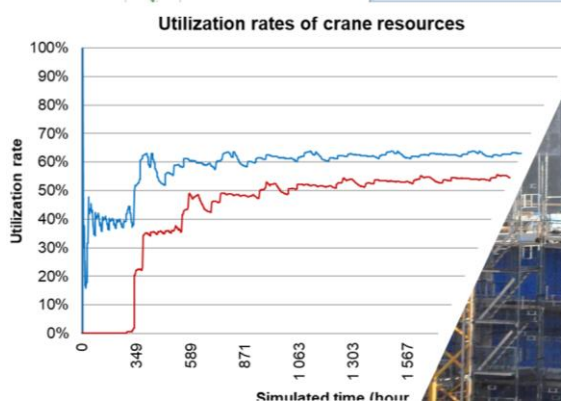
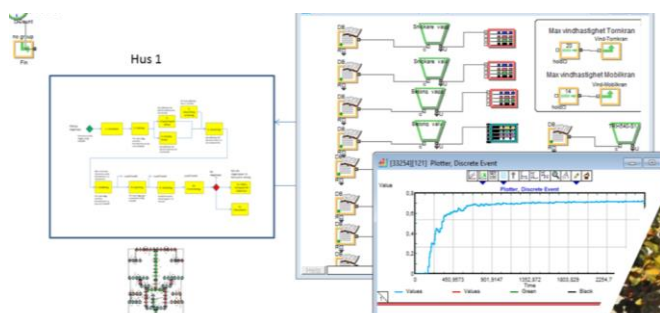


SIMULERING SOM VERKTYG FÖR PRODUKTIONSANALYS

Inverkan av resursanvändning, väder, och användning av klimatförbättrad betong på byggandet av betongstommar



FÖRORD

Denna rapport utgör en populärvetenskaplig avrapportering av forskningsprojektet ”Effektivt stombyggande med betong – simulering av stomdrift med hänsyn till osäkerheter i väderförhållanden och materialleveranser” (SBUF 13398). Den fullständiga avrapporteringen finns i den doktorsavhandling med tillhörande artiklar som det hänvisas till i referenslistan i slutet av denna rapport.

Undertecknad har varit projektledare och Peab Sverige AB har varit sökande och huvudman för projektet. Denna avrapportering är författad av Robert Larsson, industridoktorand vid Lunds Tekniska Högskola, avd. Konstruktionsteknik samt anställd vid Cementas Utvecklingsavdelning. Förutom finansiering från SBUF, har projektet även erhållit finansiellt stöd från Cementa AB.

Övriga företag som deltagit i projektet är NCC, Skanska, Cementa, Peri, Celsa Steel Service som utgjort referensgrupp till projektet. Referensgruppen har bidragit med värdefulla inspel, speciellt i projektets inledande skede. Under arbetets gång har även kontakter tagits med personer inom dessa företag i samband med platsbesök, intervjuer, och insamling av data. Förutom ovan nämnda företag så har även personer från andra företag och institut involverats under projektet, tex Lambertsson, Cramo, Betongindustri, Duke System och SMHI. Jag vill rikta ett stort tack till dessa företag och personer som på ett generöst sätt bidragit med sin specifika kompetens och erfarenhet.

Jag är också mycket tacksam för den finansiering från SBUF och Cementa som har möjliggjort detta doktorandprojekt och för att Peab Sverige AB har varit drivande som huvudman i projektet.

Martin Rudberg

Professor

L E Lundbergs donationsprofessur i bygglogistik
Linköping universitet
martin.rudberg@liu.se

SAMMANFATTNING

Att bygga stommen i betong är den vanligaste produktionsmetoden för flerbostadshus i Sverige. Arbetet med att bygga stommen påverkas dock av många olika faktorer som kan försämra produktiviteten. Försenade materialleveranser, bristande planering och koordinering av produktionsresurser, eller ogynnsamt väder är några exempel på faktorer som kan minska produktiviteten. En lägre produktivitet medför längre byggtider och ökade kostnader för stommen vilket kan påverka hela byggprojektet. Det är därför viktigt att öka kunskapen om hur olika faktorer påverkar produktiviteten för att undvika förseningar och ökade kostnader.

Att studera hur olika faktorer påverkar produktiviteten är komplext då ett produktionssystem kan innehålla ett stort antal faktorer som kan påverka utfallet. En metod som gör det möjligt att beskriva och studera komplexa produktionssystem är så kallad diskret händelsestyrd simulering (DHS).

Målsättningen med denna forskning är att öka kunskapen om hur DHS kan användas för att systematiskt analysera inverkan av faktorer som påverkar produktiviteten vid byggandet av betongstommar. Tre faktorer som anses vara speciellt viktiga för betong ingår i denna forskningsstudie, nämligen: 1) utnyttjande av arbetskraft och kran-resurser, 2) inverkan av olika väderförhållanden, och 3) användning av klimatförbättrad betong.

Ser man till utnyttjande av arbetskraft och kran-resurser (faktor 1) så visar denna studie på att DHS är en lämplig metod för att i detalj studera hur utnyttjandet av dessa resurser påverkar byggtid och kostnad för stommen. Studien lyfter fram vikten av att i detalj beskriva produktionsprocessen för att identifiera flaskhalsar orsakade av en obalans mellan behovet och tillgången på resurser för ett givet produktionsupplägg. Som stöd för att identifiera och analysera flaskhalsar och korrigerande åtgärder föreslås även att de traditionella måtten tid och kostnad kompletteras med nya indikatorer i form av väntetid och utnyttjandegrad.

När det gäller inverkan av väder (faktor 2) så bidrar denna studie med ny kunskap om hur detta kan beskrivas och studeras med hjälp av DHS. Detta uppnås genom att definiera en väderfunktion som beskriver sambandet mellan väder och arbetsproduktivitet. Dessutom beskrivs ytterligare en funktion som tar hänsyn till vädrets inverkan på betongens hållfasthetstillväxt som också är viktig för produktiviteten under stomskedet. På detta vis kan även vädrets inverkan vid användning av klimatförbättrad betong studeras (faktor 3). Genom att implementera dessa funktioner i en simuleringsmodell tillsammans med väderstatistik så simulerades inverkan av olika väderförhållanden. Ett separat beräkningsverktyg användes också för att komplettera simulerade byggtider med kostnader och klimatpåverkan.

Resultaten från simuleringarna visar att vädret har en stor påverkan på byggandet av betongstommar. Exempelvis så ökar byggtiden med 8-42% jämfört med ett referensscenario där effekten av väder inte beaktas. Utfallet beror på tidpunkten för genomförande och var projektet är beläget, men också på i vilken grad klimatförbättrad betong användes. Resultaten visar också på att klimatförbättrad betong har stor potential att minska stommens klimatpåverkan under byggskedet. Men för att möjliggöra användning av klimatförbättrad betong i perioder med kallare väder så blir valet av härdningsåtgärd mycket viktig. På en mer detaljerad nivå gjordes även en enkätstudie där entreprenörer värderade inverkan av väder på produktiviteten för typiska betongarbeten. Dessa resultat bekräftar betydelsen av vädrets påverkan även för enskilda arbetsmoment.

Denna studie beskriver hur DHS kan användas för att på ett systematiskt sätt studera hur produktiviteten hos byggrelaterade produktionssystem påverkas av olika faktorer. Studien bidrar även med nya insikter om hur resursutnyttjande, väder, och klimatförbättrad betong påverkar byggandet av betongstommar. Sammantaget kan detta leda till bättre underlag för planering och val av produktionsmetoder för att möjliggöra en ökad produktivitet.

INNEHÅLL

INLEDNING	5
GENOMFÖRANDE	6
RESULTAT	7
SIMULERING SOM VERKTYG FÖR SYSTEMATISK ANALYS AV PRODUKTIONSUPPLÄGG MED FOKUS PÅ UTNYTTJANDE AV ARBETSKRAFT OCH KRANAR (FF1)	7
SIMULERING SOM VERKTYG FÖR SYSTEMATISK ANALYS AV VÄDRETS INVERKAN PÅ STOMDRIFTEN (FF2 OCH FF3)	8
ENTREPRENÖRERS VÄRDERING AV HUR VÄDER PÅVERKAR ARBETSPRODUKTIVITETEN FÖR BETONG- RELATERADE ARBETEN (FF4)	10
SLUTSATSER	11
VIDARE FORSKNING	12
REFERENSER	12

INLEDNING

Denna rapport är en sammanfattning av doktorsavhandlingen ”Modelling and simulation of factors influencing on-site construction of concrete frameworks – Studying the effects of resource allocation, weather conditions, and climate-improved concrete” (Larsson, 2021). Forskningen har genomförts vid Lunds Tekniska Högskola och inom ramen för SBUF-projektet ”Effektivt stombyggnad med betong: Simulering av stomdrift med hänsyn till osäkerheter i väderförhållanden och materialleveranser, nr 13398”.

Att bygga stommen i betong är den vanligaste produktionsmetoden för flerbostadshus i Sverige. Men arbetet med att bygga stommen påverkas av många olika faktorer som kan försämra produktiviteten. Försenade leveranser av material, bristande planering och koordinering av produktionsresurser, eller ogynnsamt väder, är några exempel på faktorer som kan minska produktiviteten. En lägre produktivitet medför längre byggtider och ökade kostnader för stommen vilket kan påverka hela byggprojektet. Det är därför viktigt att öka kunskapen om hur olika faktorer påverkar produktiviteten för att undvika förseningar och ökade kostnader.

Men att studera hur olika faktorer påverkar produktiviteten är komplext då ett byggrelaterat produktionssystem påverkas av många olika faktorer. Produktiviteten vid uppförande av en betongstomme påverkas exempelvis av hur väl material, arbetskraft, och utrustning planeras och koordineras. För att erhålla en effektiv stomdrift eftersträvas en välbalanserad arbetscykel som resulterar i jämna och förutsägbara våningscykeltider. Ofta delas produktionen in i etapper där stomarbeten bedrivs på flera ställen parallellt och där projektgemensamma resurser (tex kran, arbetskraft) delas mellan arbetsställen. Detta förutsätter noggrann planering och styrning av resurser så att dessa är tillgängliga precis då de behövs för att undvika störningar och stillestånd vilket leder till försämrad produktivitet. Eftersom produktionen till stor del sker utomhus innebär att rådande väderförhållanden också blir en viktig faktor att ta hänsyn till, särskilt under årets kallare månader. Detta gäller inte minst för betongrelaterade arbeten. Till exempel så påverkas manuella stomarbeten av regn och snö medan arbeten som kräver lyft med kran är känsliga för kraftig vind. I de fall då platsgjutning förekommer påverkas även produktionscykler av betongens hållfasthetstillväxt då den avgör när fortsatt arbete kan ske. Betongens hållfasthetstillväxt är i sin tur beroende av omgivande temperatur och vind och extra åtgärder måste därför vidtas för att skydda härdning av betong. En ökad användning av klimatförbättrad betong innebär också en påverkan på produktionscykler eftersom dessa betongtyper generellt har en långsammare hållfasthetstillväxt vid kallare väderförhållanden. Detta medför att härdningsåtgärder och produktionscykler kan behöva anpassas.

Det faktum att väderförhållanden påverkar både yrkesarbetare, utrustning, och material, fast på olika sätt gör det komplext att beskriva och analysera dess påverkan på produktiviteten. En metod som gör det möjligt att beskriva och studera komplexa produktionssystem är diskret händelsestyrd simulering (DHS). Målsättningen med denna forskning är därför att öka kunskapen om hur DHS kan användas för att systematiskt analysera inverkan av faktorer som påverkar produktiviteten vid byggandet av betongstommar. Tre faktorer som anses vara speciellt viktiga för betong ingår i denna forskningsstudie, nämligen: 1) utnyttjande av arbetskraft och kran-resurser, 2) inverkan av olika väderförhållanden; 3) användning av klimatförbättrad betong.

Följande forskningsfrågor har legat till grund för forskningsprojektet:

FF1: Hur kan stombyggnadsprocessen med ingående arbetsmoment och resurser beskrivas i en diskret händelsestyrd simuleringsmodell för att möjliggöra en systematisk analys av stomdriften med fokus på resursutnyttjande?

FF2: Hur kan inverkan av väder på fysiska arbetsmoment och härdning av betong beskrivas i en diskret händelsestyrd simuleringsmodell?

FF3: Hur påverkas tid, kostnad, och klimatpåverkan vid byggandet av betongstommar av olika väderförhållanden och då klimatförbättrad betong används?

FF4: Hur värderar entreprenörer inverkan av väder på produktiviteten för typiska stomarbeten och vilka väderfaktorer (temperatur, vind, nederbörd) anses ha störst påverkan på produktiviteten under stomskedet?

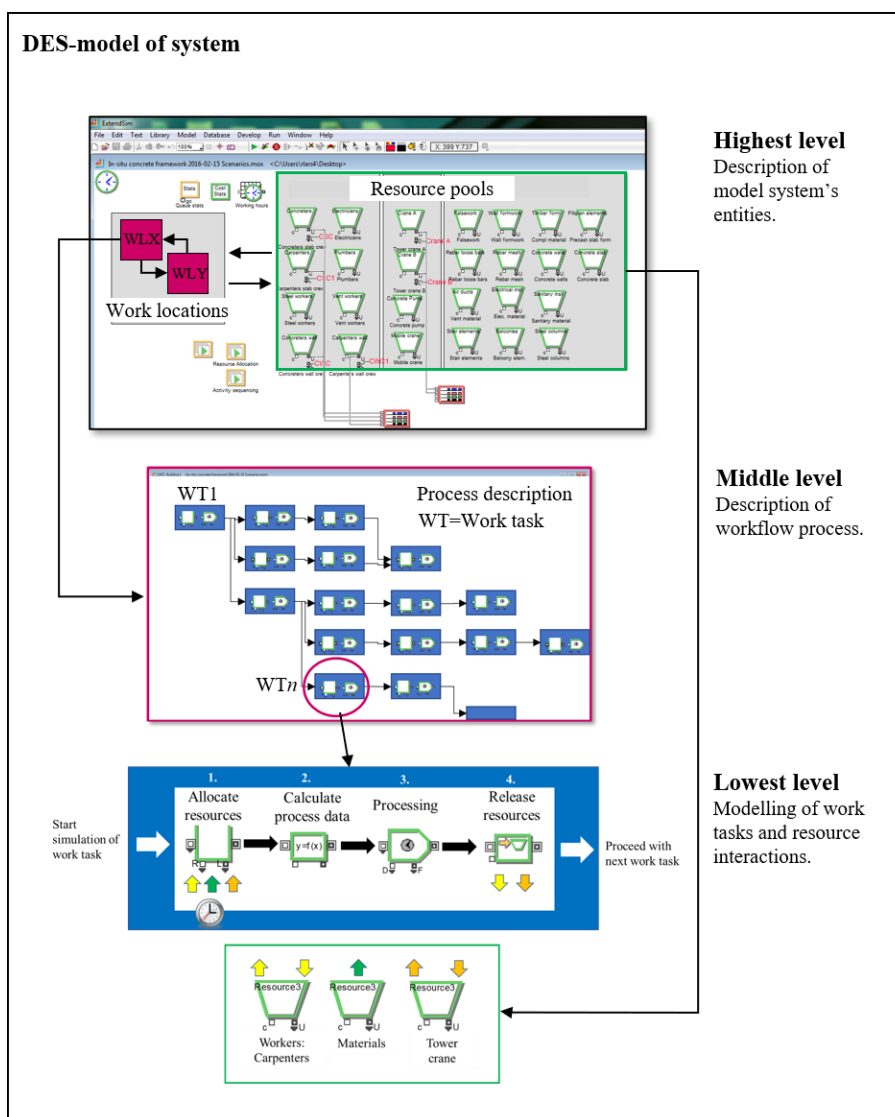
GENOMFÖRANDE

Avhandlingen (Larsson, 2021) är en sammanläggningsavhandling som bygger på fem artiklar. Den första artikeln (Larsson and Rudberg, 2020) behandlar hur stombyggnadsprocessen med ingående resurser kan beskrivas i en simuleringsmodell. Vidare beskrivs hur modellen kan användas för att analysera ett specifikt produktionsupplägg med fokus på användning av arbetare och kran-resurser. Dessutom testas olika produktionsupplägg och olika sätt att fördela resurser till arbetsmoment i syfte att minimera byggtid och kostnad. Den andra artikeln (Larsson och Rudberg, 2019) belyser hur inverkan av väder på betongarbeten kan beskrivas i en DHS-modell. Artikeln fokuserar på att modellera inverkan av temperatur, vind, och nederbörd på fysiska arbetsmoment som ingår i produktionscykeln för betongväggar. Samband mellan väder och produktivitet utgår från tidigare publicerade forskningsresultat. Modellen används sedan för att simulera effekten på byggtid då arbetet sker under olika väderförhållanden. Den tredje artikeln (Larsson, 2019) beskriver hur inverkan av väder på formrivningstider kan beaktas i simuleringsmodellen. Detta görs genom att använda simuleringsverktyget Produktionsplanering betong (PPB) för att simulera formrivningstider för olika betongval, härdningsmetoder, och klimatförhållanden. Resultaten från dessa simuleringar integreras sedan i den större DHS-modellen och på detta vis kan inverkan av olika väderförhållanden på formrivningstider beaktas då produktionscykler för betongväggar simuleras. I den fjärde artikeln (Larsson, 2020) utvidgas DHS-modellen så att en hel stomme hanteras och där inverkan av väder både på fysiska arbeten och härdning av betong (väggar och bjälklag) inkluderas. Modellen kompletteras även med data för att simulera inverkan av olika väderförhållanden på stommens tid, kostnad, och klimatpåverkan. Modellen används sedan för att simulera hur olika väderförhållanden påverkar stommen då klimatförbättrad betong används. I den femte artikeln (Larsson och Rudberg, 2021) kompletteras bilden av hur väder påverkar produktiviteten för olika betongrelaterade arbetsmoment. Data har samlats in via en enkätstudie där entreprenörer har fått kvantifiera effekten av olika vädertyper på arbetsproduktiviteten. De resultat som presenteras i artikeln baseras på data från 232 entreprenörer (platschefer, arbetschefer etc.) verksamma i Sverige. Enkätstudien har även inkluderat en objektiv rankningsmetod baserat på AHP-metoden (Analytical Hierarchy Process) för att kvantifiera vilken av väderparametrarna temperatur, vind, nederbörd, som anses vara viktigast för produktiviteten under stombyggnandet. Resultaten från de fem artiklarna har sedan använts för att besvara de fyra forskningsfrågorna.

RESULTAT

Simulering som verktyg för systematisk analys av produktionsupplägg med fokus på utnyttjande av arbetskraft och kranar (FF1)

För att besvara FF1 så har stombyggnadsprocessen kartlagts i flera olika fältstudieprojekt. Alla fältstudieprojekt var likartade vad gäller byggteknisk lösning, nämligen en blandning av prefabricerade element och platsgjutning vilket är en vanlig lösning för stommar i flerbostadshus. Fokus har varit på att beskriva processen på en relativt detaljerad nivå där även användningen av resurser framgår. Dessa beskrivningar har sedan sammanfogats till en generell beskrivning som sedan legat till grund för att utveckla en simuleringsmodell av stombyggnadsprocessen (figur 1).

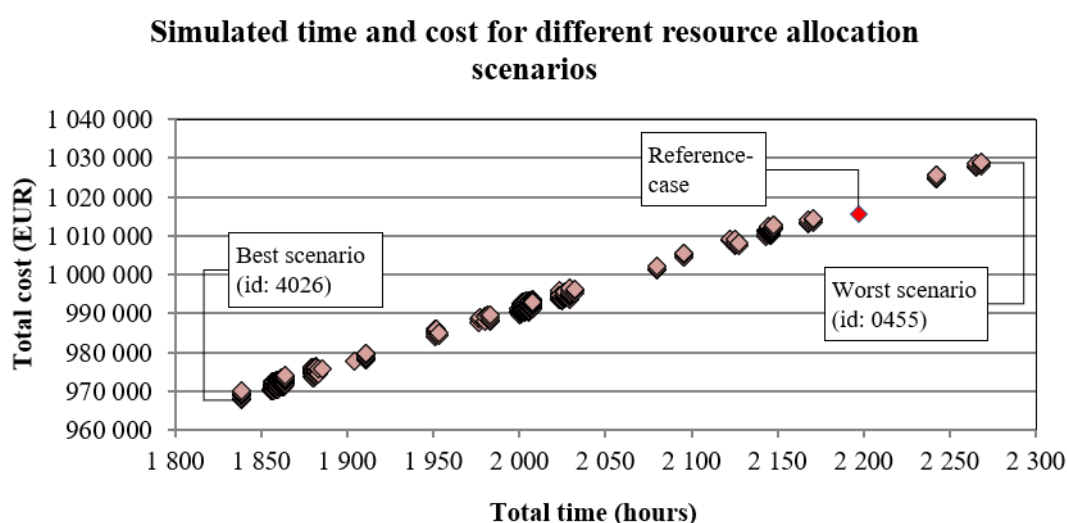


Figur 1. Översikt av DHS-modell för stombyggnadsprocess (Larsson, 2021).

Simuleringsmodellen innehåller en processbeskrivning av en komplett produktionscykel för en betongstomme. Modellen hanterar indelning av produktionscykeln i olika produktionsetapper, tex att flera huskroppar byggs parallellt, eller att en stomme delas in i flera gjutetapper.

Beskrivningen av produktionscykeln omfattar både primära och temporära arbeten. Primära arbeten avser i huvudsak form-, armering-, och betongarbeten, men också montage av prefabricerade komponenter samt förberedelser av installationer. Temporära arbeten avser främst hantering av material och utrustning för formbyggnad inom och mellan etapper. Eftersom simuleringsmodellen hanterar en detaljerad beskrivning av ingående arbetsmoment så blir det möjligt att analysera hur resurser används på ett mer realistiskt sätt än vad som är fallet vid traditionell planering.

Simuleringsmodellen fungerar som så att när simuleringen startar så exekveras arbeten i den ordningsföljd som bestäms av processbeskrivningen. Under simuleringen håller modellen reda på vilka resurser som utför arbeten och vilka som finns tillgängliga. När ett arbetsmoment ska påbörjas kontrolleras om nödvändiga resurser finns tillgängliga. Om det saknas en eller flera resurser uppstår väntetid i modellen. Dessa väntetider sparas i modellen och kan användas för att identifiera var i produktionscykeln som det uppstår stillestånd på grund av resursbrist samt vilka resurser som orsakar dessa stillestånd. Detta gör det möjligt att analysera hur utnyttjande av resurser påverkar stilleståndstider för en planerad produktionscykel. Modellen simulerar även tid och kostnad för stommen och den gör det också möjligt att automatisera analys av olika produktionsupplägg. Som exempel så användes modellen för att analysera mer än 4000 olika sätt att allokerar resurser på under stombyggnadsprocessen, se figur 2. Simuleringarna visade bla. att genom att införa en mer flexibel indelning av arbetsuppgifter erhöles flera positiva effekter på produktion totalt sett. Totala stillestånd minskade med 69%, resursutnyttjandet av arbetskraft ökade med 13%, byggkostnad minskade med 5%, medan byggtiden minskade med 15% jämfört med det ursprungliga produktionsupplägget.



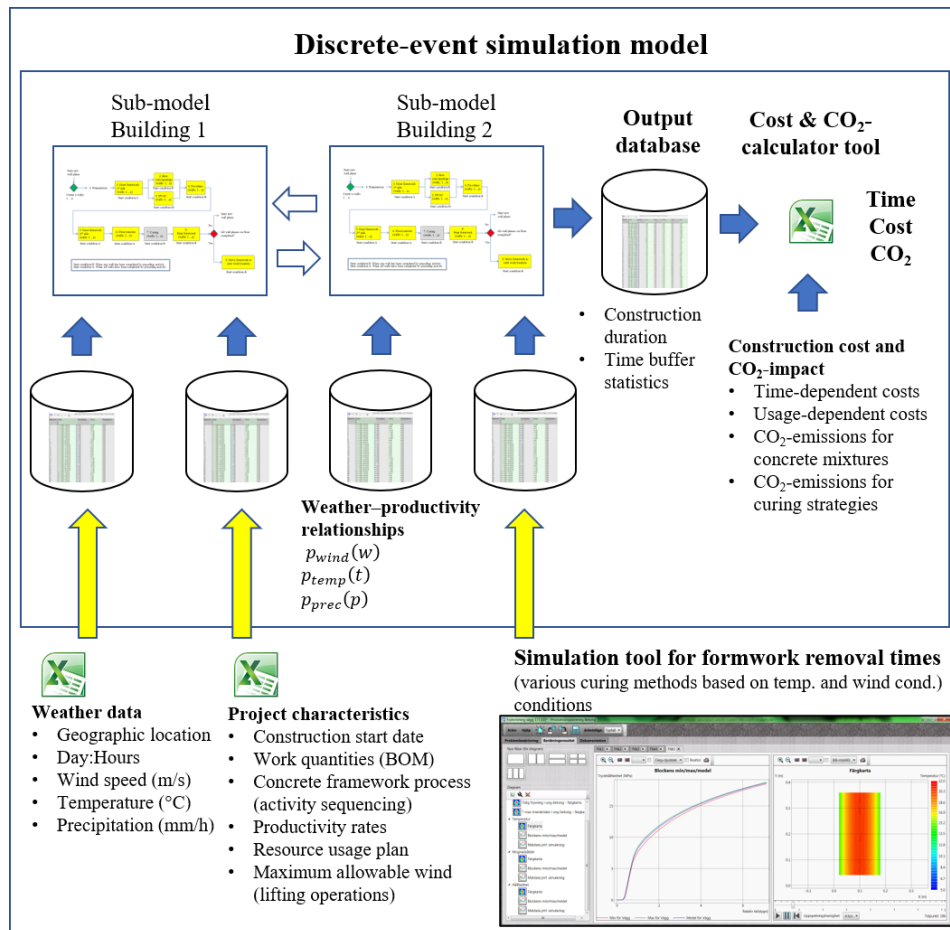
Figur 2. Simulerad tid-kostnad för stommen vid olika kombinationer av resursanvändning (Larsson och Rudberg, 2020).

Simulering som verktyg för systematisk analys av vädrets inverkan på stomdriften (FF2 och FF3)

För att besvara FF2 utvecklades en diskret händelsestyrd simuleringsmodell (DHS-modell) där inverkan av väder på stomdriften kan studeras, se figur 3. DHS-modellen innehåller en detaljerad beskrivning av stombyggnadsprocessen och de resurser som finns tillgängliga under projektet.

Kopplat till modellen finns också fyra databaser som hanterar olika typer av indata som behövs under simuleringen för att beakta inverkan av väderförhållanden.

Den första databasen innehåller timvisa uppgifter om temperatur, vind, och nederbörd som är representativa för en viss ort. Den andra databasen innehåller allmänna uppgifter om projektet som användaren matar in före start av simuleringen, t.ex. etappindelning av stommen, antal våningar, produktivetsdata, och tillgängliga resurser. Den tredje databasen innehåller matematiska samband som beskriver hur produktiviteten påverkas av temperatur, vindhastighet, nederbörd. En väderfaktor används sedan för att beräkna den sammanlagda påverkan av aktuell temperatur, vind, och nederbörd på produktiviteten för olika arbetsmoment. Mer detaljer om principerna för att beräkna inverkan av väder på arbetsproduktiviteten och hur detta hanteras i modellen finns beskrivet i Larsson & Rudberg (2019). Den fjärde databasen innehåller formrivningstider som är simulerade mha programmet Produktions Planering Betong (PPB). Formrivningstider omfattar både vägg- och bjälklagsform för olika scenarios gällande omgivande klimat, betongtyp, och härdningsmetod. DHS-modellen har försetts med algoritmer som vid varje gjuttillfälle under simuleringen automatiskt bestämmer formrivningstiden utifrån aktuella väderförhållanden. Metodiken för att integrera inverkan av väder på formrivningstider utvecklades och demonstrerades initialt i Larsson (2019) genom att fokusera på väggjutningar.



Figur 3. Översikt av DHS-modell för simulering av väderpåverkan under stomskedet (Larsson, 2020).

DHS-modellen simulerar tiden det tar att bygga stommen under påverkan av väder. Modellen genererar även data i form av tidsbuffertar som beskriver hur väl en vald kombination av betong

och härdningsmetod är anpassad till produktionscykeln då stommen byggs på en viss plats under en viss period. I ett separat Excel-program som använder simulerad byggtid från DHS-modellen som indata kan även kostnaden för stommen beräknas (Larsson, 2020). I Excel-verktyget är det även möjligt att beräkna klimatpåverkan utifrån val av betong och härdningsmetod. På detta vis blir det möjligt att analysera hur olika väderförhållanden påverkar stomdriftens byggtid, kostnad, och klimatpåverkan.

För att besvara FF3 så har modellen i figur 3 använts för att simulera ett antal scenarios där stommen byggs på tre olika geografiska platser under olika årstider, och där klimatförbättrad betong används i varierad omfattning. Mer detaljer om hur simuleringarna gjordes och resultat från varje enskilt fall är beskrivet i Larsson (2020). I tabell 1 visas en övergripande sammanställning av max- och min-värden för stommens byggtid, kostnad, och CO₂-utsläpp. Alla värden jämför med ett referensfall där stommen simuleras utan inverkan av väder. För referensfallet så är alla värden för tid, kostnad, och CO₂ normaliserade till ett. Som framgår av tabell 1 så ökar byggtiden för stommen med 8-42% då väder beaktas. Variationen beror på var stommen byggs och under vilken årstid. Störst är ökningen om stommen byggs under vintersäsongen. Resultatet påverkas också av i vilken utsträckning som klimatförbättrad betong används. Som en följd av förlängd byggtid så ökar kostnaden för stommen med 8-29%. Denna kostnadsökning beror i huvudsak på högre rörliga kostnader på grund av en längre byggtid. Genom att använda klimatförbättrad betong så uppnås minskning av CO₂-utsläpp med upp till 23% jämfört med referensfallet där konventionell betong används. Utfallet är dock beroende av årstid och plats för byggandet. Simuleringarna visar även på vikten av att välja en härdningsmetod som skyddar den klimatförbättrade betongen, speciellt mot tidig frysning.

Tabell 1. Simulerade resultat av olika väder på tid, kostnad, CO₂, och tidsbuffert (Larsson, 2020)

Location and season	Time		Cost		CO ₂		BuffTime (days)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Malmö								
Autumn	1.08	1.20	1.08	1.13	0.77	1.01	0.8	6.7
Winter	1.29	1.41	1.20	1.28	0.86	1.09	7.4	8.9
Stockholm								
Autumn	1.16	1.27	1.12	1.18	0.82	1.06	0.2	7.0
Winter	1.42	1.42	1.27	1.29	0.86	1.09	7.8	8.8
Umeå								
Autumn	1.20	1.24	1.15	1.18	0.86	1.08	6.5	7.2
Winter	1.42	1.42	1.28	1.29	1.02	1.09	6.9	7.5

Entreprenörers värdering av hur väder påverkar arbetsproduktiviteten för betong-relaterade arbeten (FF4)

För att besvara FF4 så genomfördes en enkätstudie som riktades till entreprenörer verksamma i Sverige. Enkätens huvudsakliga fokus var att undersöka vädrets inverkan på produktiviteten vid byggande av betongstommar i flerbostadshus. Totalt besvarades enkätstudien av 232 personer, där majoriteten var platschefer eller arbetschefer. Mer än 70% av de svarande hade mer än 10 års erfarenhet av att uppföra stommar av betong. Som en del i enkätstudien användes AHP (Saaty, 1990) som är en metod för att på ett objektivt sätt väga samman värderingar från olika experter. Metoden går ut på att personer får rangordna betydelsen av olika faktorer, t.ex. temperaturens

betydelse för produktiviteten jämfört med vind osv. Mer information om hur enkätstudien utformades finns beskrivet i Larsson och Rudberg (2021).

Resultatet av de parvisa jämförelserna visar på att nederbörd (regn eller snö) anses ha störst betydelse för produktiviteten, därefter vind och sist temperatur. Regn rankas vara 1.27 gånger viktigare än temperatur under sommaren medan snö rankas vara 1.38 viktigare än temperatur under vintern. Vind rankas vara 1.07 gånger viktigare än temperatur både under sommaren och vintern. Det är dock viktigt att påpeka att jämförelserna är gjorda för specifika väderförhållanden och kan därför inte generaliseras. För att ge en mer heltäckande bild behöver samma procedur upprepas på fler uppsättningar av väderförhållanden.

De parvisa jämförelserna säger dock ingenting om hur mycket produktiviteten påverkas av en viss vädertyp. Därför innehöll enkäten även frågor där de svarande fick kvantifiera hur mycket produktiviteten hos olika arbetsmoment påverkades av en viss vädertyp. Resultat från skattning av produktiviteten för olika vädertyper finns redovisade i Larsson och Rudberg (2021). Generellt visar resultaten tydligt på att vädret kan ha stor betydelse på produktiviteten för enskilda arbetsmoment. Hur mycket vädret påverkar beror dock på flera underliggande faktorer, tex. vilken typ av arbete som avses, typ av väderparameter (tex regn eller temperatur), samt intensiteten hos väderparametern (tex lätt eller kraftigt regn).

SLUTSATSER

- Diskret händelsestyrd simulering är ett kraftfullt verktyg som kan användas för att analysera byggrelaterade produktionssystem. Metoden möjliggör att analysera ett system i en kontrollerad miljö där olika produktionsmetoder eller organisatoriska förändringar kan studeras i förväg innan de implementeras i faktiska byggprojekt. Vidare så kan olika faktorer påverkan på produktionssystemet simuleras på ett strukturerat sätt.
- För att studera hur olika resurser används mha en DHS-modell krävs först att stombyggnadsprocessen beskrivs i detalj. Detta har i sig ett värde då det ger ett bra underlag för att diskutera förbättringar men även då inbyggda ”gömda” problem kan synliggöras.
- Projektet har visat på hur DHS kan användas för att identifiera och analysera flaskhalsar under stombyggnadsskedet orsakade av att kran och arbetskraft ej är tillgängliga då de behövs. Studien pekar också på värdet av att kombinera tid, kostnad, väntetid, och utnyttjandegrad när olika produktionsupplägg ska analyseras. På detta vis kan suboptimeringar undvikas när olika lösningar utvärderas. Studien visar också på potentialen av att låta DHS-modellen automatisera analys av olika sätt att använda kritiska resurser i syfte att uppnå förbättringar avseende tid och kostnad för stommen.
- Väder har stor betydelse för produktiviteten under stomskedet. Men då vädret påverkar många olika delar av produktionssystemet blir beskrivning och analys relativt komplext. Studien har därför visat hur inverkan av väder på både arbetsprocesser och betonghårdning kan modelleras i en DHS-modell.
- Simuleringar med DHS-modellen indikerar att byggtiden för stommen ökar med 8-42% jämfört med då vädret inte beaktas. Variationen i utfallet beror på var stommen byggs och under vilken årstid. Studien visar också på att klimatförbättrad betong har stor potential att minska stommens klimatpåverkan. Val av hårdningsmetod som är anpassad till de väderförhållanden som råder på en specifik plats och årstid blir dock än viktigare då klimatförbättrad betong används. Resultaten belyser också vikten av att beakta hur tillkommande arbeten som en hårdningsmetod kräver påverkar produktionscyklerna.

- Simulerade tidsbuffertar kan också användas för att analysera hur väl en specifik kombination av betong och härdningsmetod är anpassad till en viss produktionscykel. Tidsbuffertar ger en indikation på i vilken utsträckning det är möjligt att använda betong med ännu lägre klimatpåverkan utan att förlänga produktionscykeln.
- Resultat från enkätstudien riktad till entreprenörer visar också på att vädret kan ha stor påverkan på produktiviteten även hos enskilda arbetsmoment. Detta beror dock på vilken typ av arbete som avses, typ av väderparameter (temperatur, snö etc.), samt intensiteten hos väderparametern, tex lätt eller kraftigt regn.

VIDARE FORSKNING

Simulerade resultat som presenterats i denna forskning behöver verifieras genom ytterligare insamling av data från stombyggnadsprocessen. Insamling av data bör fokusera på produktivitetsdata för stomarbeten samt data som beskriver utnyttjande av resurser. För att möjliga detta bör även framtida forskning undersöka metoder för en mer automatiserad insamling av data i fält, t.ex. med hjälp av digitala hjälpmedel och sensorer.

Mer forskning behövs även för att verifiera eller revidera existerande samband mellan produktivitet och väder. Denna forskning pekar på att dessa samband bör göras mer specifikt anpassade till olika typer av arbetsmoment. Detta kommer kräva insamling av mer data vilket återigen aktualiserar behov av effektiva metoder för datainsamling. Ett alternativ till detta kan vara att samla in data via strukturerade enkätstudier vilket använts i detta projekt. Vidare forskning bör även inriktas mot verifiering av fler kombinationer av klimatförbättrad betong och härdningsåtgärder i syfte att ytterligare minska klimatpåverkan i stombyggandet. Detta bör även inkludera konsekvenser av olika härdningsåtgärder på produktionscykler.

Vidare forskning bör även inriktas mot hur DHS-metodiken kan göras mer generell och inkludera fler påverkansfaktorer, t.ex. osäkerhet i materialleveranser. Det behövs också mer forskning om hur DHS kan användas för olika ändamål, tex för strategisk och operationell planering.

REFERENSER

- Larsson, R. (2019), *An Integrated Simulation-Based Methodology for Considering Weather Effects on Formwork Removal Times*, Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering, Springer International Publishing.
- Larsson, R. och Rudberg, M. (2019), *Impact of Weather Conditions on in Situ Concrete Wall Operations Using a Simulation-Based Approach*, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 145, No. 7.
- Larsson, R. (2020), *An integrated simulation-based method for considering weather effects on concrete work tasks' productivity and concrete curing*, Research Report TVBK-3075, Lund University, Sweden.
- Larsson, R. och Rudberg, M. (2020), *A simulation-based approach for systematic analysis of workflow during the construction of in-situ concrete frames*, Research Report TVBK-3074, Lund University, Sweden.
- Larsson, R. och Rudberg, M. (2021), *Effects of weather conditions on concrete work task productivity – a questionnaire survey*, Construction Innovation, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/CI-02-2021-0012>.
- Larsson, R. (2021). *Modelling and simulation of factors influencing on-site construction of concrete frameworks – studying the effects of resource allocation, weather conditions, and climate-improved concrete*, PhD Dissertation, TVBK-21/1056-SE, Lund University, Sweden.
- Saaty, T.L. (1990), *How to make a decision: The Analytic Hierachy Process*, European Journal of Operational Research, Vol. 48, No. 1.