

# Sammanfattning

## Inledning

Denna doktorsavhandling handlar om studier av självkompakterande betongs (SKB) tixotropa och strukturella beteende i vila och hur detta beteende påverkar formtrycket. Arbetet har genomförts på Cement och Betong Institutet (CBI) och inom ämnet Betongbyggnad på Kungliga Tekniska Högskolan mellan augusti 2002 och september 2006. Projektet är en direkt följd av ett tidigare samarbetsprojekt mellan Vägverket och CBI, ”Självkompakterande betong – användningsteknik” (se artikel 3) och har finansierats av Vägverket, NCC, SBUF samt konsortiet för finansiering av grundforskning inom betongområdet.

## Bakgrund

Självkompakterande betong (SKB) började utvecklas av Tokyo University i mitten av 1980-talet och forskning inom denna teknik initierades i Sverige av CBI i början av 90-talet. Denna forskning ledde senare fram till två parallella projekt; (1) ett samarbetsprojekt mellan CBI och Vägverket i syfte att ta fram självkompakterande brobetong enligt Bro 94 och (2) det första Brite EURam projektet om SKB (koordinerat av Marianne Grauers, NCC). Det förstnämnda projektet ledde fram till att tre fullskaliga plattambroar göts med SKB under vintern/våren 1998.

Innan dessa broar gjutits bedömde man generellt, och på goda grunder, att denna extremt flytande betong skulle generera ett hydrostatiskt tryck mot form. Men vid formtrycksmätningar utförda vid gjutning av den första bron i januari 1998 visade sig trycket vara betydligt lägre än hydrostatiskt (endast 14 % av detta) och dessutom lägre än det beräknade för konventionell betong, Ikäheimonen (1998). Den enda relevanta slutsatsen var att den använda betongen hade tixotropa egenskaper, dvs. att den bygger upp en struktur i vila. Med andra ord behåller SKB sina flytegenskaper om den hålls i rörelse men när den stannat upp i formen bygger den upp en tredimensionell struktur, stark nog att motstå trycket från ovanliggande betong utan att i samma grad öka det horisontella trycket mot form.

Som en direkt följd av dessa upptäckter initierades det tidigare nämnda projektet

”Självkompakterande

betong – användningsteknik” som syftade till att studera just formtrycket vid gjutningar med SKB. Bland annat resulterade en rad av fullskalegjutningar i att ett starkt samband mellan gjuthastighet och formtryck erhöles. Under detta projekt identifierades behovet att fördjupa studierna av mekanismerna bakom denna tixotropa strukturuppbyggnad och därför initierades detta doktorandprojekt.

## Litteraturstudie

En omfattande litteraturstudie har genomförts och den har fokuserat på en rad olika områden. Inledningsvis ges en historisk bakgrund till detta vetenskapsfält och vidare grundläggande karakteristika för tixotropa material, kolloidal- och ytkemi som förklarar de interpartikulära krafter som påverkar partiklar i suspension, mätmetoder för studier av tixotropi samt metoder för att styra tixotropin. Dessutom redogörs för studier av cementbundna materials tixotropi, från pasta till konventionell betong och till SKB, för specifika studier av SKB och formtryck samt slutligen för rapporterade försök att skapa modeller för att beräkna formtrycket vid gjutning med SKB. Litteraturstudien visar bland annat att cementbundna material är tixotropa

viii

till sin natur och att strukturuppbyggnaden i vila är signifikant men sker med lägre hastighet

än strukturnedbrytningen vid störning.

### **Hypoteser**

Fyra hypoteser som bland annat ligger till grund för val av metodik ställs upp:

- De grundläggande mekanismerna bakom cementbundna materials strikt tixotropa egenskaper återfinns i de kolloidala interaktionerna mellan partiklar i betongens vätskefas, pasta- eller mikrobruksfasen, och i detta sammanhang bedöms de större ballastpartiklarna helt inerta.
- Den totala strukturuppbyggnaden hos SKB i vila är en funktion av ett reversibelt, strikt tixotropt, beteende och en irreversibel förändring över tid, dvs. en konsistensförlust.
- Strukturen representeras av den färskas betongens elastiska egenskaper och den maximala spänningen som strukturen kan motstå innan den bryts karakteriserar dess storlek.
- SKB är ett material som bygger upp en struktur i vila och denna egenskap påverkar formtrycket.

### **Mikrobruksfasens tixotropi och strukturuppbyggnad i vila**

Metodiken för studier av mikrobruksfasens strukturuppbyggnad utnyttjar den använda reometerns (Physica MCR300) möjlighet att styra spänningen och registrera responsen i form av deformation. Mätsekvensen inleds med mätning av konventionell rotationsstyrd reologi varefter reometern styrs om till att med tio minuters mellanrum i vila öka spänningen tills strukturen bryts. Detta kontrolleras genom kriteriet att skjuvhastigheten (deformationsresponsen) inte får överstiga 0,2 s<sup>-1</sup>. Efter en sammanlagd vila på ca 40 minuter slås återigen instrumentet om till att mäta konventionell reologi (efter att mikrobruket blandats i tre minuter för att bryta ned den reversibla strukturen). Således kan den irreversibla strukturen separeras från den totala och den reversibla erhållas. Denna utgör arean mellan dessa tidsmässiga strukturutvecklingar (totala respektive irreversibla).

Resultaten är rapporterade i artikel 1 och slutsatserna som redovisas stöder hypotesen att samtliga åtgärder som påverkar kraftspelet mellan partiklarna resulterar i förändringar i tixotrop respons. Bland dessa åtgärder som ökar tixotropin nämns: minskad flytmedelsdos, flytmedel med elektrostatisk dispergeringsmekanism jämfört med sterisk dito, ökad partikelkoncentration och finhet hos fillermaterial, tillsats av luftporbildare samt tillsats av viskositetsmedel och lermineral.

### **Betongens tixotropi och strukturuppbyggnad i vila**

Denna etapp inom projektet inleddes med omfattande försök att skapa bro-SKB med samtidigt väsentligt öppethållande och stabil lufthalt. En rad olika parametrar befanns påverka öppethållandet, en del mer logiska medan kunskap saknas för att förklara andra. Slutligen kunde dock målet uppfyllas genom lämpligt val av flytmedel, luftporbildare, finballast och blandningsordning och etappen genomföras.

Metodiken är uppbyggd på samma sätt som för mikrobruket men styrningen av betongviskometern (ConTec 4) fick provas fram då den inte förmår styra spänningen utan endast deformationen (rotation av yttercylindern). Den yttre cylindern befanns kunna styras

till mycket små rotationshastigheter (motsvarande ett varv på över 22 minuter) som manuellt kunde initieras vid olika tidpunkter under viloperioden. Därmed kunde metodiken baseras på spännings-töjningsmätningar och således kunde den karakteristiska elastiska egenskapen kvantifieras.

En intressant upptäckt gjordes då en speciell studie utfördes med avsikten att studera hur dessa spännings-töjningsmätningar eventuellt stör strukturuppbyggnaden. Tre SKB blandningar fick vila ostört olika länge innan strukturen mättes och denna utveckling jämfördes med den använda metodiken (med upprepade mätningar/störningar). Hypotesen som säger att strukturen störs och därmed underskattas om mätningarna utförs på en och samma blandning visade sig vara helt fel. Istället befanns strukturuppbyggnaden öka med detta förfarande. Slutsatsen är att SKB beter sig töjnings-hårdnande i det att vilan sker under inverkan av en skjuvspänning. Detta resonemang stöds av andra forskare men kunskapen bakom detta beteende saknas i dagsläget. En diskussion leder trots allt fram till att även SKB i form utsätts för skjuvspänning under vilan och med andra ord är metodiken (med upprepade mätningar/störningar) relevant. Men mer forskning behövs kring detta mycket intrikata beteende.

Metodik och resultat är rapporterade i artikel 2 och 4 och slutsatserna är att SKB bygger upp struktur i vila och att denna består av en reversibel och en irreversibel komponent samt att metodiken förmår skilja dessa åt. SKB beter sig töjnings-hårdnande då vilan sker under inverkan av en skjuvspänning. Strukturuppbyggnaden är i princip helt linjär med tiden och detta ger möjlighet att förutse strukturuppbyggnaden över tid genom mätningar under endast en kort tid av vila. Även här visas att partikelkoncentration, partikelfinhet, flytmedelsdos och -typ påverkar strukturuppbyggnaden.

### **Simultan mätning av strukturuppbyggnad och formtryck**

Ett rostfritt rör har tillverkats och försetts med fem tryckceller på olika höjd över botten. Övertrycket (luft) i röret kan regleras för att simulera högre gjuthöjder och för att simulera olika gjuhastigheter. Det visas att tryckcellerna är tillförlitliga och likaså metodiken i stort. En begränsning som beror av övertryckets inverkan på rördiametern samt betongens långt gångna tillstyvnad diskuteras. Men den praktiska begränsningen för metodiken avfärdas. Likaså diskuteras inverkan av övertrycket på resonemang kring passivt eller aktivt tryck och leder till att övertrycket inte tycks inverka på formtrycksreduktionen utan detta beror på betongens strukturella förändring under vilan.

Metodiken och resultat från denna etapp är rapporterade i artikel 5. Slutsatserna är att den irreversibla strukturuppbyggnaden (nämnd i förra stycket) kan påverka den totala dito signifikant. Därmed framgår även hur alla de parametrar som påverkar konsistensförlusten i sin tur inverkar på strukturuppbyggnaden och således också formtrycksutvecklingen. Vidare påverkas strukturuppbyggnad och formtryck av små variationer i mängden flytmedel i betongen, eller kanske hellre uttryckt som utgångskonsistens efter blandning. Detta sätter fingret på hur känsligt systemet SKB-formtryck är för variationer. Slutligen kan det konstateras att det tycks finnas ett gränsvärde för strukturuppbyggnaden som måste överskridas för att formtrycket skall reduceras signifikant med tiden i vila.

### **Rekommendationer**

Kartläggningen av materialegenskaperna för SKB har inletts i detta projekt och verktyg för kartläggningen är framtagna. Men ytterligare forskning behövs för studier av fler delmaterial och kemiska tillsatsmedel. Därför bör man i den närmsta framtiden inta en konservativ hållning inför frågan om dimensionering av formar där SKB skall användas. Detta innebär att om kunskap finns om hur en SKB beter sig skall denna naturligtvis användas för att optimera formen. Men om ett nytt koncept (ny gjutteknik, recept eller temperatur etc.) skall användas bör antingen hydrostatiskt tryck förutsättas eller så bör detta koncept provas med den metodik

som tagits fram i detta projekt. Ett ytterligare alternativ är att förse formarna med sensorer och därmed följa tryckutvecklingen i realtid.

Hus-SKB med vct 0,58 som ingått i detta projekt visar på låg grad av strukturuppbyggnad och liten sänkning av formtryck inom relevant tid. Vid normala våningshöga gjutningar ter det sig därför mer ekonomiskt att konstruera formarna för hydrostatiskt tryck och medge en hög gjuthastighet. Vissa bro-SKB visar en mycket gynnsam formtryckssänkning på kort tid, men detta på bekostnad av öppethållandet. Vid gjutning med bro-SKB som har långt öppethållande bör försiktighet iakttagas eller specifik kunskap inhämtas.

Det är viktigt att komma ihåg att detta projekt genomförts i sin helhet i laboratoriemiljö. Studierna har koncentrerats på materialparametrar för självkompakterande betonger, med för svenska betongbranschen relevanta recept, och mindre på formsystem och miljöparametrar. Således är det många parametrar som i praktiken påverkar formtrycket som ligger utanför detta projekts omfattning. Metodiken och kunskapen från detta projekt måste således inkorporeras i en större och mer övergripande modell för beräkning av formtrycket vid gjutning med SKB.

Till sist kan det inte tryckas hårt nog på att i den situation som idag råder, dvs. situationen med de kraftiga variationerna i färskas egenskaperna hos SKB beroende på stor känslighet, kan inte en säker bedömning göras av hur formtrycket kommer att utvecklas vid gjutning med SKB med flera olika levererade lass. För SKB som koncept i stort är forskning kring variationsstabil SKB ett måste.

### **Fortsatt forskning**

Förslagen till framtida fortsatt forskning delas här upp i laboratoriestudier och fältstudier. Laboratoriestudier bör fortsättas med metodiken framtagen i detta projekt och fokusera på följande parametrar/delmaterial: temperatur, olika cementtyper, andra puzzolanska delmaterial, tixotropistyrande medel inkluderande interdisciplinära studier på molekylnivå samt viskositetsmedel. Dessa förslag syftar till att förfinas kartläggningen av SKBs tixotropa egenskaper. Fördjupad forskning kring den töjnings-hårdnande egenskapen bör genomföras liksom jämförande studier av olika metoder för karakterisering av cementbundna materials tixotropi. Forskning som syftar till att skapa en mer variationsstabil SKB har inletts på CBI. Fältstudierna föreslås omfatta de parametrar som laboratoriestudier svårligen kan hantera. Bland dessa föreslås avseende formen att studera inverkan av geometrin, olika ytor (ytmaterial), formens permeabilitet, släppmedel och formens styvhet. Även armeringens inverkan bör studeras. Det har i vissa fall rapporterats att strukturen som byggs upp i SKB i vila kan vara svag nog att signifikant störas av exempelvis vibrerande maskiner eller fordon på arbetsplatsen och detta bör kartläggas.