

Sammanfattande beskrivning av SBUF-projektet nr 11544 med titeln:

Egenskaper för självkompakterande betong avsedd för anläggningskonstruktioner

Bakgrund

Fördelarna med SKB (SjälvKompakterande Betong) vad gäller miljöpåverkan (mindre buller och bättre arbetsmiljö) och möjligheter att på ett bra sätt utföra komplicerade gjutningar (t ex under-upp-gjutningar typ tunnelling respektive hårt armerade konstruktioner eller komplicerad geometri) är idag väl kända. Entreprenörerna har mycket att vinna (tid, kvalitet, ekonomi, miljö) på att använda SKB, men tyvärr har det i praktiken visat sig att en SKB allt för ofta uppvisar oacceptabelt stora egenskapsvariationer, framförallt i färskt tillstånd. Den största svårigheten med SKB är att lyckas producera robust SKB utan stora egenskapsvariationer till en rimlig kostnad. Materialkostnaden för SKB är generellt högre än för normalvibrerad betong beroende på dess höga innehåll av fillermaterial och tillsatsmedel. I tillägg till det är SKB ofta associerad med omfattande kvalitetskontroller under produktionen. Många entreprenörer ser därför inte de direkta fördelarna med att välja SKB som ett alternativ. För att nå högre acceptans bland entreprenörer måste SKB vara ett kostnadseffektivt alternativ till konventionell betong.

Idag bedrivs forskning på bred front gällande de olika delmaterialens egenskaper och sammansättning, samt utveckling av testmetoder för att på ett säkert, enkelt och inte alltför kostsamt sätt kunna säkerställa SKB-blandningarnas kvalitet vid produktion. Utvecklingen av SKB ämnad för husbyggnad har under de senaste åren gått framåt i Sverige, då efterfrågan av den produkten har varit relativt stor. Inom anläggningssektorn är dock möjligheterna idag relativt begränsade när det gäller att komponera robusta och ekonomiskt lönsamma SKB-blandningar.

Då SKB är mer känsligt för yttre störningar samt i större utsträckning mer beroende av delmaterialens egenskaper än normalvibrerad betong, bör en tillförlitlig optimeringsmetodik baseras på de valda delmaterialens unika egenskaper. För att uppnå högre kostnadseffektivitet skall proportioneringen med fördel ske med hänsyn tagen till aktuellt tillämpningsområde. Inom ramen för detta projekt har en **alternativ optimeringsmetodik**, som möjliggör säkrare optimering till en lägre kostnad, utvecklats med inriktning mot SKB lämpat för anläggningsbyggande.

SKB innehåller relativt höga halter av fillermaterial, där kalkstensfiller är vanligt förekommande i Sverige, men användandet av flygaska är däremot inte så utbrett. Flygaska är de restprodukter/askor som följer med de varma rökgaserna ur förbränningskammaren, exempelvis vid förbränning i kolkraftverk. Flygaskan är relativt basisk med pH-värden runt 12, och den har puzzolana egenskaper. Ca en tredjedel av cementhalten kan ersättas av flygaska enligt gällande regler. Flygaskans egenskaper varierar dock beroende på typ av bränsle, förbränningsmetod och anläggningens utformning.

Med ökade cementpriser och pressade priser inom byggsektorn så börjar flygaskan vara ett intressant material att använda i Sverige. Erfarenheterna är dock begränsade, men med ökade

forskningsinsatser kan användandet komma att öka. Inom ramen för projektet har flygaskans potential inom anläggningssektorn studerats, och då som tillsatsmaterial i självkompakterande betong. Dess inverkan på betongens egenskaper i ung ålder har studerats med beräkningar utifrån försöksresultat. Med ökade deponikostnader för flygaska samt ökade kostnader för cement finns det mycket att vinna på att använda flygaska vid betongtillverkning, och erfarenheter från andra länder, t. ex. Danmark, visar att det finns en stor potential i att använda flygaska som fillermaterial i SKB.

Syfte och mål

Huvudsyftet med projektet är att etablera en experimentell, enkel och billig proportioneringsmetodik för självkompakterande betong. Metodiken syftar till att göra det möjligt att på bästa sätt bestämma sammansättningen av en betong med hänsyn både till tillgängligt material och det tänkta tillämpningsområdet, s k utförandebaserad optimering. Metodiken kan också uttryckas med begreppet Lean SKB-proportionering, där lean står för att man gör precis det som behövs med hänsyn till aktuella förutsättningar inom de tillgängliga ekonomiska ramarna. Metodiken bygger på finbruksprovningar med partiklar mindre än 0.25mm kombinerat med en praktisk metod att välja lämplig ballastgradering.

Det andra syftet med projektet är att studera effekterna av flygaska som tillsatsmaterial i SKB ämnat för anläggningsbyggande. En viktig faktor vid anläggningsbyggande är att under härdningsförloppet begränsa risken för sprickor, vilka kan skapa problem längre fram under konstruktionens livslängd. Effekten av flygaska på betongens unga egenskaper har studerats vad gäller inverkan på värme- och hållfasthetsutveckling samt risken för tidiga temperatursprickor för betong med varierande halt av flygaska. Målet är att öka förståelsen kring flygaska som tillsatsmaterial i SKB, samt analysera dess potential för framtida användning i anläggningskonstruktioner.

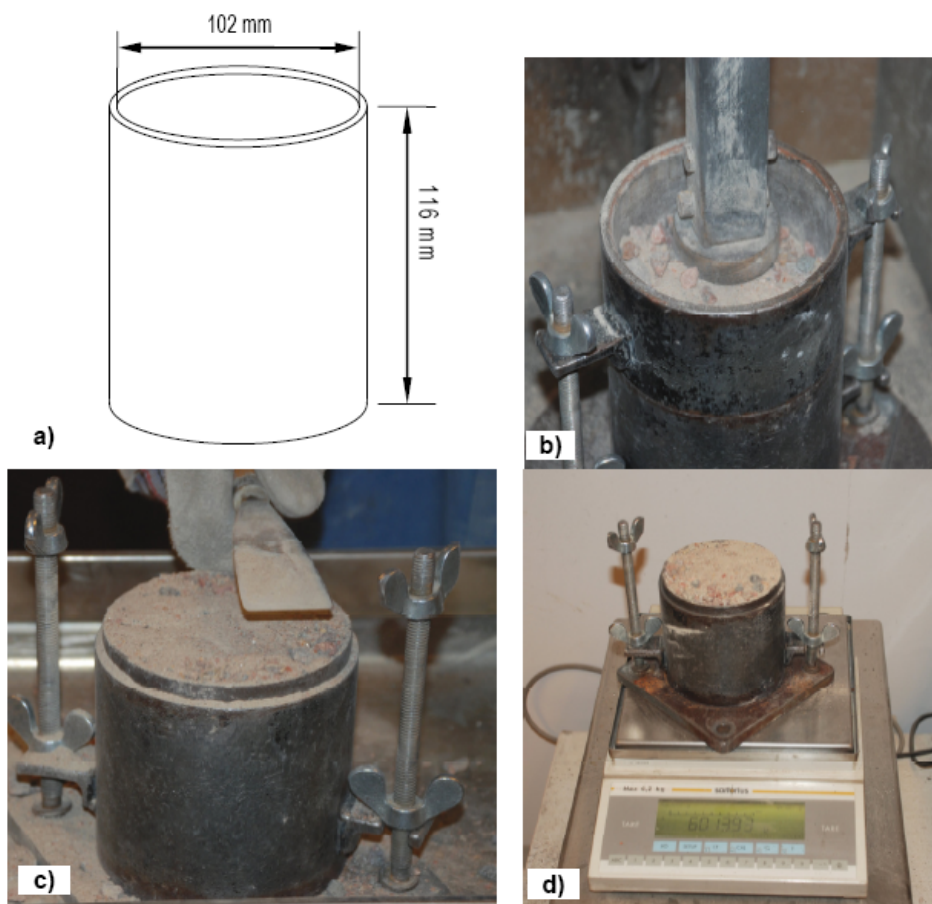
Genomförande

Optimeringsmetodiken bygger på att studera/optimera betongen i de två separata faserna finbruk och ballast. I ballastfasen bestäms lämplig ballastgradering, och i finbruksprovningarna väljs lämplig sammansättning av tillgängligt material med avseende på flytförmåga, robusthet och stabilitet. Valda testmetoder är billiga och enkla att genomföra, vilket medför att metodiken kan användas utan tillgång till dyr och avancerad utrustning.

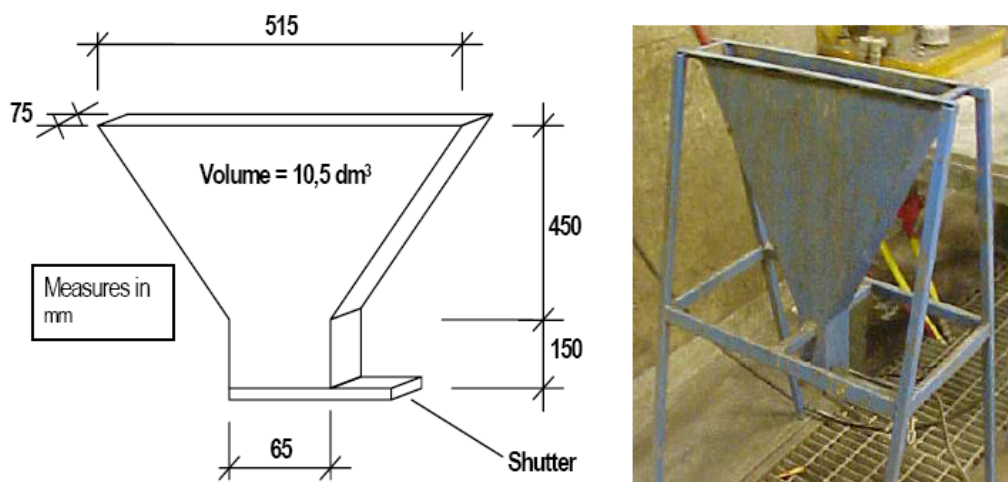
Ballasten packas i ett kärl för att bestämma packningsgraden för olika sammansättningar, och detta kompletteras med hur snabbt olika ballastkombinationer rinner ur en V-formad tratt, se figur 1 och 2. För varje sammansättning beräknas den s k finhetsmodulen, som är ytan ovanför graderingskurvan för kornstorlekar större än 0.125mm. Finhetsmodulen anses vara ett mått på ballastens medelkornstorlek.

Finbruket är en blandning av vatten, flytmedel, cement, tillsatsmaterial och den del av sanden som har kornstorlek mindre än 0.25mm. Mätningar görs av utbredningsmättet vid användning av en minisättkon samt hur snabbt bruket rinner ur en s k Marsh-tratt, se figur 3.

Slutligen kontrolleras om finbruket separerar eller inte med hjälp av ett ”skraptest”, se figur 4. Samtliga mätningar för finbruket är enkla att genomföra med okomplicerade utrustningar.



Figur 1 Mätmetod för att bestämma packningsgraden. a) storlek på testkärlet, b) reglerad packning av ballasten, c) avjämning av ytan, d) vägning av provet



Figur 2 V-tratt för bestämning av tömningstider för olika ballastkombinationer. Det är samma tratt som används för studier av tömningstider för SKB.

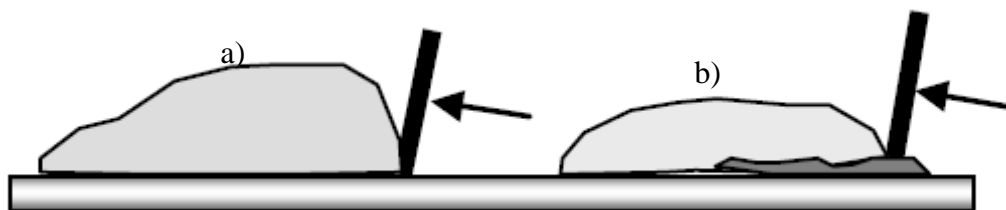


a) Minisättkon

b) Finbrukets utbredning

c) Marsh-tratt

Figur 3 Finbrukstester för allt material upp till kornstorleken 0.25mm. a) minisättkonen; b) finbrukets utbredning på fuktad glasskiva, c) tömning av finbruket genom Marsh-tratt med 10mm öppningsdiameter i munstycket.



Figur 4 Skraptest för att avgöra om finbruket separerat eller inte. a) homogent (ej separat) finbruk om skrapan enkelt kan hållas nere mot glasskivan och bruket enkelt kan skrapas bort, b) separerat finbruk, då partiklar fastnar på glasskivan och bruket är "omöjligt" att skrapa bort.

För att koppla ihop en ballastkombination med finbrukets sammansättning definieras en parameter som beskriver relationen mellan den finaste delen av sanden (kornstorlek upp till 0.25mm) och totala pulvermängden. Denna relation benämns λ_{25} och är en nyckelparameter i optimeringsmetodiken. Med hjälp av λ_{25} och aktuell ballastfördelning kan man räkna ut en betongsammansättning. Dessutom kan man genomföra relevanta finbruksprovningar utan hänsyn till absoluta mängder av delkomponenterna i betongen.

För att studera värme- och hållfasthetsutveckling för varierande flygaskehalter har en försöksserie med 0, 6, 11, 25 respektive 40% för kvoten mellan flygaska och cement studerats för två olika ekvivalenta vattencementtal. Detta resulterar i en undersökning med totalt 18 olika betonger. För att kunna studera inverkan på värme- och hållfasthetsutveckling för olika kombinationer av flygaskehalter och vattenhalter etableras en tendensmodell utifrån erhållna försöksvärden.

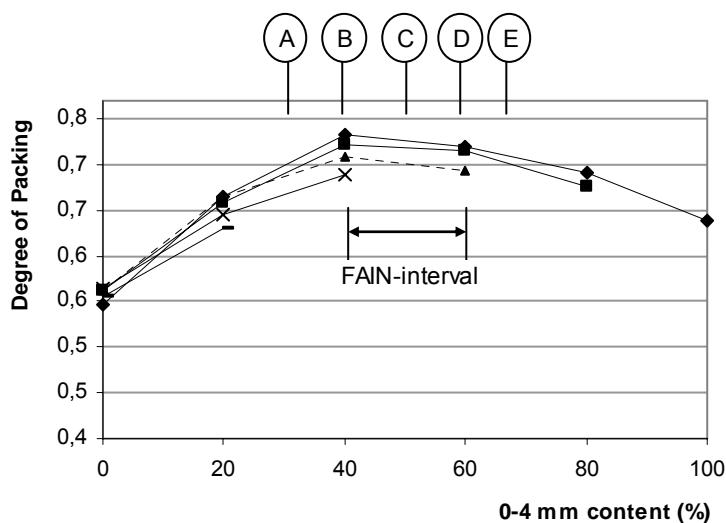
Slutligen har optimeringsmetodiken tillämpats att bestämma sammansättningen för tre betongrecept avsedda för anläggningskonstruktioner. Dessa betonger har därefter studerats med avseende på framtagning av egenskaper för att kunna prediktera sprickrisker under härdningsfasen. Mätningar har därvid genomförts för både värmetekniska och mekaniska egenskaper. Den sammanfattande mätningen avser spänningsutveckling för en temperaturvåg som simulerar situationen i en 0.7m tjock vägg som sitter helt fast.

Resultat

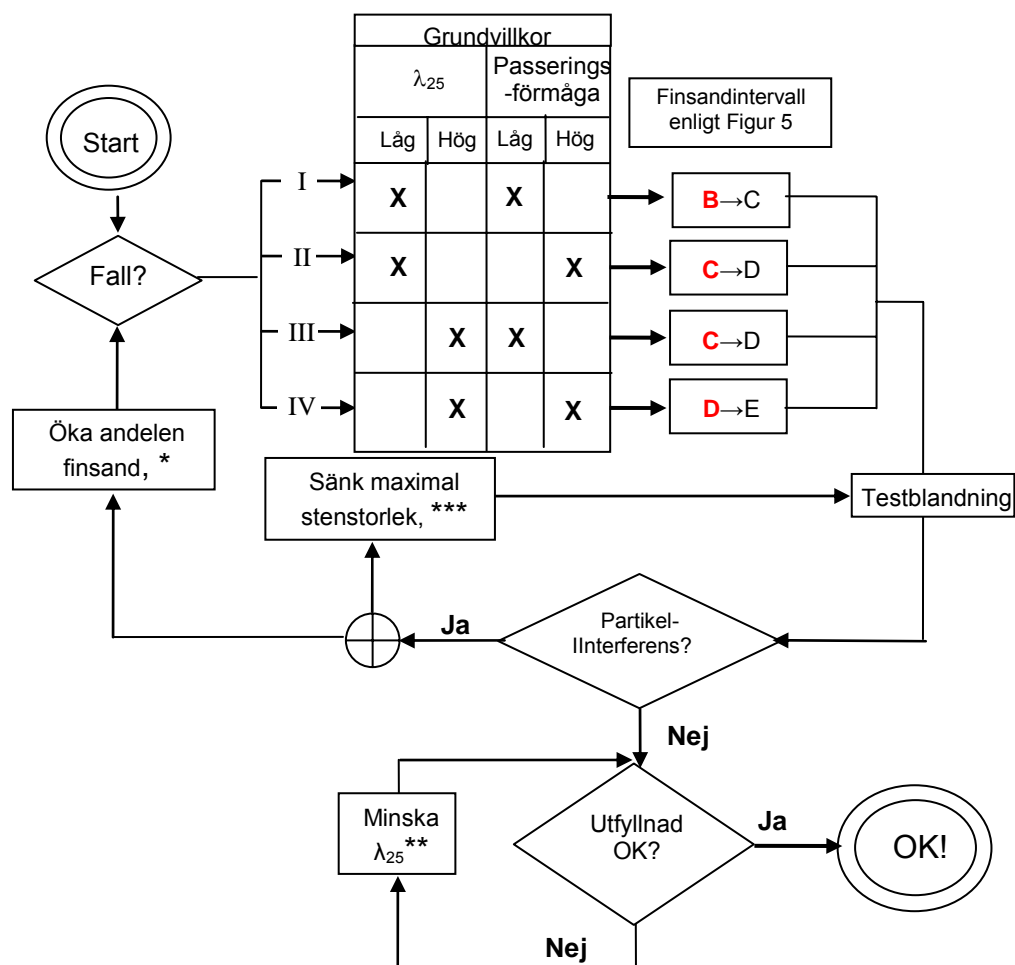
Ballastundersökningen resulterar primärt i att högsta partikelpackningen kan identifieras för ett intervall uttryckt i lämplig sandhalt (0 – 4mm kornstorlek för krossad ballast). Detta intervall benämns här FAIN-intervallet (Fine Aggregate content INterval), och anger de gränser man kan använda i optimeringsmetodikerna beroende bl a på vad betongen ska användas till. Av ekonomiska skäl bör man alltid börja med att göra testblandningar med så låg halt 0-4mm som situationen tillåter. Om detta inte fungerar, dvs man konstaterar partikelinterferens eller yttre blockering, ökas halten 0-4mm med bibehållet värde på kopplingsparametern λ_{25} , vilket resulterar i ökad pastamängd och dyrare betong, se vidare metodiksammanfattningen i figur 6.

Finbruksundersökningen ger de gränser för λ_{25} som är möjliga för ett visst vattenpulvertal. Om man befinner sig inom detta intervall innebär det att finbrukets flytförmåga och homogenitet är tillfredsställande för aktuella material. Olika nivåer på λ_{25} inom detta intervall ger olika konsistenser, vilket ger en ökad frihet för brukaren att styra önskad konsistens med λ_{25} -parametern. Däremot vet man i detta läge inte om betongsammansättningen fungerar, vilket kan uttryckas med att man inte vet om den grövre ballasten leder till partikelinterferens och blockering. Därför måste alltid blockeringen undersökas på betongen i ett strukturerat förfarande. Den totala proceduren presenteras i figur 6 med utgångsläget att ett λ_{25} -värde har valts, och där valet alltid ska göras med hänsyn till den aktuella situationen, dock måste λ_{25} vara inom framtestat intervall. I ett läge där robustheten är viktig, görs valet för det värde som i finbrukstesterna uppvisar en stor buffertzona med hänsyn till okänsligheten för flytmedelsdosering. I ett annat fall kan behovet av stor finballastandel vara viktig, och då kan man välja det största λ_{25} -värdet inom tillåtet intervall. Beroende på aktuella förhållanden finns många alternativa val av storleken på λ_{25} .

Efter att λ_{25} etablerats väljs sammansättningen av ballasten utifrån FAIN-intervallets gränser, se exempel på definition av lägen i enlighet med gjorda tester i figur 5. Läget A är definierat som andelen 0-4mm lägre än FAIN-intervallets nedre gräns. Denna situation är på grund av mycket låg finballastandel aldrig aktuell för valet av sammansättning för SKB. De övriga lägena, B, C, D och E, innebär successivt ökande sandandel, och läget E med stor andel sandandel kan vara aktuell för SKB där man har behov av att utnyttja den finaste delen av ballasten i stället för att öka andelen av eller sätta till mineraliska tillsatsmaterial eller filler.



Figur 5 Definition av sandandelen (0-4mm) i fem lägen relaterat till FAIN-intervallet.



*) Öka innehållet av finsand med bibehållet λ_{25} -värde.

**) Sänk λ_{25} antingen genom att öka pastamängden för bibehållen finsandandel eller genom att finsandandelen minskas med bibehållen pastamängd.

***) Minska maximal stenstorlek, om konsistensen kan bibehållas/ accepteras

Figur 6 Föreslagen arbetsmetodik vid bestämning av SKB-blandningar för varierande nivåer på λ_{25} och krav på betongens passeringsförmåga. De röda markeringarna representerar det första valet av sandandel, vilket bedöms vara den lägsta möjliga

Beroende på storleken på λ_{25} och kravet på passeringsförmåga, anges ett lämpligt startläge för sandandelen, se de rödmarkerade bokstäverna för respektive fall I – IV i figur 6. Dessa markeringar är bedömda som minsta möjliga sandandel för aktuellt fall, och de representerar samtidigt en ekonomisk lösning, eftersom pastamängden är proportionell mot sandandelen via värdet på λ_{25} .

λ_{25} -värdet tillsammans med andelen sand och värdet på aktuellt vattenpulvertal utgör komplett underlag för en beräkning av en betongsammansättning. Testblandningen för det framräknade receptet undersöks med avseende på ställda krav på partikelinterferens/blockering. Om kravet inte uppfylls, måste receptet justeras, vilket enligt figur 6 kan ske antingen genom att öka sandandelen eller genom att minska maximal stenstorlek. Proceduren fortsätter tills betong uppför sig tillfredsställande vad gäller blockering. Slutligen kontrolleras blandningen

för ställda krav på flytförmågan. Vid behov minskas λ_{25} -värdet, vilket enligt figur 6 kan göras antingen genom att öka pastamängden eller genom att minska sandandelen. När kravet på flytförmåga är tillfredsställt har man ett recept som för aktuell blandare fungerar som SKB i enlighet med ställda krav. Om undersökningen genomförts i laboratoriemiljö, kan det finnas behov av att fortsätta att testa betongens egenskaper och vid behov justera receptet vid användning av en större blandare, men detta är ett väl känt förfarande vid implementering av laboratorierecept i en betongfabrik.

Metodikerna har i avhandlingen testats på så sätt att de SKB-recept som senare ska användas att studera egenskaper för att beräkna sprickrisker har komponerats genom strikt tillämpning av metodiken redovisad i figur 6. Det ena receptet har 11 % flygaska i förhållande till cementhalten (betecknat FA11), och det andra receptet har 25 % flygaska (FA25). Finbrukstesterna resulterade i att för FA11 var $\lambda_{25} = 0.55$ ett lämpligt val och för FA25 var $\lambda_{25} = 0.38$ ett lämpligt val. Då referensbetongen utan flygaska (FA0) inte skulle ha någon tillsättning av tillsatsmaterial eller filler var den inte en kandidat att bli SKB, varför värdet på λ_{25} så som det är använt här inte är relevant. Däremot har för referensbetongen ballastsammansättningen valts för den kombination som har högst partikelpackning.

När det gäller valet av ballast för betongerna FA11 och FA25 var ursprungstanken att de skulle skapas som fall III i figur 6, men då FA11 har så lite pulverinnehåll (cement + flygaska) var sandhalten tvungen att ökas, så att den hamnade i läge E enligt figur 5 och blir då formellt fall IV. Ingen av recepten har utöver första valet av sammansättning justerats, vilket tyder på att metodiken att välja recept enligt redovisningen i figur 6 fungerar tillfredsställande.

Studien av sprickrisker under härdningsfasen redovisar resultat för de tre betongerna FA0, FA11 och FA25 tillsammans med en tidigare provad SKB med kalkfiller, här kallad SCC_lime. Mätningarna av spänningar för den fasthållna väggen ger att FA11 får lägst och SCC_lime högst sprickrisk, medan FA0 och FA25 ligger däremellan. Beräkningar av sprickrisker för genomgående sprickrisker i en tunnelvägg gjuten mot en bottenplatta resulterade i att bägge flygaskebetongerna (FA11 och FA25) hade lägst sprickrisk. Däremot visar beräkningarna för risken för ytsprickor i en självbalanserad vägg eller platta på mark att flygaskebetongerna i vissa lägen kunde ge förhöjd sprickrisk. Det går således inte att generellt säga om en viss betong leder till högre eller lägre sprickrisk. Slutsatsen är att man måste alltid beakta den aktuella situationen för den betong man studerar, både med hänsyn till konstruktionens utformning och omgivande miljö. För här undersökta betonger ska man också komma ihåg att flygaskan använts primärt för att ersätta en del av ballasten med bibehållen cementhalt. Inga analyser har här genomförts där flygaskan använts för att sänka cementhalten, vilket är relativt vanligt för betonger som ska vibreras.

Potential

Den föreslagna optimeringsmetodikerna kan underlätta möjligheten till mer skräddarsydda betongblandningar, vilka är komponerade med hänsyn tagen till egenskaperna hos det tillgängliga materialet och till villkoren för tillämpningen. Ett utförandebaserat tankesätt kan främja betongtillverkning och dess kostnader på ett positivt sätt. En ledstjärna kan vara att kunden inte ska behöva betala mer än vad situationen kräver. Den föreslagna metodiken är i dagsläget begränsad till att gälla färsk betong, och erbjuder enkla verktyg för att välja sammansättning utifrån en önskad konsistens. I en förlängning kan man tänka sig att kraven även kan innefatta ung och mogen ålder där sammansättning av delmaterialerna kan ske med avseende på andra typer av krav.