

Förstudie avs. spänningsanalys och sprickriskberäkning i datorprogrammet Produktionsplanering Betong

Slutrapport

**Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB / SBUF
Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier Service AB**

2015-09-14

Förord

Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort tack till samtliga branschens representanter som deltog i workshopparna och bidrog med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet.

Projektets arbetsgrupp vill även rikta ett stort tack till SBUF för finansiering av detta projekt.

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar projektet SBUF 13059 "Förstudie Spänning PPB". Huvudmomenten i projektets genomförande beskrivs. Slutsatser dragna av arbetsgruppen och baserade på input från externa workshoppar, litteraturstudier, analyser och prototypframtagning redovisas. Slutligen presenteras förstudiens resulterande rekommendationer för vidare åtgärder inom utveckling samt forskning både i närtid och på längre sikt.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Sammanfattning.....	2
Innehållsförteckning.....	3
1 Inledning.....	5
1.1 Bakgrund	5
1.2 Ändringar i projektorganisationen	5
2 Genomförande	6
2.1 Workshop 1 – Hus och industri	6
2.2 Workshop 2 – Anläggning.....	6
2.3 Analys av workshopresultat	6
2.4 Modellrevidering	6
2.4.1 Prototyputveckling	7
3 Slutsatser	8
3.1 Typfall	8
3.1.1 Typer av sprickor	8
3.1.2 Underlag	8
3.1.3 Väggar	9
3.1.4 Plattor	9
3.1.5 Bjälklag	9
3.1.6 Tredimensionella fall	10
3.1.7 Källare/fundament	10
3.2 Tvång	10
3.3 Materialmodeller & data.....	10
3.3.1 Ung betong	10
3.3.2 Andra material.....	10
3.3.3 Utformning av programvaran.....	11
3.3.4 Materialdata	11
3.4 Krav & resultat.....	11
3.5 Övriga slutsatser	11
3.5.1 Serieberäkningar	11
3.5.2 Låsning av indata	11
4 Rekommendationer.....	13
4.1 Nästan omedelbar implementation	13

4.2	Senare implementation.....	13
4.3	Vidare utredning och forskning.....	13
4.3.1	Tredimensionella problemställningar	13
4.3.2	Samverkan mellan rörelse och fukt.....	14
	Litteraturlista.....	15

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Sedan början av 1990-talet har det funnits tillgång till branschanpassade verktyg för spännings- och sprickrisikanalys av betongkonstruktioner under härdning. Dessa förbättrade verktyg och nya möjligheter har legat till grund för Trafikverkets (då Vägverket) krav för att begränsa och ge betongkonstruktioner en förbättrad beständighet. Framgångsrikt utförande av dessa beräkningar har hittills krävt (och gör det fortfarande) ingenjörsbakgrund samt både en del extra utbildning och erfarenhet. Detta beror dels på att verktygen från 1990-talet var designade mer som forskningsverktyg och inte användarvänliga i stil med Hett97 eller PPB, dels för att det saknades underlag i form av tillämpningserfarenhet för att åstadkomma en bättre och mer användarvänlig design av både modeller/typfall samt datorprogram. Utöver detta närmar sig existerande verktyg slutet av sin livstid avseende funktionalitet i nyare operativsystem.

Hittills har spänningsberäkningar varit ett nästan uteslutande anläggningsproblem. Idag finns tydliga signaler på att även detta inte längre gäller. Under tiden då Hett97 har varit tillgängligt och huvudsakligen används av hus- och industridelen av branschen, har användarna framgångsrikt lärt sig kvalitetssäkra sina gjutningar mot exempelvis vinterproblematik och så småningom förflyttat fokus från kvalitetssäkring till processoptimering (med bibehållen kvalitetssäkring) på arbetsplatsen. Denna utveckling är naturligtvis av godo och tyder på en avsevärd mognadshöjning i branschen. Den har dock också medfört att arbetsflödet inklusive härdningen optimeras ibland så hårt att även tunnare och enklare konstruktioner gjutna i långa etapper utsätts för påtagliga temperaturspänningar från fastlåsningseffekterna (inre/yttre tvång) och spricker.

För att bemöta dessa behov och möjligheter på både anläggningssidan och hos hus och industri har detta förstudieprojekt, SBUF 13059 "Förstudie Spänning PPB", startats. Syftet med detta projekt var att utreda möjligheterna med att ta fram ett nytt verktyg för spänningsanalys och sprickriskberäkningar i form av en utökning av dagens funktionalitet i PPB (som en integrerad beräkningsmodul).

1.2 Ändringar i projektorganisationen

Tidigt i projektet blev det klar att Jan-Erik Jonasson inte kommer att kunna delta i projektarbetet i den planerade omfattningen av personliga skäl. Han lämnade därför arbetsgruppen, men var tillgänglig för projektet genom ett antal telefonkonsultationer under projektets gång.

2 Genomförande

2.1 Workshop 1 – Hus och industri

Workshopen ägde rum 2015-04-15. De deltagande representerade entreprenörer, konstruktörer och materialtillverkare, samt projektets arbetsgrupp. De deltagande företagen och organisationerna var Skanska, JM, Structor, Cementa, Swerock/Peab, SBUF och The Green Dragon Magic. NCC och Tyréns meddelade förhinder sent inför workshopen.

Den nuvarande versionen av PPB presenterades som inledning, för att ge samtliga deltagare en bild av grundverkygets nuvarande nivå, design, funktionsutbud samt användarvänlighet. Eftersom spänningsberäkningar idag inte är särskilt frekvent förekommande inom hus och industri, presenterades även ett antal spänningsberäkningar med ConTeSt kring ett fall med några olika åtgärder. Sedan diskuterades olika idéer och önskemål kring simulering av rörelse, beräkning av spänningar och uppskattning av sprickrisiker. Diskussionen var huvudsakligen inriktad på att kartlägga behovet av detta inom hus och industri och mer konkret identifiering av olika typfall av konstruktion och tvång.

2.2 Workshop 2 – Anläggning

Workshopen ägde rum 2015-05-05. De deltagande representerade entreprenörer, konstruktörer, konsulter, materialtillverkare och myndigheter, samt projektets arbetsgrupp. De deltagande företagen och organisationerna var NCC, Skanska, Ramböll, Projektengagemang, Betongindustri, Thomas Concrete Group, Swerock/Peab, Trafikverket, Sveriges Byggindustrier, SBUF och The Green Dragon Magic. Tyréns meddelade förhinder sent.

Den nuvarande versionen av PPB presenterades som inledning, för att ge samtliga deltagare en bild av grundverkygets nuvarande nivå, design, funktionsutbud samt användarvänlighet. Därefter gav Trafikverket en redogörelse för sin grundläggande syn på kvalitet och kravställning av denna i utförande av anläggningskonstruktioner. Sedan diskuterades olika idéer och önskemål kring simulering av rörelse, beräkning av spänningar och uppskattning av sprickrisiker. Diskussionen var huvudsakligen inriktad på hur dagens tillämpning av ConTeSt inom anläggningskonstruktioner skall utvecklas i framtiden, dels avseende själva simuleringen och analysen men även av. hur branschen jobbar med frågan generellt och hur samarbetet mellan olika aktörer kan främjas genom design av programmet.

2.3 Analys av workshopresultat

Resultaten från workshopparna sammanställdes och analyserades av arbetsgruppen. Eftersom en del slutsatser överlappar mellan workshopparna, redovisas samtliga resultat i en logisk ordning i kap 3.

2.4 Modellrevidering

En studie av materialmodellen för ung betong utfördes. Den omfattade initialt en litteraturstudie ^{1,2,3,4,5}. Därefter följde en genomgång av erfarenheter av användningen av ConTeSt och en diskussion rörande behovet av justeringar och förändringar.

2.4.1 Prototyputveckling

Som en del i revideringen av materialmodellen för ung betong har en prototyp utvecklats. Prototypen är en s.k. enpunktsberäkning för spänning – den simulerar de fullständiga materialegenskaperna men utan någon interaktion inom konstruktionen eller med dess yttre omgivning. Prototypen användes för att utvärdera egenskaper i materialmodellen. Utvecklingen skedde i samarbete med utvecklingen av motsvarande prototyp för anpassning av materialdata inom projektet SBUF 13108 "Materialkalkylator Spänning".

3 Slutsatser

Generellt sett anses det att de beräkningarna som idag finns i ConTeSt, dvs. s.k. Linear Line Analysis och Plane Surface Analysis, skall implementeras i PPB som komplement till dagens värmesimulering. Det finns vidare önskemål att i en framtid kunna räkna mer fullskaligt på tredimensionella effekter av dels rörelse och interaktion inom konstruktionen, dels inverkan av yttre tvång.

3.1 Typfall

Typfallen och diskussionen i detta kapitel rör tillämpningar inom hus & industri. Inom anläggningssidan finns det redan ett antal typfall identifierade sedan länge och den huvudsakliga användningen är dessutom inriktad på simulering utan typfallsstöd i ConTeSt, vilket kommer att motsvaras av det fria läget i PPB.

Diskussioner under workshopparna resulterade i identifikation av såväl en rad olika konstruktionstypfall som olika grundaspekter av typfall, t.ex. tvång. Nedan följer en redovisning i form av konstruktionstyper och aspekter. Konkreta typfall som kommer att modelleras i PPB bör designas i anslutning till övrig design av programmet, så att användargränssnittet och funktionerna harmoniserar med varandra.

3.1.1 Typer av sprickor

Både genomgående sprickor och ytsprickor är av intresse för samtliga konstruktionstypfall.

3.1.2 Underlag

För att få med rimligt korrekt tvång och fastlåsningseffekter från underliggande eller på annat sätt anslutande material skall hänsyn tas till att konstruktioner kan gjutas mot:

- Gammal konstruktion i ett eller flera segment
- Mark
- Berg
- Berg med avjämning
- Pelare

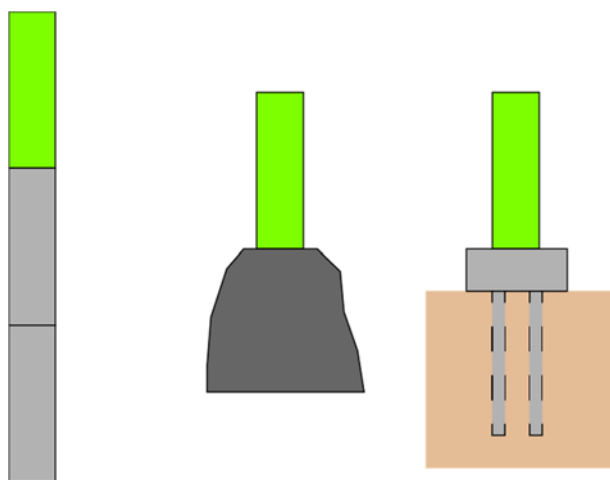


Fig. 1 Väggar på tidigare väggsektioner, berg resp. pålad sula

3.1.3 Väggar

De i PPB idag existerande typfall för väggar är bra. De bör kompletteras med:

- Väggar gjutna direkt på berg och pelare
- Möjlighet till ingjutning av s.k. komaxlåda (för att senare gjuta in ett bjälklag i)
- Vaggsektioner gjutna på varandra (uppdelning av hög vägg)
- Tvångsaspekter av sektionindelningar skall beaktas

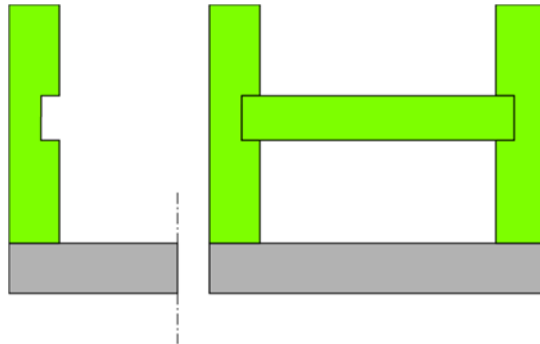


Fig. 2 Vagg med komaxlåda, utan resp. med bjälklag

3.1.4 Plattor

De i PPB idag existerande typfall för plattor är bra. De bör kompletteras med:

- Gjutning på pelare samt berg med avjämning på
- Eventuella voter skall hanteras som skilda block eftersom de oftast gjuts tidigare än plattan och med annat vct
- Tvångsaspekter av sektionindelningar skall beaktas

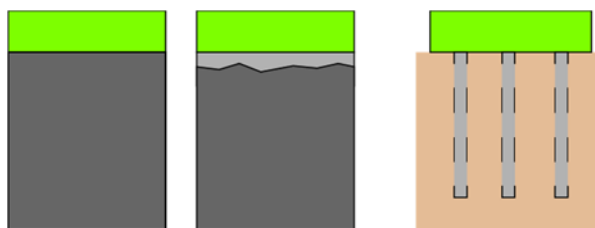


Fig. 3 Platta på berg, berg med avjämning resp. pelare

3.1.5 Bjälklag

De i PPB idag existerande typfall för bjälklag är bra. De bör kompletteras med:

- Typfall där hela bjälklaget inkl. bägge ändupplag är med
- Möjlighet att gjuta in bjälklag mellan existerande väggar i s.k. komaxlådor
- Tvångsaspekter av sektionindelningar skall beaktas

3.1.6 Tredimensionella fall

Det noterades ett intresse av olika hörnfall där väggar samt plattor/bjälklag möter varandra. Dessa fall kräver tredimensionell analys och kan inte täckas av dagens analysmetoder samt materialmodeller.

3.1.7 Källare/fundament

Ett antal olika, mer komplicerade situationer för gjutning av källarkonstruktioner identifierades. Det handlar om väggar och bjälklag med ett mer ovanligt yttre tvång. Dessa diskuterades och eftersom det dels var svårt att hitta en systematik i en eventuell typfallsindelning, dels det kommer att vara möjligt att utföra dessa simuleringar i det fria läget, beslöt arbetsgruppen att vänta med implementationen av dessa. När de grundläggande typfallen finns frisläppta och branschen har lärt sig använda dessa bör man evaluera vilka typfall som upplevs som saknade och då komplettera den grundläggande uppsättningen.

3.2 Tvång

Specifikation av tvång i konstruktioner är den idag svåraste enskilda delen av konstruktionsbeskrivningen. Den behöver göras enklare om flertalet skall kunna använda beräkningsverktyget. För att inte samtidigt tappa flexibiliteten för de avancerade användarna föreslås två olika sätt att beskriva tvång, parallellt med dagens användarlägen i PPB (typfallsbaserat och fritt).

I det typfallsbaserade bör tvånget bli kopplat till konstruktionstypfallet, hårdare styrt och uttryckt i parametrar som är lätta att interpretiera. Där krävs det att man in i själva typfallet bygger in explicita modeller för tvångsberäkning, avsedda för just detta typfall. Detta bör rimligen basera sig på resultat från SBUF 11618 "Tvång för sprickriskberäkningar".

I det fria läget kan tvånget beskrivas som idag i ConTeSt. Möjlighet att variera tvångsparametrarna i tid/mognadsålder efterfrågas dock.

3.3 Materialmodeller & data

3.3.1 Ung betong

Härdningstemperaturens inverkan på autogen deformation är under pågående studie, SBUF 12903 "Härdningstemperaturens effekter på den unga betongens egenskaper". Materialmodellen för detta i ConTeSt är rätt gammal. Det existerar en färskare ⁴. Implementation av spänning i PPB bör avvakta resultat från den pågående studien och beakta detta vid revidering av denna materialmodell.

För övrigt finns det inga synpunkter på resten av materialmodelleringen (t.ex. krypning, icke-linjärt spännings-töjningssamband) så som den sker idag i ConTeSt. Samma modeller kan med fördel användas i PPB.

3.3.2 Andra material

Idag täcker materialmodellen för övriga material endast linjärelastiskt beteende med möjlighet till värmeutvidgning. Detta ses som ej tillräckligt. När det gäller gammal betong bör materialmodellen göras något mer avancerad och täcka även krypning som sker vid hög ålder. För övrigt bör det utredas närmare om stöd för andra materialmodeller bör läggas in för att modellera omgivningen till den unga betongen mer korrekt än idag.

3.3.3 Utformning av programvaran

ConTeSt betraktas som huvudsakligen byggd som ett forskningsprogram med ett grafiskt användarinterface. Detta medför bl.a. att specifikation av materialbeteende är långt ifrån pedagogisk och använder sig av för mycket trixande, även om resultatet blir korrekt. Det är mycket önskvärt att detta omarbetas från grunden och att olika finesser designas mer explicit, klart och pedagogiskt i PPB för att reducera risken till missförstånd hos flertalet användare.

3.3.4 Materialdata

Som grund bör åtminstone Anläggningscement och Bascement täckas av materialdatauppsättningen i PPB för spänningsanalys. Anläggningscementets egenskaper är kända sedan tidigare och inmätta i ConTeSt. Bascementet har mätts in inom ramen för SBUF 12524 "Undvik vattenläckage i betongkonstruktioner genom temperatur- och härdningsstyrning" och dessa materialdata bör tas med.

3.4 Krav & resultat

Som resultat ses primärt spänningskvot samt töjningskvot, men även spänning och töjning bör kunna presenteras om så önskas. Alla dessa resultatfält skall hanteras på ett liknande sätt med diagram och färgkartor som övriga resultatfält i PPB.

När det gäller kravställning av resultat är det endast spänningskvot samt töjningskvot som är av intresse.

3.5 Övriga slutsatser

3.5.1 Serieberäkningar

Möjlighet till serieberäkning av samma slag som finns i Hett97 efterlyses. Där skall det vara möjligt att uppge olika alternativ för indata (typiskt variera en eller ett par variabler) och få resultat från samtliga alternativen sammanställda enligt ett eller flera specifika krav. Detta anses vara ett kraftfullt verktyg att kunna jämföra olika slags åtgärder med varandra med hjälp av specificerade krav.

3.5.2 Låsning av indata

Ett typiskt mönster för samarbete kring sprickreduktion i anläggningskonstruktioner går ut på att en konstruktör eller konsult utför själva planeringen och entreprenören står för genomförandet. Planeringen sker oftast långt i förväg och utan exakt kunskap om t.ex. väderlek vid gjutning, vilket kan ha stor inverkan på resultatet. Genomförandet är oftast baserat på en arbetsbeskrivning som långt ifrån alltid förklarar varför man skall göra på ett visst sätt. Denna situation är i behov av större informationsutbyte. Det optimala vore att konstruktören/konsulten och entreprenören utbytte PPB-projekt (filer) med varandra. Konstruktören/konsulten skulle fortfarande ta fram en huvudlösning. Entreprenören skulle kunna komma med synpunkter på dess lämplighet, strax före gjutning uppdatera simuleringen med mer exakt väderlek samt efter gjutning följa upp med analys av temperaturmätvärden mot bakgrund av den planerade härdningen.

Framtagning av ett branschgemensamt verktyg för spänningsanalys, som är gratis för alla branschens aktörer är en bra grund för ett sådant informationsutbyte. En högre nivå av pedagogik och användarvänlig design är ett annat måste jämfört med ConTeSt. Det identifierades även en specifik funktion för att främja detta informationsutbyte och samarbete. För att den ansvarande parten skall känna sig bekväm med att lämna ut så detaljerad information och inte riskera att den av misstag

ändras och leder till felaktiga slutsatsen i det utförande ledet bör PPB möjliggöra att indata, delar av eller i sin helhet, skyddas från ändring. Ett bra exempel skulle kunna vara att allt utom väderlek låses innan filen skickas från konstruktören/konsulten till entreprenören. Skyddet kan implementeras genom ett enkelt password (t.ex. för användning inom samma företag, internkonsult och arbetslag inom en större entreprenör) eller med en elektronisk signatur (t.ex. för användning mellan olika företag).

4 Rekommendationer

4.1 Nästan omedelbar implementation

Eftersom pedagogiken i utformningen av typfall med inbyggd modellering av tvång är beroende av resultat från ett pågående SBUF-projekt och valet av materialmodell för krympning är beroende av ett annat pågående SBUF-projekt bör en första implementation av spänning i PPB invänta de resultaten man är beroende av. För övrigt anses följande funktioner redo och av hög prioritet att implementeras:

- Spänningsberäkning inkluderande s.k. Linear Line Analysis och Plane Surface Analysis, baserat på resultaten av en tvådimensionell simulering av temperaturförlopp under härdning
- Samtliga typfall enligt kap 3.1 utom 3.1.6 och 3.1.7 bör implementeras.
- I det fria läget skall det vara möjligt att fritt rita upp geometrin (som idag) och genomföra en spänningsanalys på.
- Tvångsmodellering skall i möjligaste mån byggas in i typfallen. Den skall vara utformat på ett pedagogiskt sätt och referera till parametrar som lätt går att interpretiera.
- I det fria läget skall det vara möjligt att, som komplement till de inbyggda tvångstypfallen, ange tvång på ett friare sätt (som idag i ConTeSt) med möjligheter till variation av parametrarna i tid/mognadsålder.
- ConTeSt:s materialmodeller bör implementeras med revideringsförslag enligt kap. 3.3
- Existerande materialdata för Anläggningscement och Bascement skall utgöra grunden i materialdatabasen för spänning i PPB. Om andra materialdata görs tillgängliga från materialtillverkare skall de självklart läggas till.

4.2 Senare implementation

Ett antal funktioner identifierades av hög värde, men bedöms inte vara av samma prioritet som de uppräknade för omedelbar implementation. Dessa sekundära funktioner kan implementera ihop med de primära eller separat vid ett senare tillfälle. Funktionerna är:

- Serieberäkningar, enligt kap 3.5.1
- Låsning av indata, enligt kap 3.5.2

4.3 Vidare utredning och forskning

Förstudien identifierade även två områden som är av betydande intresse för branschen men där det saknas kunskap och modeller för att det skall vara möjligt att gå till direkt implementation i form av funktioner i PPB. Dessa två områden måste först bli fokus för nödvändig forskning. Efter att det tagits fram erforderlig kunskap som är stabil nog och med rimlig fenomenologisk täckning kan en diskussion om eventuell implementation äga rum.

4.3.1 Tredimensionella problemställningar

Behovet av spänningsanalys för fall med tredimensionella tillstånd och beroenden föreligger redan idag. Samtliga konstruktioner och/eller delar som inte har en dominerande dimension längs med vilken huvudspänningsriktningen kommer att ligga är berörda av detta, t.ex. hörn där olika konstruktionsdelar möter varandra, fundament som saknar tydlig, dominerande utsträckning, mm. För att kunna på ett framgångsrikt sätt simulera tredimensionella effekter krävs det följande:

1. Generalisering av materialmodeller för krypning, krympning samt icke-linjära samband mellan spänning och töjning till att gälla i tre dimensioner.
2. Modeller för hur uppluckring och bildning av mikrosprickor sker på kontaktytor mellan berörda material, vilket avlastar ibland betydligt konstruktionen, särskilt i närheten av hörn.
3. Implementation av fullskalig tredimensionell spänningsanalys.
4. Implementation av fullskalig tredimensionell simulering av värmeflöde.

1 bedöms som uppgift inom tillämpad forskning. Grundkunskap inom området finns redan. Det som behövs är att sammanbinda ett antal modeller samt idéer med varandra och validera att de fungerar.

2 är i behov av en litteraturstudie för att bedömas vidare. Här kan det finnas behov av både grundforskning för att undersöka fenomenologin i sig och definitivt av tillämpad forskning att sy ihop och generalisera modelleringen till en för implementationen nödvändig helhet.

3 samt 4 är rena utvecklingsuppgifter. Förutsatt att 1 och 2 är lösta kan 3 och 4 implementeras. Här skall det dock understrykas att såväl beskrivningen av konstruktionen och förhållanden i ett tredimensionellt fall som resultaten av simuleringen blir mer komplex och svårare att åskådliggöra på en tvådimensionell skärm på ett tydligt sätt. I samband med en sådan implementation bör det läggas ner betydande resurser på analys av just detta och design av programvarans visuella del.

Förstudiens rekommendation är att stimulera den nödvändiga forskningen rörande 1 och 2 samt att avvakta med 3 och 4 tills dels forskningsresultaten är tillgängliga, dels implementation enligt kap. 4.1 och 4.2 är utförd.

4.3.2 Samverkan mellan rörelse och fukt

Dagens modell för krympning täcker den s.k. autogena deformationen, vilken är ett resultat av självuttorkningen. Detta fungerar för att analysera betongens rörelse under den första månaden efter gjutning och täcker väl sprickriskbedömning för det man brukar kalla temperatursprickor. Denna modell är dessutom under revidering, som påpekat i kap. 3.3.1. För att komma vidare i spänningsanalysen och kunna räkna även på sprickor samt belastning av omgivande material på grund av senare uttorkning (ej självuttorkning) krävs:

1. Verktyg som simulerar uttorkning
2. Modeller som kopplar uttorkning i ett senare skede med rörelse

Uppgift 1 är föremål för pågående förstudie SBUF 13064 "Förstudie Fukt PPB". Uppgift 2 är dock ett område i behov av forskning innan en implementation kan komma i fråga.

Förstudiens rekommendation är att:

- Implementera 1 genom att utveckla fuktsimuleringen i PPB i enlighet med kommande rekommendationer från SBUF 13064
- Implementera spänningsanalys enligt kap. 4.1 och 4.2
- Stimulera den nödvändiga forskningen rörande 2

Därefter bör en ny bedömning göras, vid behov baserad på en ny förstudie, hur samverkan mellan uttorkning och rörelse skall på bästa sätt hanteras i PPB.

Litteraturförteckning

¹ Gustaf Westman, *Thermal Cracking in High Performance Concrete*, 1995 LTU

² Mårten Larsson, *Estimation of Crack Risk in Early Age Concrete*, 2000 LTU

³ Mårten Larsson & Jan-Erik Jonasson, *Linear Logarithmic Model for Concrete Creep, I. Formulation and Evaluation*, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 1, No. 2, 172-187 July 2003

⁴ Hans Hedlund, *Hardening Concrete, Measurements and evaluation of non-elastic deformation and associated restraint stresses*, 2000 LTU