report. Paris: RILEM, 2007. RILEM Report nr. 38, s. 137-141.

BRE Digest 330, Part 1-4: Alkali-Silica Reaction in Concrete. Part 1: Background to Guidance Notes, Part 2: Detailed Guidance for New Construction, Part 3: Case Studies, Part 4: Guidance for New Construction Using Aggregates of Normal Reactivity. Garston, Watford, UK: Building Research Establishment, 2004.

Duchesne J & Berube M A. Long-Term Effectiveness of Supplementary Cementing Materials Against Alkali-Silica Reaction. Cem. Con. Res., 2001 (V. 31), s. 1057-1063.

10.7.7 Motstånd mot kemisk nedbrytning

Al-Tammi A & Sonebi M. Assessment of Self-Compacting Concrete Immersed in Acidic Solution. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, (V. 15), nr. 4, s. 354-357.

Boel V, Audenaert K & De Schutter G. Acid attack of self-compacting concrete. Ur: Proceedings, ICCRRR International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, 2005, Cape Town, Sydafrika.

BRE Special Digest 1, Part 1-4: Concrete in Aggressive Ground. Garston, Watford, UK: Building Research Establishment, 2001.

BRE Digest 363: Sulphate and Acid Resistance of Concrete in the Ground. Garston, Watford, UK: Building Research Establishment, 1996.

11. Brand

11.1 Fenomenet brandspjälkning

Brandsäkerhet tillhör betongs goda egenskaper. Betong kan inte antända och behåller det mesta av sin hållfasthet och styvhet upp till minst 400°C. Vid fortsatt upphettning sjunker hållfastheten men även vid 800°C återstår c:a 25 % av tryckhållfastheten. Betong är vidare ett värmetrögt material vilket innebär att temperaturens inträngning i betongen sker långsamt. Efter en brand kan man därför räkna med att majoriteteten av tvärsnittet är opåverkad.

Betongs goda egenskaper vid brand gör det till ett utomordentligt byggmaterial för husbyggnader. Det finns däremot en annan aspekt som man måste beakta i täta och fuktiga betongkonstruktioner som kan komma utsättas för brand. Det viktigaste exemplet är tunnlar där kraftiga bränder givit upphov till spjälkning. Spjälkning är avskalning av betongskikt eller betongdelar från ytan av konstruktioner eller konstruktionselement till följd av snabb uppvärmning vid brandexponering. Är graden av och hastigheten på avskalningen hög benämns spjälkningen som explosiv. I och med att branden kommer åt nya ytor allteftersom avskalningen fortskrider kan så småningom stora delar av tjockleken spjälkas av. Att tunneln är särskilt känslig beror på att den normalt utförs i höghållfast och därmed tät betong och att fuktigheten normalt alltid är hög. Det sker ingen uttorkning av betongen. Det finns flera sätt att lösa problemet med brandspjälkning i tunnlar; ett är inblandning av polypropylenfibrer (pp-fibrer), ett annat är utveckling av betongrecept och betongelementets utformning samt efterföljande brandprovning, se avsnitt 11.3 och 11.5.

Fenomenet brandspjälkning har varit känt i mer än 50 år. Längre har man menat att det finns tre tänkbara faktorer (Betongrapport nr 16, 2011):

1. Ökat ångtryck i porerna till följd av betongens uppvärmning.
2. Termiska spänningar i betongen till följd av hastigt stigande temperatur.
3. Yttre laster särskilt i kombination med de termiska spänningarna enligt 2.

Vad gäller ångtrycket har olika forskare fört fram flera underliggande förklaringar (Jansson, 2013). Självt har Jansson (2013) fört fram ytterligare en tänkbar faktor:

4. Kombinationen av hög fukt och måttligt hög temperatur leder till väsentligt försämrade hållfasthetsegenskaper hos betongen som därför spjälkar.

I skrivande stund (2020) finns ännu ingen förklaring som forskarna kunnat enas om. Däremot är enigheten om vilka underliggande faktorer som har betydelse för brandspjälkning relativt stor. Betongrapport nr 16 lyfte fram tolv faktorer som kan grupperas i yttre påverkan, dimensionering och armering samt betongens sammansättning eller egenskaper. De beskrivs närmare i de följande styckena.

11.1.1 Yttre påverkan

- brandförlopp (tid- temperaturkurva) – ökad spjälning vid kraftigare brand
- brandprofil (en-, två-, tre- eller firsidig brandexponering) – ökad spjälning vid flersidig exponering
- belastning (tryckpåkänningar) – ökad spjälning vid tryckspänningar

11.1.2 Dimensioner och armering

- yttre geometri

- täckande betongskikt och armering (inkl. eventuell förspänning) – allvarigare konsekvenser vid tunna täcksikt (armeringen förlorar hållfasthet och förankring), ökad spjälkning vid förspänning (som ger tryckspänningar)

11.1.3 Betongens sammansättning eller egenskaper

- ballast (typ och storlek) – ballast av basalt ger mindre spjälkning än ballast av granit och kvarts, ökad spjälning vid större max stenstorlek
- cement och filler (typ och mängder)
- luftinblandning – minskad spjälning vid ökad lufthalt
- fiberinblandning – minskad spjälning med polypropylenfibrer
- fuktinnehåll – ökad spjälning vid högre fuktinnehåll
- permeabilitet – ökad spjälning vid minskad permeabilitet (= ökad täthet)
- hållfasthetsegenskaper – ökad spjälning vid högre (tryck)hållfasthet

11.2 SKB och brandspjälkning

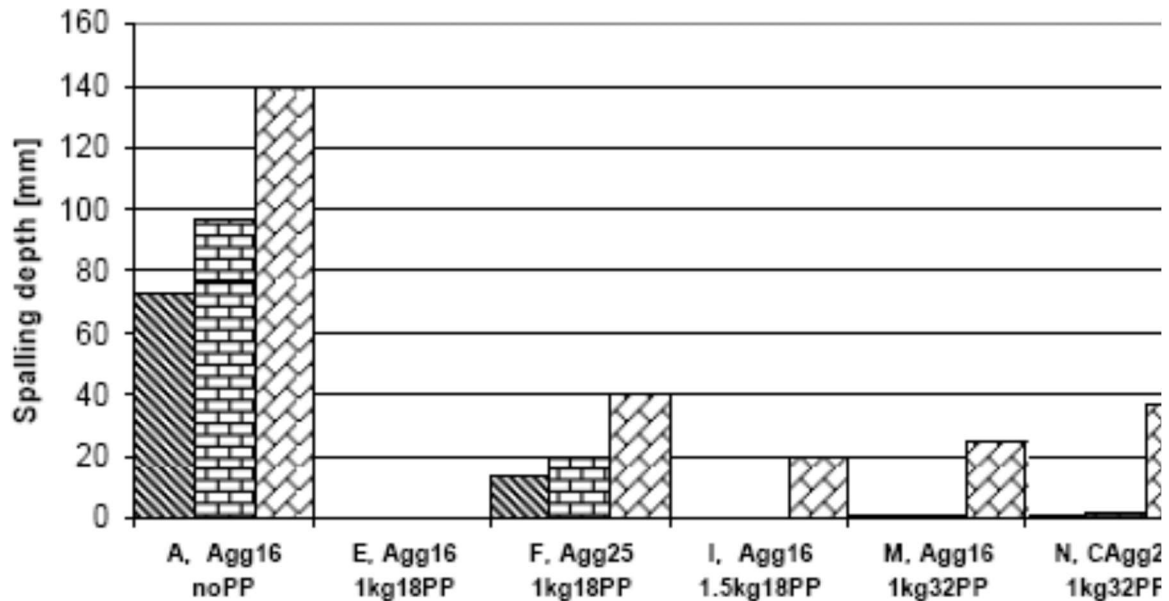
I grunden är det ingen skillnad mellan självkompakterande betongs brandbeständighet och konventionell, vibrerad betongs brandbeständighet. Det finns absolut inga belägg för att produktionsmetoden skulle ha någon betydelse för vare sig brandbeständigheten generellt eller benägenheten att spjälka specifikt. Det som gör att fenomenet brandspjälkning uppmärksammas i självkompakterande betong beror på att de recept som används för självkompakterande betong oftast skiljer sig från dem som används för konventionell betong. Självkompakterande betong tillverkas sällan med höga vattencementtal och för att förhindra separation innehåller SKB vanligen filler vilket ytterligare höjer tätheten. Det är vidare vanligt att moderna tunnlar innehåller förtillverkade betongelement för väggar, tak och utomlands ofta för hela tunnelröret. Självkompakterande betong har en hög marknadsdel hos tillverkarna av förtillverkad betong. Samtidigt är man inom den delen av industrin angelägen om en snabb hållfasthetstillväxt för hög produktivitet vilket leder till ytterligare sänkningar av vct och därmed en ytterligare höjning av tätheten. I korthet betyder detta att den SKB som används i tunnlar har en hög täthet vilket innebär att den kräver någon form av åtgärd för att ge erforderlig brandbeständighet.

Mycket av den experimentella forskning som genomförts på brandutsatt SKB har handlat om SKB med kalkfiller. Kalkstenfiller strukturomvandlas vid 800°C vilket bidrar till ytterligare hållfasthetsförlust. Det är möjligt att andra filler (flygaska har nämnts, Betongrapport nr 16) skulle kunna ge en SKB med större motstånd mot brandspjälkning. Hittills har tillsats av polypropylenfibrer (pp-fibrer) varit den helt dominerande åtgärden vilken diskuteras i nästa avsnitt.

11.3 Pp-fibrer som effektiv åtgärd mot brandspjälkning

Talrika försök visar att inblandning av polypropylenfibrer (pp-fibrer) i betongen är en effektiv åtgärd mot brandspjälkning. De fibrer som används har längd mellan 6 och 12 mm och diameter mellan 18 och 32 µm. Däremot går det inte att få samma goda resultat ifall man tillsätter polypropylen i form av granulat. Försök visar att tämligen små mängder på något kg/m³ leder

till en kraftig reduktion av spjälkningen (figur 11.1) i tät och fuktig betong. Detta gäller oavsett om det handlar om konventionell betong eller självkompakterande betong.



Figur 11.1 – Uppmätt spjälkningsdjup i stora provkroppar av betong med olika halter (i kg/m^3) av pp-fibrer och med olika max stenstorlek (i mm). Vänstra kolumnen inom varje betongtyp anger medelvärde, mittersta kolumnen anger medelvärde inom den inre delen av provkroppen, högra kolumnen anger maxvärde. Referens: Jansson & Boström (2007).

Forskarna vet ännu inte varför pp-fibrerna är så effektiva. Följande teorier har framförts (De Schutter & Audenaert, 2007):

1. Permeabiliteten ökar i betong p.g.a. att kapillärporer bildas när fibrerna smälter (vid c:a 165°C) och förångas.
2. Permeabiliteten ökar i betongen genom att diffusionsöppna kanaler bildas i övergångszonen mellan fiber och betong.
3. Permeabiliteten ökar i betongen genom tillskott av mikroporer som bildas redan vid tillsättningen och iblandningen av fibrerna.
4. Permeabiliteten ökar i betongen genom att mikrosprickor bildas intill ändarna på pp-fibrerna när dessa smälter.

Som diskuterats i avsnitt 11.1 innebär ökad permeabilitet att spjälkningen minskar.

Jansson (2013) tar upp ytterligare två teorier:

5. Ångtrycket i betongen sjunker i området intill fibrerna.
6. Fuktransporten till kallare områden i betongen bromsas av fibrerna som expanderar i volym vid uppvärmning. Därmed reduceras ångtrycket i stället i området närmast branden (Persson, 2004).

En annan fråga handlar om huruvida pp-fibrerna fungerar i en ”andra brand”. Vad händer en betongkonstruktion som vid ett tillfälle utsatts för en mindre brandbelastning och vid ett senare tillfälle utsatts för en kraftigare brand? Har pp-fibrerna förbrukats? Problemet har undersökts empiriskt av Albrektsson (2015). Vid första tillfället utsattes provkropparna för en temperatur på 350°C under tre timmar. Vid en senare provning för standardbrandkurvan spjälade

provkropparna utan pp-fibrer medan provkroppen med pp-fibrer klarade provningen utan spjälkning.

11.4 Proportionering

Under första decenniet på 2000-talet genomfördes ett flertal svenska forskningsprojekt om självkompakterande betong och brandspjälkning. I en serie SBUF-rapporter utprovades lämpliga betongrecept innehållande polypropylenfibrer (Salen & Nilsson, 2009; Nilsson & Saleh, 2009). Försök visade att det är svårt att gjuta SKB med högre halter pp-fibrer än 1,5 till 2 kg/m³. Finare pp-fibrer (med $\Phi = 18 \mu\text{m}$) har en specifik yta på 240 m²/kg fiber vilket förändrar de reologiska egenskaperna mot en styvare massa. Man kan i viss utsträckning åtgärda detta genom att tillsätta mer flytmedel. Det finns dock en risk att betongen separerar. Då måste man istället öka cementpastainnehållet, dvs cementmängden. Detta kan dock ge andra problem såsom sprickbildning i grova konstruktioner, större kostnader och större utsläpp av CO₂. Kemiska stabilatorer kan vara ett annat sätt att minska risken för separation. Grövre pp-fibrer har mindre specifik yta och fungerar därför litet bättre än finare pp-fibrer rent gjutningsmässigt.

En slutsats i SBUF-rapporterna var att en SKB med $v_{ct} = 0,40$, $v_{pt} = 0,30$ med 1,0 till 1,5 kg pp-fibrer per kubikmeter ledde till en gjutbar anläggningsbetong med goda brandegenskaper. Ifall hänsyn behöver tas till brandspjälkning i betonghus bör $v_{pt} \leq 0,50$ ifall kalkfiller används för att ge husbyggnadsbetongen robusthet. Högre värden på v_{pt} kan innebära separation.

11.5 Tillgängliga rekommendationer

Forskningen inom självkompakterande betong, brand och brandspjälkning är omfattande men som visats i avsnitt 11.1 och 11.3 vet vi fortfarande inte säkert varför tät och fuktig betong spjälkar vid brand och heller inte varför pp-fibrerna ger ett så bra skydd. Utvecklingen av regelverk tar lång tid. Det finns en eurokod (Eurokod 2-1-2) som behandlar termisk och mekanisk verkan av brand men där finns inga rekommendationer om hur man skall skydda betongkonstruktioner mot brandspjälkning.

Svenska Betongföreningen har bedrivit ett kommittéarbete kring betong och brand och publicerade 2011 en intermistisk rapport (Betongrapport nr 16). Rekommendationerna för om och hur man genom särskilda åtgärder skyddar en betongkonstruktion mot brandspjälkning bygger på flera steg. Åtgärder kan helt uteslutas i konstruktioner där brandrisken är minimal, i betongkonstruktioner som (åtminstone så småningom) får ett lågt fukttinnehåll och i fall då konsekvenserna av spjälkning är försumbara. För återstoden (betongtunnlar är det bästa exemplet) analyseras konstruktion utifrån fukttinnehåll, v_{ct} , pulverinnehåll och förekomst av tryckspänningar. Rapporten innehåller ett diagram som anger för vilka kombinationer på värdena av dessa parametrar som man behöver vidta en åtgärd. Möjliga åtgärder är utöver tillsats av pp-fibrer, främst isolering och brandprovning. Rapporten innehåller vidare en tabell som anger hur mycket pp-fibrer som behöver tillsättas beroende på, $v_{ct_{ekv}}$, pulverinnehåll och de samhälliga konsekvenserna

11.6 Referenser

Albrektsson J. Durability of Fire Exposed Concrete - Experimental Studies Focusing on Stiffness & Transport Properties. Stockholm: KTH, institutionen för byggvetenskap, avdelningen för betongbyggnad, 2016. Licentiatavhandling, bulletin nr. 133.

De Schutter G & Audenaert K. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee TC 205-DSC 'Durability of Self-Compacting Concrete'. Paris: RILEM Publications S.A.R.L., 2007. RILEM Report nr. 38.

Jansson R. Fire Spalling of Concrete – Theoretical and Experimental Studies. Stockholm: KTH, institutionen för byggvetenskap, avdelningen för betongbyggnad, 2013. Doktorsavhandling, bulletin nr. 117.

Jansson R & Boström L. Experimental Study of the Influence of Polypropylene Fibres on Material Properties and Fire Spalling of Concrete. Ur: Proceedings, fib Task Group 4.3 workshop — Fire Design of Concrete Structures – From Materials Modelling to Structural Performance, Coimbra, Portugal, 8-9 november, 2007.

Persson B. Fire Resistance of Self-Compacting Concrete. SCC. Materials and Structures, 2004 (V 37), nr. 273, s. 575-584.

Saleh I & Nilsson H. Tillverkning av självkompakterande betong med polypropylenfiber. Stockholm: Sika Sverige AB, 2009 (a). SBUF rapport nr 11 522.

Saleh I & Nilsson H. Självkompakterande betong med goda brandspjälkningsegenskaper. Göteborg: Betongtekniskt centrum, 2009 (b). SBUF rapport nr 12 013.

Betong – Rekommendationer för att förhindra spjälkning i anläggningskonstruktioner. Stockholm: Svenska Betongföreningen, 2011. Betongrapport nr 16 (interimsrapport), 62 s.

12. Formtryck

12.1 Betydelsen av korrekt formbyggnad

Betydelsen av att korrekt skapa en formbyggnad för betong kan inte underskattas. Själva meningen med att bygga med betong är att kunna forma den färdiga konstruktionen exakt som tänkt. Det handlar inte bara om ett estetiskt perspektiv, utan också för att nå den belastningskapacitet som strukturen måste ha. Därför är formbyggnaden mycket viktig och den färskas betongens tryck mot formen skall inte kunna deformera formen och givetvis skall formen inte kollapsa. Deformerad form leder ofelbart till en geometrisk defekt hos den gjutna byggnadsdelen. Kollapsad form leder till stor risk för personal som befinner sig i dess närhet och kostnaderna för att åtgärda de konsekvenser som det leder till är väsentliga.

Resonemanget ovan gäller såväl för horisontella gjutningar som vertikala dito. Men medan de vertikala lasterna på en horisontell form är relativt enkla att beräkna så är de horisontella lasterna på en vertikal form desto svårare att förutse. I avsnitten som följer skall därför diskussionen fokusera på betongens tryck mot vertikal form.

12.2 Parametrar som inverkar på formtryck

12.2.1 Formgeometri och armering

Av de geometriska måtten hos en form är dess höjd avgjort viktigast. Även bredden kan ha viss betydelse. I tunna formar kan betong med grövre ballast bygga valv som gör att formtrycket blir lägre. I breda formar finns ingen sådan möjlighet.

En newtonsk vätska (se avsnitt 4.3) utövar på ett djup under ytan samma tryck i alla riktningar vilket kallas ett hydrostatiskt tryck. Med andra ord är trycket i horisontalled samma som trycket i vertikalled för en newtonsk vätska. På djupet H (m) blir trycket P (Pa) lika med $\rho g H$ där ρ är materialets densitet (kg/m^3) och g (m/s^2) är tyngdaccelerationen. Om materialet inte är newtonskt till sin konsistens, vilket inte betong är, utan istället följer Bingham's vätskemodell reduceras det horisontella trycket relativt det vertikala på grund av materialets skjuvmotstånd, eller med andra ord dess flytgränsspänning τ_0 (Pa). Som en följd av detta innebär det att en betong, liksom SKB, som har en relativt sett låg flytgränsspänning i teorin leder till ett högt formtryck. Men detta är en förenklad slutsats som inte alltid gäller eftersom materialegenskaperna i vila påverkar trycket, se vidare i avsnitt 12.2.3.

Tvårsnittets storlek inverkar på så sätt att tjockare tvärsnitt i regel ger ett högre tryck än ett tunnare. Orsaken är att betongen, främst genom den grövre ballasten, har förmågan att med hjälp av friktion mot formen brygga över tvärsnittet och ta upp en del av de vertikala krafterna genom bågverkan. Detta framgår av de mer teoretiskt framtagna formlerna i avsnitt 12.3 där tvärsnittstjockleken ingår.

Armering har teoretiskt möjlighet att bära upp del av betongen. Då tvärsnittet i ett horisontalplan innehåller en större area hos den liggande armeringen är det främst denna som kan bära upp betongen. Men även den vertikala armeringen bidrar till viss del genom friktionen mot betongen. Hur detta teoretiskt bidrar till formtrycket visas i avsnitt 12.3.4 där modellen enligt Perrot m.fl. beskrivs.

12.2.2 Gjutmetodik

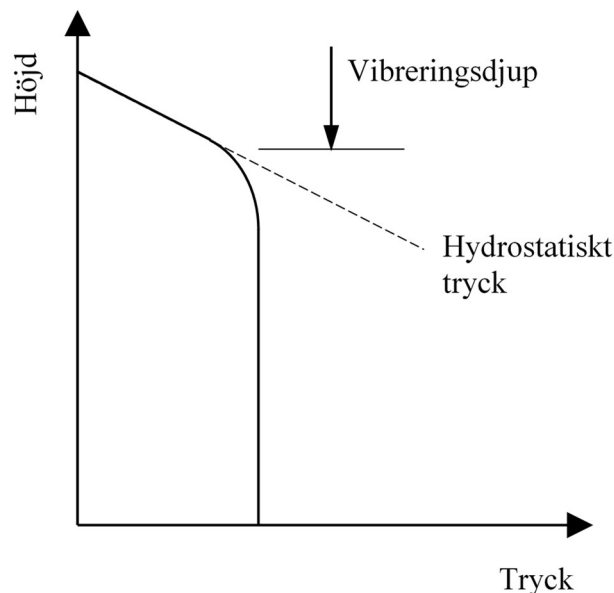
SKB erbjuder möjlighet att gjuta såväl uppifrån som underifrån. Gjuter man uppifrån, men inte för snabbt, så har betongen på ett visst djup under överytan möjlighet att vila vilket är positivt om den bygger upp struktur vilket reducerar formtrycket.

Gjuter man underifrån så finns ingen möjlighet för betongen att vila vilket gör att ett hydrostatiskt vätsketryck bör antas. Beroende på hur man genomför pumpningen underifrån kan även pumptrycket behöva adderas till det tryck betongen ger.

Vid sidan av sättet att gjuta så är själva stighastigheten av stor vikt. Detta har att göra med att betongen har mindre tid på sig att vila ju snabbare man gjuter, och hur detta påverkar formtrycket redogörs för i nästkommande avsnitt.

13.2.3 Materialparametrar

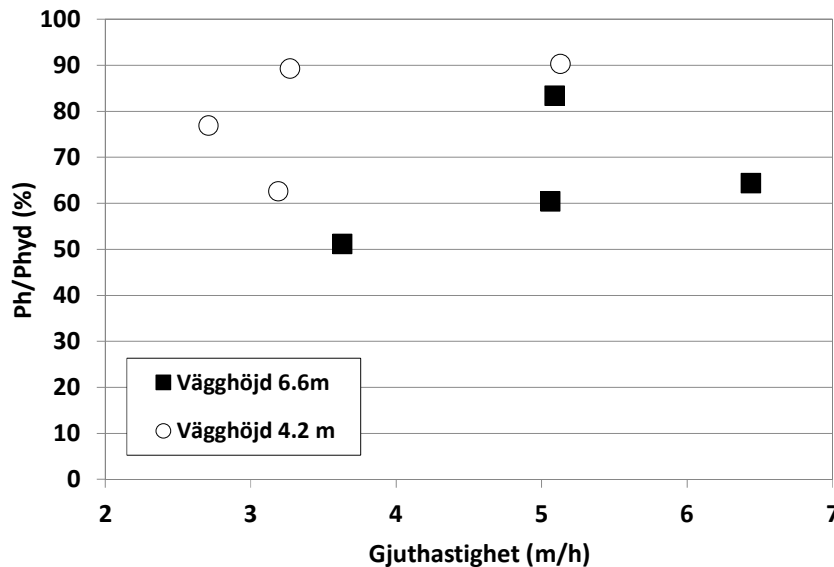
Det är i princip bara en materialparameter som vid sidan av densiteten inverkar på formtrycket och det är betongens flytgränsspänning. I kapitel 4, avsnitt 4.7, beskrevs strukturuppbyggnad och betongens statiska flytgränsspänning vilken skiljer sig från den dynamiska flytgränsspänningen. Oavsett vilken typ av flytgränsspänning man diskuterar så relaterar den till betongens skjuvmotstånd, och det är den parameter som påverkar formtrycket. Om vi som exempel tar frågan om konventionell betong som är ämnad att vibreras, skulle den med sin relativt höga flytgränsspänning och utan vibrering leda till ett lågt tryck. Men eftersom vibreringen gör betongen lokalt flytande så kommer ett hydrostatiskt tryck att uppstå ner till djupet av vibreringens räckvidd. När sedan gjutningen fortskrider uppåt lämnas betongen som är under vibreringens räckvidd i vila och trycket blir i princip konstant i höjddled, se figur 12.1.



Figur 12.1: Principiell tryckfördelning hos konventionell betong.

SKB vibreras inte och har dessutom en låg flytgränsspänning. Båda dessa fakta pekar åt ett högre formtryck. Men eftersom SKB ofta har visat sig vara ett tixotrop material så bygger den upp en struktur i vila, eller med andra ord så ökar den statiska flytgränsspänningen med tiden i vila. Av detta följer att en högre gjuthastighet leder till kortare tid i vila för betongen och således ett högre tryck. Men notera att det inte finns något generellt samband mellan gjuthastighet och formtryck. Detta kan i och för sig erhållas om exakt samma recept används, men inte om olika

typer av SKB används. Detta framgår tydligt av figur 12.2 som kommer från verkliga försök med olika SKB (Billberg 2013) och som visar att ett lägre formtryck kan registreras vid gjuthastigheten 6.4 m/h jämfört med det som registreras vid 2,7 m/h.



Figur 12.2: Relativt formtryck, dvs. uppmätt tryck relativt hydrostatiskt tryck som funktion av gjuthastigheten (Billberg m.fl. 2013).

12.3 Beräkningsmodeller för formtryck

I de följande avsnitten 13.3.1-13.3.8 redovisas tio st. formtrycksmodeller som tagits fram världen över de senaste 10-15 åren. Samtliga modeller utvärderades vid försök utförda vid CBI Betonginstitutet i slutet av maj 2012. För djupare insikt i respektive modell hänvisas till referenserna som angivits i avsnitten. Mer information om de jämförelser mellan modellerna som genomfördes 2012 återfinns i Billberg (2013) och Billberg m.fl. (2014).

12.3.1 Modell utvecklad av Khayat och Omran

Khayat och Omran (2011) utvecklade sin beräkningsmodell utifrån en stor mängd laboratorieförsök där de använt ett 0,7 m högt rör som kallas ”*Sherbrooke pressure column*”, Khayat och Omran (2012). Den är designad för att med övertryck av luft kunna simulera betonghöjder upp till 13 m. Från den stora databasen kunde samband erhållas mellan olika nyckelparametrar och ett uttryck erhållas för det maximala trycket, P_{max} (kPa) se ekv. 12.1. Modeller tar hänsyn till följande parametrar: gjuthöjd H (m), gjuthastighet R (m/h), minsta horisontella formdimensionen D_{min} (m) och betongens strukturuppbyggnad under vila $PV_{\tau_{0rest}@15min}$ (Pa). Metoden innebär att man med en portabel tixometer kallad *Portable Vane* eller PV, Khayat och Omran (2012), mäter det vridmoment som behövs för att få en fyrbladig sond, nersänkt i betongen, att rotera. Genom att ta hänsyn till geometrin hos sonden kan vridmomentet räknas om till den statiska flytgränsspänningen som mäts efter 15 minuter i vila. Modellen tar även hänsyn till maximal stenstorleken (MSA) och väntetid (s) mellan gjutpallar (WP) genom faktorerna f_{MSA} respektive f_{WP} .

$$P_{max} (kPa) = \frac{\gamma_c H}{100} (98 - 3.82 H + 0.63 R + 11 D_{min} - 0.021 PV_{\tau_{0rest} @ 15 \text{ min} @ T_i}) \cdot f_{MSA} \cdot f_{WP} \quad (12.1)$$

där $\gamma_c = \rho g$ är betongens enhetstyngd (kN/m^3)

12.3.2 Modell utvecklad av Lange och Tejeda-Dominguez

Lange och Tejeda-Dominguez, Lange m.fl. (2008), Tejeda-Dominguez (2005), karakteriserar betongens beteende i vila genom formtryckets förändring (sjunkande) efter slutförd gjutning. Själva metodiken innebär att betong gjuts i ett PVC-rör med höjden 920 mm och diametern 250 mm. Röret är instrumenterat med en tryckcell 152 mm från botten av röret. Tryckcellen registrerar trycket från gjutning till dess att trycket reducerats till noll. Denna tryckkurva befann man bäst beskrivas med en hyperbolisk funktion (ekv. 12.2).

$$C(t) = \frac{C_0}{(at^2 + 1)^\alpha} \quad (12.2)$$

där $C(t)$ är den karakteristiska tryckkurvan som funktion av tiden, C_0 är trycket direkt efter slutförd gjutning och de tidsberoende parametrarna, a och α , används för att anpassa funktionen till tryckkurvan. Uttrycket för horisontella trycket, P_h (kPa), förutsatt en kontinuerlig gjutning, blir då (ekv. 12.3):

$$P_h = \gamma R t \frac{C_0}{(at^2 + 1)^\alpha} \quad (13.3)$$

där $\gamma = \rho g$ är betongens enhetstyngd (kN/m^3), R är gjuthastigheten (m/h) och t är tiden (h).

12.3.3 Modell utvecklad av Ovarlez och Roussel

Ovarlez & Roussel (2006) använder en teori om silotryck, från början presenterad av Janssen (1885) för att analytiskt ta fram en formtrycksmodell för SKB. Deras tillvägagångssätt baseras på antagandet att Janssens modell också är giltig för ett inneslutet elastiskt material, som SKB i en form. Modellen antar vidare att det är friktion mellan betongen och formen och att det uppstår en skjuvspänning i betongen som motsvarar den statiska flytgränsspänningen. Istället för att använda en statisk flytgräns vid en viss tidpunkt fokuserar Ovarlez and Roussel på den linjära, tidsberoende, ökningen av den statiska flytgränsen i vila, A_{thix} (Pa/s), med andra ord strukturuppbyggnaden. Genom att använda formens geometri, höjd, H (m), och tjocklek, e (m); gjuthastighet, R (m/h), och betongens densitet, ρ (kg/m^3), på ett fundamentalt sätt tar de fram följande ekvation (ekv. 12.4) för beräkning av P_{max} (kPa):

$$P_{max} = \left(1 - \frac{HA_{thix}}{\rho g e R}\right) \cdot \rho g H = \rho g H - \frac{H^2 A_{thix}}{e R} \quad (12.4)$$

12.3.4 Modell utarbetad av Perrot m.fl.

Denna modell, framtagen av Perrot m.fl. (2009), är baserad på den tidigare modellen av Ovarlez och Roussel (2006). Men det finns två huvudsakliga skillnader mellan dessa modeller. Den första är att Perrot m.fl. (2009) också tar hänsyn till inverkan av armeringen i formen. Endast den vertikala armeringen ingår i beräkningarna trots att de horisontella järnen givetvis också har betydelse. Detta innebär att modellen är konservativ vilket är bättre än det omvända. Den andra skillnaden är att Perrot m.fl. (2009) mäter strukturuppbyggnaden med en speciellt utvecklad metod. En platta sänks delvis ner i betong som i sin behållare står på en våg. Det räcker med en mycket liten sättning av betongen för att plattan successivt skall ta upp mer och mer av betongtyngden från vågen. Spänningen som byggs upp på plattans yta motsvarar den statiska flytgränsspänningen. Detta är alltså en statisk metod som inte stör provet och som kontinuerligt registrerar betongens strukturuppbyggnad, Amziane m.fl. (2008), Tchamba m.fl.

(2006). Dessa förändringar av Ovarlez och Roussels metod resulterar i följande uttryck för det maximala horisontella betongtrycket mot form (ekv. 12.5):

$$P_{\max} = \left(\rho g H - \left(\frac{\phi_b + 2S_b}{(e - S_b)\phi_b} \right) \frac{A_{thix} H^2}{R} \right) \quad (12.5)$$

där S_b är den horisontella ytan av armering per löpmeter form (m^2), och ϕ_b är den genomsnittliga diametern av armeringsjärnen (m). De andra parametrarna har beskrivits i avsnitt 12.3.3 ovan.

12.3.5 Modell utvecklad av Gardner m.fl.

Baserat på resultat från en stor mängd fältförsök har Gardner m.fl. utvecklat en formtrycksmodell, Gardner m.fl. (2012). Den fokuserar på tiden som behövs för att betongens flytsättningsmått skall reduceras till noll (även om detta inte i praktiken är möjligt då basen för sättkonen är 200 mm), t_0 (h), ekv. 12.6. Denna parameter fås vid extrapolering av konsistenstappet för betong som i princip får vila till dess att betongens flytsättningsmått skall sjunka till 400 mm från det ursprungliga värdet.

$$t_0 = t_{400} \left(\frac{FSM_i}{FSM_i - 400} \right) \quad (12.6)$$

där t_{400} = tiden till dess att flytsättningsmålet når 400 mm (h), FSM_i = ursprungligt flytsättningsmått (mm). Uttrycket för horisontellt tryck P (kPa) som funktion av tiden t (h) lyder, ekv. 12.7:

$$P = wR \left(t - \frac{t^2}{2t_0} \right) \quad (12.7)$$

där w = betongens enhetstyngd (kN/m^3), R = gjuthastighet (m/h) och t = tid (h). Ekv. 12.7 är giltig för $t < t_0/2$. Maximalt tryck uppstår vid $t = t_0/2$ och då gäller uttrycket, ekv. 12.8:

$$P_{\max} = wRt_0/2 \quad (12.8)$$

Om tiden för att fylla formen, $t_h = H/R$, är mindre än t_0 , används $t = t_h$ i ekv. 12.7, vilket då blir ekv. 12.9:

$$P_h = wR \left(t_h - \frac{t_h^2}{2t_0} \right) \quad (12.9)$$

12.3.6 Modeller enligt DIN 18218:2010-01

Graubner m.fl. (2012) tog fram en modell baserad på simuleringsförsök med betongprover med måtten $25 \times 25 \times 25$ (cm) samt teoretiska studier och fullskaleprov som genomfördes under ett gemensamt projekt tillsammans med en rad olika tyska forskningscentra. Formlerna som grundas på denna modell används i standarden DIN 18218:2010-01 (2010). Endast ett fåtal parametrar ingår i modellen som är avsedd för att vara både robust och praktisk; gjuthastighet R (m/h), betongens enhetstyngd $\gamma_c = \rho_c g$ (kN/m^3), betongens tillstyvnadstid, t_E (h), som korrelerar mot strukturuppbyggnaden, samt gjuthöjden, H (m). DIN 18218:2010-01 (2010) beskriver hur man kan beräkna tillstyvnadstiden t_E baserat på $t_{E,KB}$ som mäts med en tillstyvnadstids-påse (tumtest), $t_E = 1.25 t_{E,KB}$. Tiden för tillstyvnad definieras som när intrycket av tummen i påsen

är mindre än 1 mm då man trycker med kraften 50 N. Vid sidan om detta sätt att karakterisera tillstyvnadstiden kan den också mätas med vicatnål eller ultraljud.

DIN 18212:2010-01 (2010) erbjuder ekvationer för både tryckets medelvärde och karakteristiskt dimensioneringsvärde. Medelvärde beräknas med följande:

$$P_{\max} = (0,8 + 0,16 \cdot R \cdot t_E) \cdot \gamma_c \quad (12.10)$$

under förutsättning att $P_{\max} \leq P_{hyd}$

Ekvationen för karakteristiskt konstruktionsvärde lyder:

$$P_{\max} = (1,0 + 0,26 \cdot R \cdot t_E) \cdot \gamma_c \quad (12.11)$$

under förutsättning att $P_{\max} > 30 \text{ kPa}$ och $P_{\max} \leq P_{hyd}$

Det karakteristiska dimensioneringsvärdet och partialkoefficienten (1,5) enligt DIN 18218:2010-01 (2010) tar hänsyn till spridningen i parametrarna såsom tillstyvnadstid, gjuthastighet och betongens densitet och övriga osäkerheter.

12.3.7 Modeller utvecklade av Proske

Modellen enligt Proske (2007) baseras på Janssens (1885) siloteori. Den tidsberoende friktionen mellan betong, form och armering, $\mu(t)$, liksom den tidsberoende tryckkvoten, $\lambda(t)$, bestäms genom laboratieförsök, Proske (2007), Proske och Graubner (2007). Modellen tar hänsyn till gjuthastighet, R (m/h), betongens enhetstyngd, γ_c (kN/m³), tillstyvnadstid, t_E (h), samt minsta horisontella dimensionen, D_{\min} (m), och betongens ålder, t (h). För modellen krävs också minsta armeringsdimensionen. Tillstyvnadstiden, $t_E = 1,25t_{E,KB}$, kan beräknas baserat på $t_{E,KB}$ som mäts med tillstyvnadstids-påsen (tumtest, se tidigare beskrivning. Då endast ett armeringslager använts i projektet ökades D_{\min} , med en faktor = 1,5.

Det är viktigt att skilja på medelvärde och karakteristiskt dimensioneringsvärde. Uttrycket för medelvärde är:

$$P_{\max} = \max P(t)$$

med

$$P(t) = P_{\text{vertikal}}(t) \cdot \lambda(t) = \frac{\gamma_c \cdot R \int_0^t e^{\frac{2R}{D_{\min}} \int_0^t \lambda(t) \cdot \mu(t) dt} \cdot dt}{e^{\frac{2R}{D_{\min}} \int_0^t \lambda(t) \cdot \mu(t) dt}} \cdot \lambda(t) \quad (12.12)$$

där

$$\lambda(t) = 1 + 0,11 \frac{t}{t_E} - 2,23 \left(\frac{t}{t_E} \right)^2 - 0,66 \left(\frac{t}{t_E} \right)^3 + 3,46 \left(\frac{t}{t_E} \right)^4 - 1,56 \left(\frac{t}{t_E} \right)^5 \quad (12.13)$$

och

$$\mu(t) = 2 \left(\frac{t}{t_E} \right)^{2,5} \leq 0,2 \quad (12.14)$$

Ekvation 12.15 utvecklades för karakteristiskt dimensioneringsvärde, Proske och Graubner (2007), och tar hänsyn 5 % -kvantilen för den tidsberoende friktionen $\mu(t)$ samt 95 % -kvantilen för tryckkvoten $\lambda(t)$.

$$P_{\max} = \left(R \cdot \frac{t_E}{10} \right)^{(0.72+0.178 \cdot \arctan(D_{\min}))} \cdot \arctan \left((D_{\min} \cdot 12)^{0.45} \right) \cdot 2.37 \cdot \gamma_c \quad (12.15)$$

under förutsättning att $P_{\max} > 10$ kPa och $P_{\max} \leq P_{\text{hyd}}$.

12.3.8 Modell utvecklad av Beitzel

Beitzel (2010) utarbetade en modell i sitt doktorandprojekt och liksom flera andra modeller bygger teorierna på Janssens (1885) siloteori. Studierna baseras på jämvikten hos de krafter som råder för ett betongtvärsnitt i formen och ur denna togs ett uttryck fram för det vertikala trycket, σ_v (kPa), ekv. 12.16.

$$\sigma_v = \rho g H - \frac{C_{thix} \cdot H^2}{Rd} \quad (12.16)$$

där C_{thix} är strukturuppbyggnaden (Pa/s), dvs. exakt lika parametern A_{thix} som beskrevs för modellen utvecklad av Ovarlez och Roussel (2006) (avsnitt 12.3.3), d är formtjockleken (m), H och R är som tidigare höjden (m) respektive gjuthastigheten (m/h). Beitzel (2010) använde sedan Mohrs modell för beräkning av huvudspänningar för att relatera det vertikala trycket till det horisontella, σ_h (kPa), ekv. 12.17:

$$\sigma_h = \sigma_v - \frac{2 \cdot C_{thix} \cdot H}{R} \quad (12.17)$$

12.3.9 Utvärdering av formtrycksmodellerna

Formtrycksförsöken ägde rum på CBI:s gård (på KTH:s campus i Stockholm). Totalt åtta väggar göts genom pumpning uppifrån med SKB. Fyra av väggarna var 6,6 m höga och de övriga var 4,2 m höga. Samtliga väggar var 2,4 m breda varav sju hade tjockleken 0,2 medan en var dubbelt så tjock, dvs. 0,4 m. Samtliga väggar armerades med ett nät i ena sidan och detta för att kunna lyfta ner dem säkert efter att försöken avslutats. Betongens tryck mot form uppmättes med trycksensorer monterade på fyra olika höjder över botten på formen. Tryckcellerna är av typen Omega PX43E0-100GI. De matas med 15 VDC och signalen som registreras från cellen är i mA. För att registrera gjuthastigheten mättes betongens höjd i formen manuellt med en lasermätare och protokollfördes kontinuerligt.

Tabell 12.1: Betongernas färska egenskaper samt gjuthastigheter

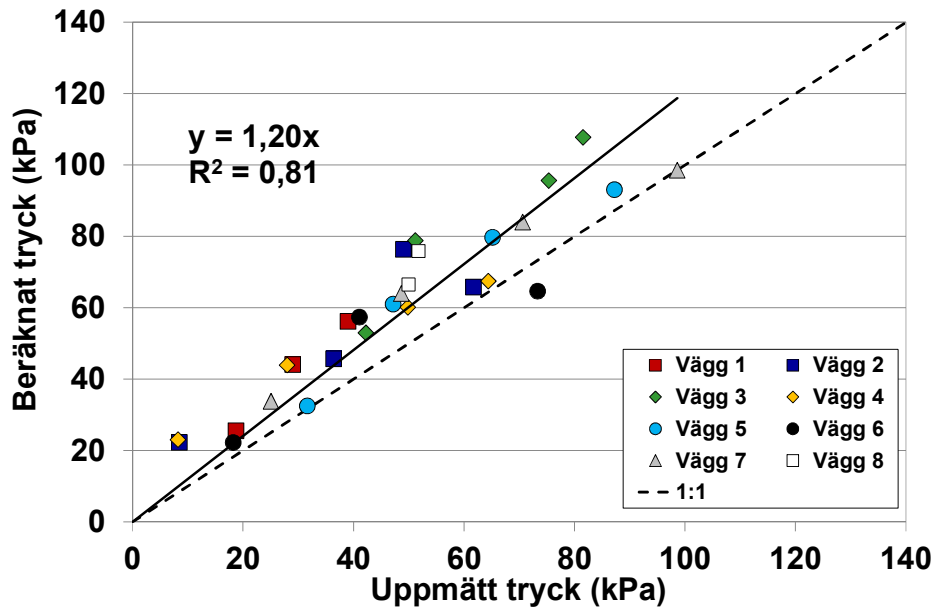
Vägg Nr	Flytsättmått (mm)	t_{500} (s)	Lufthalt (%)	Densitet (kg/m ³)	Temperatur (°C)	Gjuthastighet (m/h)
1	610	2,1	4,2	2238	25,2	3,6
2	710	2,6	5,8	2264	21,2	5,1
3	600	1,1	7,0	2261	22,6	5,1
4	630	1,4	4,7	2334	21,6	2,7
5	615	2,4	6,2	2267	22,0	6,4
6	650	1,9	7,0	2261	20,8	3,3
7	710	2,2	4,0	2343	21,2	5,1
8	620	2,5	4,0	2311	20,3	3,2

Vid varje gjuttillfälle karakteriserade representanterna för modellerna betongens nyckelparametrar som ingår i respektive modell (se avsnitt 12.3.1-12.3.8). Eftersom tryckcellerna placerats på fyra olika höjder i formen kan man simulera varje gjutning som fyra gjutningar, med de olika tryckcellerna värderade som den lägsta i väggar med olika höjder. På så sätt blir de tryck som skall räknas fram med vardera modellen i teorin 32 st. men på grund av olika skäl blev maximalt antal mätpunkter 28 st.

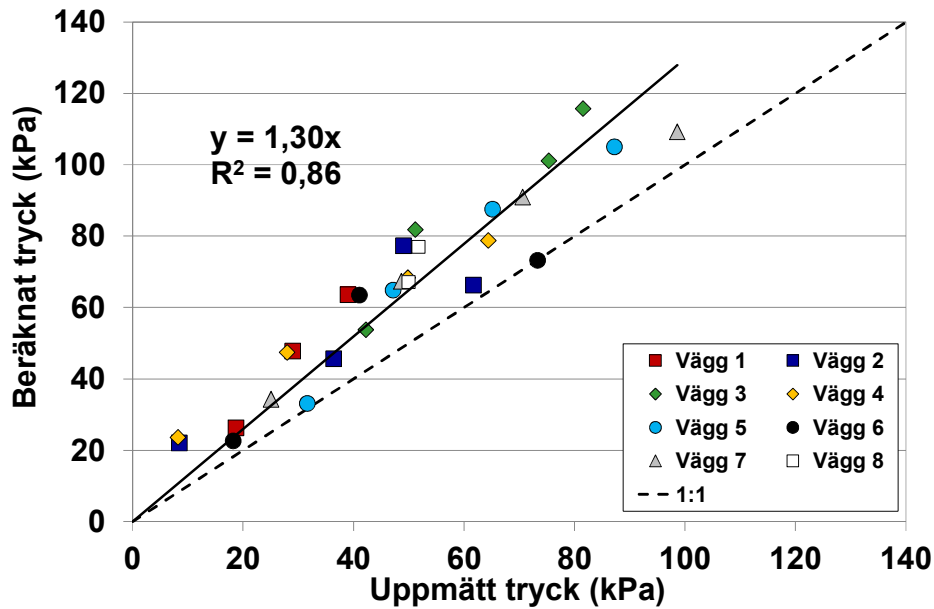
Följaktligen kan 28 beräknade tryck ställas mot de uppmätta trycken och två av modellerna skall här redovisas. Det är modellerna representerade av Perrot m.fl. (2009) samt Gardner m.fl. (2012). Valet av dessa två modeller är gjort eftersom de representerar en strikt teoretisk modell (Perrot m.fl., 2009) sam en enkel och empirisk modell (Gardner m.fl., 2012). Resultaten är redovisade i figur 12.3 respektive 12.4. Redovisning av samtliga resultat återfinns i Billberg (2013).

Värdering av modellerna är gjord så att en linjär regression som styrs genom origo ger en lutning samt en korrelationskoefficient, R^2 . De två visade resultaten ger att modellerna har en relativt god precision i det att R^2 är 0,81 respektive 0,86. Dessutom är båda modellerna konservativa eftersom lutningarna på regressionslinjerna är 1,2 respektive 1,3.

Man kan alltså dra slutsatserna att dessa teoretiska modeller är relativt korrekta samt att även enkelt genomförda och empiriska modeller fungerar väl.



Figur 12.3: Resultat för modell utvecklad av Perrot m.fl. (2009).



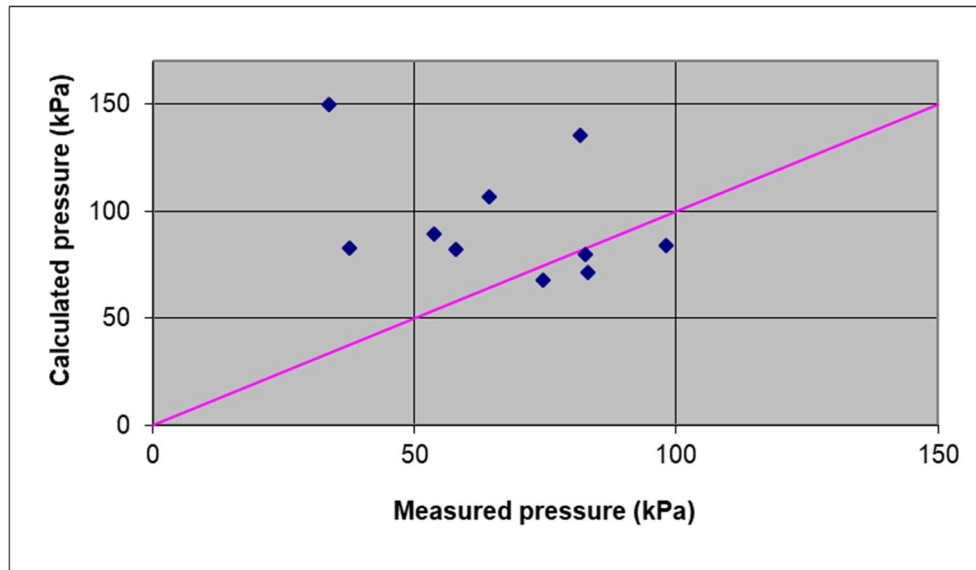
Figur 12.4: Resultat för modell utvecklad av Gardner m.fl. (2012).

De övriga modellernas motsvarande resultat redovisas i tabell 12.2. Det framgår att samtliga modeller är konservativa med lutningar på 1,09-1,42 samt att precisionen i form av R^2 ligger mellan 0,69 och 0,85.

Tabell 12.2: Regressionsanalys av modellernas beräknade tryck

Modell	Lutning	R ²
Khayat och Omran (2011)	1,16	0,78
Ovarlez and Roussel (2006)	1,22	0,77
Lange och Tejada-Dominguez, Lange m.fl. (2008)	1,09	0,80
Perrot, m.fl. (2009)	1,20	0,81
Gardner m.fl. (2012)	1,30	0,86
DIN 18212:2010-01 (2010) - Medelvärden	1,37	0,85
DIN 18212:2010-01 (2010) - Dimensioneringsvärden	1,42	0,85
Proske (2007)- Medelvärden	1,23	0,69
Proske och Graubner (2012) - Dimensioneringsvärden	1,40	0,85
Beitzel (2010)	1,23	0,82

Ett par av formtrycksmodellerna studerades i en fallstudie ingående i ett licentiatprojekt på KTH (McCarthy, 2015). Fallstudien handlade om ett nytt fängelse i Härnösand och specifikt dess inre ringmur som är 400 m lång, 6 m hög och 0,27 m bred. Eftersom modellerna inte var tillgängliga då projektet inleddes var det inte möjligt att mäta just de parametrar som ingår i modellerna. Den modell som visade sig mest praktisk att använda var DIN-modellen (se avsnitt 12.3.6). Figur 12.5 visar en jämförelse mellan beräknat och uppmätt formtryck. Varje punkt i diagrammet motsvarar en gjutning en specifik dag. Som framgår av figuren är överensstämmelsen svag. Med god vilja kan man identifiera två punktsvärmar som var och en har en hyfsad översnstämmelse mellan mätresultat och beräknade resultat. I projektet lyckades man inte identifiera någon specifik faktor som skilde den ena svärmen från den andra.



Figur 12.5: Relationen mellan uppmätt och beräknat formtryck enligt DIN (2010). Mätningarna gjordes på en mur tillhörande Härnösands nya fängelse (McCarthy & Silfwerbrand, 2014).

12.4 Rekommendationer

SKB kan resultera i såväl lågt formtryck som högt dito. Liksom det beskrivits i detta kapitel beror formtrycket på betongen i sig och vilka egenskaper den har, men också på hur man gjuter och hur snabbt man gör det.

De beskrivna formtrycksmodellerna är i praktiken mest värdefulla vid planering i förväg av gjutningar med SKB. Med andra ord för att karakterisera betongens egenskaper. Men skall alltid ta i beaktande att betongen kan variera från tillfället till tillfälle och även under en dags leveranser. Dessutom påverkas strukturuppbyggnaden i vila av temperatur mm.

När man planerar för gjutning med SKB i en vertikal form, och när konstruktionens höjd överstiger normal våningshöjd (ca 2,6 m) bör man alltid resonera kring frågan om formtryck. Bygger man form med formskivor är de ofta konstruerade för hydrostatiskt tryck upp till 2,6 m våningshöjd, men kontrollera alltid detta i förväg. Bygger man högre eller med platsbyggd träform eller liknande bör alltid betongleverantören kontaktas och efterfrågas om eventuell erfarenhet hur den betong man avser gjuta med har påverkat formtrycket vid tidigare gjutningar. Dessutom bör man planera för att kontinuerligt mäta trycket med exempelvis mätklockor (mäter kraften i formstag) under gjutningen samt vara beredd att styra gjuthastigheten utifrån det tryck som registreras.

12.5 Referenser

Amziane S, Perrot A & Lecompte T. A Novel Settling and Structural Build-Up Measurement Method. *Measurements Science and Technology*, 2008 (V.19), 8 s. (105702).

Beitzel M. Modeling Fresh Concrete Pressure of Normal and Self-Compacting Concrete. Ur: *Proceedings, SCC2010, 6th International RILEM Symposium on SCC and 4th North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Montreal, Quebec, Kanada, 2010, s. 243-254. (Ed. K H Khayat & D Feys).

Billberg P & Österberg T. Självkompakterande betong – användningsteknik. Stockholm: Cement och Betong Institutet, 2002, CBI rapport 2:2002.

Billberg P, Silfwerbrand J & Österberg T. Form Pressures Generated by Self-Consolidating Concrete. *Concrete International*, 2005 (V. 27), nr. 10, s. 35-42.

Billberg P. Utvärdering av formtrycksmodeller vid gjutning med SKB - En internationell jämförelse med världens experter samlade. Stockholm: SBUF, 2013. SBUF-rapport 12645.

Billberg P, Roussel N, Amziane S, Beitzel M, Charitou G, Freund B, Gardner J N, Grampeix G, Graubner C-A, Keller L, Khayat K H, Lange D A, Omran A F, Perrot A, Proske T, Robert Quattrociochi R & Vanhove Y: Field Validation of Models for Predicting Lateral Form Pressure Exerted by SCC. *Cement & Concrete Composites*, 2014 (V. 54), s. 70-79.

DIN 18218:2010-01: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen (Pressure of Fresh Concrete on Vertical Formwork). Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.

DIN Standard on Formwork Pressures Updated. *Concrete International*, 2010 (V. 32), nr. 6, s. 27-29.

Gardner J, Keller L, Quattrociochi R, Charitou G: Field Investigation of Formwork Pressures Using Self Consolidating Concrete, *Concrete International*, 2012 (V. 34), nr. 1, s. 41–47

Graubner C-A, Boska E, Motzko C, Proske T & Dehn F: Formwork Pressure Induced by Highly Flowable Concrete – Design Approach and Transfer in Practice. *Structural Concrete*, 2012 (V. 13), nr. 1, s. 51-60.

Janssen H A. Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *VDI Zeitschrift*, 1885 (V. 39). s. 1045-1049.

Khayat K H & Omran A F. Field Monitoring of SCC Formwork Pressure and Validation of Prediction Models. *Concrete International*, 2011 (V. 33), nr. 6, s. 33-39.

Kim J H, Beacraft M W, Kwon S H & Shaw S P. Simple Analytical Model for Formwork Design of Self-Consolidating Concrete. *ACI Materials Journal*, 2011 (V. 108), nr. 1, s. 38 – 45.

Lange D A, Birch B, Henchen J, Liu Y-S, Tejeda-Dominguez F & Struble L. Modeling Formwork Pressure of SCC. Ur: Proceedings, 3rd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, USA, 2008, s. 295-300. (Ed. S P Shah,).

McCarthy R. Self-Compacting Concrete for Improved Construction Technology. Stockholm: KTH, institutionen för byggvetenskap, avdelningen för brobyggnad, 2015. Licentiatavhandling.

McCarthy R & Silfwerbrand J. Comparison of Three Methods to Measure Formwork Pressure When Using SCC. *Concrete International*, 2011 (V. 33), nr. 6, s. 27-32.

McCarthy R & Silfwerbrand J. The Influence of SCC Properties on Formwork Pressure – A Field Study. *Nordic Concrete Research*, 2014, nr 49 (1/2014), s. 73-91.

Omran A F, Naji S & Khayat K H. Portable Vane Test to Assess Structural Build-Up at Rest of Self-Consolidating Concrete. *ACI Materials Journal*, 2011 (V. 108), nr. 6, s. 628-637.

Omran A F & Khayat K H. Portable Pressure Device to Evaluate Formwork Pressure Exerted by Flowable Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013 (V. 25), nr. 6, s. 731-740 .

Ovarlez G & Roussel N. A Physical Model for the Prediction of Lateral Stress Exerted by Self-Compacting Concrete on Formwork. *Materials and Structures*, 2006 (V. 39), nr. 2, s. 269-279.

Perrot A, Amziane S, Ovarlez G & Roussel N. SCC Formwork Pressure: Influence of Steel Rebars. *Cement and Concrete Research*, 2009 (V. 39), nr. 6, s. 524-528.

Proske T Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein wirklichkeitsnahes Modell zu Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung (Formwork Pressure Using Self-Compacting Concrete). Darmstadt, Tyskland: Technische Universität Darmstadt, 2007. PhD Thesis, 310 s.

Proske T & Graubner C-A. Pressure on Formwork Using SCC – Experimental Studies and Modeling. Ur: Proceedings, 5th RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete. Gent, Belgien, 2007, s. 473-478.

Tejeda-Dominguez F. Laboratory and Field Study of Self Consolidating Concrete Formwork Pressure. Urbana-Champaign, USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2005. M.Sc. Thesis.

Tchamba J C, Amziane S, Ovarlez G, & Roussel N. Lateral Stress Exerted by Fresh Cement Paste on Formwork: Laboratory Experiments. *Cement and Concrete Research*, 2006 (V. 38), s. 59-66.

13. Estetiska aspekter

13.1 Inledning

Estetiska aspekter handlar om form och yta. ”Form” skall här ses i en mycket vid bemärkelse och sammanfatta en byggnads eller en anläggnings rumsliga geometri och storlek. Med ”yta” tänker vi i första hand på vertikala ytor och främst fasader men också betonggolvet yta.

13.2 Form

Estetiska aspekter handlar om form och yta. Genom sin goda formbarhet kan betong användas för att skapa ett oändligt antal former och geometrier. I princip kan allt som kan gjutas med vibrerad betong också gjutas med SKB. Ett undantag är gjutning av lutande etapper där graden av lutning kan behöva begränsas mer vid gjutning med SKB än med vibrerad betong. Men denna begränsning torde knappast inskränka på arkitektens möjligheter. Å andra sidan kan man enklare gjuta mot överform vilket ger vissa nya möjligheter.

13.3 Yta

I Betongrapport nr 14 definierar Tage Hertzell betongytans visuella uttryck med fem termer; (1) helhetsformer, (2) ytmönster, (3) ytstruktur, (4) gråton och (5) kulör. Av dessa fem torde valet mellan SKB och vibrerad betong främst påverka ytstrukturen och gråtonen. Helhetsformer handlar om hela väggar med öppningar för fönster och dörrar. Ytmönster kan vara fogar i vägg med förtillverkade fasadelement men också spegling från formbrädorna. Ytstrukturen handlar om jämnhet, ojämnheter och porer. Gråtonen karakteriserar betong men handlar liksom kulör också om avsiktliga eller oavsiktliga variationer i gråton (eller kulör).

I och med att gjutning av SKB innehåller färre manuella moment än traditionell gjutning och vibrering bör man kunna åstadkomma jämnare resultat vilket här betyder mindre variationer i gråton och kulör. Eftersom receptet skiljer sig mellan SKB och vibrerad betong kan man även anta att det blir en skillnad i gråton. Huruvida resultatet blir vitare eller svartare beror på valet av delmaterial och hänger inte ihop med produktionsmetoden.

Rätt utförd leder SKB vanligen till fina ytor, men det finns även risker för s.k. gjutveck som diskuteras i kapitel 18.

13.4 Betonggolv

Viktigast för utseendet hos betonggolv är frånvaron av oregelbunden sprickbildning, i synnerhet grova sprickor, men även ojämnheter, variationer i gråton och kulör samt skadade fogar och kantresning är (även) estetiska defekter. I Danmark används regelbundet en form av SKB (”semi-SKB”) till betonggolv. Om huruvida det leder till mindre sprickbildning och färre defekter är i skrivande stund okänt. Klart är dock att enbart en övergång från vibrerad betong till SKB inte räcker för att eliminera sprickor som har en grund i stor krympning, stora tvång och otillräcklig armering.

13.5 Referens

Att beskriva betongytor. Stockholm: Svenska Betongföreningen, 2009. Betongrapport nr 14, 56 s.

14. Arbetsmiljö

14.1 Allmänt om arbetsmiljö på byggarbetsplatsen

För att uppnå en hållbar utveckling vid byggande skall hänsyn tas till människors hälsa och behov utan att för den skull försaka andra faktorer såsom ekonomiska, sociala och miljömässiga. De faktorerna skall hanteras på ett sådant sätt att de inte skadar vår omgivning eller orsakar ekonomiska eller tidsmässiga förluster. För byggsektorn innebär det att kunna konstruera och bygga hus och infrastruktur med låg miljö- och arbetsmiljöpåverkan samtidigt som produktiviteten ökas och livskvaliteten förbättras. En arbetsmiljöplan skall upprättas för objektet innan byggplatsen etableras. Det är byggarbetsmiljösamordnaren för planering och projektering (Bas-P) som i första hand ordnar detta. Byggherren eller en uppdragstagare som övertagit dennes åtagande har också ett ansvar för upprättande av planen.

Många i byggbranschen utsätts idag för påfrestande belastningar; lyfter och bär tungt, mycket och ofta och arbetet sker ideligen i arbetsställningar som är ansträngande för kroppen. Skador och olyckor som beror på undermåliga ergonomiska förhållanden är mycket vanliga i byggbranschen. För att komma på rätsida med dessa förslitningsskador och olyckor bör arbetsmiljön beaktas redan i tidiga skeden av projekt. Det är därför viktigt att entreprenörer, konstruktörer, arkitekter, beställare, materialleverantörer med flera samarbetar och medvetet fokuserar på att analysera risker för säkerhets och arbetsmiljöfrågor i varje skede i ett byggprojekt.

14.1.1 Bakgrund

Byggindustrin är en av de industrier som har störst inverkan av arbetsmiljön på sina utövare. Inom byggindustrin löper arbetarna större risk att utveckla förslitningsskador än i de flesta andra branscher. För många av hantverkarna inom dagens byggande innebär arbetet en stor påfrestning för kroppen. Enligt en studie av Samuelsson (2009) är ungefär 65 procent av alla inrapporterade skador från byggindustrin förslitningsskador. *European Agency for Health and Safety at Work* (2004) uppger att i medeltal är ungefär 8 % av ett byggprojekts kostnader i Europa relaterat till förslitningsskador och olyckor. De menar också att de här kostnaderna betalas antingen av beställaren eller av skattebetalarna i samhället. Det är därför av största vikt att fokusera på risk; identifiering, bedömning och eliminering i så tidiga skeden som möjligt för att på så sätt skapa rätt arbetsmiljö på byggarbetsplatserna. Integrering av arbetsmiljötänkande i projekteringsstadiet av ett projekt innebär bl.a. fokus på att:

- arbeta med eliminering av tunga lyft som kan skapa förslitningsskador
- ständigt förbättra förutsättningarna för utförandet av arbetet
- skapa förutsättningar för att ha rätt organisation på arbetsplatsen
- projektera och planera arbetet så att en jämn arbetsbelastning kan uppnås

för att minska förslitningsskador och olyckor.

Följande fyra ergonomiska problem är de vanligaste bland byggarbetare:

- böja och/eller vrida ryggen
- arbeta i samma position under en längre tid
- stå/vara i samma position under en längre tid
- arbeta med tunga arbetsredskap och tungt material

Det är även viktigt att hantverkarna har rätt utbildning för att utföra tilltänkta arbeten. Att ha rätt arbetsmiljö på arbetsplatsen är inte bara viktigt för personalens säkerhet. Slarv med arbetsmiljön kan även påverka produktiviteten negativt, öka kostnaderna för ett projekt, skapa låg arbetsmoral och på längre sikt sänka hantverkarnas förmåga att arbeta på rätt sätt inom branschen.

Arbetsmiljö handlar om att skapa rätt ergonomiska förutsättningar för hantverkarna. Fokus skall vara på att skapa arbetsuppgifter som passar hantverkarna, inte anpassa hantverkarna till arbetsuppgifterna. Det handlar även om att skapa rätt arbetsplats och att organisera eller planera arbetet så att en rimlig mängd av arbetsuppgifter fördelas på hantverkarna och på en nivå som svarar mot vars och ens kompetens. Viktigt är också att ha tillgång till rätt hjälpmedel och att kunna variera sina arbetsuppgifter så att en ensidig belastning inte uppstår. Arbetsmiljö ses idag mer och mer som en värdemätare på hur lyckat ett projekt är och ses också som en indikator på effektivitet i ett projekt.

Arbetsrelaterade skador och/eller förslitningar är väldigt vanligt bland byggnadsarbetare i Europa, ca 25 procent av alla hantverkare har ont/problem med ryggen och 23 procent har muskelsmärk av någon form. I Sverige lider var femte byggnadsarbetare (eller cirka 50 000 byggnadsarbetare) av ergonomirelaterade sjukdomar. De största riskfaktorerna är tunga lyft, ansträngande arbetsställningar samt repetitivt och ensidigt arbete. Den riskfaktor som stigit mest på senare år handlar om stress och mental påverkan.

14.1.2 Gjutform

Formens huvuduppgift är att se till att den gjutna betongen hålls på rätt plats till dess tillräckligt hög hållfasthet har uppnåtts. Formytans beskaffenheter påverkar den färdiga betongytans struktur och färgvariationer. Formen utsätts för tryck av betongen och ökar punktvis då vibrering i betongen sker. De faktorer som mest påverkar formtryck vid gjutning är stighastighet, den färska betongens konsistens, densitet och temperatur. Gjutformen spelar stor roll för utseende och form på den färdiga betongkonstruktionen. Det finns olika sorters formsystem för broar. Mest vanligt för broar är dock att formen byggs med lösvirke på konstruktionens slutliga plats.

En hantverkares vardag består i medeltal av ungefär 16 procent formbyggnad. I formbyggnadsarbetet ingår en hel del tunga lyft och arbete i olämpliga arbetsställningar. Det är därför viktigt att när man väljer formsystem, formmaterial och formsläppningsmedel med mera, tänka på arbetsmiljö, arbetarskydd och närmiljö.

14.1.3 Armering

Armering av en konstruktion är oftast ett för hantverkarna tungt arbete som utförs till stora delar för hand. Vanligtvis lyfts ett knippe armeringsstänger upp på exempelvis en farbana för att sedan ett och ett eller några i taget manuellt lyftas till sin slutliga position för fixering och montage/fastsättning. Arbetet är normalt sett tungt och tidskrävande, det utförs också oftast ensidigt repetitivt för hantverkarna under en längre tid i mycket påfrestande arbetsställningar. Det krävs oftast ett flertal hantverkare för att klara av arbetet på utsatt tid.

14.1.4 Betong

Betongarbetarna är de inom byggindustrin som är utsatta för störst risk för förslitningsskador. De arbetar ofta med tunga lyft av t.ex. vibratorstavar, ofta i svåra arbetsställningar och utför ofta vibreringsarbetet repetitivt. Andra riskfaktorer som betongarbetarna är utsatta för är vibrationer i händer och armar och mycket höga ljud i samband med vibrering av betongen.

Idag är det också många gånger svårt att rekrytera utbildad och tillräckligt kvalificerad personal inom byggbranschen vilket leder till att många projekt är underbemannade. Det tillsammans med att arbetet är tungt och slitsamt innebär många gånger en ökad stress på arbetsplatsen. Detta kan i sin tur medföra lägre produktivitet och ökade kostnader för projekten. Vibratorstaven väger någonstans mellan 10 och 20 kg. Arbetet utförs i olämpliga ställningar och är som beskrivits ovan mycket repetitivt. Fördelarna med självkompakterande betong är naturligtvis både uppenbara och väsentliga.

14.1.5 Ansvar för arbetsmiljö

Beställaren och projektören har ansvar för arbetsmiljön enligt Arbetsmiljölagen. Syftet är att skapa fokus på arbetsmiljö i tidiga skeden i projekt. Byggherren ansvarar för att se till att en arbetsmiljöplan skapas innan projektet påbörjas. Byggherren påverkar också byggprojektets arbetsmiljö både direkt och indirekt. Direkt genom att olika val görs, till exempel val av brotyp, upphandlingsform, entreprenör, och/eller material. Indirekt genom till exempel val av arbetsplats, tid för genomförande, och arkitektonisk utformning vilket i sin tur kan påverka graden av komplexitet för genomförandet för att nämna några olika saker. Projektören i sin tur påverkar arbetsmiljön direkt genom val av exempelvis olika konstruktionslösningar, detaljer och material. Genom detaljutformning skapar projektören förutsättningar för specifika logistiklösningar på arbetsplatsen. Entreprenörens val av arbetsmetoder, material, prefabriceringsgrad med mera avgör vilken arbetsmiljö som skapas, men beställaren och projektören måste ha skapat förutsättningar för att entreprenören skall kunna göra bra arbetsmiljöval till rimliga kostnader.

14.1.6 Kostnader för sjukfrånvaro

För ett företag finns det direkta och indirekta kostnader gällande sjukfrånvaro. Direkta kostnader är till exempel utbetalad sjuklön, sociala avgifter, kostnader för ersättare. Indirekta kostnader handlar om kostnader som inte är förknippade med hantverkarna. Det kan exempelvis vara produktionsbortfall eller produktivitetsnedsättning på arbetsplatsen eller försämrade kvalitet på slutprodukten. Enligt en beräkning gjord på Chalmers (Rose, 2001) är den indirekta kostnaden generellt sett för byggindustrin nitton gånger så hög som den direkta kostnaden. The European Agency for Safety and Health at Work (2010) skrev i en rapport att de indirekta kostnaderna inom byggindustrin ligger någonstans mellan 10 och 30 gånger de direkta kostnaderna. I en tidigare rapport av the European Agency for Safety and Health at Work från 2004 sägs att 8 procent av de totala byggkostnaderna i Europa är relaterade till ergonomiska problem, det vill säga fel arbetsmiljö som leder till olyckor och förslitnings- eller belastningsskador. Enligt deras beräkningar motsvarar det en kostnad på cirka 75 miljarder kronor per år i för höga byggkostnader i Europa.

14.1.7 Sammanfattning

Alla inblandade parter måste fokusera och ordentligt arbeta igenom de stadier i ett projekt där störst inverkan på de ergonomiska förutsättningarna finns. För att möjliggöra god produktivitet vid en arbetsplats är det viktigt att hantverkarna känner sig säkra och trygga i sitt arbete. Det är därför viktigt att i projekteringsstadiet fokusera på arbetsmiljön. Projekteringen i de tidiga skedena kommer att bestämma hur produktiviteten blir och hur stort slöseri det blir på en arbetsplats. Arbetet bör därför fokusera på:

- riskidentifiering
- riskbedömning
- riskeliminering

Därefter skall ett arbete med att implementera och förbättra designen av projektet utefter de framkomna synpunkterna ske. Där skall utrymme ges för alternativa produktionsmetoder och möjlighet till att anpassa arbetsplatsen för rätt hjälpmedel.

14.1.8 Industriellt tänkande

Byggprojekt för till exempel broar, kajer och andra anläggningar sträcker sig oftast över långa tidsperioder, och använder oftast en liten andel standardiserade delar. Det är ofta underentreprenörer och materialleverantörer som står för en stor del av förädlingen av byggandet. Ansvar för en anläggning varierar under dess livstid mellan beställare, projektör, entreprenör, underentreprenörer, materialleverantörer, förvaltare och brukare. Det medför att det kan vara svårt att få alla att dra åt samma håll för att få fram det bästa för slutprodukten.

Inom byggindustrin sägs konstruktioner ofta vara mer eller mindre unika enstycksproduktioner, organisationen är i regel hopsatt temporärt för att lösa uppgiften och konstruktionen byggs oftast på sin slutgiltiga position. Dessa faktorer pekas ofta ut som orsaker till den relativt låga produktivitetens utvecklingen inom byggindustrin. Även tolkningen av regler och förordningar sägs bromsa utvecklingen. Industrialisering genom nya och förbättrade arbetsmetoder kan generera en ökad produktivitet, kortare byggtider och bättre lönsamhet. För att införa nya och förbättrade arbetsmetoder behöver man lägga fokus på tidiga skeden inom projekteringen.

Det finns olika uppfattningar om vad industriellt tänkande inom bygg är. Forskare skiljer i dagsläget ofta på industriellt och industrialiserat byggande. En vanlig definition av industrialiserat byggande när termerna ses som olika är ”justera dagens process så att den blir mer effektiv”. En definition av industriellt byggande kan då vara ”en radikal förändring av dagens process så att en signifikant skillnad mot dagens process skapas”. Det sistnämnda syftar till stor del på att produktionen flyttas från arbetsplats till fabrik, det vill säga att prefabricera hela eller delar av en konstruktion. En definition av industriellt tänkande när de två termerna ses som mer eller mindre likvärdiga kan vara, ”givna förutsättningar för modern teknologi att systematiskt konstruera och planera utförandet av ett projekt dels genom mekanisering dels genom arbetskraft”. När det inte särskiljs på de två termerna utan ett industriellt tänkande åsyftas är ofta diskussionerna att det är mer relevant att analysera skillnaderna mellan fabrikstillverkning och platsstillverkning och relatera det till graden av industriellt tänkande. Industriellt tänkande handlar inte enbart om förtillverkning (prefabricering) utan även om att förändra och skapa nytänkande när platsbyggeri används.

14.2 Självkompakterande betong

14.2.1 Allmänt

Övergång från gjutning med konventionell betong till självkompakterande betong innebär möjlighet till en mycket stor arbetsmiljömässig förbättring med bl.a. färre arbetsskador och mindre buller. En förändring i denna riktning medför inte bara en förbättrad arbetsmiljö för den enskilde betongarbetaren utan också en förbättring ur ett vidare samhällsperspektiv. Orsaken till förbättringen är att det externt tillförda kompakteringsarbetet, d.v.s. vibreringen, i princip helt kan elimineras.

14.2.2 Belastningsskador

Kompakteringsarbete med relativt tunga stavvibratorer innebär att betongarbetaren utsätts för påfrestande belastningar och ofta är tvingad till tunga lyft vid ergonomiskt ofördelaktiga kroppsställningar. Ett klart riskmoment i yrket är också att behöva klättra ner i formar för att komma åt att vibrera ut betongen i trånga eller hårt armerade partier. Följden av ensidig belastning av vissa muskelgrupper blir att många betongarbetare får belastningsskador. Vid arbete med handhållna stavar medför vibreringen i sig dessutom att blodkärlen i händerna skadas vilket leder till s.k. "vita fingrar". Den mekaniska belastningen och vibreringen leder alltför ofta till att en betongarbetare inte klarar att utföra denna typ av arbetsmoment under ett helt yrkesliv. Med andra ord så går alltför sällan en betongarbetare i pension vid 65 års ålder. Detta faktum är en orsak som gör att nyrekryteringen till arbetet som betongarbetare i dagsläget inte är lätt. Kostnaderna för samhället blir också stora då vibrerings- och belastningsskador bidrar till ökad sjukfrånvaro och i vissa fall förtidspensioneringar.

14.2.3 Buller

Vibrering av betong är ett bullerintensivt arbetsmoment. En undersökning, NCC (2000), visar ett exempel på att ytvibrering kan generera 101,9 dB(A) och 94,8 dB(A) på avstånden 1 m respektive 4 m från ljudkällan då två vibratorer används samtidigt. Det kan nämnas här att gränsvärdet för hörselskador i dessa sammanhang är satt till 85 dB(A). Ett annat exempel från samma rapport visar att ljudnivån på en verklig arbetsplats minskar med 10 dB(A) från 94 dB(A) till ca 84 dB(A) när självkompakterande betong ersätter konventionell betong.

Ljudnivån i en fabrikshall där prefabricerade betongelement kompakteras med bl.a. vibratorbord är så hög att arbetet omöjliggörs utan hörselskydd. Kanske är det just inom prefabindustrin man ur bullersynpunkt har allra mest att vinna på att ställa om till självkompakterande betong. Bortsett från att man slipper underhåll och nyinvesteringar av kompakteringsutrustning kan en eliminering av vibrationsbullret innebära att personalen kan kommunicera direkt med varandra i normal samtalston. Stressen minskar samtidigt som säkerheten på arbetsplatsen ökar.

Även arbetsplatsens grannar påverkas av bullret från vibrationsutrustningarna. I vissa fall får entreprenören helt enkelt anpassa produktionen tidsmässigt för att inte störa omgivningen, Nilsson (1998). Således bidrar användning av självkompakterande betong till en förbättrad attityd från omgivningen till ljudet från en byggarbetsplats. En tyst arbetsplats behöver dessutom inte planera in gjutningarna till vissa tider utan kan utnyttja hela arbetspasset. Den bullerstörning som gjutningen genererar kan också minimeras eftersom gjutningen med SKB kan utföras på kortare tid.

14.2.4 Säkerheten på bygget

Genom att eliminera vibreringsarbetet ökar också säkerheten på arbetsplatsen. En hög ljudnivå är förutom direkt skadlig också stressande och irriterande. Hörselskydd måste användas. Detta försämrar kommunikationen (varningsrop) och uppmärksamheten. På en byggarbetsplats där självkompakterande betong används kan kommunikation ske i normal samtalston och uppmärksamheten kan styras över till övervakning och kvalitetssäkring (figur 6.1).



Figur 14.1: Gjutning med SKB (Simonsson, 2011).

14.2.5 Risker med SKB

Om gjuthastigheten drivs upp till en nivå där formtrycket blir för högt finns risk att formras uppstår. Konsekvensen av ett sådant formras kan i så fall mycket väl bli ödesdigert med dödsfall som följd. Det har tidigare (i kapitel 12) redovisats den erfarenhet som finns idag avseende stighastighet och tixotropi relativt formtryck. Rekommendationen är att iaktta en mycket försiktig attityd i denna fråga. Om vetenskap ej finns om betongens eventuella tixotropa egenskaper eller om hur känsligt formtrycket är gentemot stighastigheten bör man dimensionera för fullt vätsketryck.

Således rekommenderas att i god tid före gjutning skaffa sig gedigen kunskap om aktuell betongs tillstyvnande och hur stighastigheten inverkar på formtrycket. Detta bör även omfatta variationer i betongtemperatur som kan bli aktuella sommar- och vintertid.

14.3 Referenser

European Agency for Safety and Health at Work (OSHA) 2004. Bilbao Declaration – Building in safety. European construction safety summit, Bilbao, Spanien, 22 november 2004. http://agency.osha.eu.int/publications/other/20041122/en/index_1.htm.

European Agency for Safety and Health at Work, 2010. Work-related musculoskeletal disorders in the EU — Facts and figures. Luxemburg, 2010. European Risk Observatory Report ISSN 1830-5946

NCC. Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. EU-projekt kontrakt BRPR-CT96-0366, 2000.

Nilsson M. Projekt vibreringsfri brobetong. Borlänge: Vägverket, 1998. Publikation nr 1998:71.

Rose L. Models and Methods for Analysis and Improvement of Physical Work Environments. Göteborg: Chalmers, institutionen för produkt- och produktionsutveckling, 2001. Doktorsavhandling.

Samuelsson B. Arbets-skador i byggverksamhet 2008. Privat och offentlig verksamhet: bygg- och anläggning, byggnadsplåtslageri, elinstallation, ventilation, VVS, måleri, Glasmästeri, maskinentreprenad. Stockholm: Byggindustrins Centrala Arbetsmiljöråd, 2009. Rapport nr 2009:2, 71 s.

Simonsson P. Buildability of concrete structures: processes, methods and material. Luleå: Luleå tekniska universitet, institutionen för konstruktionsteknik, 2011. Doktorsavhandling.

15. Mottagningskontroll och lossning

15.1 Allmänt

En viktig skillnad mellan SKB och vanlig betong är att med vanlig betong är det möjligt att kompensera variationer i den färska betongens konsistens med varierande vibreringsinsats. Detta är inte möjligt med SKB. Avgörande är istället att olika mått på arbetbarheten hos den levererade betongen håller sig inom vissa snäva gränser. Det är således viktigt att betongen motsvarar i förväg uppställda kriterier. Likaså är det viktigt att entreprenören både besitter kompetens och har tillgång till en verifieringsmetod att korrekt värdera betongen i förhållande till uppsatta kriterier.

Förberedelserna och kommunikation mellan betongleverantör och entreprenör är mycket viktiga. Hur skall en situation där betongen faller utanför uppställda kriterier hanteras? Kan betongen användas eller korrigeras? Om ej, hur påverkar ett kasserat lass logistiken och i slutändan gjutresultatet? Dessa frågor liksom vem som ansvarar för beslut och åtgärder får inte vara obesvarade när gjutning påbörjas utan skall vara väl förberedda i god tid före gjutningen.

Vid användning av SKB skall arbetsmetoder för den aktuella gjutningen tas fram baserade på byggarens erfarenhet och/eller förprovning, se SS-EN 13670, avsnitt 8.4.3. Om det ställs krav på den färska betongens egenskaper och kriterier för överensstämmelse utöver dem som anges i SS-EN 206, skall en överenskommelse om detta träffas med betongtillverkaren.

Åtgärder före gjutning, t.ex. framtagning av gjutplan, och mottagningskontroll skall genomföras enligt SS-EN 13670 och SS 137006. Detta medför att omfattning av provtagning och provtagningsmetodik bör i förväg ha genomgått och överenskommit i samråd mellan beställare, entreprenör och betongleverantör och finnas angivet i utförandespecifikationen. Kommunikation mellan dessa aktörer är viktig och bör inledas i ett tidigt skede och kan då även omfatta förundersökningar av recept, transport- och gjutmetodik vid komplicerade gjutningar.

15.2 Provtagning

På samma sätt som för konventionell betong skall mottagningskontroll innefatta kontroll och signering av följesedel före lossning. Betongen skall okulärbesiktigas under lossning och lossningen skall avbrytas om, efter erfarenhetsmässig bedömning, dess utseende inte är normalt. Det är vanligt att man i det sammanhanget gör en kontroll för att se om huruvida betongen separerar. När så erfordras i utförandespecifikationen skall prover tas vid mottagningsstället (fabriksbetong) eller gjutstället och omfattning av provtagningen och provtagningsmetodik skall finnas angivet i utförandespecifikationen. Likaså bör kriterier och gränsvärden för mottagningskontrollen av SKB definieras, se t.ex. EFNARC (2005).

I SS-EN 206 anges provningsmetoder och frekvens för bedömning av överensstämmelse med betongspecifikationen och i bilaga B anges krav för provning av identitet. Med provning av identitet avses provtagning av betong till en konstruktion och syftet är att påvisa att betongen som mottagits tillhör samma betongvariant ("population") som genom tillverkarens bedömning av överensstämmelse verifierats vara i överensstämmelse. Identitetsprovning utförs av entreprenören och är inte en del av eller en ersättning för betongleverantörens egenkontroll.

Omfattning av provningen vid mottagningskontroll beror på utförandeklass enligt SS-EN 13670 vilket definierar kraven på kontroll av material och produkter samt utförande. I denna standard anges också vilken typ av kontroll som skall genomföras och vilken dokumentation som erfordras. För bärverk i utförandeklass 3 (högsta kraven), bör den systematiska kontrollen

innefatta allt betongarbete av betydelse för bärförmåga och beständighet och innefatta kontroll av betong samt gjutning och härdning.

I SS-EN 13670 (Bilaga F) anges att för SKB bör mottagningskontrollen, förutom kontroll av följesedel, inkludera provning av den färska betongens egenskaper. I utförandespecifikationen bör, där det är relevant, anges om stickprov skall tas och med vilken frekvens detta skall göras samt vilka egenskaper som skall verifieras. Bedömning och kontroll av egenskaper kan omfatta:

- Flytsättnmätt och t_{500}
- Viskositet
- Passeringsförmåga
- Separationsmotstånd
- Lufthalt
- Tryckhållfasthet
- Frostbeständighet

Vanligast är att flytsättnmätt (och t_{500}) och lufthalt, då detta har specificerats, kontrolleras vid mottagningskontrollen. Då provtagning erfordras bör flytsättnmätt och lufthalt provas på samtliga lass fram till dess att erhållna värden visar att betongen håller jämn kvalitet (lufthalt vid krav på sådan), visar stabilitet och ligger innanför de överenskomna gränsvärdena. Då stabila värden på flytsättnmätt (och lufthalt) kunnat påvisas genom prov från flera på varandra följande leveranser, kan provtagningsfrekvensen minskas och stickprov tas vid tveksamheter. Vid särskilt krävande och komplicerade gjutningar kan en mer omfattande kontroll behövas med provtagning på varje lass. Provtagning sker före pumpning. Dock kan prov på betongen behöva tas både före och efter pumpen i inledningen av gjutningen. Detta för att dokumentera hur den aktuella betongens flytsättnmätt och lufthalt påverkas av pumpningen samt etablera en relation mellan respektive egenskap före och efter pump.

Provtagning och värdering av SKB är inte att jämföra med fallet med konventionell betong. Det är ofrånkomligt att en viss vana och känsla för betongens beteende är av stor vikt för att korrekt kunna värdera om den uppfyller överenskomna kriterier. Därför är det viktigt att teknikansvarig och arbetsledning har både formell kompetens (kompetensklass I-U eller II-U) samt dokumenterad erfarenhet av arbete med SKB. Erfarna betongtekniker menar att det finns anledning att prova SKB mer än konventionell betong då SKB:s robusthet kan variera avsevärt. Ett lass med dålig betong kan förstöra en hel gjutning.

Vi provtagning skall analysprovet vara representativt för betongen och provtagning skall genomföras enligt SS-EN 12350-1. Ett faktum, som försvårar provtagningen på plats och samtidigt innebär ett osäkerhetsmoment i samband med värderingen av provresultatet, är att det nästan alltid kommer mer sten i förhållande till de finare fraktionerna då en mindre mängd betong (motsvarande exempelvis en spann) tappas ut från en fullastad roterbil. Detta innebär att flytsättnmättet bedöms vara mindre än vad det egentligen är för det aktuella lasset. Även om en något större mängd betong tas ut från bilen (exempelvis motsvarande volymen i en skottkärra) är det inte alltid säkert att detta prov är representativt för lasset som helhet. Erfarenhetsmässigt mäts större flytsättnmätt på prover tagna efter det att bilen lossat 0,5 till 1 m³. Detta är viktigt då resultatet från provtagningen värderas men också vid planeringen av provtagningen. Det kan nämnas att skillnader uppemot 100 mm flytsättnmätt har konstaterats mellan provtagning på den första volymen som tas ur bilen och efter att ca 2 m³ tömts ur ett lass. Fenomenet är inte unikt för SKB men påverkar utvärderingen av den färska betongens egenskaper i högre grad än vad fallet är vid utvärdering av egenskaperna hos konventionell

betong. Prov bör därför tas ut när ca 0,5 m³ lossats och när det är ett kontinuerligt flöde av betong i ränna eller pump.

15.3 Lossning

SKB kan lossas med ränna, bandbil, i bask eller med pump. Lossning i ficka kan vara mindre lämpligt eftersom betongen bör hållas i rörelse i möjligaste mån ända tills den stannar i formen. Då den färska betongen kan uppvisa utpräglade tixotropa egenskaper bör varken ficka eller bask användas. Lyckade SKB-gjutningar har genomförts med bask och kran men detta medför att det måste säkerställas att ingen separation (segregation) sker vid lossning och förflyttning. Vid delad lossning eller uppehåll i gjutning (> ca 10 minuter) skall behållaren roteras sakta under väntetiden och kraftigt under minst två minuter innan fortsatt lossning påbörjas, se Norsk Betongförening (2002). Eventuellt kan också provtagning för att kontrollera konsistens behöva göras. Skriftlig chaufförsinstruktion bör finnas och denna skall följas.

SKB har under normala betingelser (dvs. under temperaturer som gäller under större delen av året) en öppethållandetid överstigande 1 timme. Med öppethållandetid menas här den tid efter färdig blandning som betongen uppfyller uppställda krav på flytbarhet, stabilitet och passeringsförmåga.

15.4 Justering av konsistens

Vid behov, t.ex. då konsistens avviker från specifikation eller vid längre gjutuppehåll, kan konsistens hos SKB justeras på arbetsplats. Detta kan göras genom tillsättning av flyttillsatsmedel, viskositetsmedel eller polypropylenfibrer (mikrofiber, diameter < 32 µm). De förstnämnda görs för att öka flytförmågan och de två sistnämnda för att stabilisera SKB som har fått ett för stort flytsättningsmått och/eller som är separationsbenägen. Enligt SS-EN 206, avsnitt 7.5, får i speciella fall tillsatsmedel, pigment, fibrer eller vatten tillsättas då:

- detta sker på tillverkarens ansvar;
- konsistensen och gränsvärden överensstämmer med specificerade värden; och
- det finns ett dokumenterat förfarande för säkert utförande av processen, som ingår i fabrikenes produktionsstyrning.

Vidare står i SS-EN-206: ”Om vatten tillsätts ska dessutom kontroll av överensstämmelse utföras på ett stickprov av den slutliga produkten.”

Mängden vatten, tillsatsmedel, pigment eller fibrer, som tillsätts i transportblandare, skall i samtliga fall noteras på följesedeln. Generellt är det inte tillåtet att tillsätta vatten i betongbilen.

Tillsättning av flyttillsatsmedel är möjligt men viss försiktighet bör tillämpas, då även små flyttillsatsmedelsmängder kan ge stora effekter på den färska betongens flytförmåga och stabilitet. Det är också viktigt att tillsatsmedlet blir homogent utblandat i betonglasset. Därför är det att föredra ett flyttillsatsmedel med lägre torrhalt eftersom detta är enklare att dosera och blanda ut. Det finns också särskilda flyttillsatsmedelsprodukter som levereras som pulver som kan tillsättas den färska betongen, dessa produkter kan generera ökad lufthalt och det är därför viktigt att följa leverantörens anvisningar för produkten. För tillsats av flyttillsatsmedel måste rutiner och instruktioner finnas på plats. Vid tillsättning av flyttillsatsmedel måste trumman roteras för tömning så att betongen hamnar på första vingen så att tillsatsmedlet i sin tur kan tillsättas på ett sätt som gör att det blandas in i betongen. Betongen måste sedan roteras under minst fem minuter på högsta varvtal innan betongen kan lossas. Speciell hänsyn måste tas till

flytmedlets effekt på betongens retardation. Betongtillverkaren måste kvalitetssäkra proceduren i en skriftlig instruktion som delges bl.a. chauffören. Acceptabel effekt av flytmedlet kan emellertid endast fås om den färska betongen inte har hunnit styvna till för mycket under transport och väntan. Uppskattningsvis bör flytsättningsmålet vara minst 470 till 500 mm för att tillsättning av flytmedel till roterarens kärl skall ge avsedd effekt. Inom vilka minsta intervall som flytsättningsmålet bör vara måste baseras på erfarenhet och/eller förundersökning.

Ett betongglass som vid leverans har för stort flytsättningsmått och som är separationsbenäget kan justeras med hjälp av viskositetsmedel eller polypropylenfibrer. Detta är dock inte i detalj utrett, men vid de tillfällen det provats har båda metoderna visat sig fungera, och därför bör en undersökning av lämplig dosering göras före leverans. Det är betongtillverkare/-leverantörer, förslagsvis i samråd med entreprenören och köparen av betongen, som utarbetar system och rutiner för detta i god tid före leveranserna. På samma sätt som vid tillsättning av flyttillsatsmedel måste betongen roteras under minst fem minuter på högsta varvtal innan betongen kan lossas.

Det bör dock observeras att justering av konsistens är tidskrävande då det innefattar provtagning både före och efter tillsättning av flyttillsatsmedel eller viskositetsmedel samt fem minuters blandning. Detta medför en fördröjning av lossning av cirka 15 minuter vilket måste beaktas i gjutschemat. Därför är det oerhört viktigt att det finns en kommunikation mellan arbetsplatsen och betongfabriken så att nödvändiga justeringar kan göras redan på betongfabriken.

15.5 Referenser

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification-Production and Use. EFNARC, 2005. (<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.)

Guidelines for Production and Use of Self-Compacting Concrete. Oslo: Norsk Betongforening, 2002. NB-Publikation nr. 29.

SS-EN 12350-1: Provning av färsk betong – Del 1: Provtagning. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute, 2009.

SS-EN 13670: Betongkonstruktioner – Utförande. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute, 2009.

SS-EN 206:2013+A1:2016 Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2018, 104 s.

SS 137006: Betongkonstruktioner – Utförande – Tillämpning av SS-EN 13670:2009 i Sverige. Stockholm: SIS Swedish Standards Institute, 2015.

16. Pumpning och gjutning

Kapitlet är nyskrivet av Ingemar Löfgren.

16.1 Allmänt

SKB är väl lämpad för pumpning. Men detta betyder inte nödvändigtvis att all SKB är lättpumpad och jämfört med konventionell (normal) betong så finns det likheter men också stora skillnader i beteendet; se t.ex. Feys (2009), Feys m.fl. (2010), Feys (2012), Khatib (2013), De Schutter och Feys (2016).

Under normala betingelser, kontrollerade former och låga pumptryck påverkas lufthalt och konsistens i ungefär samma utsträckning som vid pumpning av normal betong. Det bör dock observeras att pumpning och den friktion som uppstår leder till ökad betongtemperatur och denna kan då påverka betongens reologiska egenskaper, se Feys (2012) och Khatib (2013).

Åtgärder bör alltid vidtas för att hålla pumptrycket så lågt som möjligt. Lågt tryck med hög matningshastighet är lämpligare än vice versa. Men betongen får inte forceras genom pump och högre matningshastighet kan leda till väsentligt ökat pumptryck. Vid höga pumptryck har stora konsistens- och lufthaltsförluster rapporterats, Feys m.fl. (2016). Exempelvis har konsistensbortfall på 110 mm uttryckt som flytsättningsmått konstaterats. Högt pumptryck ökar dessutom risken för pumpstopp. Därför bör åtminstone ett prov tas efter pump, lämpligen det första.

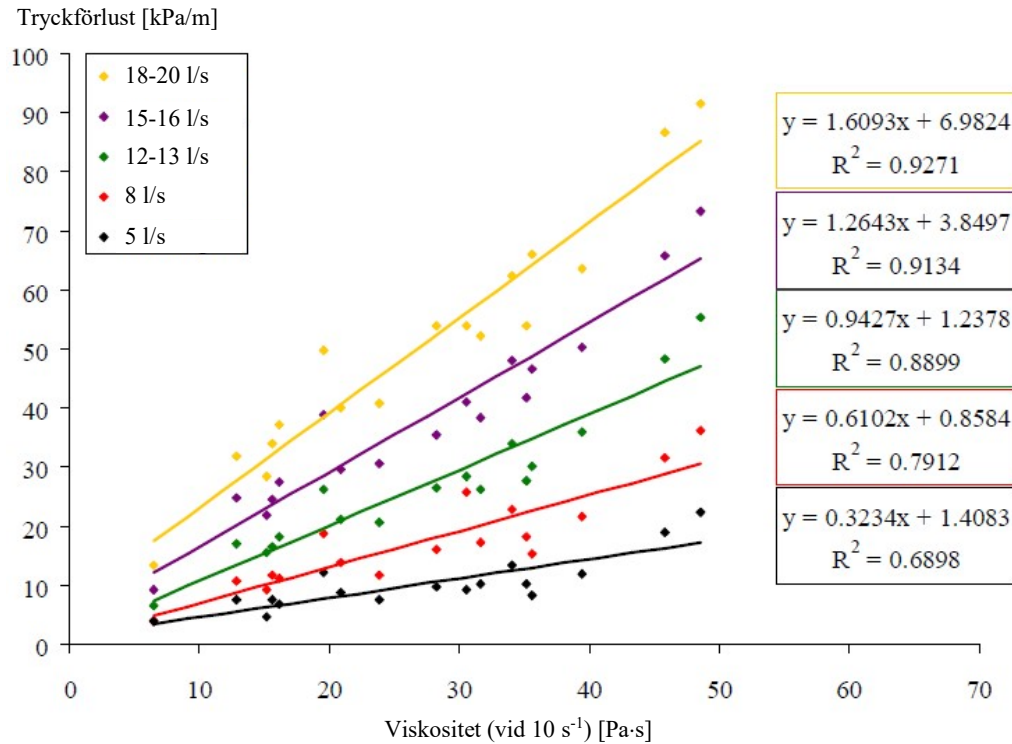
16.2 Inverkan av reologiska egenskaper

För att en betong skall vara pumpbar så måste den innehålla tillräckligt med finmaterial, inte vara separations- eller blödningsbenägen och inte ge upphov till blockering. En SKB uppfyller lätt dessa kriterier. Men de reologiska egenskaperna skiljer sig från en konventionell betong, där SKB har lägre skjuvgränsspänning och högre viskositet, vilket gör att SKB beter sig annorlunda vid pumpning.

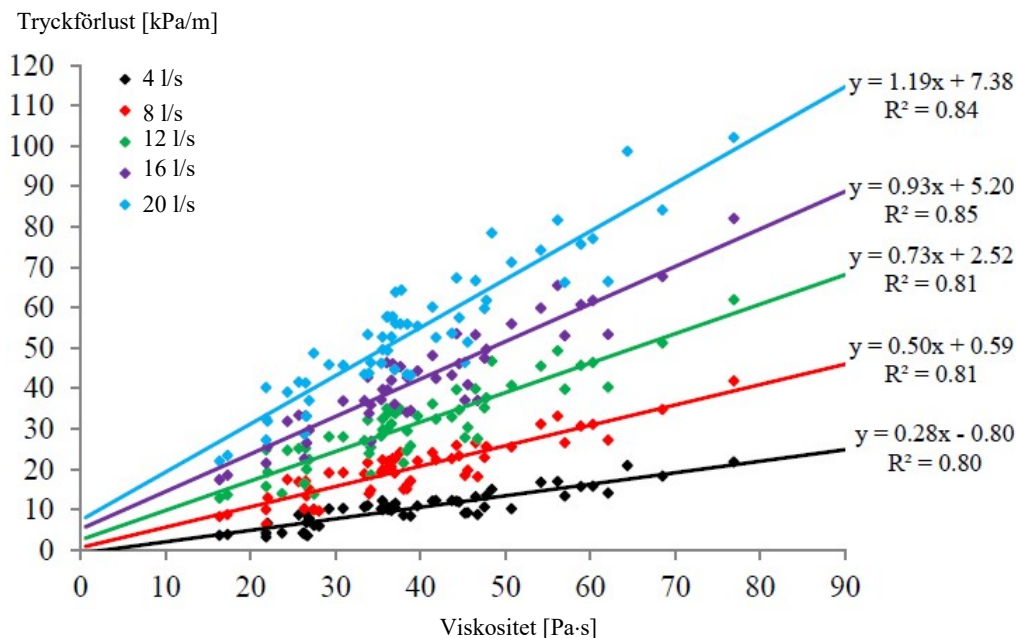
Vid pumpning av konventionell betong uppstår ett lubrikationslager ("glid-" eller "smörjlagret") närmast mantelytan i pumpröret eller -slangen. Detta gör att konventionell betong framflyttas genom det som benämns pluggflöde (*plug flow* på engelska) som innebär att det i ett tunt skikt närmast manteln uppstår en hastighetsprofil (gradient) men att det sedan är en liten skillnad för resterande betong. All skjuvning av materialet sker alltså i detta tunna lubrikationslager och det åtgår mindre energi för skjuvning av betongmassan. För en självkompakterande betong är skillnaden att det uppstår en hastighetsprofil inte bara vid mantelytan utan också i resterande betong vilket innebär att en SKB utsätts för mer skjuvning. Skillnaden i beteende beror på att den konventionella betongen har en högre skjuvgränsspänning som gör att skjuvningen sker främst i lubrikationslagret vilket möjliggör att betongen kan förflyttas i röret. Vid pumpning är det höga skjuvhastigheter som uppstår, de kan vara ca $30 - 60 \text{ s}^{-1}$, vilket är betydligt högre än vid mätning av reologiska egenskaper som vanligtvis sker vid hastigheter lägre än 20 s^{-1} . Skjuvhastigheten i lubrikationslager närmast mantelytan kan vara ännu högre och överstiga 100 s^{-1} .

För självkompakterande betong (och betong med hög andel finmaterial) har det visat sig att pumptrycket påverkas mest av den plastiska viskositeten och i mindre utsträckning av flytgränsspänningen, se Chapdelaine (2007), Feys (2012) och Khatib (2013). I figur 16.1 och 16.2 visas exempel på hur tryckförlusten beror av matarhastighet och viskositet. Som framgår av figurerna är det framförallt vid hög matningshastighet som viskositeten har en stor inverkan

och pumptrycket kan öka exponentiellt. För att minska pumptrycken och förbättra pumpbarheten är det därför viktigt att sänka viskositeten, Khatib (2013). Detta kan åstadkommas t.ex. genom att öka v_{ct} , ersätta en del av cementen med flygaska eller en liten mängd silikastoft (< 6 % av cementvikten) men också en ökad pastavolym kan vara gynnsamt.



Figur 16.1: Samband mellan uppmätt tryckförlust och viskositet vid olika matningshastighet. Baserad på Feys (2009).



Figur 16.2: Samband mellan uppmätt tryckförlust och viskositet vid olika matningshastighet i 5 tumms rör (127 mm). Baserad på Khatib (2013).

SKB som är utpräglat skjuvförtjockande (se avsnitt 4.5) bör undvikas, eller pumpas med låg matningshastighet. En skjuvförtunnande SKB är däremot gynnsamt, detta kan vara svårt att

åstadkomma men kan erhållas t.ex. med särskilda viskositetsmodifierande tillsatsmedel, men vanligtvis så är SKB skjuvförtjockande.

En SKB som påverkas av strukturuppbyggnad och har en hög grad av tixotropi kan ge upphov till ökat pumptryck och risk för pumpstopp vid uppehåll i pumpningen. Det kan också leda till att den första betongen som kommer ut när pumpningen återstartas inte längre är självkompakterande p.g.a. strukturuppbyggnad och att det krävs tillförd energi (skjuvning) för att den skall återgå till sitt ursprungliga beteende.

16.3 Beräkning av pumptryck

Det finns ett antal modeller för beräkning av pumptryck, se bl.a. Kaplan (2001), Jacobsen m.fl. (2009), Feys (2012), Khatib (2013) och Kwon m.fl. (2016). För en Newtonvätska (se avsnitt 4.3) kan Hagen-Poiseuilles lag (ekvation) användas för att beräkna flödet (Q) när tryckskillnaden (Δp) är känd (se Feys, 2009):

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot D^4}{128 \cdot \mu \cdot L} \quad (16.1)$$

För en Newtonvätska så leder en ökad viskositet (μ) eller rörlängd (L) till minskat flöde eller en större tryckskillnad (tryckförlust, Δp). En minskad rördiameter (D) har stor inverkan och halveras denna så blir tryckförlusten (Δp) 16 gånger större, dvs. det krävs ett väsentligt högre tryck för att flödet skall bibehållas.

För en Binghamvätska (se avsnitt 4.4) så inverkar också skjuvgränsspänningen på tryckförlusten. För en Binghamvätska så kan flödet beräknas med hjälp av Buckingham-Reinerekvationen (se Feys, 2009):

$$Q = \frac{\pi}{384} \cdot \frac{3 \cdot \Delta p^3 \cdot D^4 + 256 \cdot \tau_0^4 \cdot L^4 - 16 \cdot \tau_0 \cdot L \cdot D^3 \cdot \Delta p^3}{24 \cdot \Delta p^3 \cdot \mu_{pl} \cdot L} \quad (16.2)$$

där τ_0 är skjuvgränsspänningen, k_{pl} är den plastiska viskositeten, D rördiametern, L rörlängden och Δp är tryckförlusten.

Buckingham-Reiner ekvationen tar inte hänsyn till att SKB kan bete sig skjuvförtjockande, enligt Herschel-Bulkley (avsnitt 4.5), vid höga skjuvhastigheter. Det går att beakta skjuvförtunnande material ($n < 1$) men en analytisk lösning saknas för skjuvförtjockande material ($n > 1$).

I båda dessa förenklade modeller för flödet försummas effekten av lubrikationslagret vilket leder till att tryckförlust (Δp) överskattas, se Feys m.fl. (2013) och Chapdelaine (2007). Effekten av lubrikationslagret och dess inverkan är således viktig och behöver beaktas. Skillnad i beteendet vid pumpning hos konventionell och självkompakterande betong, som avgörs av lubrikationslagret och dess tribologiska egenskaper, beskrevs av Kaplan (2001). Kaplan gjorde en distinktion mellan dessa två typer av flöden, se figur 16.3. I zon 1, där skjuvning endast sker i lubrikationslagret, behöver endast de tribologiska egenskaperna hos detta skikt som beaktas. Enligt Kaplan (2001) kan tryckförlusten beräknas som:

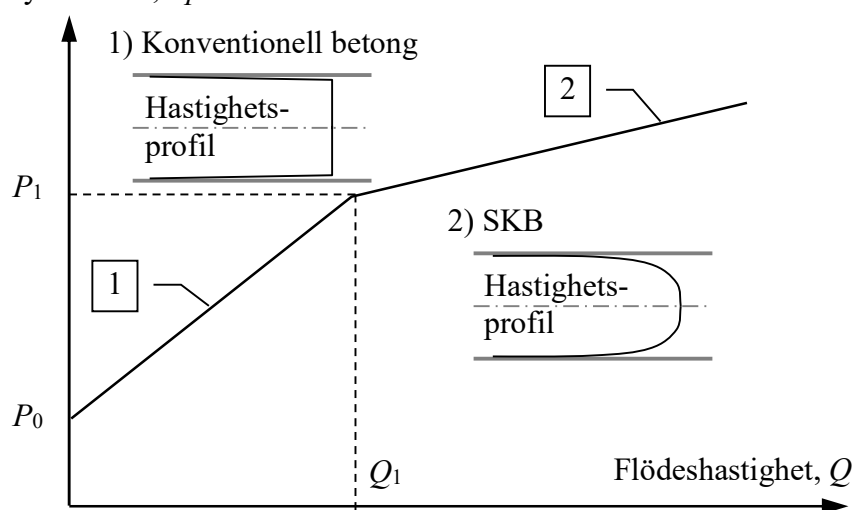
$$\Delta p = \frac{4 \cdot L}{D} \cdot \left(\tau_{0i} + \frac{Q}{900 \cdot \pi \cdot D^2} \cdot \eta_i \right) \quad (16.3)$$

Där lubrikationslagrets tribologiska egenskaper beskrivs av dess flytgränsspänning (τ_{0i}) och viskositetskonstant (η_i som anges i Pa·s/m).

I zon 2, där både lubrikationslagret och betong skjuvas, bestäms tryckfallet och flödet av en kombination av de tribologiska egenskaperna och betongens reologiska egenskaper. Men i detta fall är det svårare att bestämma de tribologiska egenskaperna eftersom lubrikationslagrets tjocklek är svår att mäta, se Le m.fl. (2015). Men resultat från Kaplan (2001) och Chapdelaine (2007) visar att den föreslagna ekvationen (16.4) för zon 2 ändå kan användas för att få en uppskattning av pumptrycket.

$$\Delta p = \frac{4 \cdot L}{D} \cdot \left(\tau_{oi} + \frac{\frac{Q}{900 \cdot \pi \cdot D^2} - \frac{D}{8 \cdot \mu} \cdot \tau_{oi} + \frac{D}{6 \cdot \mu} \cdot \tau_{oi}}{1 + \frac{D}{8 \cdot \mu} \cdot \eta_i} \cdot \eta_i \right) \quad (16.4)$$

Tryckförlust, Δp



Figur 16.3: Distinktion mellan zon 1 och 2 vid pumpning. I zon 1 sker all skjuvning i lubrikationslagret. I zon 2, som avser SKB, sker skjuvning också delvis i betongen. Punkten Q_1, P_1 anger den teoretiska punkten där skjuvspänningen nära manteln överstiger betongens skjuvgränsspänning vilket orsakar en hastighetsprofil i betongmassan. Baserad på Kaplan (2001).

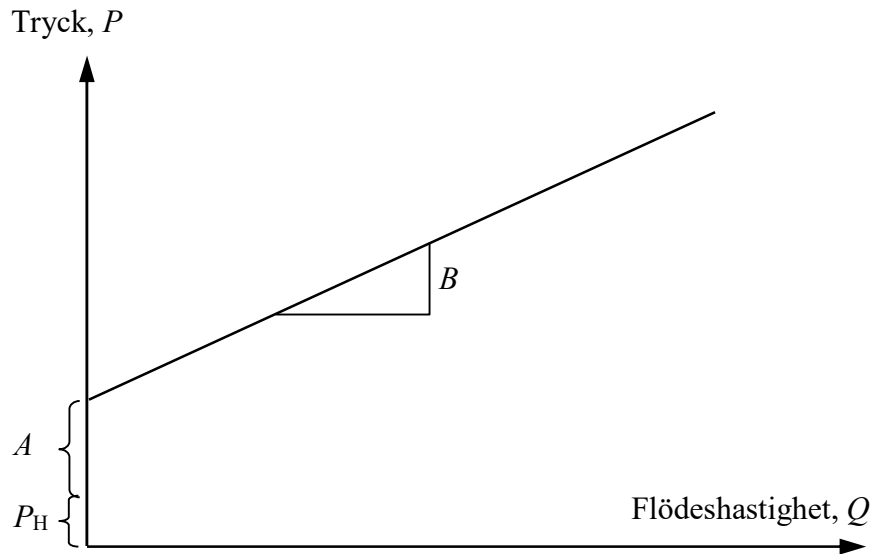
De tribologiska egenskaperna kan inte bestämmas med vanliga reometrar utan kräver särskild mätutrustning, se Khatib (2013). En nyligen utvecklad utrustning av Putzmeister är SLIPER "Sliding Pipe Rheometer", se Kasten (2009) och Mechtcherine m.fl. (2014). Enligt Mechtcherine m.fl. (2014) kan pumptrycket beräknas som summan av de inverkanse parametrarna, skjuvgränsspänningen P_y , den plastiska viskositeten, P_v och trycket orsakat av betongens egenvikten P_H , enligt ekvation 16.5:

$$P = P_y + P_v + P_H = \frac{4 \cdot L}{D} \cdot a + \frac{16 \cdot Q \cdot L}{\pi \cdot D^3} \cdot b + \rho \cdot g \cdot H \quad (16.5)$$

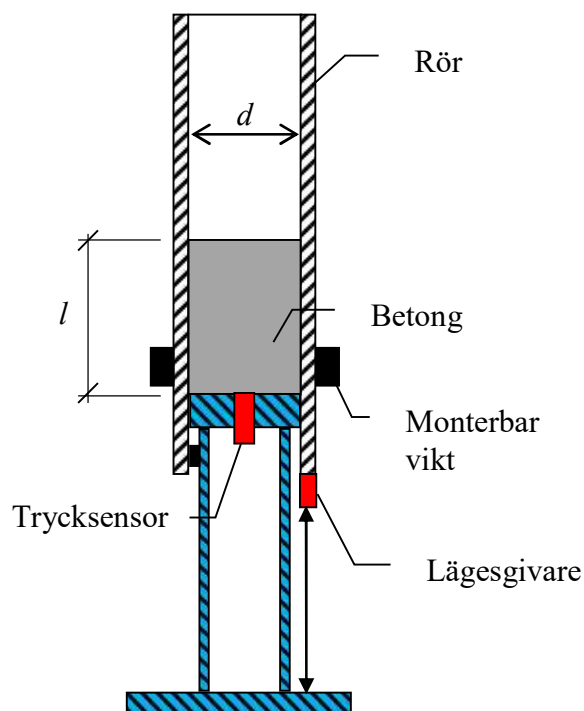
Med Sliding Pipe Rheometer kan parametrarna a och b bestämmas experimentellt och beskrivs av ekvation 16.6:

$$a = \frac{d \cdot A}{4 \cdot l} \quad \& \quad b = \frac{B \cdot \pi \cdot d^3}{16 \cdot l} \quad (16.6)$$

Där A är skärningspunkten vid y-axeln i diagrammet (borträknat trycket orsakat av betongens egenvikt) som visar P - Q och B är lutningen på kurvan, se figur 16.4, l och d är längd och diametern hos det rör som används för Sliding Pipe Rheometer, se figur 16.5.



Figur 16.4: Schematisk figur som visar bestämning av de tribologiska parametrarna. Baserad på Mechtcherine m.fl. (2014).



Figur 16.5: Mätprincip för SLIPER, där det tryck som uppstår av friktion när röret glider nedåt uppmäts. Vid mätning uppmäts både trycket och rörets glidhastighet och den senare kan justeras genom att applicera vikter på röret.

16.4 Gjutteknik

Vid pumpning av anläggningsbetong visar erfarenheten att den bör utföras på ett sådant sätt att jämn stigning i formen med så få avbrott som möjligt erhålls. En låg stighastighet vid vertikal gjutning (väggar) bör undvikas eftersom detta kan öka risken för veckbildning.

Pumphastigheten skall anpassas så att pumpstopp i möjligaste mån undvikas. Pumptrycket skall vara reducerat i förhållande till pumpning av konventionell betong. Pumpslangen bör vara nedstucken i betongen (c:a 20-60 cm, Norsk Betongförening, 2002) eller hållas mellan 0,5 och 0,8 meter över tidigare gjutpalls överyta beroende på betongens reologi, formens utformning, armeringens konfiguration m.m. för att undvika tixotrop tillstyvnad och gjutveck. Lämplig "släpphöjd" med hänsyn till dessa faktorer får bedömas från fall till fall baserat på erfarenhet från tidigare gjutningar under liknande förhållanden. Men då betongen släpps ned i formen från en hängande slang så kan detta leda till en luftindragande effekt vilket orsakar ökat antal ytporer, se RILEM TC 188-CSC (2006) och Daczko (2012). Vid gjutning av grövre vertikala konstruktioner där betongen inte slår genom armering, kan vid uppehåll, och när betongen i formen styvnat till, störlhöjden ökas för att väcka betongen i tidigare gjutpall så att den bättre kan blandas samman med den nya gjutpallen. Vid gjutning av vertikala konstruktionsdelar uppifrån och när betongen faller genom armering kan en alltför hög störlhöjd dock medföra att pasta och sten separeras.

SKB lämpar sig väl för pumpning genom ventil. Detta har visat sig såväl vid gjutning av husväggar med systemform som vid gjutning av tunnelinklädnad ("*lining*"). Principen är att formen "tankas" med betong som trycks upp underifrån. I fallet med tunnelinklädnad är tekniken inte bara en möjlighet utan ofta snarare en nödvändighet. Det skall dock påpekas att vid tankning genom ventil kan resultatet vid uppstart efter stopp bli ett förhöjt formtryck som bör beaktas.

Nedstick eller ventiler bör placeras med avstånd som är anpassat efter den självkompakterande betongens reologiska egenskaper för att undvika sten- och pastaseparation p.g.a. för lång flödessträcka. Normalt bör avstånden inte överstiga 10 m (dvs. maximalt 5 m utflöde), se Norsk Betongförening (2002) och EFNARC (2005). Detta behöver dock anpassas efter de förutsättningar som råder, dvs. formens och armeringens geometri, temperatur, etc. och betongens reologiska egenskaper.

16.5 Referenser

- Daczko J A. Self-Consolidating Concrete – Applying What We Know. CRC Press, 2012.
- De Schutter, G., Feys, D., (2016): Pumping of Fresh Concrete: Insights and Challenges, RILEM Technical Letters, 2016, nr. 1, s. 76 – 80.
- EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification-Production and Use. EFNARC, 2005. (<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.)
- Feys D. Understanding the Pumping of Conventional Vibrated and Self-Compacting Concrete. Ur: Understanding the Rheology of Concrete, Chapter 13, Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, UK, s. 2012, 331-353.
- Feys D. Interactions between Rheological Properties and Pumping of Self-Compacting Concrete. Gent, Belgien: Ghent University, 2009. Ph.D. Thesis.
- Feys D, De Schutter G, Khayat, K H & Verhoeven R. Changes in Rheology of Self-Consolidating Concrete Induced by Pumping. Materials and Structures, 2016 (V. 49), s. 4657-4677.
- Feys D, De Schutter G & Verhoeven R. Parameters Influencing Pressure during Pumping of Self-Compacting Concrete. Materials and Structures, 2013 (V. 46), s. 533–555.
- Feys D, De Schutter G, Verhoeven R & Khayat K H. Similarities and Differences of Pumping Conventional and Self-Compacting Concrete. Ur: Proceedings, SCC2010 Design, Production

- and Placement of Self-Consolidating Concrete. Montreal, Kanada, 2010, s. 153–162. (Springer).
- Jacobsen S, Mork J M, Lee S F & Haugan L. Pumping of Concrete and Mortar – State of the Art., Trondheim, Norge: SINTEF Building and Infrastructure, 2009. COIN Project report 5.
- Khatib R. Analysis and Prediction of Pumping Characteristics of High-Strength Self-Consolidating Concrete. Sherbrooke, Quebec, Kanada: University of Sherbrooke, Dept. of Civil Engineering, 2013. PhD Thesis.
- Kaplan D. Pumping of Concretes. Paris: LCPC, 2001. PhD Thesis. (På franska).
- Chapdelaine F. Fundamental and Practical Study on Pumping of Concrete. Laval, Frankrike: Université Laval, 2007. PhD Thesis. (På franska).
- Kasten K J. Gleitrohr-Rheometer – Ein Verfahren zur Bestimmung der Fließeigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen. Dresden, Tyskland: Dresden Univ. of Technology, 2009. Ph.D. Thesis.
- Kwon S H, Jang K P, Kim J H & Shah S P. State of the Art on Prediction of Concrete Pumping. *Int. J. of Concrete Structures and Materials*, 2016 (V. 10), nr. 3, s. 75–85.
- Le H D, Kadri E H, Aggoun S, Vierendeels J, Trich P & De Schutter G. Effect of Lubrication Layer on Velocity Profile Of Concrete in a Pumping Pipe. *Materials and Structure*, 2015 (V. 48), s. 3991–4003.
- Mechtcherine V, Nerella V N & Kasten K. Testing Pumpability of Concrete Using Sliding Pipe Rheometer. *Construction and Building Materials*, 2014 (V. 53), s. 312–323.
- Guidelines for Production and Use of Self-Compacting Concrete. Oslo: Norsk Betongforening, 2002. NB-Publikation nr. 29.
- RILEM TC 188-CSC. Final report of RILEM TC 188-CSC: Casting of Self Compacting Concrete. *Materials and Structures*, 2006 (V. 39), s. 937–954.

17. Numerisk modellering av färsk betongs rörelse

17.1 Numerisk simulering av SKB

Hand i hand med utvecklingen av självkompakterande betong i Sverige har även numerisk simulering av betongens utbredning och utblandning pågått. Arbetet inleddes av Örjan Petersson på dåvarande Cement- och Betonginstitutet och man har velat undersöka fenomen såsom blockering och formutfyllnad (Petersson, 2003). Man har även velat undersöka egenskaper såsom homogenitet och kompatibilitet mellan den armerade formen och betongens reologi. Målet är att med förbättrad datorkraft kunna skapa den ”digitala tvilling” som kan testa betongrecept och egenskaper innan gjutningen utförs för att undvika dyra misstag samt ge möjlighet till justering och förbättring.

I dagsläget är det möjligt att specificera de reologiska egenskaper som krävs för att få fullgod formutfyllnad liksom att modellera blockering och framför allt att undvika blockering av ballast (Roussel m.fl., 2009).

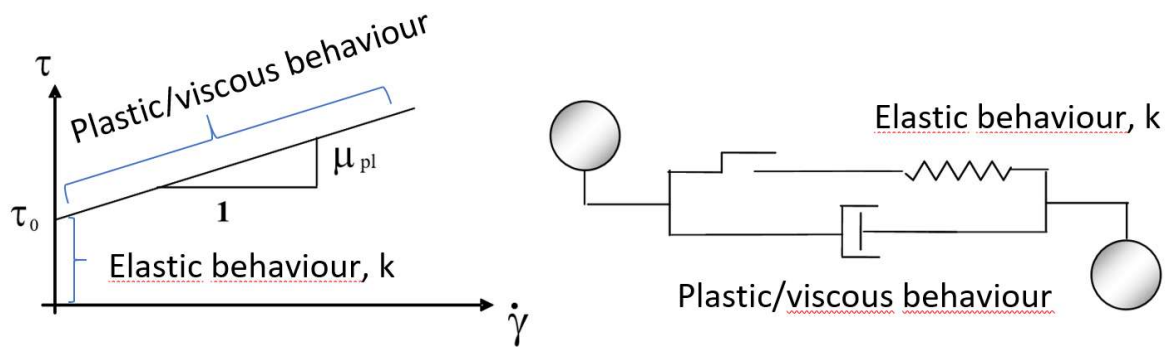
År 2006 organiserade Cement – och Betonginstitutet (CBI) en workshop i simulering av självkompakterande betongs flöde med deltagare från hela Europa. Detta blev starten på ett ännu pågående samarbete kring egenskaper samt modellering av SKB. Vid denna workshop presenterades ett antal föredrag (Roussel, 2004; Thrane Nyholm m.fl., 2005; Uebachs & Brameshuber, 2005) och diskuterades olika simuleringsmodeller (Wallevik, 2003; Dufour & Pijaudier-Cabot, 2005; Flatt m.fl., 2004; McBride & Mukaie, 2006; Noor & Uomoto, 1999), vilka är aktuella än idag. Olika modeller har tagits fram, dels en diskret metod med partiklar (*Distinct Element Method*, DEM), dels en kontinuumbaserad simulering (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), dels modeller som simulerar både partiklar och fluid. För dessa modeller gäller följande antaganden för simulering av betong:

- i) Mängden energi i systemet är konstant.
- ii) Massan i systemet är konstant.
- iii) Newtons andra lag: $F = ma$ är tillämplig.

Materialmodellen som används i vårt land för att beskriva SKB är Bingham's materialmodell, som uttrycker betongens flythastighet (bland annat som plastisk viskositet μ_{pl}) fram till den så kallade flytgränsspänningen τ_0 , då betongen slutar flyta. Detta samband uttrycks vanligen som skjuvspänning $\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma}$ (se avsnitt 4.4).

17.2 DEM

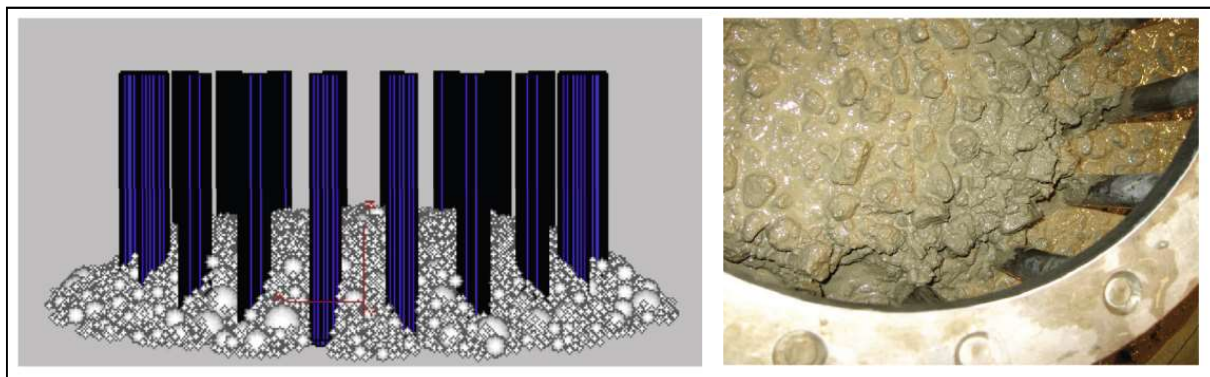
Distinct Element Method, DEM, (ibland *Discrete Element Method*, på svenska används ibland diskret elementmetod) används för att simulera rörelse och interaktion mellan partiklar. Modellen möjliggör visualisering av förskjutningar och rotationer av enskilda ballastkorn (eventuellt blandade med cementpastapartiklar) eller ballastpartiklar täckta av ett lager cementpasta. En grundläggande förutsättning för metoden är att materialet består av separata partiklar (inte nödvändigtvis sfäriska). De krafter som verkar på varje partikel beräknas enligt fysikaliska lagar (i – iii, se avsnitt 17.1) och summeras. En integrationsmetod används för att beräkna nya positioner för varje partikel baserad på summan av det totala kraftspelet som verkar. För att efterlikna ett Bingham-material har skjuvningen mellan partiklarna beskrivits med hjälp av en fjäder, en dämpare (μ_{pl}) och ett tröskelvärde (τ_0) enligt figur (Gram m.fl., 2007), se figur 17.1.



Figur 17.1: Bingham's material modellerat med hjälp av en dämpare, en fjäder och en friktionsfunktion.

Denna partikelmodell används till simulering av detaljer och fenomen hos t.ex. ballast i betong eller blockering. Det är möjligt att skapa ballastkorn med olika form. Ballastens ytråhet och storlek kan modelleras med parametrar för friktion och storlek medan sammanfogning av ett flertal partiklar kan ge ekvivalent form.

Med denna metod har framför allt flytsättningsmättet med framgång simulerats med representativ siktkurva, flödestid och partikeldiameter, samt även blockering med J-ring, se figur 17.2.



Figur 17.2: Ballastblockering (simulerad och verklig) av SKB med J-ring.

Programvaran finns även tillgänglig med en applikation som tillåter simulering av ett flöde med partiklar, man kan alltså blanda partiklar och fluid (cementpasta) i en suspension.

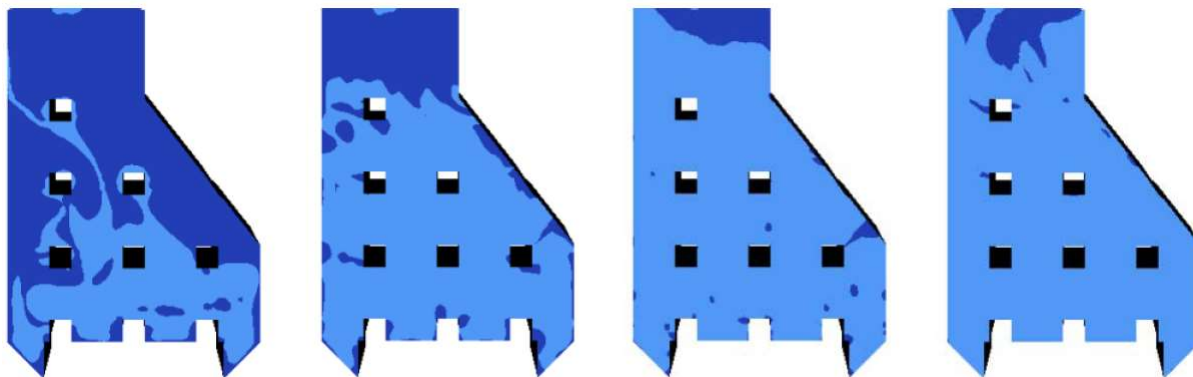
17.3 CFD

Den kontinuumbaserade ansatsen – *Computational Fluid Dynamics*, CFD (på svenska numerisk strömningsmekanik) – används för att simulera större flödesmängder. Betongen modelleras som ett homogent material, alltså ingår inte effekter av ballastens inverkan, som till exempel blockering eller separation.

De för flöde tillämpliga, generaliserade Navier-Stokes ekvationer styr kontinuitet, energi och kraft – det finns ingen allmän teoretisk lösning för hela detta system av ekvationer. Då icke-linjära ekvationer är mycket svåra att lösa analytiskt, diskretiseras dessa i programvaran.

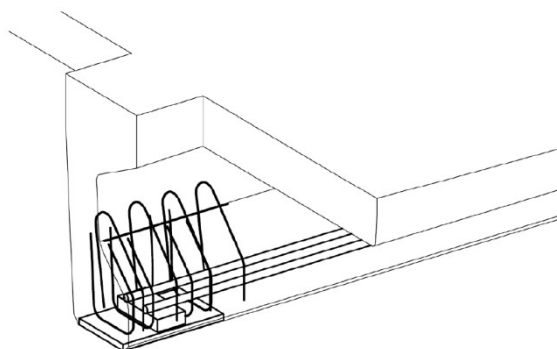
Även för denna typ av kontinuumbaserad lösning finns metoder att simulera exempelvis separation, t.ex. genom att blanda ut två olika fluider med densitetsskillnad, för att se hur väl sammanhållen betongen är efter ett visst flöde i form eller provningsmetod. För forutfyllnad

finns lyckade försök med att integrera Darcys lag i modellen för att beskriva flöde genom tät armering (Vasilic, 2016). Fördelen med CFD är den kortare beräkningstiden och möjlighet till beräkning av större volymer för t.ex. studie av industriella applikationer, en TT-kassett, se figur 17.3.



Figur 17.3: CFD-simulering av TT-kassett som gjuts med olika flytgränsspänning. Ljusblå färg motsvarar betong, mörkblå färg är luftfickor. Ena änden har fyllts med SKB av flytgränsspänning $\tau_0 = 25$ Pa, $\tau_0 = 12.5$ Pa, $\tau_0 = 5$ Pa och $\tau_0 = 1$ Pa från vänster till höger.

Vid gjutning av en TT-kassett toppfylls ena änden med självkompakterande betong av mycket låg flytgränsspänning (nära 800 mm i flytsättnått). I denna mycket hårt armerade del (byglar samt sex stycken spännkablar, se figur 17.4) behöver säkerställas att betongen fyller ut hela formen utan luftfickor eller separation. Simuleringen har genomförts med olika flytgränsspänningar, endast en mycket låg flytgränsspänning fungerar.



Figur 17.4: Den hårt armerade TT-kassetten vars ände toppfylls har simulerats med SKB.

17.4 Modeller

Vid NIST i USA har enskilda partiklar modellerats på detaljnivå i en fluid, av Flatt m.fl. (2004). Man har planerat att skala upp simuleringarna med hjälp av NASA:s superdator.

I Danmark har Lattice Boltzman (en fristående metod baserad på en molekylär beskrivning av fluiden med inbyggd möjlighet att kinetiskt beskriva kollision mellan partiklar) framgångsrikt använts för simulering av fiberriktning och -fördelning under gjutning (Svec, 2014).

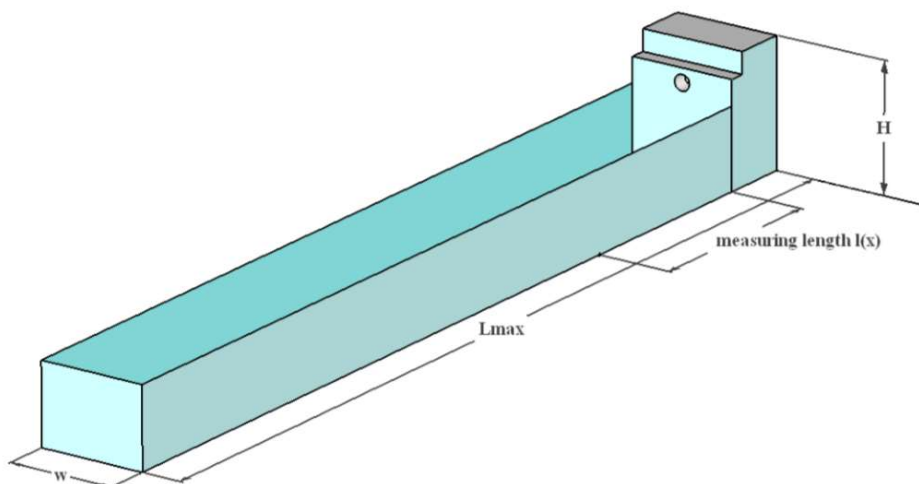
Fler hybridmodeller utvecklas och kan ge en mer representativ modell av olika fenomen i betongen.

Olika modelleringsmodeller (diskreta eller kontinuumbaserade alternativt en hybrid mellan dessa) är anpassade för att lösa olika typer av problem i olika skalor.

En kvantitativ övergripande analys av betongflödet i formen bör göras med den kontinuumbaserade ansatsen för att upptäcka zoner med sämre betongutfyllnad. En högupplöst detaljstudie kan sedan komplettera analysen på valda delar av och kring dessa zoner för att fånga partikelfenomen kvalitativt och fenomenologiskt med hjälp av en partikel- eller hybridmodell som tar mer datorkraft i anspråk.

17.5 Simulering av kanalströmning och reologi på arbetsplatsen

En stor del av det gemensamma arbetet i den internationella RILEM kommittén som har sitt ursprung från mötet på CBI 2006 har varit att kalibrera de olika simuleringmodellerna mot en analytisk lösning för flytgränsspänning τ_0 och ett resulterande flytsättnått (Roussel & Coussot, 2005, se kapitel 4, och utbredning i ett kanalflöde (Roussel, 2007). Mätning av utbredning i en kanal, eller förlängd L-låda (reologilåda eller R-låda, se figur 17.5) har fördelen att utbredningsfronten är väl definierad och att man enkelt kan bestämma t_{400} , tiden då fronten passerar 400 mm från luckan efter att den dragits upp och sex liter betong flödar ut.



Figur 17.5: R-lådan (reologilådan med bredden $w = 0,2$ m) mäter arbetbarhet för SKB.

Flytgränsspänningen är kopplad till betongens utbredning i kanalen enligt följande samband:

$$V = w \int_0^{h_{max}} x dh = \frac{w^3}{4A} \left(\ln(1+u) + \frac{u(u-2)}{2} \right) \quad (17.1)$$

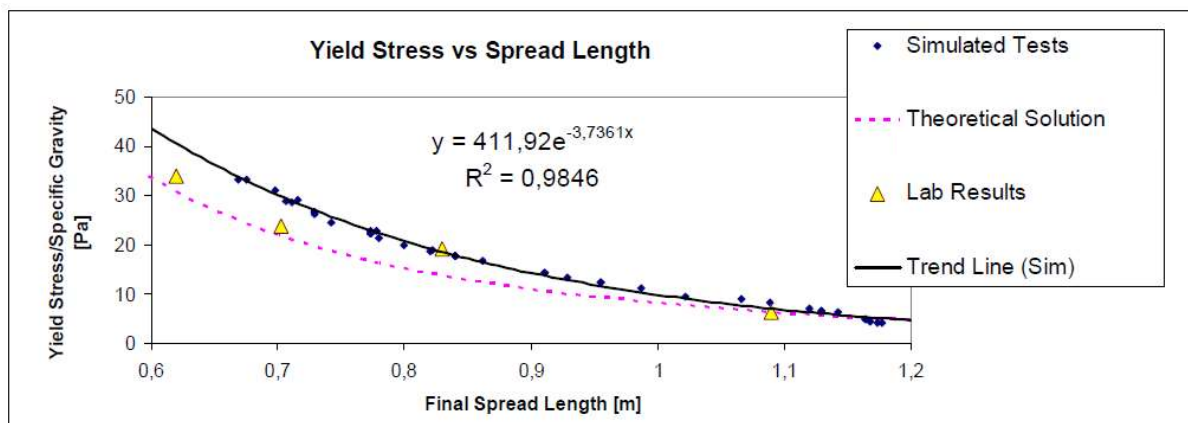
med $A = \frac{2\tau_0}{\rho g w}$ och $u = \frac{2h_{max}}{w}$

där V = betongvolymen (= konstant = 6 liter), w = R-lådans bredd, x = läget från luckan, H = R-lådans höjd i startläget, h_{max} är den maximala höjden av SKB i kanalen, t_0 = flytgränsspänningen, ρ = betongens densitet och g = jordaccelretationen. h_{max} kan uppmätas direkt vid bakre kanten, varifrån flödet kommer. Betongens maximala höjd vid inloppet/inflödet är kopplad till betongens slutliga utbredningen l (Roussel, 2007).

$$l = \frac{h_{max}}{A} + \frac{w}{2A} \ln \left(\frac{w}{w + 2h_{max}} \right) \quad (17.2)$$

För den teoretiska lösningen av flytgränsspänningen antas att betongens hastighet i höjd med lådans botten är $v = 0$ och att rörelsemängdsmomentet kan negligeras.

Då 6 liter betong fylls i lådan och sedan plötsligt släpps ut då luckan snabbt dras upp beter sig betongen som en dämpad våg och flyter ut. Längden på utflyt kopplas till flytgränsspänningen enligt ekv. 17.1 och 17.2, se figur 17.6.

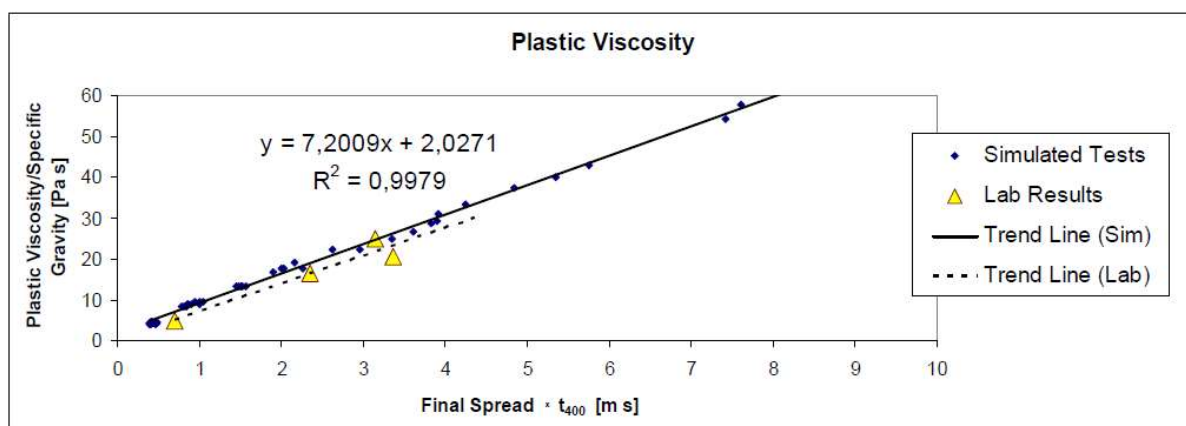


Figur 17.6: Laborieförsök, analytisk lösning (17.1) och (17.2) samt simulering av flytgränsspänning (Gram m.fl. 2014).

God överensstämmelse har erhållits mellan simulering av utflödet och flytgränsspänning τ_0 för simulering med CFD.

En jämförelse visas även med den analytiska lösningen och provning i laboriet.

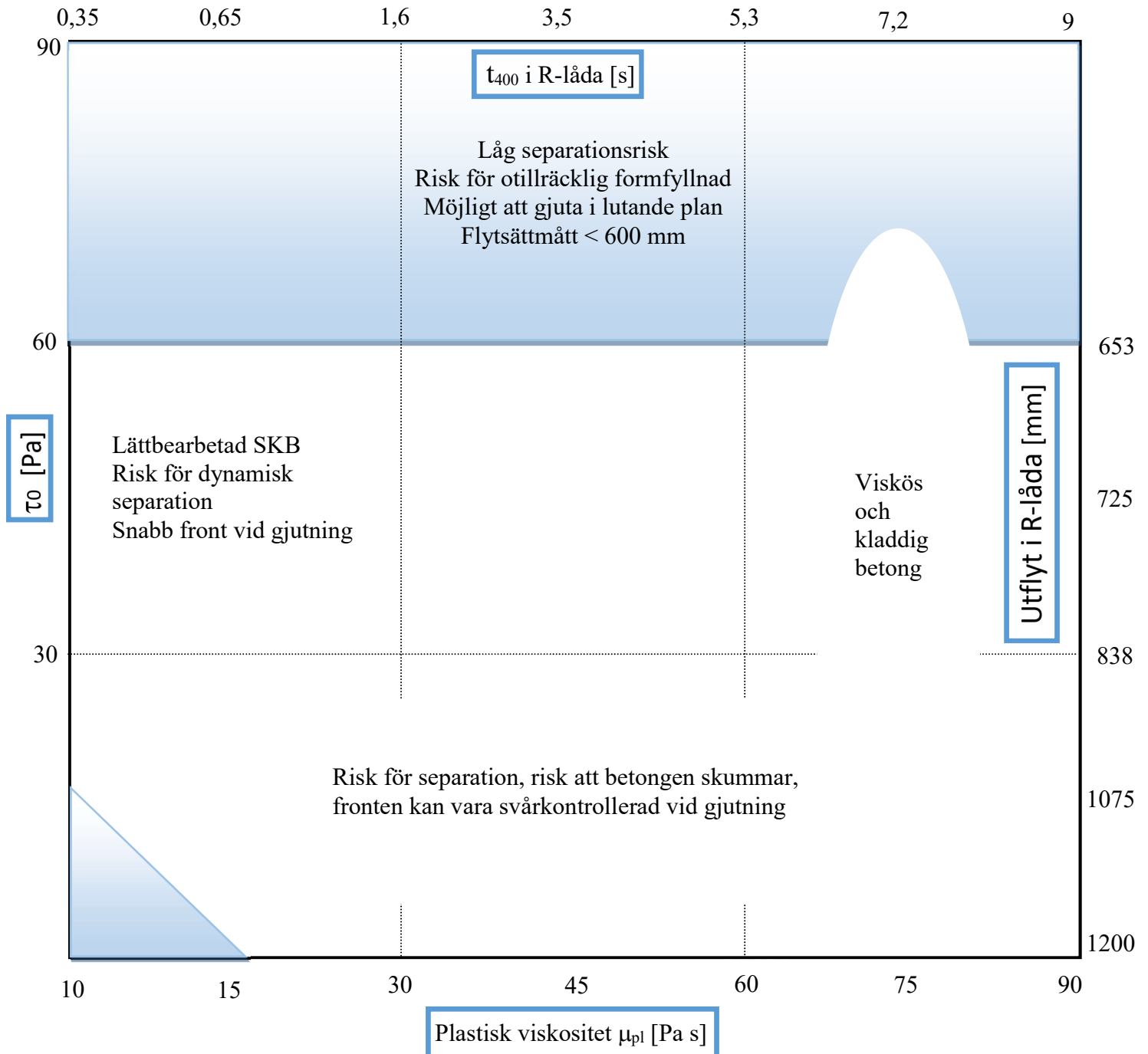
För den plastiska viskositeten gäller att den kopplas till både utflytet och t_{400} . En linjär relation mellan produkten av utflyt och t_{400} kan kopplas till plastisk viskositet μ_{pl} .



Figur 17.7: Laborieförsök, analytisk lösning (Gram m.fl. 2014) samt simulering av plastisk viskositet visar god överensstämmelse.

Även här är korrelation mellan laborieförsök och simulering mycket god. Ofta är det just viskositeten som kan göra att betongen upplevs som svår att arbeta med ute på byggarbetsplatsen. Detta trots att det är flytgränsspänningen (flytsättningsmått) som mäts och kravställs från fabrik. Parametrarna flytgränsspänning och plastisk viskositet kan bestämmas

på plats utan dyr utrustning som viskometer genom att testa betongen i R-lådan och läsa av värden (figur 17.6 - 17.8). I figur 17.8 visas en s.k. reograf med koppling till R-lådans utflyt och t_{400} . SKB:s densitet har betydelse för betongens flytegenskaper. Reografen gäller en självkompakterande betong med densiteten $\rho = 2250 \text{ kg/m}^3$. Ökar densiteten med 10 % så ökar såväl flytgränsspänning som plastisk viskositet också med c:a 10 %.



Figur 17.8: Reograf för SKB med R-låda, inspirerad av Guidelines (2006).

Färska egenskaper hos SKB varierar starkt med olika typer av cement, ballast och tillsatsmaterial. Arbetbarheten påverkas, liksom även kvaliteten av gjutningen. Ju mer svårkontrollerad gjutfronten är, desto viktigare är det att inte låta betongen flyta alltför lång väg,

eftersom detta kan ge upphov till separation. Grafen är tänkt att kunna ge en möjlighet att säkerställa god kvalitet av SKB på arbetsplatsen.

17.6 Referenser

Dufour F & Pijaudier-Cabot G. Numerical Modelling of Concrete Flow: Homogeneous Approach. *Int. J. Numer. Anal. Meth. in Geomech.*, 2005 (V. 29), s. 395-416.

Flatt R, Martys N & Bergström L. The Rheology of Cementitious Materials. *MRS Bulletin*, Materials Research Society, 2004 (V. 29), nr. 5, s. 314-318.

Gram A, Farhang A & Silfwerbrand J. Computer–Aided Modelling and Simulation of Self-Compacting Concrete Flow. *Proceedings, 5th International Rilem Symposium*, Gent, Belgien, 2007, s. 455-460.

Gram A, Silfwerbrand J & Lagerblad B. Obtaining Rheological Parameters from Flow Test – Analytical, Computational and Lab Test Approach. *Cement and Concrete Research*, 2014 (V. 63), s. 29-34.

Guidelines for Execution of SCC. DTI, Taastrup, Danmark: SCC Consortium (rapport), 2006.

McBride J & Mukai D J. Coarse Aggregate and Self-Consolidating Concrete Passing Ability. Farmington Hills, Michigan, USA: ACI SP No. 233 on Workability of SCC, 2006.

Noor M A & Uomoto T. Numerical Simulation of Fresh Concrete. *Seisan Kenkyu*, Tokyo, 1999 (V. 51), s. 169-172.

Peterson Ö. Simulation of Self-Compacting Concrete – Laboratory Experiments and Numerical Modelling of Testing Methods, J-Ring and L-Box Test. *Proceedings, 3rd International Rilem Symposium*, Reykjavik, 2003, s. 202-207.

Rousell N. The LCPC Box – A Cheap and Simple Technique for Yield Stress Measurements of SCC. *Mater. Struct.*, 2007 (V. 40), s. 889-896.

Roussel N & Coussot P. Fifty-Cent Rheometer for Yield Stress Measurements: From Slump to Spreading Flow. *Journal of Rheology*, 2005 (V. 49), s. 705-718.

Roussel N, Nguyen T L H, Yazoghli O & Coussot P. Passing Ability of Fresh Concrete: A Probabilistic Approach. *Cement and Concrete Research*, 2009 (V. 39), nr. 3, s. 227-232.

Roussel N. Three-Dimensional Numerical Simulations of Slump Tests. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 2004 (V. 12), s. 55-62.

Svec O. Flow Modelling of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete. Lyngby, Danmark: Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2014, Byg Rapport.

Thrane Nyholm L, Szabo P, Geiker M, Stang H & Pade C. Simulation and Verification of Flow in Test Methods. *Proceedings, 4th International Rilem Symposium*, Chicago, USA, 2005, s. 551-556.

Uebachs S & Brameshuber W. Numerical Simulation in the Flow Behaviour of Self-Compacting Concretes Using Fluid Mechanical Methods. *Proceedings, 4th International RILEM Symposium*, Chicago, USA, 2005, s. 597-604.

Vasilic K. A Numerical Model for Self-Compacting Concrete Flow through Reinforced Sections: A Porous Medium Analogy. Berlin: BAM Dissertationsreihe, 2016, Band 144.

Wallevik J E. Rheology of Particle Suspensions. Trondheim, Norge: NTNU, 2003. PhD Thesis.

18. Gjutveck

Om en gjutning med SKB inte sker kontinuerligt utan med viss tidsfördröjning mellan betonglassen kan ett lass som får ligga still i formen under väntan få alltför styv konsistens för att nästkommande lass skall kunna förmås att blanda sig med det befintliga. Om så sker skapas ett så kallat gjutveck i ytan, se figur 18.1. Gjutveck är en defekt som yttrar sig som en spricka i betongytan men det är ingen egentlig spricka utan en icke avsiktlig gjutfog.

Uppkomst av gjutveck beror på såväl betongegenskaper som gjutmetodik. Gjutveck behöver inte vara annat än ett estetiskt ytproblem, men kan i förekommande fall vara även av mekanisk natur. Men även om det inte är ett tekniskt problem så är det många gånger illa nog eftersom gjutveck påtagligt liknar grova sprickor som estetiskt kan vara katastrofala om en betongkonstruktion är tänkt att vara exponerad. Med vetskap om hur betongen beter sig i vila kan gjutveck undvikas och om logistiken vid gjutning av någon anledning blir rubbad kan man trots allt undvika dem.



Figur 18.1: Exempel på horisontellt gjutveck som visar gränsen mellan två SKB-lass.

18.1 Orsaker bakom gjutveck

18.1.1 Materialegenskaper

Ur ett materialperspektiv är orsaken bakom uppkomst av gjutveck betongens tixotropi och/eller strukturuppbyggnad. Dessa materialegenskaper diskuterades i kapitel 4, avsnitt 4.6 - 4.7 och för djupare insikt i dessa egenskaper hänvisas till dessa avsnitt.

SKB kan alltså styvna till i formen pga. tixotropi och detta sker oftast snabbare än normal tillstyvnad i form av konsistensförluster. Med andra ord handlar frågan om hur lång tid det tar mellan gjutpallarna.

Om möjligt skall förprov utföras för att säkerställa hur snabbt betongen styvnar till pga. tixotropi. Detta kan sedan ligga till grund för planering av gjutningen.

18.1.2 Gjutmetodik

SKB:s tixotropa egenskap påverkar inte bara formtrycket, vilket diskuterades i kapitel 12, utan även planering av gjutlogistiken. Det har redan nämnts att effekten av tixotropin är att betongen styvnar till med tiden vid vila, och desto snabbare ju mer tixotrop betongen är, se kapitel 4. Då detta är mycket positivt för formtryck men menligt för långsam gjutning och/eller gjutuppehåll är gjutning av vertikala konstruktioner litet av en balansgång vad gäller gjuthastigheten. För bästa kvalitet hos vertikala ytor rekommenderas ofta en kontinuerlig gjutning, men detta kan i vissa fall vara svårt att uppnå. Dessutom kan leverans av betongen störas av trafik eller liknande och oplanerade väntetider uppstå.

18.2 Konsekvenser av gjutveck

18.2.1 Estetik

Om man betraktar exemplen i figur 18.1 är konsekvenserna av gjutveck på estetiken uppenbar. Det finns därför alla skäl att planera gjutningar så att dessa skador inte uppstår.

18.2.2 Mekaniska egenskaper

Även om gjutveck oftast uppstår som relativt horisontella gjutfogar i vertikala strukturer, och att dessa tar upp främst vertikala laster, dvs. vinkelrätt mot fogen, kan det vara intressant att kvantifiera hur gjutvecket inverkar på vidhäftning mellan de två lassen.

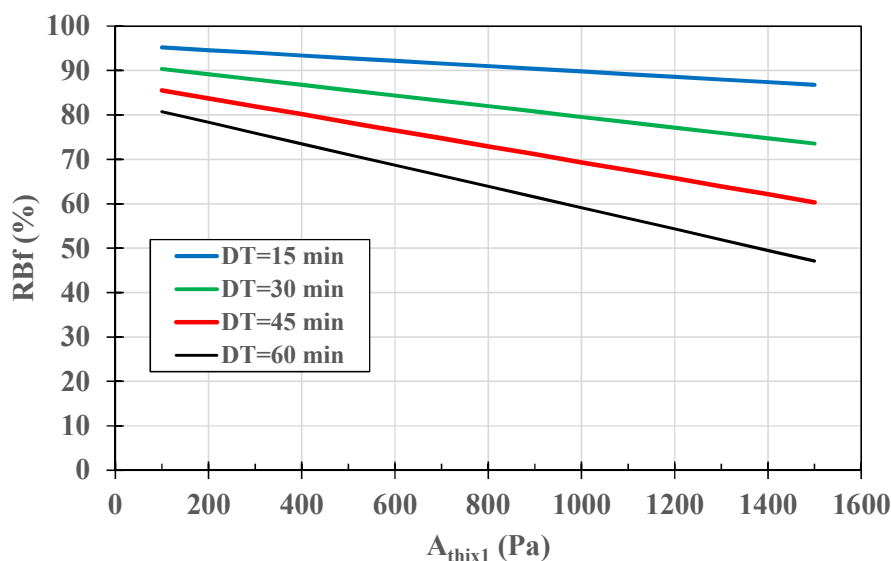
Khayat m.fl. (2012) genomförde försök där SKB med två olika lass göts i stående balkformar, avsedda för provning av böjdraghållfasthet. Nivån mellan de båda lassen, dvs. gjutfogen, tillsågs att hamna i balkens mittnitt. Genom att karakterisera betongens strukturuppbyggnad, variera tiden mellan lassen och senare mäta böjdraghållfastheten kunde samband mellan dessa parametrar skapas. Följande ekvation (ekv. 18.1) erhöles från försöken:

$$RBf(\%) = -0.0004 \cdot DT \cdot A_{Thix1} - 0.2816 \cdot DT + 100, \quad (18.1)$$

där:

$RBf(\%)$ är residualhållfasthetsfaktorn i form av böjdraghållfasthet, DT är tid mellan gjutpallar i minuter och A_{Thix1} = statisk flytgränsspänning i Pa efter 15 minuters vila mätt med en s.k. ”portable vane”. Mer information om den utrustningen finns i Omran och Khayat (2013).

I figur 18.2 har några exempel på resultat vid användning av ekv. 18.1 plottats. Dessa exempel motsvarar betonger vars statiska flytgränsspänning efter 15 minuter i vila går från 100 Pa till 1500 Pa samt med väntetider mellan lassen som varierar från 15 till 60 minuter i 15-minutersintervall. Resultaten visar att en betong som på 15 minuter uppnår en statisk flytgränsspänning på max 500 Pa och om väntetiden mellan lassen är max 30 minuter så blir konsekvensen att residualvärdet på böjdraghållfastheten reduceras till ca 85 %. En kvart senare är detta värde ca 78 % och efter en timme 71 %.



Figur 18.2: Visualisering av ekv. 18.1 för gjutuppehåll 15, 30, 45 och 60 minuter.

18.2.3 Beständighet

Med tanke på att gjutveckan, även om de inte är genomgående, lokalt reducerar täckande betongskiktet så öppnar de upp för att karbonatisering liksom eventuella kloridjoner snabbare kan nå armeringsjärn. De bör alltså på samma sätt som för andra defekter såsom exempelvis gjutskador eller sprickor lagas på gängse sätt så att fullgott täckande betongskikt (ur beständighetsaspekten) erhålls.

18.3 Undvikande av gjutveck

Baserat på diskussionerna i detta avsnitt om gjutveck bör man från olika perspektiv göra vad man kan för att undvika dem.

Först och främst bör planering av gjutningen ställas i relation till betongens tixotropi. Ju mer utpräglad denna egenskap är desto mindre tolerans för gjutuppehåll. Men, som sagt, ibland kan ofrivilliga gjutuppehåll uppstå och då bör gjutarlaget veta hur man får liv i betongen igen.

Det har visat sig i många fall att om betongen får styvna till alltför mycket så duger inte vanliga vibratorstavar för att bryta ner strukturen. Istället kan man med fördel använda sig av en bräda eller regel och gunga igång betongen i ytan. Med andra ord är större rörelser (amplitud) och lägre frekvens att föredra jämfört med dem som en vibratorstav erbjuder.

Det kan varmt rekommenderas att de gjutarlag som skall ägna sig åt att gjuta vertikala strukturer i förväg provar detta så att man lär sig det mest effektiva sättet att bryta ner strukturen och få betongen flytande igen. Detta kan vara skillnaden mellan en lyckad gjutning och en som rent estetiskt är mycket svår att åtgärda.

18.4 Referens

Khayat K H, Omran A & Magdi W A. Evaluation of Thixotropy of Self-Compacting Concrete and Influence on Concrete Performance. Proceedings, I Simposio Latino Americano Sobre Concreto Autoadesável, Maceió, Alagoas, Brasilien, 2012.

19. Gjutning mot form, formrivning och ytor

Formen och tidpunkten för formrivningen påverkar all betong inte minst betongens yta. Det gäller all betong men självkompakterande betong uppför sig inte nödvändigtvis som konventionellt vibrerad betong. Två frågor lyder:

- Exakt när bör formrivning ske?
- Kan man säga någonting om det?

En pulverhaltig SKB med låg flytgränsspänning fyller ut sin form väl och ger detaljrika ytor och fina gjutningar mot matris eller virke. Man skall vara mycket aktsam med formkvalitet samt till varje pris undvika smuts och missfärgningar, eftersom även små detaljer syns på betongytan efter avformning. Orenheter i formen kan lätt resultera i en porig yta. Bräderna skall vara vattnade, alternativt behandlade med formolja på det torra virket.

Formduk kan ge en mer porfri yta vid gjutning av SKB. Det gäller även för konventionell betong.

Gjutpallar bör undvikas i möjligaste mån, det finns annars risk för tillstyvnad p.g.a. tixotropi och bildning av gjutveck (oftast av estetisk karaktär) om det går mer än 15 minuter mellan pallarna. Om den nylevererade betongen rinner ovanpå den gamla pallan kan man ta en regel eller bräda och gunga den befintliga gjutytan lätt för att få ihop pallarna.

Tixotropi och betongens mixdesign hänger ihop. I figur 19.1 nedan ses exempel på en anläggningsbetong blandad med kalsktensfiller av typen Limus 25 (partikelstorlek: 0 – 0,1 mm), eftersom ingen tillgång fanns till Limus 40 (0 - 0,5 mm). Resultatet blev en pulverhaltig och robust betong med god kontroll och arbetbarhet, dock med tendens till gjutveck på ytan.



Figur 19.1: Gjutning med anläggningsbetong innehållande Limus 25. Notera tendensen till gjutveck. Foto: Kjell Wallin.

För mer lättflytande SKB med låg viskositet bör maximal vägglängd inte överstiga 10-12 m eftersom gjutfronten annars separerar och bär med sig skum eller cementpasta. En utbredning av ca 5 m åt vardera hållet gör det möjligt för eventuella luftblåsor att lämna betongen. Vid längre etapper har man möjlighet att fylla formen växelvis med slang från mitten och i vardera änden i omgångar för att undvika problem.

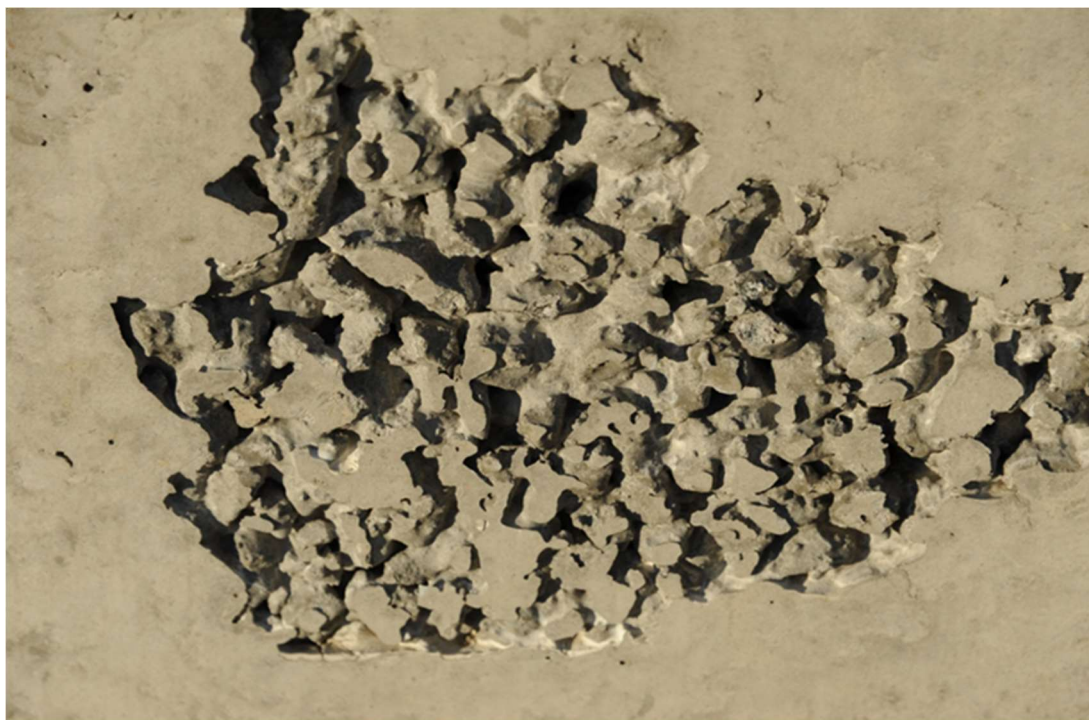
Vid gjutning av bjälklag skall SKB härddas och täckas omedelbart efter gjutning för att förhindra avdunstning. Maskinglättning är inte att rekommendera, eftersom ytan då lätt blir spröd och torr.

Vid gjutning med sluten form (t.ex. inklädnad, s.k. *lining*, i tunnel) används med fördel SKB för att fylla utrymmet genom ett antal ventiler. Ventilerna stängs vartefter gjutnivån stiger och nästa ventil ansluts. Denna gjutmetod förutsätter en kontinuerlig påfyllning med ca 2 m mellan ventilerna i höjddled där man kan fylla formen nedåt en meter och trycka betongen uppåt en meter mellan omtagen för att få en fullgod formfyllnad.

Förgrening av slangar skall undvikas till varje pris, eftersom betongen lätt stelnar till i systemet. Det slutna systemet behöver vara självtömmande för att fungera.

Nedsläppet av betongen får inte vara för högt (även detta är receptberoende) eftersom detta kan innebära att ballasten studsar upp och att det skapas hålrum mellan de grövre ballastpartiklarna, amerikanerna kallar det *"honeycomb"*, se figur 19.2. som synligt resultat då ballasten studsats, se figur 19.2.

Sammanfattningsvis kan speciellt påpekas att de faktorer som påverkar ytan för konventionell betong även gäller för självkompakterande betong, i ännu högre utsträckning.



Figur 19.2: *"Honeycombing"* p.g.a. nedsläpp från för hög höjd i form (studs av ballast).
Foto: Kjell Wallin.

20. Efterbehandling

Självkompakterande anläggningsbetong är rikare på finmaterial än normal anläggningsbetong och har ett lägre vattenpulvertal. Detta innebär att den också har en betydligt bättre sammanhållning och inte så lätt släpper vatten i samband med härdningsprocessen. Detta är positivt med avseende på eftersättningar i den färska betongen men kan orsaka problem med uttorkning i ytskiktet. Orsaken är att det vatten som avdunstar från betongytan svårare kan kompenseras underifrån. Vid gjutningar i varm, solig och blåsig väderlek kan detta innebära en ökad risk för plastiska krympsprickor och uttorkningssprickor. Detta gäller även självkompakterande husbetong. Exponerade ytor skall täckas in så snabbt som möjligt efter det att bearbetning av ytan (avjämning, slopning, glättning etc.) är klar. I likhet med vad som gäller för vibrerad betong så bör membranhärdare, täckmattor, folie eller liknande in täckningsmaterial ligga kvar under minst fyra dygn (gäller betong med lågt vct). Vid mycket varm, solig och blåsig väderlek bör också fukt tillföras genom vattning eller genom att täcka in ytan med fuktade isoleringsmattor.

En finfördelad vattendimma som åstadkommes genom att spruta överytan med vatten från ett högtäcksmunstycke (som riktas uppåt in över betongytan), har visat sig effektiv för att motarbeta plastiska krympsprickor i ett tidigt skede. Man bör dock vara aktsam på att inte tillföra så mycket vatten att hållfasthet nedsätts och separation erhålls.

Betongen är känsligare för omgivningens temperatur. Det rekommenderas därför att i förväg bestämma hydratationsstarten för aktuell SKB vid lägre utomhustemperaturer. Exempel finns på att tendenskurvan (temperatur) kan förskjutas från ca 3,5 timmar till hydratationsstart för Byggcement och konventionell betong till motsvarande 6 timmar för Byggcement och självkompakterande betong.

Appendix A – Praktikfall Stäket

A.1 Spännande utveckling av SKB för tunnelling i Stäket

Redan vid byggnationen 1999 av en järnvägstunnel i Stäket 30 km norr om Stockholm beslöt dåvarande Banverket (numera uppgånget i Trafikverket) att självkompakterande betong (SKB) skulle användas för inklädnung av berget, så kallad lining, då bergtäckningen i tunneln var låg (endast 4-6 m på vissa sträckor). Beslutet att använda SKB var ett steg mot att förbättra gjutresultatet vid liningarbeten. Problem som ofta uppstår vid liningsarbeten är att det kan vara svårt att komma åt att vibrera konventionell betong samt att säkerställa att alla hålrum mellan gjutform och berg fylls ut ordentligt.

Peab Anläggning och Swerock tog med hjälp av dåvarande Cement och Betong Institutet, CBI, (numera uppgånget i RISE) fram ett recept på självkompakterande anläggningsbetong. Betongreceptet var framtaget och endast utprovat i laboratoriet hos CBI. Alltså fanns det inte så mycket erfarenhet om hur betongen skulle uppträda vid fullskaleförsök på Swerocks betongfabrik i Järfälla. I augusti 1999 började de första blandningsförsöken av SKB på Järfällafabriken.

Inom Peab Anläggning fanns vid detta tillfälle inte så mycket erfarenhet om hur transport och pumpning påverkar betongens flytbenägenhet och dess stabilitet. Dessutom var det oklart hur gjutformen skulle påverkas av formtryck vid gjutning med SKB i förhållande till NB (traditionell eller normal betong).

Vid Peab Sverige AB Anläggning, region Stockholm, beslöts då att tillsammans med Luleå tekniska universitet (LTU) genomföra ett examensarbete med syfte att genom fullskaleförsök vid fabrik delta i arbetet med att ta fram en stabil SKB för användning vid tunnelling. För att kunna säkerställa en stabil betong har även transportens och pumpningens inverkan på betongens egenskaper undersökts vid dessa fullskaleförsök (Johansson & Simonsson, 2000).

Vid mätningarna av den färska betongens egenskaper användes L-låda och flytsättningsmått samt provtagning av lufthalt. En klassificering av pastarand, separationstendens, observerad seghet, t_{500} - seghet och skumningstendens noterades för att bedöma stabiliteten hos betongen.

A.2 Utmaningen 1999

Svåra gjutförhållanden: Vid gjutning under svåra förhållanden så som lining av en tunnel där det gäller att fylla utrymmet mellan berg och form väl, anses den konventionella betongen inte vara en säker metod. Det beror på att det kan vara svårt att komma åt att vibrera ordentligt överallt. Betongen skall även vid svåra gjutförhållanden både fylla ut formen och samtidigt omsluta armeringsjärnen väl.

Därför sågs användandet av SKB som en ny möjlighet och ett mycket bra alternativ vid gjutförhållanden beskrivna enligt ovan. SKB kan både fylla ut formen väl samtidigt som den är mycket lättarbetad i och med att ingen vibrering erfordras.

Formtryck: Vid gjutning med SKB var kunskapen begränsad om hur trycket påverkar formen. Vissa ansåg att det kunde bli mycket lägre tryck än vid användning av konventionell betong, medan andra menade att det är precis tvärt om. Den stora tvistefrågan då var ifall det skulle utvecklas fullt hydrostatiskt tryck i gjutformen eller inte. Går det att spara in på formkonstruktioner eller är förstärkning av formar ett måste?

Mottagningskontroll: Det saknades enkla och säkra rutiner till provningsmetoder för att säkerställa kvaliteten på de ankommande betongklasserna på arbetsplats. De befintliga provningsmetoderna (se bilaga C) ställer stora krav på de personer som utför mätningarna. De provtagningar som utförs på arbetsplatsen är mätning av flytsättningsmått, t_{500} , lufthalt samt L-låda.

L-lådan ”glöms” ofta bort eftersom det är en arbetsam mätning då den kräver mycket efterarbete. På arbetsplatsen är L-lådan dock relevant i samband med provning av nya recept och ballastmaterial, då ett mått på blockering fås. Flytsättnmättet tas så att en bedömning av betongens flytbenägenhet kan göras. Det mest intressanta flytsättnmättet är det som tas efter pumpning (vid gjutningar då pump används). Detta pga två olika orsaker, den första orsaken är att det är den konsistensen av betongen som hamnar i form som är relevant för aktuell gjutning, den andra orsaken är att pumpningen oftast minskar flytsättnmättet.

Att arbeta fram enkla rutiner för samtliga mottagningskontroller på arbetsplats är ett viktigt led för att utveckla och säkra kvaliteten på SKB.

Stabil betong: SKB har en viss benägenhet att tappa i flytbarhet under sin väg från fabrik till form. Det är därför grundläggande att kunna tillverka en betong som bibehåller sina egenskaper under tiden i färsk fas. De ingående parametrarnas inbördes förhållande är viktigt för stabilitet i SKB vid gjutning. Med andra ord är det angeläget att ha total kontroll på receptet för att kunna modifiera laboratoriereceptet till önskade egenskaper i fabriks- och arbetsplatsmiljö.

A.3 Krav på betongen

Kraven på betongen ställdes upp i samarbete mellan PEAB och Banverket. Kraven var att utprovningarna av SKB skulle dokumenteras och redovisas för Banverket kontinuerligt. Ingen gjutning av lining fick påbörjas utan att Banverket var övertygat om att kraven på betongen uppfylldes. Kraven var att lufthalten enligt då gällande BBK skulle uppfyllas, där en lägsta lufthalt på 4,0 % och ett riktvärde på lufthalten till 5,5 % för miljöklass B3, måttligt aggressiv miljö, ställdes. Därför sattes kraven att lufthalten bör ligga mellan 4 och 8 %. Krav på flytsättnmätt sattes till mellan 620 och 750 mm, där målet var ca 700 mm eller mer utan någon separation för att kunna uppnå önskade flytegenskaper i betongen. Kravet på flytsättnmättet valdes utifrån aktuellt gjutningsförhållande och aktuell konstruktion, vilken var mycket hårt armerad.

Banverket krävde att minst tre godkända gjutserier med minst fem lass i varje serie skulle vara genomförda under en provningsperiod. Om inte detta krav uppfylldes skulle inte Peab få gjuta med SKB vid liningen av tunneln vid Stäket. En arbetsmetod undersöktes för mottagningskontrollen på arbetsplatsen.

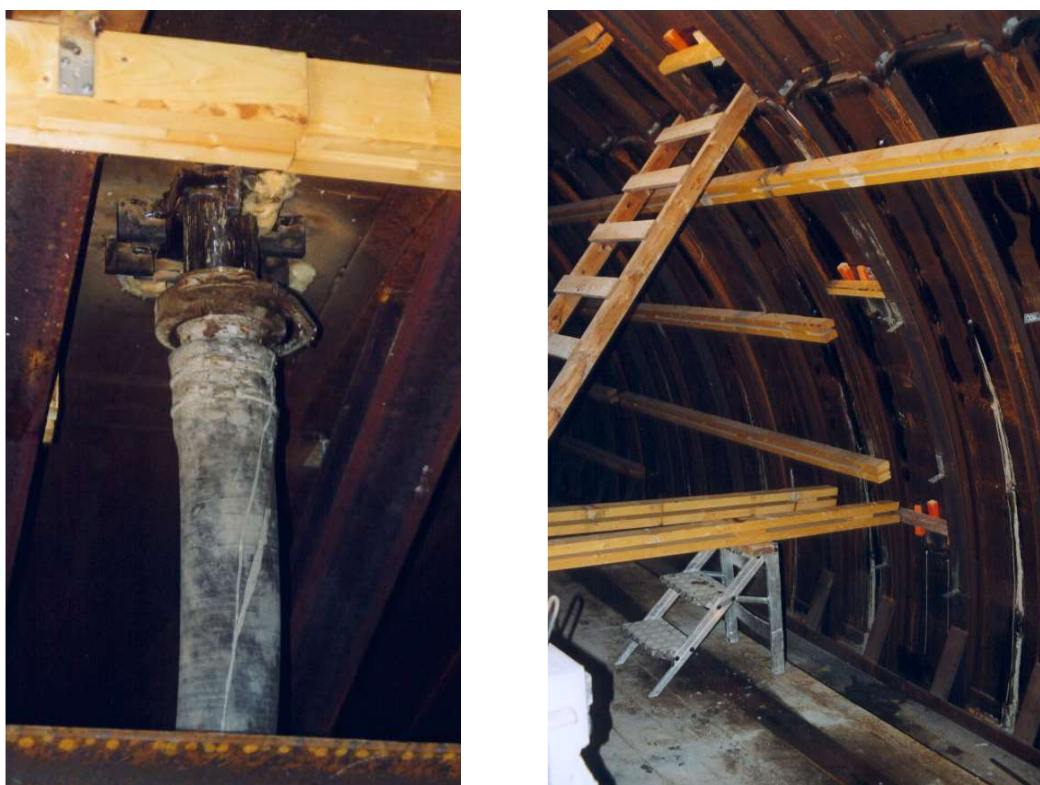
A.4 Lining av monolit 6 i Stäkettunneln

Gjutning av monolit 6 i Stäkettunneln (den 9 december 1999) var den första delen av totalt 150 m som skulle linas. Längden på formen vid gjutningen var 13 m. Gjuttjockleken mot berget varierade eftersom resultatet av sprängningsarbetena varierat, men den teoretiska tjockleken var beräknad till 0,55 m. Till gjutningen gick det åt ca 180 m³ betong. Formen som användes för gjutningen var en bågformad stålform vilken skulle ta upp krafter genom valvverkan. Formen användes för både betongtunneln utanför bergtunneln och liningen av tunneltaket i Stäket.

Transporttiden mellan Järfälla och Stäket var då (liksom nu) ca 15 minuter.

Gjutförfarandet beskrivs i Johansson & Simonsson (2000) som följer:

- Före gjutning kontrollerades att alla luckor gick att försegla ordentligt så att inget läckage skulle kunna förekomma.
- Fyllningen av formen skedde, med hjälp av pump, genom luckor vilka var placerade på var sida öst och väst, centriskt på formen på tre olika höjder, därefter skedde fyllningen genom nipplar placerade i taket på formen, se figur A.1Figur .



Figur A.1: Bilden till vänster visar hur SKB slutligen pumpas in i toppen av liningsformen efter det att betongen fyllts genom luckorna som den högra bilden visar. Fyllningen av formen gjordes växelvis mellan sidorna så att lasten på formen inte snedfördelades och så att inte formtrycket skulle bli för stort (Johansson & Simonsson, 2000).

De första luckorna var placerade ca 1 m upp på valvet. Först fylldes betong i lucka 1 på den östra sidan, ca två lass, därefter fylldes lucka 1 på den västra sidan med ca tre lass. Orsaken till att det fylls två lass betong per sida och inte fler, är att det inte får bli för stor skillnad på tryck på de olika sidorna, eftersom jämvikt vad det gäller tryck bör råda. När nivån på betongen kommit upp till de första luckorna stängdes dessa och tätades. Därefter fortsatte gjutningen genom lucka 2 på den östra sidan med fyllning av två lass för att sedan fylla två lass genom den västra luckan. Luckpar 2 satt ungefär 2,5 m upp på formen. När betongens nivå sedan kommit upp till luckpar 2 stängdes även dessa och tätades. Gjutningen fortsatte med luckpar 3, vilka var belägna på ungefär 4 m höjd, där först två lass fylldes på den östra sidan för att senare följas av två lass på den västra sidan osv till dess nivå på betongen stigit så högt att luckorna måste stängas och tätas. Härifrån skedde fyllningen sedan genom nippelar på den östra och västra sidan, dessa var placerade centriskt ca 5,5 meter upp på formen. Den sista betongen pumpades in i den översta ensamma nippeln som var placerad i mitten på formen. I bergets underkant fanns ett 4-tums rör vilket skulle användas till fyllning om betongen inte fylldes ända upp emot berget vid pumpningen av den sista betongen. Gjuthastigheten hölls till ca 22 m³/h vilket motsvaras av en stighöjd på ca 1 m/h. Betongen härdade i ca 96 timmar, därefter avformades valvet.

A.5 Slutsatser 1999 och i dag

Gjutningen i Stäket förlöpte felfritt med lyckat resultat synligt efter formrivning. Metoden användes sedan för hela tunnelns lining.

Vid intrimning av receptet kom man till slutsatsen att laboratorie- och fabriksmiljö inte alltid stämmer överens vad det gäller förutsättningarna för framställning av SKB. Med det ovannämnda i åtanke är det viktigt att lägga kraft på att ta fram ett stabilt recept som fungerar i produktionen. Styrande parametrar vid intrimning av ett recept är enligt studien av Johansson & Simonsson (2000) flyttillsatsmedel samt totalvattenhalt i betongen. Fukthalten i ballasten kan vara svår att bestämma under pågående produktion. Det är dock nödvändigt att kontinuerligt mäta fukthalten i ballastmaterialet under produktion och inte bara göra stickprovsmätningar, då en liten ändring av totalvattenhalt i betongen ger stora utslag på resultatet av betongens konsistens. Detta medför att man anser det bäst att styra betongens konsistens med flyttillsatsmedlet. Även mängden finmaterial i betongen inverkar på betongens flytförmåga. Det är viktigt att inte förändra alla ingående parametrar samtidigt vid intrimning av ett recept, utan man bör göra en noggrann plan över sina försök. Intrimning av varje betonglass bör i möjligaste mån ske på fabrik för att minimera väntetiderna mellan lassen på arbetsplats.

Det framkom att L-låda endast är nödvändig att använda när det gäller den stora intrimningen av ett SKB-recept, både vad gäller laboratorium och fabrik. När sedan receptet är intrimmat finns det mindre anledning att använda L-låda på fabrik eller arbetsplats. Dock kan vissa stickprov göras då konsistensen är tveksam. Flytsättningsmättet anses vara det styrande kvalitetsverktyget på arbetsplatsen eftersom det är betongens flytegenskaper som där är mest intressanta. Genom en okulär bedömning visar flytsättningsmättet även om betongen har några separationstendenser.

En klassificering av varje betonglass vid mätning av flytsättningsmått är önskvärd för att få en bra dokumentation av varje enskilt betonglass och med hjälp därav kunna dra slutsatser om varför betongen ser ut och uppträder som den gör. Denna klassificering är ett ytterligare instrument vid mottagningskontroll av SKB på arbetsplatsen.

Logistiken är viktig vid gjutning med SKB har det visat sig under gjutningarna. Det är inte bra med lång väntetid mellan betonglassen på grund av att betongens tixotropiska tillstyvnadsprocess startar. Detta påverkar troligen även risken för att betongen bildar gjutveck.

Erfarenheten visar att blandning av SKB inte bör ske efter det att annan typ av betong har blandats i samma blandare utan ursköljning. Detta gäller även betongbilarna.

Första lasset per betongbil blir ofta styvare med ett lågt flytsättningsmått som följd. Detta kan bero på att en del av pastan i betongen fastnar på betongbilens bulk och rotorblad. Är dessutom betongbilen inte ”vattnad” invändigt före användning ”suger” den även fukt.

Transportens påverkan på betongen är enligt Johansson & Simonsson (2005) att lufthalten ökar men flytsättningsmättet minskar. Man ser inte heller någon större skillnad vid en tidsmässigt lång transport utan får samma resultat oavsett transporttid, vilket kan indikera att betongen påverkas lika mycket av en tidsmässigt kort som lång transport.

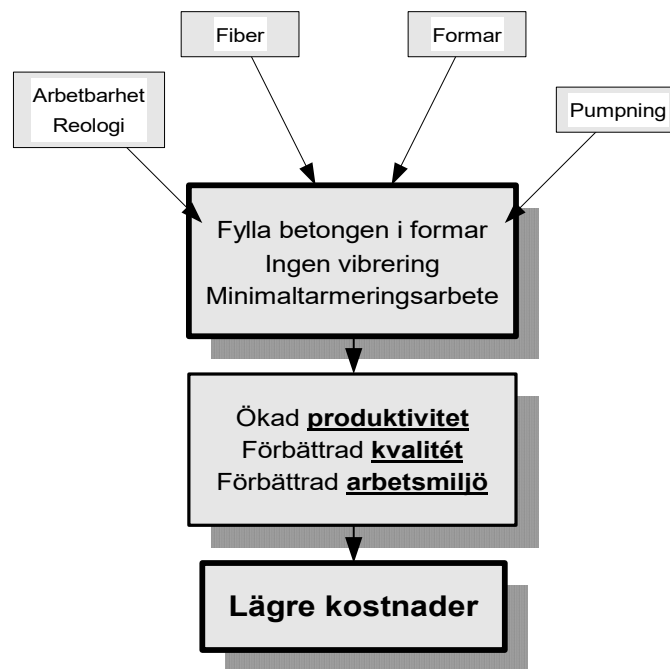
Pumpningens påverkan på betongen är enligt våra mätningar att både lufthalten och flytsättningsmättet minskar, vilket bör beaktas vid tillverkning och provning på fabrik.

Utvecklings- och forskningsresultat som har utförts i vårt land har gett möjlighet att tillverka en tillräckligt robust SKB för produktionsmässiga förhållanden. Kombinerar man SKB med stålfiberarmering kommer även armeringsarbetet att reduceras och därmed går produktionen mot ett mer industrialiserat betongbyggande. SKB:s fördelar inom husbyggnation har sammanställts av Grauers (1998) och många av dessa fördelar är aktuella även för anläggningsbetong:

- Ökad produktivitet (lägre enhetstider) då arbetsmomenten armering och vibrering kan elimineras.

- Ökad mekanisering, exempelvis ”direkttankning” genom pumpning av väggformar.
- Minskning av arbetsskador, speciellt kan så kallade ”vita fingrar” elimineras.
- Betongyrket kommer att bli mer attraktivt.
- Kortare byggtid.
- Högre kvalitet genom bättre resultat, speciellt vid besvärliga gjutningar (färre lagningar, bättre ytor).

Hela idén bakom SKB beskrivs bäst i figur där det framgår vilka olika parametrarna som ingår (figur A.4).



Figur A.4: Idén bakom SCC för att minska totalkostnaderna (tekniska och sociala kostnader).
(Fritt efter Grauers, 1998).

Sammanfattningsvis kan sägas att många av de erfarenheter och utmaningar som sågs 1999 gäller än i dag.

Farhågor om formtryck och otäta formar liksom gjutveck kan fortfarande utgöra moment som behöver kontrolleras.

Däremot var man i början även orolig för sättningar i form vid gjutning med SKB, vilket noggrant kontrollerades innan det avfärdades.

Öppethållandetiden för SKB ansågs då vara en hel timme längre än för den konventionella betongen (Nilsson, 1998), oberoende av om betongen rörde om eller ej. Tillstyvnadsprocessen kunde förskjutas och kontrolleras med hjälp av olika tillsatsmaterial.

Enligt (Johansson & Simonsson, 2000) ansågs det enkelt att:

”Vid gjutningar med långa transporttider eller när problem har uppstått vid gjutningen då betongen fått stå och styvna till mellan någon gjutpall, kan SCC återfå sina flytegenskaper genom en lätt vibrering. Därmed förlängs även öppethållandetiden.”

Man såg även fördelen med tilläggsdosering av flytmedel på plats om SKBn inte uppfyllde tillräckliga krav på flytsättnått.

Dåtidens recepturer innehåll högre mängd filler och flytmedel samtidigt, vilket kan ha bidragit till en robust produkt.

Grauers (1998) idéer om SKB och produktion står sig än i dag och det finns ännu stora vinster i en fortsatt utveckling och ökad användning av SKB.

A.6 Referenser

Grauers M. Vibreringsfri betong: Industrialiserad platsgjuten betong. Betong, nr 7, 1998, s. 12-15.

Johansson, Andreas och Simonsson, Peter (2000). Exjobb LTU

Nilsson M. Projekt vibreringsfri brobetong. Borlänge: Vägverket, 1998. Publikation nr 1998:71.

Appendix B – Praktikfall Kapellskär

B.1 Beskrivning av projektet och erfarenheter från det

Under 2015 göts en ny hamnplan till Kappellskärs hamn där man använde SKB i stödmurselementen för att säkerställa god kvalitet i kombination med mycket tät armering. Elementen tillverkades på i torrhet på land och därefter sänktes de ned i vattnet på 10 m djup. Väggsnivorna var endast 350 mm tjocka och delvis mycket tätt armerade i kontrefort- och frontmur. Den slanka konstruktionen i kombination med hög höjd (11 m, se figur B.1 och B.2) och tät armering ställde höga krav på den färsla betongens gjutegenskaper och arbetets utförande.

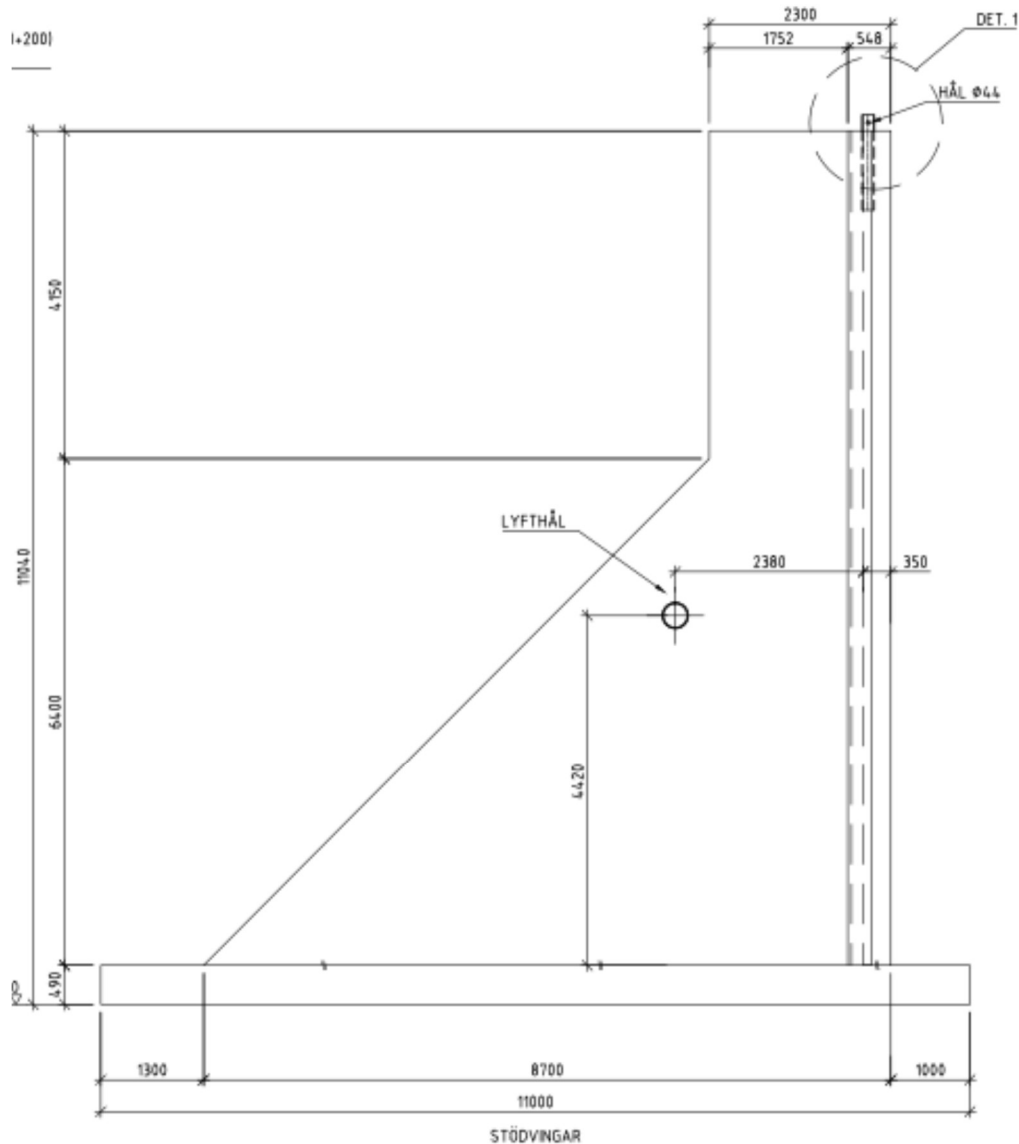


Figur B.1: L-stöd i form av vägg och kontrefort som gjuts på landbacken för att sedan sänkas ned. Foto: Kjell Wallin.

Betongen som levererades för de utmanande väggjutningarna var av två olika kvaliteter: C40/50 vct 0,45 i den nedre delen av elementet och C40/50 vct 0,40 i den övre delen, som hamnar i skvalpzonen. Då det fanns risk för temperatursprickor skulle cementhalten helst ligga under 430 kg/m^3 med ett d_{max} på 16 mm.

Swerock har som betongleverantör många års erfarenhet av SKB med helkross (Gladö) och rekommenderade gjutning med självkompakterande betong på grund av den tätt armerade konstruktionen, trots risken för höga formtryck.

Det är i allmänhet svårare att tillverka betong med endast krossballast, som har en annan kornform och partikelstorleksfördelning än naturballast (figur B.3 och B.4). Helkross kräver speciell proportioneringsteknik och receptanpassning för att uppnå SKB med relevant låga cementhalter och god arbetbarhet. Detta arbete skedde i nära samarbete med ballastleverantören (Swerock) och tillsatsmedelsleverantören (BASF).

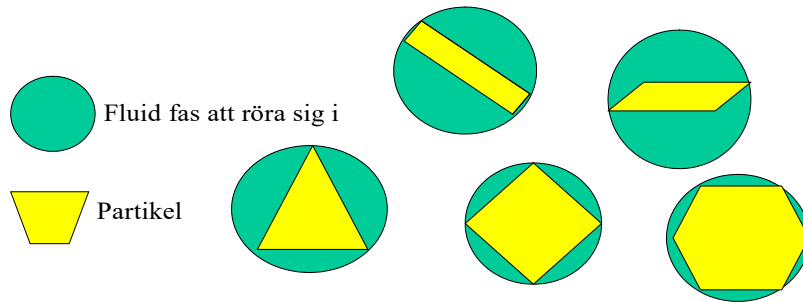


Figur B.2: Stödmurselement, vy. Utdrag från konstruktionsritning.

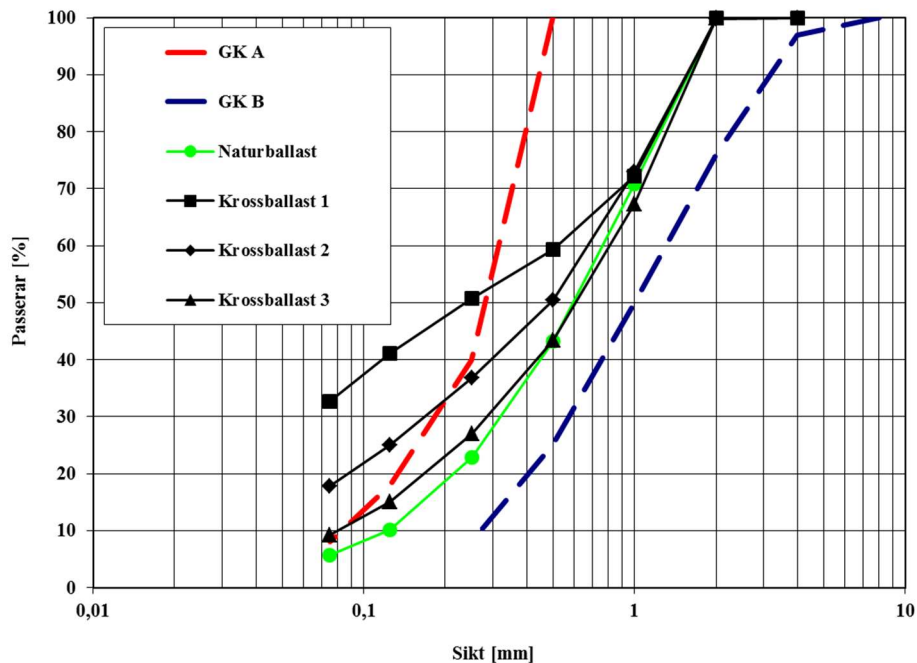
Swerock har sedan 2012 kontinuerligt utvecklat sitt sätt att proportionera krossballastbetong för att bättre kunna styra dess färska och hårdnade egenskaper. Särskilt fokus har legat på justering av stenhalt och stenens kornkurva. Anpassade tillsatsmedel balanserar ytterligare ballastproportioneringen.

Proportioneringstekniken som tagits fram skapar en SKB med väldigt god rörlighet vid relativt moderata flytsättnått. Vid ett riktvärde på flytsättnått kring 650 mm erhålls en betong som bygger upp en stabil partikelstruktur på kort tid, vilket har visat sig reducera formtrycket väsentligt. Samtidigt uppvisar konceptet mycket goda egenskaper med begränsad risk för gjutveck vid pallgjutning. Man nyttjar den färska betongens egenskaper optimalt och kan tillåta tämligen höga stighastigheter i form, utan att formtrycket blir för högt.

Vid tillverkning av SKB används ofta kalkfyller för att förändra arbetbarheten i den riktning man önskar. Betongleverantören använder Limus 40 som kompletterande fyller i syfte att öka betongens andel finmaterial och erfarenheterna visar att man kan tillverka väl fungerande SKB då mängden fyller och cement tillsammans överstiger ca 500 kg/m³.



Figur B.3: Inverkan av kornformen på erforderlig pastamängd i betong, detta har stort påverkan vid tillverkning av SKB (Lagerblad m.fl., 2008).



Figur B.4: Exempel på partikelstorleksfördelning av naturballast och tre olika typer av krossballast, fraktion 0-2 mm. GK A och B är gränskurvorna för lämplig betongballast enligt Johansson (1994).

Utveckling av ballasttillverkning och ballasthantering i samarbete och tät kommunikation med ballastleverantören är ett viktigt moment. Därigenom har det krossade materialet som är avsett för betongtillverkning endast små egenskapsvariationer, vilket möjliggör en produkt med jämn kvalitet.

B.2 Utförande

Gjutning av de höga stödmurselementen genomfördes höst- och vintertid 2014–15. Utmaningen låg i att gjuta höga trånga väggar med mycket armering och samtidigt balansera stighastighet mot formens egenskaper. Till dessa utmaningar tillkom önskemålet att kunna lyfta elementen relativt kort tid efter gjutning även vintertid och samtidigt hålla nere cementhalten för att minimera risken för uppkomst av temperatursprickor.

För att gjuta SKB utan att behöva ta hänsyn till formtryck bör formen vara utformad för fullt hydrostatiskt vätsketryck från betongen. För en vägg som är 11 m hög skulle formen behöva dimensioneras för cirka 260 kN/m^2 , vilket är både tekniskt svårt och ekonomiskt ogynnsamt. I praktiken använder man vanligtvis ett formsystem som klarar mindre formtryck än fullt hydrostatiskt tryck och begränsar stighastigheten för att utnyttja betongens tixotropi och tillstyvnad. I föreliggande fall var det lämpligt att mäta formtrycket via krafterna i formstagen för att verifiera antaganden och höja säkerheten mot formkollaps.

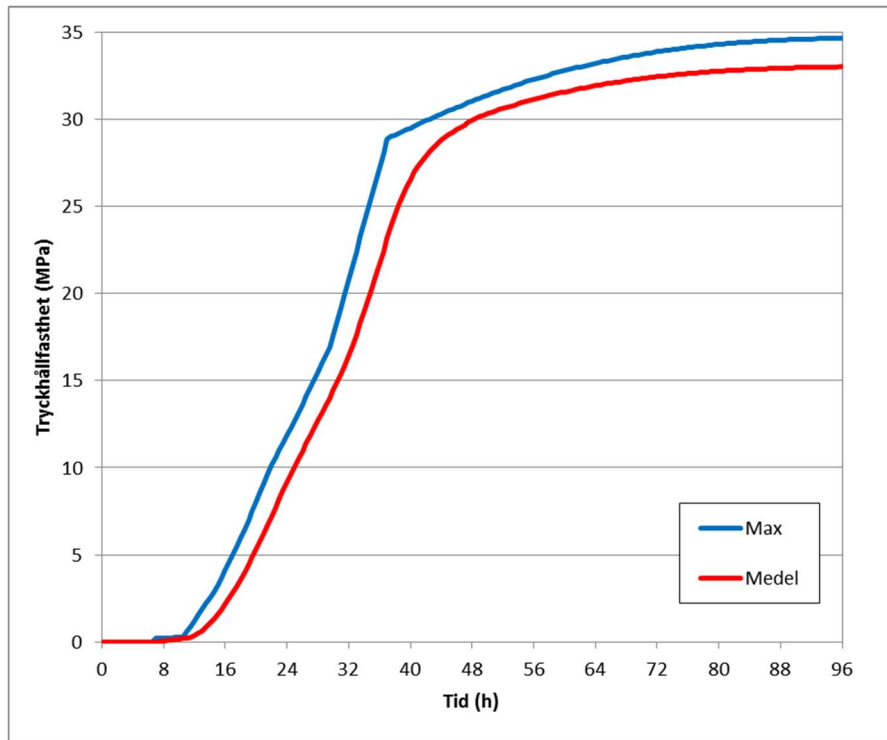
Formsystemet för gjutning av stödmursegmenten var dimensionerat för 50 kN/m^2 och man valde initialt att begränsa betongens stighastighet till 1 m/h. Beräknad gjuttid med hänsyn till stighöjder och formtryck blev därmed ca 12 timmar. Mätning av formtryck via stagkraft genomfördes och verifierade att formtrycket blev lägre än förväntat. Betongtillverkarens sätt att proportionera betongen resulterade i en SKB som gav låga formtryck. Genom tillsats av accelerator till betongen kunde formtrycket reduceras ytterligare. Detta medförde att stighastigheten kunde ökas till 2 m/h, gjuttiden kortades alltså till 6-7 timmar. Mätningarna visade att formstagen utnyttjades till ca 50 % med denna stighastighet.

För att kunna lyfta stödmursegmenten krävs det en tryckhållfasthet av 30 MPa i betongen. Ett krav från produktionen var att uppnå denna hållfasthet även ner till -10°C i omgivningstemperatur. Att åstadkomma snabb hållfasthetstillväxt genom täckning och tillförsel av värme är mycket kostsamt och praktiskt svårt att genomföra med aktuell geometri. Samtidigt skulle en sådan hantering skapa risker för temperatursprickor. En kvalificerad gissning var att SKB med hög sluthållfasthet i kombination med snabb tidig hållfasthetstillväxt skulle lösa problemet utan tillförsel av värme. Forskningsarbete och erfarenhet från tidigare projekt har visat att hållfasthetsutvecklingen är avsevärt mycket snabbare i aktuell typ av SKB, jämfört med traditionell betong. Orsaken till detta är sammansättningen med höga halter av kalkfiller och hög dosering av flytmedel. Kalkfiller påskyndar den tidiga cementhydratationen och bidrar därmed till tidig hållfasthetsutveckling. Ökad dispergering av cementet genom flytmedel ger en högre värmeutveckling och snabbare hållfasthetstillväxt.

Provkuber göts och provades både i 20°C och vid lägre temperatur för att verifiera hållfasthetstillväxten och för att skapa ett beräkningsunderlag. Beräkningar baserade på aktuell betongs provade tryckhållfasthet (tabell B.1) visar att inga värmningsåtgärder behöver vidtas för att uppnå 30 MPa även vid kalla väderförhållanden. När hydratationen i de tunna väggarna avstannar (koldgrader i konstruktionen) efter cirka 3 dygn har erforderlig styrka redan uppnåtts (figur B.5).

Tabell B.1: Provningsresultat för tryckhållfasthetsutveckling vid 7°C .

Real tid (h)	Ekvivalent tid t_{20} (h)	Uppmätt f_{cc} (MPa)
24	4,4	4,8
48	12,7	18,3
72	21,5	28,5
144	52,5	38,4



Figur B.4: Beräknad tryckhållfasthet i stödmursegmenten vid lufttemperatur -10°C .

Det sista stödmomentet göts den 11 mars 2015 och det kan konstateras att resultatet avseende konceptet med SKB vida överträffade alla förväntningar gällande både kvalitet och kostnadsmässiga aspekter.

B.3 Referenser

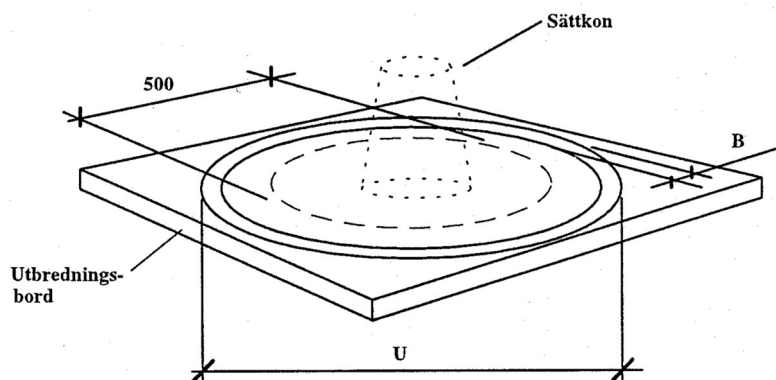
Johansson L: Ballast. Ur: Betonghandboken Material, utgåva 2. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994, s. 69-94.

Lagerblad B, Westerholm M, Fjällberg L & Gram H-E. Bergkrossmaterial som ballast i betong. Stockholm: CBI Betonginstitutet, 2008. CBI rapport nr 1:2008, 121 s.

Appendix C – Vanliga provningsmetoder

C.1 Flytsättmått

Flytsättmått (*FSM*) var när det började användas för SKB år 1999 ännu ingen svensk standard, men har blivit en vedertagen metod att mäta konsistensen på SKB hos flertalet betongleverantörer och hos övriga aktörer inom branschen. Man kan se flytsättmåttet som en variant av det traditionella sättmättet, se figur C.1.



Figur C.1: Princip för mätning av flytsättmått. (Billberg m.fl., 1999)

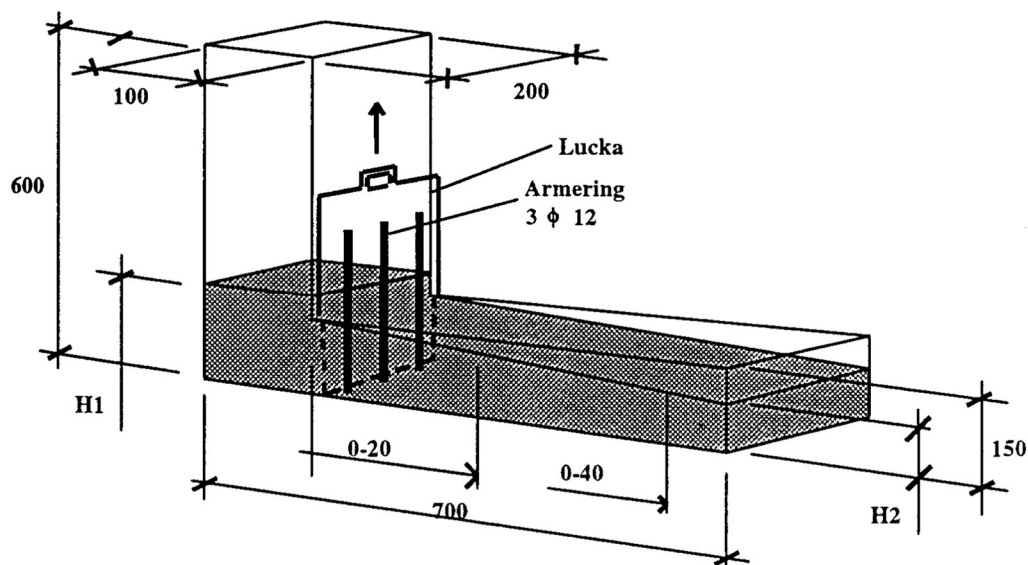
Flytsättmått mäts genom att man använder sig av en traditionell sättkon. Konen skall fuktas och placeras på ett plant underlag som också skall vara fuktat. Ett lämpligt underlag är en plywoodskiva med en minsta storlek på 750×750 mm. På skivan skall det vara uttritad två cirklar, en mindre med samma storlek som sättkonens nederända för att underlätta att sättkonen placeras centriskt i den större cirkeln. Den större av cirklarna skall ha en diameter på 500 mm och används till att mäta den tid (t) det tar för betongen att nå cirkeln och benämns t_{500} . Konen fylls med betong och överytan slätas till utan att någon bearbetning sker. Därefter skall konen lyftas försiktigt rakt uppåt utan att någon vridande eller lutande rörelse uppstår. Det är en stor fördel vid upprepade försök om det är samma person som lyfter konen. Annars kan det uppstå variationer i mätvärdena pga den mänskliga faktorn. Betongen kommer att flyta ut på plywoodskivan och den slutliga diametern som betongen uppnår mäts och benämns U i figur C.1, vilket är det mått som benämns flytsättmått (*FSM*). *FSM* för SKB ligger normalt kring 600-750 mm (för att betongen skall få kallas vibreringsfri) och variationerna beror på betongens sammansättning och applikation. När konen lyfts startas ett tidtagningsur för att mäta tiden det tar innan betongen passerar 500 mm cirkeln, t_{500} . Med det måttet kan man utläsa hur snabbt betongen rör sig i en form, samt segheten i betongen. Enligt Billberg m.fl. (1999) bör tiden på t_{500} inte vara längre än 6-7 sekunder.

Med den ovan beskrivna provningsmetoden kan även betongens stabilitet bedömas och en eventuell separation upptäckas. Detta görs genom en visuell bedömning av bredden B ("pastaranden" på den utflutna betongen), se figur C.1. Även mängden sten som följt med ända ut i randen studeras. Är randen stenfattig kan det misstänkas att det råder separation, eftersom kravet på en vibreringsfri betong är att stenen följer med hela vägen ut till kanten och att stenen är jämt fördelad i betongen (Hansson & Karlsson, 1999).

Idag finns en svensk standard för flytsättmåttet (SS-EN 12350-8:2019).

C.2 L-lådan

L-lådan har fått sitt namn av att den ser ut som bokstaven L (figur C2). L-lådan är framtagen på dåvarande CBI och provningsmetodens avsikt är att på ett lätt och enkelt sätt kunna utvärdera den färska vibreringsfria betongens olika egenskaper (Hansson & Karlsson, 1999). Det finns liknande mätmetoder runt om i världen. I Japan används ett så kallat *U-type test* för liknade försök. Fördelen med L-lådan är att den kan användas i laboratorier, på fabrik och på arbetsplats. Detta ger möjligheter att följa upp betongens egenskaper med samma mätmetod oavsett plats. Det enda som krävs för att få ett relevant resultat är att L-lådan placeras vågrätt.



Figur C2: L-lådan och de parametrar som kan mätas (Billberg m.fl, 1999).

Provningsförfarandet finns beskrivet i Billberg m.fl. (1999). Principen är att man fyller den vertikala delen av lådan med betong. Då skall luckan vara stängd. Ca 12 liter betong krävs för att fylla den vertikala delen av L-lådan. Efter att betongen har vilat 1 min i den vertikala delen av lådan dras luckan upp och betongen rinner ut i den horisontella delen av lådan. På sin färd från vertikalt till horisontellt läge måste betongen passera ett hinder bestående av vertikala armeringsstänger på ett visst avstånd från varandra. I Sverige används vanligen 34 mm avstånd mellan stängerna. Armeringen går dock att anpassa för att efterlikna verkligheten i möjligaste mån. Detta görs genom att variera öppningen mellan stängerna och armeringsort (diametern på järnen och om det används järn med kammar eller ej).

Ett antal parametrar mäts för att kunna göra en mer komplett bedömning av betongens flytförmåga. För att kunna kontrollera att betongen är stabil och inte separationsbenägen får den som tidigare nämnts vila i 1 min i den vertikala delen av lådan innan luckan öppnas. Skulle betongen vara separerad skulle detta märkas genom att stenen samlas i botten av den vertikala delen av lådan vilket syns tydligt när luckan dras upp. När väl luckan öppnats kan tiden mätas för betongfronten att ta sig 200 mm (T20) samt 400 mm (T40) från öppningen. När betongen har stannat mäts höjden vid den vertikala delen (H1) och höjden i den borte ändan av den horisontella delen (H2), se figur C.2. Genom att ta kvoten (H2/ H1) kan ett blockeringskriterium beräknas. Kvoten bör vara större eller lika med 0,80 för vibreringsfri betong enligt Billberg & Petersson (1999). Även en visuell bedömning görs av eventuell blockering mellan armeringsjärnen samt granskning sker för att se om det finns några stenar i betongytan, vilket är ett tecken på att betongen är stabil.

Idag finns en svensk standard för L-lådan (SS-EN 12350-10:2010).

C.3 Referenser

Billberg P, Petersson Ö, Norberg J, Sundbom S & Ysberg G. Vibreringsfri betong för brogjutning enligt Bro 94. Stockholm: Cement och Betong Institutet, 1999. Öppen uppdragsrapport nr 99002.

Hansson H & Karlsson M. Två vägbroar i höghållfast respektive vibreringsfri betong – från betong-sammansättning till beständighetsegenskaper. Göteborg: Chalmers, institutionen för byggmaterial, 1999. Examensarbete nr E-99:1.

Billberg P & Petersson Ö. Kursmaterial. Kurs i vibreringsfri betong – sammansättning, tillverkning och provning. Stockholm: Cement och Betong Institutet, september 1999.

SS EN 12350-8:2019 Provning av färsk betong – Del 8: Självkompakterande betong – Flytsättningsmått. Utgåva 2. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2019, 20 s.

SS EN 12350-10:2010 Provning av färsk betong – Del 10: Självkompakterande betong – L låda. Stockholm: Swedish Standards Institute, 2010, 20 s.