

PRODUKTIONSTEKNIK FÖR HÖGA BYGGNADER I BETONG



Anders Lindvall

2019-11-08

FÖRORD

Det finns ett ökat intresse för byggnation av höga byggnader i Sverige. Internationellt har däremot höga byggnader (höjd överstigande 100 m) uppförts under lång tid, där det fram till slutet av 1800-talet rörde det sig främst om monumentalbyggnader, t.ex. religiösa byggnader. Fram till 1960-talet var byggnationen av höga byggnader rätt blygsam men från mitten av 1960-talet utvecklades byggtekniken, vilket möjliggjorde att både fler och allt högre höga byggnader har kunnat uppföras. De vanligaste byggnadsmaterialen i höga byggnader är betong och stål, där detta projekt har varit inriktat på höga byggnader uppförda i betong.

I projektet har en sammanställning av tillgänglig kunskap gjorts kring hur betongkonstruktioner i höga byggnader kan utföras (med höjder överstigande 100 m). Fokus i projektet har varit på frågor rörande material, produktionsteknik samt materiallogistik. Det görs också en kort genomgång av strukturell uppbyggnad av höga byggnader. Projektet har främst genomförts som en litteraturstudie kombinerat med en genomgång av erfarenheter från två med höga byggnader.

Projektet har genomförts vid det centrala laboratoriet (C-Lab) hos Thomas Concrete Group i Göteborg. Det praktiska arbetet har genomförts av Anders Lindvall vid C-Lab tillsammans med en styrgrupp bestående av:

- Pär Åhman, Sveriges Byggindustrier (som också har fungerat som projektsamordnare).
- Jonas Magnusson, NCC.
- Joakim Dahlgren, Perssons Hyrmaskiner.
- Hans Hedlund, Skanska.
- Mats Karlsson, Thomas Betong.
- Rolf Jonsson, Wästbygg.

I referensgruppen till projektet har förutom styrgruppen också ledamöter i FoU-Väst ingått.

Projektet har finansierats genom bidrag från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).

Ett tack riktas till projektets finansiär samt deltagare i styr- och referensgrupperna.

Göteborg 2019-11-08

Anders Lindvall, projektledare
Thomas Concrete Group, C-Lab

SAMMANFATTNING

Bakgrunden till detta projekt är det finns ett ökat intresse för byggnation av höga byggnader i Sverige. I projektet görs en sammanställning av tillgänglig kunskap kring material, produktionsteknik och materiallogistik vid uppförande av höga byggnader i betong (med höjder överstigande 100 m). Det görs också en kort sammanställning av strukturella system i höga byggnader. Projektet har huvudsakligen genomförts som en litteraturstudie kombinerat med en genomgång av två projekt (The Shard i London och Turning Torso i Malmö).

Rapporten inleds med en kort historik kring (modern) armerad betong (vilket har varit en förutsättning för att kunna upphöra höga byggnader) och byggnation av höga byggnader i betong. (Modern) armerad betong är något som utvecklades och patenterades i mitten av 1800-talet där sedan en kontinuerlig utveckling har skett fram tills idag. Fram till slutet av 1800-talet var höga byggnader främst monumentalbyggnader, t.ex. kyrkor, men från slutet av 1880-talet började även höga byggnader med andra användningsområden (t.ex. kontor eller bostäder) att uppföras. Sedan slutet av 1800-talet har det också skett en utveckling av strukturella system, material och produktionsteknik vilket har möjliggjort att allt högre byggnader har kunnat uppföras. Den första egentliga höga byggnaden i betong var ”The Ingalls Building” i Cincinnati i Ohio (15 våningar och 64 m hög) som uppfördes 1903. Den högsta höga byggnaden idag är Burj Khalifa i Dubai (164 våningar och 828 m hög) som uppfördes 2004-2009.

Huvuddelen av rapporten behandlar produktionsteknik för höga hus, där fokus är på materialfrågor (betong) och produktionsteknik samt hur materiallogistik till/från och på arbetsplatsen kan lösas.

- Vad gäller materialfrågor har det under de senaste 40 åren skett en omfattande utveckling av materialet betong, t.ex. har betong med allt högre hållfasthet och styvhet samt god pumpbarhet utvecklats. Med moderna tillsatsmedel och tillsatsmaterial finns det också att möjlighet att ”skraddarsy” betongen för att uppnå lämpliga egenskaper, t.ex. med avseende på hållfasthet och/eller pumpbarhet. Detta har i sin tur medfört att allt högre byggnader med stomme i betong har kunnat uppföras. I rapporten ges exempel på hur val av betongsammansättning kan göras.
- Vad gäller produktionsteknik har det skett en omfattande utveckling inom exempelvis formsystem där moderna formsystem har medfört ett allt mer effektivt byggande. Vilken typ av formsystem som används beror exempelvis på utformningen av det bärande systemet och höjden på byggnaden samt valda betongkvaliteter. I rapporten ges exempel på hur optimala val av formsystem kan göras.
- Vad gäller materiallogistik till/från och på arbetsplatsen är denna av stor vikt för att få ett effektivt byggande. Många gånger uppförs höga byggnader i stadskärnor vilket ställer höga krav på materialhanteringen. Exempelvis är det normalt begränsat med plats för lagring av material. Därför är det av vikt att planera materiallogistiken i förväg där exempelvis transporter av material bör göras när materialen behövs i byggprocessen. Transporter av material på arbetsplatsen sker normalt med kran och genom pumpning (för betong). Dessa transporter är ofta en trång sektion i tidsplaner och behöver därför också planeras i förväg. Det bör också planeras för väderberoende transporter, t.ex. genom att använda för en viss del av materialtransporter samt även ha mindre lager av material på arbetsställen uppe i byggnaden. Vid pumpning av betong kräver detta planering i förväg (vilket inte är något unikt för höga byggnader). För att lyckas med pumpning till höga höjder behöver rätt pumpsteknik användas kombinerat med lämpliga betonger. Dessutom bör provpumpningar göras innan de verkliga pumpningarna genomförs.

I rapporten ges det också exempel på hur produktionstekniken har lösts i några projekt med höga byggnader. De byggnader som tas upp är Burj Khalifa (Dubai), Petronas Towers (Malyasia, The Shard (Storbritannien), Federation Tower (Ryssland) samt The Capital Market Authority (Saudiarabien). Gemensamt för dessa projekt är att de har genomförts utan några större problem tack vare noggrann planering för byggstart.

Två fallstudier presenteras i rapporten, The Shard i London och Turning Torso i Malmö, där lite mer ingående beskrivningar görs av produktionstekniken.

Rapporten avslutas med en diskussion och rekommendationer kring produktionsteknik för höga byggnader i betongen. Slutligen ges också förslag på fortsatta studier.

INNEHÅLL

INTRODUKTION	1
BAKGRUND	1
SYFTE	2
AVGRÄNSNINGAR.....	2
BYGGNATION AV HÖGA HUS	4
KORT HISTORIK	4
<i>Utveckling av (modern) armerad betong</i>	4
<i>De första skyskraporna</i>	6
<i>Utveckling av skyskrapor</i>	8
<i>Tekniska innovationer</i>	9
<i>Utveckling av teknik för att uppföra höga byggnader – exempel på projekt</i>	11
NULÄGE.....	14
KORT GENOMGÅNG AV STRUKTURELL UPPBYGGNAD	15
PRODUKTIONSTEKNIK FÖR HÖGA HUS – LITTERATURSTUDIE	20
SÄKERHET PÅ ARBETSPLATSEN	20
MATERIALFRÅGOR	20
<i>Allmänt</i>	20
<i>Rekommendations för val av betongsammansättning</i>	21
<i>Exempel på val betongkvalitet i projekt</i>	24
PRODUKTIONSTEKNIK	25
<i>Allmänt</i>	25
<i>Val av formsystem</i>	27
MATERIALLOGISTIK PÅ ARBETSPLATSEN	30
<i>Allmänt</i>	30
<i>Pumpning av betong</i>	31
PROJEKT MED HÖGA BYGGNADER.....	35
<i>Burj Khalifa</i>	36
Materialfrågor.....	36
Materiallogistik på arbetsplatsen.....	37
<i>Petronas Towers</i>	37
Materialfrågor.....	38
Produktionsteknik	38
<i>The Shard</i>	39
<i>Federation Tower (Ryssland)</i>	39
<i>The Capital Market Authority (Saudiarabien)</i>	39
PRODUKTIONSTEKNIK FÖR HÖGA HUS – FALLSTUDIER	41
THE SHARD.....	41
TURNING TORSO.....	44
DISKUSSION	48
ALLMÄNT	48
MATERIALFRÅGOR.....	49
PRODUKTIONSTEKNIK	50
MATERIALLOGISTIK PÅ ARBETSPLATSEN	51

REKOMMENDATIONER	53
ALLMÄNNA FRÅGOR.....	53
MATERIALFRÅGOR.....	53
PRODUKTIONSTEKNIK.....	54
MATERIALLOGISTIK TILL OCH FRÅN SAMT PÅ ARBETSPLATSEN.....	55
FÖRSLAG PÅ FORTSATTAS STUDIER	56
LITTERATURFÖRTECKNING	57

INTRODUKTION

Bakgrund

Bakgrunden till detta projekt är att det finns ett ökat intresse för byggnation av höga byggnader i Sverige. Internationellt har höga byggnader (höjd överstigande 100 m) uppförts under lång tid, där det fram till slutet av 1800-talet rörde det sig främst om monumentalbyggnader, t.ex. religiösa byggnader. Det bärande systemet i dessa byggnader bestod av bärande ytterväggar, vilket också begränsade hur höga byggnaderna kunde byggas. Under slutet av 1800-talet började en ny typ av höga byggnader uppföras, betecknade ”skyskrapor”¹, där det bärande systemet bestod av en stomme av järn eller stål. Med en bärande stomme gick det att uppföra betydligt högre byggnader än med enbart bärande ytterväggar. Den första egentliga ”skyskrapan”, där den bärande stommen bestod av stål, var ”Home Insurance Building” (42 m hög) som uppfördes 1884 i Chicago (och revs 1931). En del av de tidigaste skyskraporna byggda före 1900 finns fortfarande, där ett exempel är ”Reliance Building” i Chicago (61 m hög), som uppfördes 1890-94. I dagsläget finns det minst 4900 byggnader i världen som har en höjd som överstiger 150 m (enligt The Skyscraper Center²). Som jämförelse kan nämnas att den högsta byggnaden i Sverige just nu är Turning Torso som är 190 m hög och har 54 våningar. Under de senaste 20 åren har även ”superhöga” byggnader börjat uppföras, där höjden överstiger 300 m.

Det finns ingen tydlig definition på vad en hög byggnad är (enligt Council on Tall Buildings and Urban Habitat, CTBUH³). CTBUH nämner att som en indikation kan en byggnad anses som ”hög” om antalet våningar överstiger 14 (eller att höjden överstiger 50 m). Enligt CTBUH finns det tre olika kriterier en byggnad måste uppfylla för att betecknas som hög:

- **Höjd relativt omgivande byggnader.** Som exempel ges en 14 våningar hög byggnad; som anses vara en hög byggnad om omgivande byggnader endast är ett fåtal våningar höga medan den anses vara en låg byggnad om omgivande byggnader är höga.
- **Proportioner** (förhållande mellan höjd och bredd). Det finns flera byggnader som inte är speciellt höga, men som har begränsad bredd (slanka) att de ger ett intryck av att vara höga (speciellt om omgivande bebyggelse är låg). Omvänt finns det byggnader som är höga men samtidigt så pass breda att de inte upplevs som höga.
- **Byggteknik**, där en byggnad kan anses vara hög om en speciell byggteknik används (som normalt används till höga byggnader). Ett exempel på detta är om byggnaden är uppförd med en inre bärande stomme.

I detta projekt har vi valt att definiera en byggnad som hög om dess höjd överstiger 100 m.

Fokus i detta projekt är på höga byggnader där stommen är utförd i betong. Traditionellt har dock stommen i höga byggnader huvudsakligen uppförts i stål, men sedan 1970-talet har det blivit allt vanligare att stommen istället uppförs i betong eller kombinationer av betong och stål. Som ett exempel kan nämnas att av de högsta byggnaderna i världen har fjorton byggnader en stomme av en kombination av betong och stål, sex byggnader en stomme av enbart stål och fyra byggnader en stomme av enbart betong, se Baker (2010). Av de tio högsta byggnaderna som uppfördes 2008, bestod stommen i nio av dem av antingen en kombination av betong och stål eller enbart stål, se Baker (2010). Det finns flera förklaringar till att betong blir vanligare i höga byggnader, se Ohno m.fl. (2004) & Aldred (2010):

- **Byggnadsmaterialen har utvecklats**, där det har blivit möjligt att tillverka både betong och armering med allt högre hållfastheter. Detta har i sin tur möjliggjort att

¹ En ”skyskrapa” kan definieras som ”en kontinuerligt beboeligt fristående höghus som är betydligt högre än omgivande byggnader”. Hämtat från Wikipedias webbplats: sv.wikipedia.org/wiki/Skyskrapa (hämtat 2019-01-16).

² Hämtat från The Skyscraper Center’s webbplats: <http://skyscrapercenter.com/> (hämtat 2019-01-03).

³ Hämtat från CTBUH’s webbplats: www.ctbuh.org (hämtat 2019-01-03).

konstruktionselement med mindre tvärsnitt kan byggas, vilket medför att både volymen betong och mängden armering kan minskas (och på så sätt minskas även egenvikten).

- **Produktionsmetoderna har utvecklats**, t.ex. vad gäller armering och formbyggnad, vilket har medfört att produktionshastigheten har kunnat snabbas på. Exempel på sådant som utvecklats är tekniker för glid- och klätterformar och metoder för prefabricering av armeringsdetaljer.
- **Förbättrade beräkningsmetoder används**, som möjliggör bättre utnyttjande av konstruktionsmaterial (vilket också medför att byggnadens egenvikt minskas).
- **Kvaliteten på utförande har förbättrats**, t.ex. genom en högre grad prefabricering.
- **Minskade byggkostnader**, när betong används jämfört med andra byggnadsmaterial.

Utformningen av det bärande systemet i en hög byggnad avgörs av vilken användning byggnaden är avsedd för, t.ex. bostäder eller andra verksamheter. Speciellt vid byggnation av bostäder är det viktigt att byggnaden är utformad på ett sådant sätt att vibrationer och svängningar blir små, för att undvika att eventuellt obehag uppstår för de boende. För att uppfylla dessa egenskaper är det lämpligt att ha en bärande stomme i betong, eftersom materialet både har en stor styvhet och massa vilket ger en bra dämpning av rörelser. Ytterligare fördelar är att betong motstår brand bättre än många andra material, t.ex. stål, och får långa livslängder (förutsatt att lämpliga betongkvaliteter och tillräckligt stort minsta täckande betongskikt används).

Syfte

Projektet syftar till att sammanställa tillgänglig kunskap kring hur betongkonstruktioner i höga byggnader (med höjder överstigande 100 m) kan utföras. Fokus i projektet kommer att vara på materialfrågor, produktionsteknik och materiallogistiken på arbetsplatsen.

Projektet har främst genomförts som en litteraturstudie kombinerat med genomgång av erfarenheter från några projekt med höga byggnader.

Avgränsningar

I litteraturen finns det ett flertal anvisningar kring den **konstruktiva utformningen av höga byggnader** och detta kommer därför **inte att tas upp i projektet**. Fokus i projekt är istället på **materialfrågor och hur produktion och materiallogistik på arbetsplatsen** kan lösas.

Följande områden har behandlats i projektet:

- **Allmänna frågor.**
 - Historik kring byggnation av höga byggnader.
 - Kort genomgång av strukturell utformning.
- **Materialfrågor.**
 - Sammansättning hos betongen för att uppnå lämpliga egenskaper (t.ex. snabbt hårdnande, låg vikt, god pumpbarhet, hög hållfasthet).
 - Genomgång av andra egenskaper hos betongen (t.ex. färska egenskaper, mekaniska egenskaper, beständighet, uttorkning). Speciellt fokus kommer att vara på betong med hög hållfasthet.
- **Produktion och materiallogistik på arbetsplatsen.**
 - Säkerhet på arbetsplatsen.
 - Formar (system, material), där olika typer av formar tas upp. Speciellt fokus har varit på formar för gjutning av den centrala kärnan.
 - Materiallogistik till och från samt på arbetsplatsen.
 - Transporter till och från arbetsplatsen, som normalt sköt med lastbil.
 - Transporter av färsk betong, som huvudsakligen transporters genom pumpning men det kan också bli aktuellt med bask som lyfts till arbetsstället.
 - Övriga material, som lyfts till arbetsstället.
 - Hänsyn till begränsat utrymme på byggarbetsplatsen.

- Hänsyn till pressade tidplaner.

BYGGNATION AV HÖGA HUS

Kort historik

En kort historisk genomgång av armerad betong och höga byggnader görs i texten nedan, till stor del baserad Ali (2001) och fib (2014).

Utveckling av (modern) armerad betong

(Modern) armerad betong är en förutsättning för att kunna uppföra höga byggnader i betong.

Modern armerad betong är en relativt ny företeelse som har funnits sedan mitten av 1800-talet.

Några viktiga tidpunkter i utvecklingen av modern armerad betong är:

1865, då Francois Coignet fick patent på armering ingjuten i betongplattor anslutna till väggar.

1867, då Joseph Monier fick patent på trädgårdskrukor och badkar (!) i armerad betong. 1877 fick Monier patent på balkar och pelare i armerad betong. Dock var det tveksamt om Monier verkligen förstod den fulla potentialen av sin uppfinning. Monier använde armering i första hand för att öka den inre sammanhållningen hos betongen än att öka betongens draghållfasthet.

1867, då bland andra William E. Ward noterade att stålverktyg som användes för vid uppförande av en kaj i betong var svåra att göra rena. Det visade sig också att betongen hade så god vidhäftning till stålet att brottet vid rengöring skedde i bruket och inte vid stålytan. Ward drog på detta slutsatser kring hur två olika material kan samverka. Ward sammanfattade sina slutsatser med: "Användning av både järn och betong kan ökas dramatiskt till byggnation genom en lämplig kombination av deras speciella fysiska egenskaper, betydligt mer än om materialen skulle användas var för sig i samma mängd"⁴.

1871-1876 då William E. Ward lät uppföra den första byggnaden i armerad betong (benämnd William E. Ward House, se Figur 1) där betong och stål kombinerades. Byggnaden var belägen i New York. Genom att använda armerade betong uppnåddes en betydligt högre bärförmåga än vad som egentligen behövdes för byggnaden. Ward lät också kontrollera bärförmågan i den färdiga byggnaden där en 26 tons last placerade i mitten av ett bjälklag (5,5 m spännvidd). Denna last låg på under vintern och nedböjningen mättes upp till endast 0,3 mm.

⁴ The utility of both iron and béton could be greatly increased for building purposes through a properly adjusted combination of their special physical properties, and very much greater efficiency be reached through their combination than could possibly be realized in the exclusive use of either material separately, in the same or in equal quantity".



Figur 1. William E. Ward House, som är den första byggnaden uppförd i modern armerad betong. Foto från Wikipedia.

1877, då Thaddeus Hyatt utförde experiment på armerad betong. Experimenten möjliggjorde att förståelsen för hur armerad betong fungerar förbättrades. I tidigare byggprojekt med armerad betong fick byggarna prova sig fram, där det ibland inte fungerade och konstruktionen till och med kunde rasa. Förutom en förbättrad allmän förståelse för armerad betong också att både värmeutvidgning och deformation under belastning i princip är densamma för betong och stål. Resultaten från experimenten finns publicerade i "An Account of Some Experiments with Portland-Cement-Concrete Combined with Iron as a Building Material, with Reference to Economy of Metal in Construction and for Security against Fire in the Making of Roofs, Floors, and Walking Surfaces".

1879, när den franska ingenjören Francois Hennebique uppförde en byggnad i armerad betong där en vidareutveckling av Moniers teorier användes. I byggnaden användes bland annat armerade balkar där armeringen i form av järnstänger var placerade i dragzonen. Eftersom balkarna hade låg skjuvhållfasthet la Hennebique in vertikala plattor och u-formade byglar i balkarna för att öka hållfastheten. Under de efterföljande tolv åren genomförde Hennebique hemliga experiment kring hur armering i pelare, balkar och plattor kan utformas på mest effektivt sätt. Hennebique fick sitt första patent på armerad betong 1892.

1884, när den första kommersiella användningen av armerad betong gjordes i Tyskland, där byggentreprenörerna Freitag & Heidschuch samt Martenstein & Josseaux införfärdade rättigheterna att använda Moniers patent i praktiskt byggande. Under de efterföljande åren gjordes ytterligare experiment kring armerad betong, där bland annat bärförmåga under last och brandbeständighet samt beständighet mot korrosion undersöktes. Resultaten från dessa experiment publicerades 1887 med titeln "Das System Monier". Parallellt med dessa experiment togs också beräkningsmodeller för att bedöma bärförmåga hos Moniers system fram av Preussens statsarkitekt

K. Koenen. Dessa modeller publicerades i ett antal artiklar i *Centralblatt der Bauverwaltung* 1886. Den kunskap som Wayss och Koenen hade tagit fram utvecklades vidare till en praktiskt fungerande teknologi som gick under namnet "Monierbau" i Tyskland och "Monier construction" i USA. Teknologin blev snabbt anamrad och 1890 uppfördes huvuddelen armerade betongkonstruktioner enligt Monierbau.

I **början av 1900-talet** uppfördes flera byggnader i armerad betong, där speciellt tre byggnader sticker ut. Dessa är Ingalls Building i Cincinnati (uppförd 1902-1903 och som fortfarande finns kvar), Terminal Station i Atlanta (uppförd 1903-1904, riven 1972) och Marlborough Hotel i Atlantic City (uppförd 1905-1906, riven 1978). Av dessa byggnader var Ingalls Building den mest nydanande. I Ingalls Building användes följande system: (i) Ransomes tunga bjälklag-pelarsystem med dragarmering, (ii) Moniers och Wayss system med armering i två riktningar, (iii) armering enligt Hennebiques system och (iv) Hyatts system för kompressionskammare.

De första skyskraporna

Den egentliga utvecklingen av skyskrapor började 1876 i samband med världsutställningen (Centennial Exposition) i Philadelphia. Vid denna utställning presenterades bl.a. Portlandcement och armerade betongbalkar. Dock var mycket fokus på vid den tiden på att uppföra broar och inte höga byggnader. Den armering som användes i slutet av 1800-talet var till stor del släta järn, vilka har begränsad vidhäftning jämfört med dagens armeringsjärn. Ett steg mot bättre armering togs 1884 när E.L. Ransomes fick patent på att gjuta in "vridna järn" ("twisted bars") som armering i betong. En annan innovation var när Francois Hennebique (den armerade betongens fader) fick patent på ett system där raka stålrör försedda med påhakade byglar, göts in i betong. Även Joseph Monier patenterade armerad betong 1867, där stål göts in i betong. Denna nya armerade betong provades bland annat av Robert Talbot där resultaten från provningar presenterades i "Tests of Reinforced Concrete Beams". Den armerade betongen fick en extra "skjuts" i samband med den stora branden i Chicago 1871, då det visade sig att byggnader i armerad betong kunde motstå branden effektivt bättre än andra byggnadsmaterial.

Ursprungligen var motivet att uppföra höga byggnader ekonomiskt, där en hög byggnad möjliggjorde att en större uthyrningsbar kontorsyta kunde byggas på en viss markyta, se Ali & Kyong (2007). Dessutom blev ljusinsläpp bättre ju högre byggnaderna var. För att kunna bygga höga byggnader med stora ljusinsläpp utvecklades tekniken med en inre stomme i stål/järn i vilken bjälklagen fästes in. För att dölja ståldetaljer användes exempelvis tegel, men där teglet inte har någon lastbärande funktion utan endast bär sin egna vikt. Med tiden blev det också prestige med höga byggnader, t.ex. Park Row Building i New York (30 våningar uppförd 1899) är det tidigt exempel. Jakten på höga byggnader kulminerade 1931 när Empire State Building (102 våningar och 381 m hög) var klar 1931. Fram till 1930-talet användes i princip samma teknik för att uppföra höga byggnader (en bärande stomme med betong- eller stålpelare och bjälklag i betong), vilket i många fall resulterade i att konstruktionen blev överdimensionerad.

De första högre byggnaderna i betong som började uppföras var uppbyggda på liknande sätt som byggnader i stål och trä, där ytterväggarna var bärande och bjälklag upplagda på balkar. Med denna byggmetod utnyttjades dock inte den fulla potentialen hos betong. Konstruktionsdelarna var normalt massiva, vilket innebar att deras egenvikt var stor jämfört med dess lastbärande förmåga. Ett steg mot ett bättre utnyttjande av betong togs när E.L. Ransome fick patent på ett system där bärningen hos en byggnad gjordes i de centrala delarna istället för i ytterväggarna. Ransome tog också fram ett system där prefabricerade ytterväggar kombinerades med platsgjutna bjälklag och pelare. På detta sätt kunde stommen i en byggnad uppföras i betongen samtidigt som byggandet blev mer väderberoende. En annan innovation som har underlättat byggande av höga byggnader i betong är möjligheten att kunna utnyttja bjälklaget som bärande konstruktion istället för

underliggande balkar. Dessa innovationer tillsammans med att betong har hög bärförmåga, beständigt mot brand och god ljuddämpare har bidragit till att betong har blivit ett lämpligt material för både industrier och bostäder.

Det första egentliga höga byggnaden i betong (liknande en skyskrapa) uppfördes i Chicago 1884-1885 då den 10 våningar höga "Home Insurance Building" byggdes. Den första riktiga skyskrapan som uppfördes med armerad betong var "The Ingalls Building" (15 våningar hög, 64 m) som uppfördes 1903 i Cincinnati, Ohio (se Figur 2). Byggnaden namngavs efter Melville E. Ingalls, som var delstatsjurist i Massachusetts. Ingalls blev med tiden specialist på juridik kring järnvägar och var bland annat med och startade upp "The big four railroad", där han också gjorde sig en förmögenhet. Ingalls var också intresserad av höga byggnader i byggnader och realiserade sina planer med Ingalls Building. Dock fanns det en stor misstro mot höga byggnader i slutet av 1800- och början av 1900-talet så innan byggnationen av Ingalls Building kunde påbörjas spenderade Ingalls två år för att övertyga myndigheter att det gick att uppföra byggnader högre än sex våningar (vilket var dåtidens rekord). En bidragande faktor till att Ingalls Building kunde uppföras var användningen av E.L. Ransomes patent med "vridna järn" som bidrag till att betongens bärförmåga kunde göras så hög att höga byggnader gick att uppföra.



Figur 2. Ingalls Building belägen i Cincinnati, som var den första riktiga skyskrapan som uppfördes i armerad betong.

Betongen som användes till Ingalls Building blandades på arbetsplatsen. Hantering av material gjordes i fyra stora behållare på bottenvåningen, där cement, sand och grov ballast lagrades. Själva blandaren hade en kapacitet på ca 750 l (18 ft³). Betongen blandades i blandaren och fylldes i en

bask med volymen ca 800 l (1 yr³). Innan betongen hälldes i basken justerades konsistensen med extra vatten. All utrustning som användes vid blandningen var framtagen av Ransome själv eller av personalen vid Ransome Concrete Machinery Company. Allt byggnadsarbete gjordes sedan för hand.

Innan Ingalls Building blev klar fanns det många skeptiker, där det bland annat antogs att byggnaden skulle rasa direkt när de temporära stöttor som användes under byggtiden togs bort. Det var till och med en nyhetsreporter som var vaken hela natten för att vara först med att rapportera nyheten att byggnaden hade rasat. Alla kritiker hade dock fel då byggnaden inte rasade och faktiskt finns kvar än idag. När byggnaden var klar skrev A.O. Elzner, som var en av konstruktörerna, en artikel som publicerades 1904 där fördelarna med betong jämfört med stål som byggnadsmaterial presenterades. Bland annat nämndes att betong är betydligt billigare, eftersom tillverkning av stål kräver stora investeringar. Dessutom är färdiga stålkonstruktioner svåra att flytta. En ytterligare fördel med betong var att byggnationer kunde inledas direkt, medan med stål var byggtreprenören tvungen att invänta leveranser av stål.

Utveckling av skyskrapor

När Ingalls Building uppfördes var den uppförd med dåtidens senaste teknik. Exempel på teknik som har använts är det bärande system som är uppbyggt av ett monolitisk balk/pelarsystem. Det senaste inom armeringsteknik användes också, t.ex. är bjälklagen armerade med nät och i balkar har bockad armering använts nära stöd. Fram till början av 1960-talet skedde ingen större utveckling av och detta medförde att det var få byggnader som uppfördes högre än 20 våningar. Under början av 1960-talet började dock tekniken att bygga höga byggnader i betong att utvecklas, t.ex. vad gäller utformning av bärande system, vilket möjliggjorde att allt högre byggnader gick att bygga.

I Ali & Kyoung (2007) görs en genomgång av utvecklingen av strukturella system för höga byggnader. Historiskt har höga byggnader främst uppförts i Nordamerika, men från 1980-talet och framåt har huvuddelen av nya höga byggnader uppförts i Asien (Kina, Korea, Japan och Malaysia). I mitten av 2000-talet fanns 32 % av höga byggnader i Asien medan 24 % av höga byggnader fanns i Nordamerika. En annan utveckling som har skett sedan 1980-talet och framåt är användningen av höga byggnader Ursprungligen användes höga byggnader nästan uteslutande för kommersiella lokaler medan sedan mitten av 1980-talet har allt fler höga bostadshus (och hotell) börjat uppföras.

I Europa har höga byggnader uppförts sedan 1950-talet, främst i Ryssland. Historiskt har dessa höga byggnader haft en höjd på upp till ca 200 m, inte minst eftersom många europeiska städer har haft begränsningar vad gäller maximala höjder på byggnader, se t.ex. Pietrzak (2013). I dagsläget finns det 890 byggnader i Europa som har en höjd som överstiger 100 m belägna i 30 olika länder, enligt The Skyscraper Center⁵. Huvuddelen av dessa byggnader har uppförts sedan slutet av 1960-talet. Fram till år 2000 var huvuddelen av höga byggnader (ca 65 %) uppförda som kontor, men det finns några exempel på bostadshus och hotell (normalt upp till ca 150 m höjd). Efter år 2000 har andelen höga byggnader för bostäder och hotell ökat, där det har byggts ungefär lika stor andel höga byggnaden med kontor som med bostäder samt hotell. Under de senaste tio åren har även "superhöga" byggnader, dvs. med en höjd överstigande 300 m, börjat uppföras. Det första exemplet på en "superhög" byggnad i Europa är "Moscow Tower" i Moskva som är 302 m högt (76 våningar) färdigställt 2010.

Fram till år 2000 var huvuddelen av de höga byggnaderna i Europa uppförda Västeuropa (i området mellan Storbritannien och norra Italien) samt Moskva. Det finns även del exempel på höga byggnader som har uppförts i sydöstra delen av Europa och på Iberiska halvön. Efter år 2000 började höga byggnader även att uppföras i andra delar av Europa, t.ex. Östeuropa (t.ex. Polen).

⁵ Skyscraper Center (<http://www.skyscrapercenter.com>). Hämtat 2018-08-06.

Huvuddelen av de höga byggnader som har uppförts i Europa finns i huvudstäder, förutom några städer i Nederländerna, Tyskland och Italien.

Tekniska innovationer

En stor del av utvecklingen för att kunna uppföra allt högre byggnader beror på utveckling av allt mer effektiva strukturella system och beräkningsmetoder, se t.ex. Ali & Kyong ((2007). Parallellt med denna utveckling har också både material och produktionsteknik utvecklats. I Ali (2001) görs en intressant genomgång tekniska innovationer som har möjliggjort att allt högre höga byggnader har kunnat uppföras. Några exempel på tekniska innovationer som har möjliggjort detta är:

Utveckling av formar. Det mest effektiva sättet att uppföra höga byggnader är att använda samma form flera gånger. Detta har jag möjliggjorts genom att formarna har tillverkats av andra material än trä, t.ex. stål, aluminium, plast eller kombinationer av dessa. Dessutom har nya typer av formar tagits fram, t.ex. självbärande formar, formbord (flying form), glidform och klätterform.

Utveckling av tillverkning och transport av betong. Ursprungligen blandades betong på den aktuella arbetsplatsen, t.ex. var detta fallet när Ingalls Building uppfördes. Tillverkning av betong i speciella betongfabriker började 1913, där betongen sedan transporterades till respektive arbetsplats i öppna bilar. Genom att tillverka betong i speciella fabriker kunde tillverkningsprocessen kontrolleras betydligt bättre än när blandningen gjordes på arbetsplatsen. Dock separerade betongen normalt i samband med dessa transporter vilket betydde att betongen fick blandas igen vid ankomst till arbetsplatsen, vilket var ett tidskonsumerande arbete. I början av 1920-talet introducerades transportbilar med möjlighet till att blanda betongen under transport (dvs. transporten gjordes med en tidig version av roterbilar), vilket innebar att betongen var klar att gjuta vid ankomst till arbetsplatsen. Den första hydrauliskt drivna blandaren på en transportbil introducerades 1947.

Utveckling av metoder för att gjuta betongen. Fram till 1960-talet göts betong från bask, som transporterade betongen från transportbilen till arbetsstället. Under 1960-talet utvecklades hydrauliska pumpar för betong, vilket möjliggjort en betydligt mer effektiv transport av betong från transportbilen till arbetsstället. I dagsläget är pumpning den absolut vanligaste metoden för att transportera betong från transportbilen till arbetsstället. Vid uppförande av höga byggnader har betong pumpats i ett svep upp till över 600 m höjd (t.ex. vid byggnationen av Burj Khalifa). Vid pumpning är det viktigt att betongen sätts samman på ett lämpligt sätt och att rätt utrustning används, t.ex. med hänsyn till de tryck som uppstår vid pumpning.

Utveckling av betongsammansättningar (betongteknologi). Parallellt med utvecklingen av nya produktionstekniker har också sammansättningen på betongen utvecklats. Exempel på sådant som går att använda för höga byggnader är lättballastbetong eller högpresterande betong.

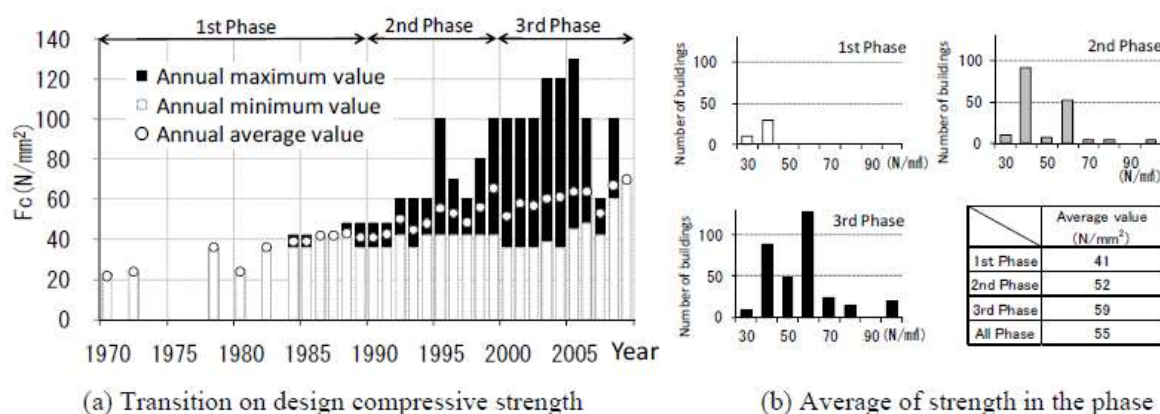
Lättballastbetong tillverkas genom att använda ballast med låg densitet för att på så sätt minska densiteten på betongen. Tryckhållfastheten hos betongen beror på densiteten där en låg densitet medför att hållfastheten också blir låg och vice versa. Lättballastbetong har stor användning i höga byggnader, där många byggnadsdelar inte behöver ha så hög hållfasthet men där en låg egenvikt är en fördel. På detta sätt kan det bärande systemet i byggnaden utformas med mindre dimensioner. Ett exempel på en hög byggnad som är uppförd i lättballastbetong är One Shell Plaza i Houston Texas, som är 52 våningar hög (218 m) och uppförd 1971.

Högpresterande betong, där det med högpresterande främst avses antingen en hög sluthållfasthet och/eller en hög tidig hållfasthet. Även andra egenskaper kan innefattas i högpresterande, t.ex. beständighet, stabilitet hos färsk betong etc. En hög sluthållfasthet hos betongen innebär att dimensioner på bärande byggnadsdelar kan göras mindre medan en hög tidig hållfasthet innebär att

konstruktionsdelar kan belastas och/eller formas bort tidigare. Betong med hög sluthållfasthet har möjliggjorts genom användning av tillsatsmaterial i betongen (främst silikastoft men även flygaska och/eller GGBS) En tidig hållfasthet uppnås genom att ha en lämplig betongsammansättning, t.ex. med användning av vissa tillsatsmedel kombinerat med låga vct.

Ett exempel på utvecklingen av högpresterande betong ges i Portland Cement Association (1994) och ACI (2010) där en ”hög” hållfasthet definierades som 41 MPa 1984 och 55 MPa 2005. Idag definieras en betong som ”höghållfast” om hållfasthetsklassen överstiger C50/60, se t.ex. SS-EN 206.

Hur utvecklingen av betongkvaliteter har bidragit till att allt högre byggnader har kunnat uppföras är något som tas upp av Izumi m.fl. (2012). Izumi m.fl. har samlat in information om 555 höga byggnader som har uppförts i Japan under perioden 1971-2009. Det visade sig att allt högre byggnader uppfördes och detta kunde kopplas till (i) utveckling av armering och betong med allt högre hållfastheter samt (ii) utveckling av den konstruktiva utformningen med avseende på seismiska laster. Det noterades också en koppling till nationella forskningsprogram, där det exempelvis märktes en tydlig ökning i byggandet i höga byggnader efter 1995, då ett forskningsprogram kring högpresterande armerad betong (”Development of Advanced Reinforced Concrete Buildings with High Strength and High Quality Materials”) avslutades. Ett exempel på den utveckling av höghållfasthet betong som har skett visas i Figur 3 där Izumi m.fl. har gjort en indelning i 3 faser beroende på betongens hållfasthet.



Figur 3. Exempel på utveckling av betong med hög hållfasthet. Figur från Izumi m.fl (2012).

I Figur 3 framgår att betongen i höga byggnader har haft allt högre hållfasthet, där den dimensionerande hållfastheten i nyare byggnader överstiger 100 MPa i vissa fall. Innan projektet kring högpresterande material drogs igång på 1990-talet var en höghållfast betong en betong som hade en hållfasthet överstigande 30 MPa och en betong med ultrahög hållfasthet var en som hade en hållfasthet som översteg 60 MPa. I dagsläget är en betong med hög eller ultrahög hållfasthet en betong där hållfastheten överstiger 60 MPa respektive 100 MPa. Gränsen för hur hög hållfasthet en betong går uppåt där det finns exempel på användning av betong med dimensionerande hållfastheter på över 180 MPa.

En viktig faktor som har bidragit till byggnation av allt högre byggnader (i betong men även andra material) är **utvecklingen av strukturella system**. Utformningen av de strukturella systemen beror på användningen av byggnaden, där speciellt blandad användning (dvs. blandning av lokaler, kontor och bostäder) innebär utmaningar. Exempelvis behöver många gånger kontor öppna stora lokaler, där lasterna är rätt stora, medan bostäder har mindre krav på öppna ytor samtidigt som lasterna också är mindre. När byggnaderna blir högre blir också lasterna både högre och annorlunda jämfört med lägre byggnader. I princip kan lasterna delas upp i egenvikt och horisontella laster, där

de horisontella lasterna (främst vindlaster) blir dominerande ju högre en byggnad blir. Byggnation av allt högre hus i betong (och även andra material) har möjliggjort av en utveckling av strukturella system. Vilket strukturellt system som ska väljas är också ett komplext problem, där många gånger olika system kombineras för att få så god bärförmåga som möjligt.

Utveckling av teknik för att uppföra höga byggnader – exempel på projekt

I Ali (2001) tas också några intressanta projekt upp som visar på utvecklingen av tekniken för att uppföra höga byggnader i betong:

The Marina City Twin Towers, som uppfördes 1960-1968, är två parallella torn som är belägna i centrala Chicago (se Figur 4). Tornen var för sin tid de högsta i världen (179 m). Det som gör dessa byggnader speciella är att den cirkulära formen, som har valts för att få effektiva ventilationssystem. Dessutom minskar storleken på den bärande kärnan på detta sätt. Ursprungligen var byggnaderna dimensionerade så att den centrala kärnan skulle ta hela den horisontella lasten från bjälklagen. Dock modifierades utformning med två pelarrader för att reducera lasterna något. Även efter denna modifiering tar dock den centrala kärnan ca 70 % av den horisontella belastningen.



Figur 4. The Marina City Twin Towers i Chicago. Foto från Wikipedia.

Ett annat exempel på en hög byggnad är **The Water Tower Palace**, som uppfördes 1975 i Chicago (se Figur 5). Byggnaden är 262 m hög och innehåller både bostäder, kontor och ett shoppingcenter. I byggnaden har totalt 11 olika betongsammansättningar använts, med hållfastheter som varierade

mellan 20,7 MPa och 62,1 MPa. Högst hållfastheter har använts i pelare, medan längre hållfastheter har använts till bjälklag. Höjden på byggnaden är ca 2/3 av de högsta dåtida byggnaderna uppförde i stål.



Figur 5. The Water Tower Palace i Chicago.

311 South Wacker Drive är en byggnad som uppfördes 1990 i Chicago (se Figur 6). Byggnaden är 295 m hög (och är därför "superhög"). Det strukturella systemet är uppbyggt av en betongkärna kombinerad med stålpelare och ett kompositbjälklag av betong och stål. Byggnaden är uppförd på ett sådant sätt att styvheten på använda material är samma i hela byggnadens höjd. Två betongkvaliteter har använts, 68,9 MPa respektive 82,7 MPa. Gjutningen har gjorts med en självklättrande pump, som var placerade högst upp på byggnaden. Två separata "flygande" formor användes, där cykeltiden var 5 dygn. Bjälklagen är spännarmerade (efterspända) för att på så sätt minska dimensioner på bjälklagen.



Figur 6. 311 South Wacker Drive i Chicago.

Ett annat exempel på en modern hög byggnad är **Sun Trust Plaza** belägen i **One Peachtree Center**, som uppfördes 1991 i Atlanta (se Figur 7). Byggnaden är 257 m och är uppbyggd av ett antal tuber som har kombinerats ("bundled tube"). Tre betongkvaliteter har använts i pelare och lastbärande väggar; 58,6 MPa, 68,9 MPa samt 82,7 MPa. På grund av krav från den arkitektoniska utformningen har inga pelare tillåtit invändigt i byggnaden. Lastbärningen uppnås istället med golvspeglar med spännvidd 15,2 m, uppbyggda med högpresterande betong och spännarmering (efterspänd). Betongen är bland annat sammansatt med silikastoft och granitballast.



Figur 7. Sun Trust Plaza belägen i One Peachtree Center i Atlanta.

Nuläge

Det byggs en hel del höga byggnader i armerad betong men detta ställer speciella krav både på de material som används och den produktionsteknik som tillämpas. Även frågor rörande säkerhet blir speciella när höga byggnader uppförs. Exempelvis sker arbeten normalt på höga höjder, där betongen måste transporteras både vertikalt och horisontellt. Det kan också krävas både hög hållfasthet och snabbt hållfasthetstillväxt hos betongen. Detta innebär att den betong som används vid byggnation av höga byggnader måste ha lämpliga egenskaper både i färskt och hårdnat tillstånd, t.ex. att betong är lättpumpad och hög hållfasthet. Tack vare den utveckling av materialet betong som har skett sedan 1970-talet, t.ex. vad gäller nya bindemedel och tillsatsmedel, har det blivit både tekniskt och ekonomiskt möjligt att tillverka en betong med lämpliga egenskaper för höga byggnader. I dagens höga byggnader används normalt en ”högpresterande betong” (där det med ”högpresterande” avses en betong som främst är lättpumpad och med hög hållfasthet samt elasticitetsmodul), som har möjliggjort att byggnader med stor styvhet kan uppföras samtidigt som tvärsnitten på konstruktionselement kan hållas nere.

KORT GENOMGÅNG AV STRUKTURELL UPPBYGGNAD

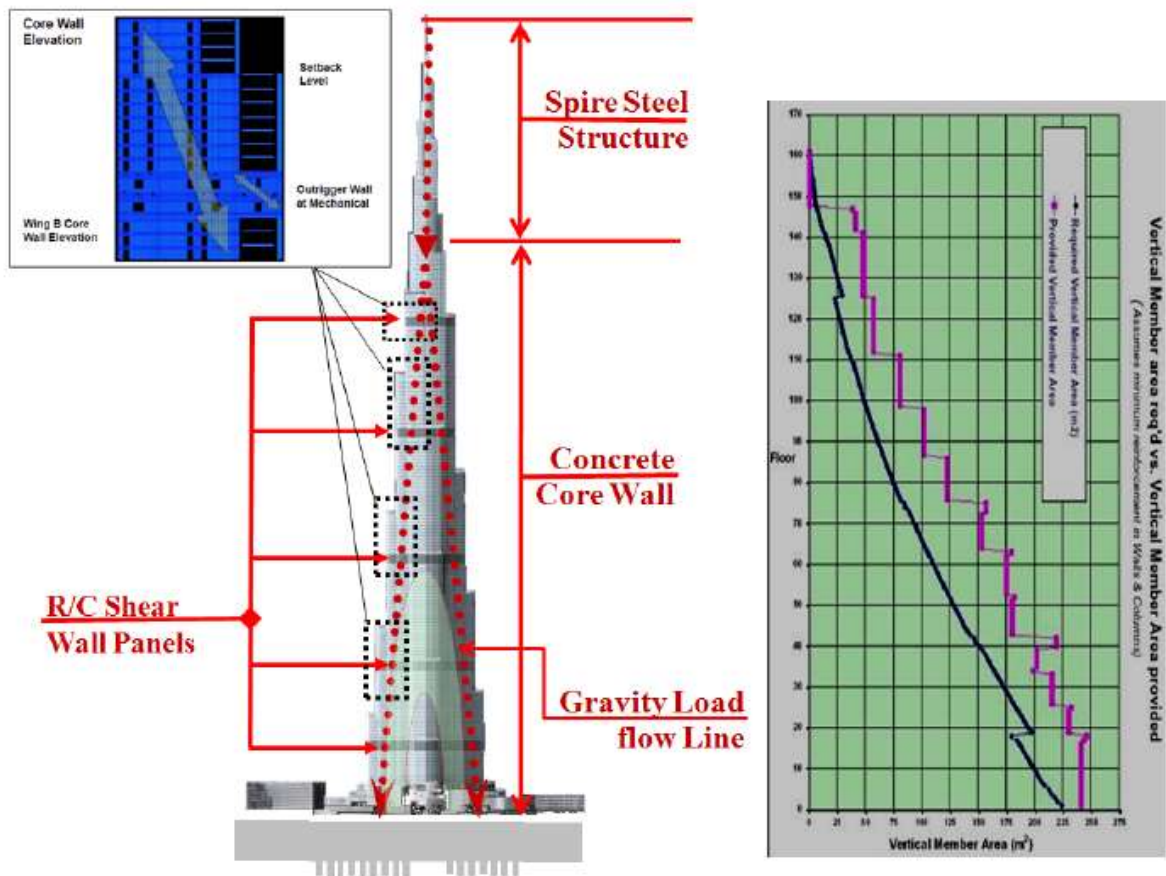
Avgörande för att kunna uppföra höga byggnader är den strukturella utformningen, där det har skett en omfattande utveckling sedan 1960-talet. Därför görs en kort genomgång av strukturell uppbyggnad av höga byggnader i följande kapitel.

I Clark (2014) beskrivs utmaningarna med att uppföra höga byggnader (som definieras som en byggnad med mer än 30 våningar och där förhållande mellan höjd och bredd överstiger 5), med fokus på den strukturella utformningen. Den största utmaningen för den strukturella utformningen sägs vara horisontella laster (t.ex. vindlaster) och förhållandet mellan horisontella laster och vertikala laster (där främst egenvikten bidrar). Andra faktorer som påverkar den strukturella utformningen är:

- Lateral hållfasthet och styvhet.
- Vertikal transport under byggtiden.
- Brandsäkerhet (bärförmåga, utrymning osv.)
- Utformning av serviceutrymmen.
- Vertikal dimensionsändring av byggnaden (under användning).
- Vertikalitet och planering (lite oklart vad som avses, men troligen har detta att göra med arkitektonisk utformning).
- Cykeltiden vid byggnation av bjälklag.
- Materialhantering på arbetsplatsen (t.ex. in- och uttransporter samt lagring på arbetsplatsen).

I Clark (2014) och mpa (2015) nämns också att kärnan i höga byggnader är en viktig del, både för den strukturella stabiliteten men också för installationer och hissar etc. Utseendet på kärnan är också olika beroende på användningen av byggnaden. För kontorshus är utseendet på bjälklagen ungefär samma oavsett var i byggnaden medan bostadshus kan utseendet på bjälklagen variera i stor utsträckning mellan olika delar i byggnaden. Dessutom är antalet personer som kan vistas i byggnaden olika, vilket i sin tur innebär att behov av hissar (och storleken på kärnan) varierar. Speciellt komplicerat blir det i höga byggnader med flera olika användningar, t.ex. kontor, hotell och bostäder, där det vanligen krävs separata hissar för respektive användning.

En utmaning vid utformning av höga byggnader är hur vindlaster (och även andra horisontella laster) skall hanteras. Detta är något som behandlas i exempelvis i Yea & Simiu (2011), Davids m.fl. (2012) och fib (2014). För att ta hand om horisontella laster behöver det strukturella systemet utformas på lämpligt sätt (där hänsyn måste tas till byggnadens höjd). Ett exempel på hur vindlaster (och andra horisontella laster) kan tas om hand visas i Figur 8, där den principiella utformningen av det strukturella systemet i Burj Khalifa i Dubai visas. I den högre delen av figuren visas erforderliga tvärsnittsareor på pelare och den centrala kärnan för att motstå horisontella laster (blå kurvan) samt verkliga tvärsnittsareor på pelare och den centrala kärnan (lila kurvan). Den lila kurvan är till höger om den blåa kurvan vilket betyder att bärförmågan är tillräcklig.



Figur 8. Exempel på utformning av det strukturella systemet i Burj Khalifa för att kunna motstå vindlaster (och andra horisontella laster). Figur från Abdelrazaq (2012).

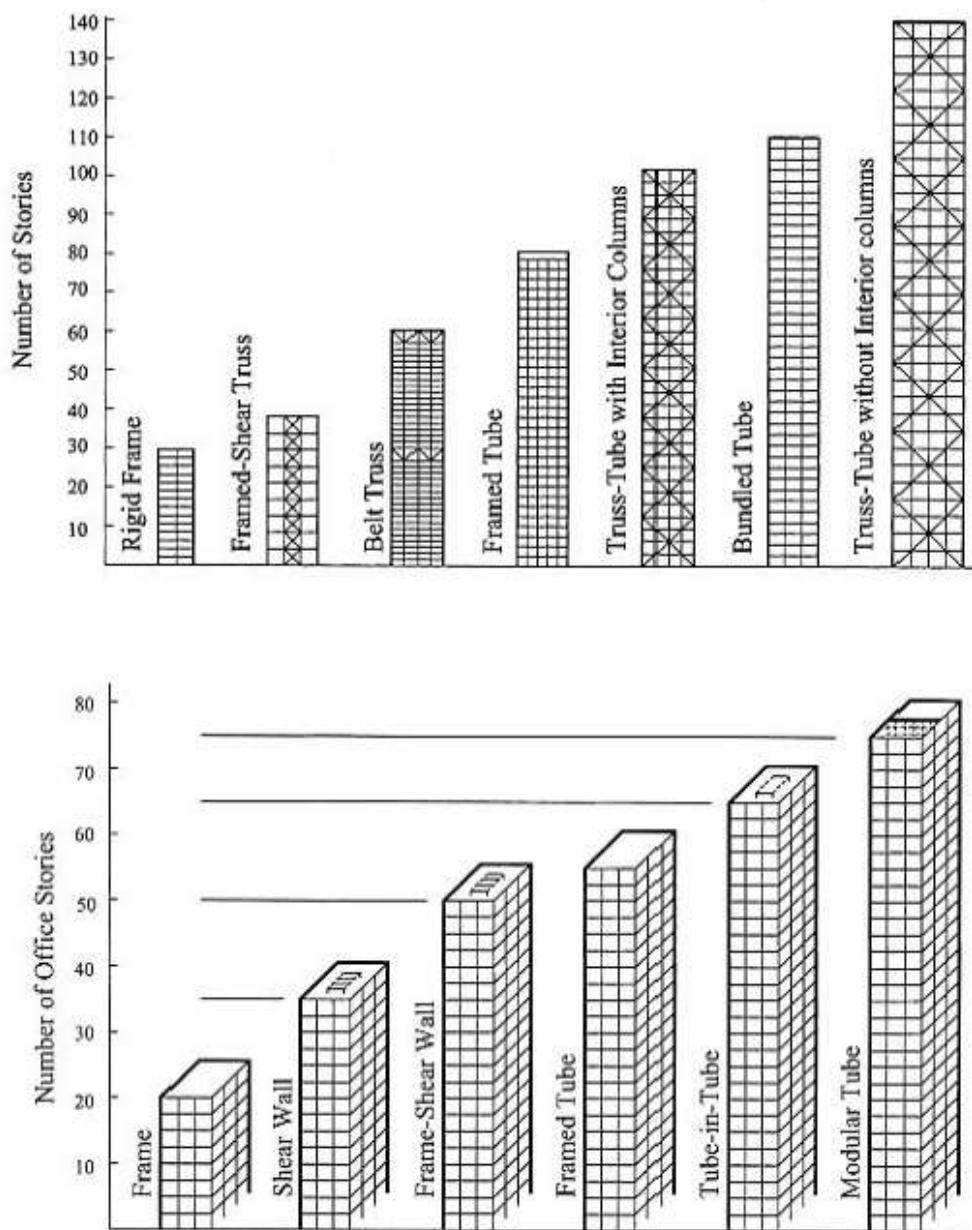
I Figur 8 framgår att högst påkänningar uppstår längst ned i tornet vid infästningen till fundamentet (illustrerat av den blåa kurvan i den högra delen av figuren). Påkänningen från horisontella laster tas främst upp av den centrala kärnan, där tjockleken på väggarna varierar mellan 1300 mm längst och 500 mm högst upp. Dessutom har byggnadens form anpassats så att belastning från vind ska bli så liten som möjligt. Även bottenplattan i Burj Khalifa är utformad för att kunna ta hand om både horisontella och vertikala laster, där plattan är ca 3,7 m tjock.

Det finns några olika alternativa utformningar av strukturella system där följande åtta principiella varianter (med angivande av en ungefärlig maximal höjd för respektive system), fib (2014):

- **Frame system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 75 m.
- **Shear-wall system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 120 m.
- **Shear-wall och frame system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 160 m.
- **Framed-tube system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 150-170 m.
- **Tube-in-tube system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 180-200 m.
- **Bundled-tube system** eller **modular-tube system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 225 m.
- **Braced-tube system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 300 m.
- **Outrigger-braced system.** Användbart för byggnader med en höjd upp till ca 350 m.

I moderna höga byggnader kan det bärande systemet liknas med en konsolbalk, som är fast inspänd i marken. Det bärande systemet behöver både kunna bära sin egenvikt och horisontella laster, t.ex. vind och jordbävningar. Ju högre en hög byggnad blir desto större blir bidraget från de horisontella lasterna (främst vindlaster), där det bärande systemet måste utformas för att klara dessa laster

(t.ex. genom förstävningar etc.). Detta betyder också att det finns en maximal höjd som ett visst bärande system kan användas till. Detta är något som Ali Kyoung (2007) har ställt samman se Figur 9, där maximalt antal våningar för olika uppbyggnader av strukturella redovisas Figur 9 (baserad på information från Fazlur Khan (1969⁶, 1972⁷ och 1973⁸)).



Figur 9. Exempel på hur höga byggnader som går att uppföra med olika bärande system. Figur från Ali & Kyoung (2007).

⁶ Khan, F.R. (1969), Recent structural systems in steel for high-rise buildings, I Proceedings of the *British Constructional Steelwork Association Conference on Steel in Architecture*, London, British Constructional Steelwork Association.

⁷ Khan, F.R. (1972), Influence of design criteria on selection of structural systems for tall buildings, I Proceedings of the *Canadian Structural Engineering Conference*, Toronto, Canadian Steel Industries Construction Council, sid. 1-15.

⁸ Khan, F.R. (1973), Evolution of structural systems for high-rise buildings in steel and concrete, I J. Kozak (Ed.), *Tall Buildings in the Middle and East Europe: Proceedings of the 10th Regional Conference on Tall Buildings-Planning, Design and Construction*. Bratislava: Czechoslovak Scientific and Technical Association, 1973.

En faktor som har visat sig vara viktig vid utformning av det strukturella systemet är förhållandet mellan höjd och bredd på en hög byggnad, beskrivet med byggnadens slankhetstal ("Slenderness ratio"), se fib (2014). Slankhetstalet beskriver förhållandet mellan byggnadens bredd och höjd. Om slankhetstalet är lägre än 1/6, vilket det normalt är för högre byggnader, innebär det att byggnadens dynamiska beteende kommer bli styrande för utformningen av det strukturella systemet, vilket i sin tur kan medföra en mer komplicerad utformning av byggnaden.

I många höga byggnader kombineras betong och stål, vilket möjliggjort att allt högre byggnader har kunnat uppföras. I en artikel av Rizk (2010) görs en genomgång av hur betong och stål kan kombineras, där tre principiella metoder finns:

- Kompositkonstruktioner där stål kombineras med betong, t.ex. i pelare eller bjälklag.
- Förstärkning av bjälklag.
- Stålkonstruktioner i övre delen av höga byggnader, dels för att spara vikt och dels för att det är svårt att leverera betong till höga höjder.

I mycket höga byggnader, över 400 m höga, rekommenderas att den övre delen av byggnaden uppförs i stål för att minska egenvikten. Vad gäller betong i höga byggnader (i kombination med stål) rekommenderar Rizk (2010) att följande kvaliteter används: 30-50 MPa för bjälklag och 50-70 MPa för pelare, väggar och kärnan. Rizk rekommenderar också att extra vikt läggs på att stabilisera höga byggnaderna för horisontella belastningar och att extra pelarsystem kan användas för att öka bärförmågan med avseende på vertikala laster. På detta sätt får en större säkerhet mot eventuella lokala skador och även fortskridande ras.

Rizk (2010) redovisar också ett samband mellan egenvikten på en hög byggnad och antalet våningar, där det skiljs på horisontella element (t.ex. bjälklag) och den totala mängden element. Det visar sig att de horisontella elementen motsvarar ca 58 % av den totala egenvikten.

I Rizk görs också en jämförelse mellan höga byggnader i betong respektive stål, där det visar sig att ju högre en byggnad i stål är desto mer material krävs (vid en ökning från 20 våningar till 80 våningar kräver en byggnad i stål 370 % mer material, medan en byggnad i betong kräver 70 % mer material).

En faktor som kan ha stor påverkan på det strukturella systemet är speciella arkitektoniska utformningar, exempelvis om byggnaden lutar, se t.ex. Clark (2014). I en lutande byggnad ställs höga krav på att kärnan är vertikal (för hissar osv.), där lutningen innebär att stora laster kan påföras kärnan både under byggtid och under byggnadens användning. Även tidsberoende fenomen, t.ex. krypning, kan innebära att stora laster påförs en lutande byggnad.

Vid dimensionering och uppförande av höga byggnader är en viktig faktor att ta hänsyn till deformationer av vertikala konstruktionsdelar, t.ex. pelare. Detta i sin tur medför att byggnadens höjd minskar, vilket också ställer krav på utförande och toleranser. För höga byggnader kan minskningen vara rätt stor. Ett exempel är Petronas Tower (452 m höga) där deformationer på upp till 610 mm (orsakat av elastiska deformationer, krypning och krympning) har noterats, se Kim & Lee (2004). Hänsyn har tagits till detta genom att lägga till extra fogar och leder i byggnaden. Dessutom har speciella anordningar för hissar installerats för att möjliggöra god funktion. En ytterligare faktor som är av vikt för den strukturella utformningen är toleranser, se t.ex. Concrete Construction (1979) eller Clark (2014). Som ett exempel nämns pelare, där den totala avvikelserna kan bli stor om varje pelare i en hög byggnad har en liten avvikelse i längd.

En viktig faktor vid byggnation av höga byggnader i betong är att konstruktionen måste vara robust för att minimera risken för skador. Detta är något som bland annat beskrivs i en artikel av Watanabe m.fl. (2004), där det också påpekas att konsekvenserna av eventuella skador i en hög

byggnad i stadsmiljö kan bli mycket stora jämfört med eventuella skador på en lägre byggnad. Som ett exempel nämns sprickbildning som kan få stora konsekvenser för byggnadens funktion speciellt om sprickorna uppstår i bärande konstruktionsdelar. Det kan också vara svårt att reparera sprickor och därför påpekar Watanabe m.fl. att det är önskvärt med ”reparationsfria” konstruktionsdelar. Den metod som föreslås för att få mer robusta konstruktionsdelar är att använda spännarmerad betong, för att på så sätt begränsa uppkomst av sprickor.

Den strukturella uppbyggnaden hos en hög byggnad är ofta kopplad till den arkitektoniska utformningen, se t.ex. Izumi m.fl. (2012). Under slutet av 1970-talet och början av 1980-talet inleddes en debatt bland arkitekter om att det bärande systemet hos höga byggnader inte skulle vara synligt utan byggas in. Dock har det under senare år åter blivit populärt att utforma höga byggnader så att det bärande systemet syns i fasaden.

I Izumi m.fl. (2012) ges också exempel på hur den arkitektoniska utformningen av en hög byggnad kan kategoriseras. En uppdelning har gjorts i:

- **Struktur**, där en ytterligare indelning kan göras i skala, profil och detaljer. Genom en lämplig kombination av dessa kan ett lämpligt visuellt intryck av en byggnad fås.
- **Fasad**, där en ytterligare indelning kan göras i utformning, färg och upplysning. Genom en lämplig kombination av dessa kan ett lämpligt visuellt intryck av en byggnad fås.
- **Formspråk**, som är ett viktigt verktyg för att kunna möta funktionella och strukturella krav och ge byggnaden ett estetiskt uttryck som överensstämmer med byggherrens och arkitektens önskemål.
- **Komplexitet och motsatser**, där exempelvis aerodynamisk form, tredimensionella uttryck, exotiska former eller oregelbundna fackverk påverkar.

Izumi m.fl. (2012) påpekar också att det arkitektoniska utseendet på byggnader inte bara skall vara fokuserat på byggnadens utseende utan också på funktionalitet. En rekommendation är att byggnader inte skall utformas med för komplexa former bara för sakens skull utan att även med hänsyn till god kvalitet och minskade kostnader. Detta är också något som rekommenderas för framtida undersökningar.

En annan viktig aspekt vid uppförande av höga byggnader (och självklart även för andra komplicerade projekt) är samordning mellan involverade parter, se t.ex. O-Kyung & Jong-Hoon (2004). I denna artikel påpekas att det är av vikt att ha en organisation med överblick över hela byggprocessen från planering till underhåll för att kunna göra optimala val vad gäller ingående material och produktionsteknik. I komplicerade projekt är det också av stor vikt att ha tydliga hålltider för viktiga moment, för att arbetet på arbetsplatsen skall fungera effektivt. Detta gäller speciellt för projekt i tätbebyggda områden, vilket ofta höga hus är. O-Kyung & Jong-Hoon (2004) påpekar att med en väl genomförd planering där samtliga inblandade parter har varit involverade fås goda förutsättningar för att hålla tidplaner och få en god ekonomi.

I litteraturen finns det flera exempel på strukturell utformning av höga byggnader i betong med koppling till val av betongkvaliteter, se t.ex. Abdelrazaq (2012), Ghasemi (2016), Kim & Lee (2016) eller Chung m.fl. (2016). Gemensamt för de uppgifter som finns i litteraturen är att betongkvaliteter (åtminstone teoretiskt) anpassas till det strukturella systemet. Exempel på anpassning är att betongkvaliteten kopplas till krav på bärförmåga, där högst betongkvalitet används i de konstruktionsdelar som har högst belastning och vice versa. Dessutom behöver hänsyn tas till kompetensen hos den personal som skall utföra gjutningsarbetena.

PRODUKTIONSTEKNIK FÖR HÖGA HUS – LITTERATURSTUDIE

I följande kapitel presenteras resultaten av den litteraturstudie som har genomförts. Fokus i litteraturstudien har varit på **materialfrågor (betong) och produktionsteknik samt hur materiallogistik till/från och på arbetsplatsen** kan lösas. Även frågor rörande säkerhet på arbetsplatsen tas upp. En stor del av den litteratur som har gått igenom redovisar erfarenheter och resultat av specifika projekt där höga byggnader har uppförts i betong.

Säkerhet på arbetsplatsen

Säkerheten på arbetsplatsen är av vikt både vad gäller transport av personal och material. Vid vertikal transport av material till höga höjder är säkerheten under transporten av stor vikt, där exempelvis inga delar får lossna under transporten (om transporten sker med kran). Därför är det en fördel om transporter av material kan göras med andra metoder, t.ex. i hissar eller pumpning (av betong). Vad gäller arbetsställen på hög höjd får det heller inte finnas lös utrustning eller lösa verktyg som falla ned.

Även säkerheten vid transporter av personal vid byggnation av höga byggnader är en utmaning, där transporten normalt sker med hissar. Många gånger kan transporter av material och personal vara det som är den trånga sektionen i tidsplaner. Det är därför viktigt att noggrant planera hur transporter av både material och personal skall göras på arbetsplatsen och arrangera hissar så att inte material- och personflöden kommer i konflikt med varandra, se t.ex. Isgren (2019).

Det är också viktigt att planera inför eventuella krissituationer, t.ex. brand på hög höjd eller evakuering från hög höjd. En sådan planering innefattar bland annat utbildning av personalen så att alla på arbetsplatsen vet hur de ska bete sig vid krissituationer, Isgren (2019). Utrymningsvägar måste också förberedas och personalen måste informeras om dessa.

Materialfrågor

Allmänt

Under de senaste 40 åren har det skett en omfattande utveckling av materialet betong, t.ex. har betong med allt högre hållfasthet och styvhet (elasticitetsmodul) utvecklats, som har möjliggjort att allt högre och mer komplexa byggnader har kunnat uppföras. Parallellt med utvecklingen av materialet betong har också den konstruktiva utformningen av höga byggnader utvecklats, vilket har möjliggjort att allt högre byggnader har kunnat uppföras. Utvecklingen av materialet betong har både varit drivande och en förutsättning för utvecklingen av den konstruktiva utformningen. Exempel på sådant som har utvecklats är betongens mekaniska egenskaper (främst hållfasthet och elasticitetsmodul men också att betongens hållfasthetstillväxt sker snabbare) och den färiska betongens egenskaper (t.ex. pumpbarhet och bearbetbarhet). Denna utveckling har möjliggjort både genom att nya och bättre delmaterial används och att tekniken för att blanda och gjuta betong har utvecklats. Ett exempel på hur betong har utvecklats finns i Concrete Construction Staff (publicerad 1961) i vilken det sägs att höga byggnader kräver högpresterande betong, där hållfastheten överstiger 5000 psi (motsvarande ungefär 34 MPa). I dagsläget motsvarar detta en rätt ordinär betong, medan en högpresterande betong har en hållfasthet som överstiger 80 MPa vid 28 dygns ålder.

Utveckling av **betong med hög (och "anpassad") hållfasthet** ("högpresterande betong") har möjliggjort att allt högre byggnader med stomme i betong har kunnat uppföras, där stommen kan göras relativt slank och ändå få tillräcklig bärförmåga. Exempel på detta ges i PCA (1994), Kim & Lee (2004), Ohna m.fl. (2004), Baker m.fl. (2007), Moazami m.fl. (2008), Corres Peiretti & Gómez Navarro (2010) & Aldred (2010), där det bland annat beskrivs hur utveckling av betong med hög hållfasthet har bidragit till att ge förutsättningar för byggnation av höga byggnader. Utvecklingen

av material betong har också möjliggjort (och varit en förutsättning för) att den konstruktiva utformningen av höga byggnader har kunnat utvecklas.

En annan faktor som driver utvecklingen av betong är hur klimatpåverkan från byggandet kan minskas. Detta är något som bland annat Alsamasam m.fl. (2008) tar upp, där det beskrivs att den mest effektiva åtgärden för att minska klimatpåverkan är att minska andelen cementklinker i bindemedlet genom att använda tillsatsmaterial (främst flygaska eller GGBS). I Alsamasam m.fl. (2008) påpekas också att byggnader i betong normalt får lägre klimatpåverkan än motsvarande byggnader i stål eller trä, speciellt om hänsyn tas till byggnadernas hela livslängd.

Med ”rätt” val av betongsammansättning kan både byggprocessen bli billigare och effektivare. Det finns också möjligheter att minska på armeringsmängder med lämpliga val av betong. Ett exempel på vilka besparingar som kan göras med lämpliga val av betong ges i Tarmac (2015a & 2015b), där tre typer av betong har studerats; en konventionell betong samt två specialbetonger (en betong med snabb hållfasthetsutveckling och en självkompakterande betong). Fyra fall studerades: (i) standard med standardbetong, (ii) standard där specialbetonger användes, (iii) fall med minskad armeringsmängd, och (iv) fall med minskad armeringsmängd och dimensioner på konstruktionsdelar. Utvärderingen visar att beroende på vilken konstruktionsdel som avses och vilken typ av betong som använts kan besparingen bli upp till ca 14 % jämfört med om en konventionell betong hade använts. De största besparingarna uppnås om betongen med snabb hållfasthetsutveckling används, där både armeringsmängd och dimensioner på konstruktionsdelar kan minskas. Dessutom kan avformning göras tidigare. Detta gäller speciellt i konstruktionsdelar som har stora belastningar.

I Ohon m.fl. (2004) ges ett exempel på hur både armering och betong har utvecklats sedan början av 1970-talet. Som exempel nämns att 1972 hade betongen och armeringen dimensionerande hållfastheter på 30 MPa (Fc30) respektive 390 MPa (SD390). Sedan 1995 har betong och armering med dimensionerande hållfastheter på 100 MPa (Fc100) respektive 685 MPa (SD685). För att åstadkomma en betong med så höga hållfastheter krävs att vattencementtalet är lågt kombinerat med användning av effektiva superplasticerande tillsatsmedel (för att få en arbetbar betong trots låga vattenhalter). Ett potentiellt problem är dock att betong med låga vct blir också mer känsliga för brand (risk för explosiv spjälkning) och för att minska detta tillsätts polypropylenfiber vid blandning.

Rekommendationer för val av betongsammansättning

I litteraturen finns en del rekommendationer kring val av betongsammansättning för byggnation av höga byggnader, se t.ex. fib (2014) eller Bester (2013). I fib (2014) ges följande generella rekommendationer kring val av betong (kopplat till krav på lägsta bärförmåga):

- **Grundkonstruktioner**, där det rekommenderas att använda betong med stora mängder tillsatsmaterial (flygaska och/eller GGBS). Användning av tillsatsmaterial innebär speciellt att värmeutvecklingen i samband med hydratation begränsas, vilket är gynnsamt för massiva konstruktioner (vilket är vanligt i höga byggnader). Den vanligaste tillsatsen är GGBS och det nämns att normala tillsatser är 50-70 % (av bindemedelsmängden), men att tillsatser på 80 % också har använts. Dock kan användning av tillsatsmaterial innebära att betongens hållfasthet växer till långsammare, speciellt i ung ålder (t.ex. 28 dygnshållfastheten). Det nämns att normalt är den tidiga belastningen på grundkonstruktion betydligt lägre än den slutbelastningen, vilket betyder att en långsammare hållfasthetstillväxt kan accepteras. Det rekommenderas därför att betongens hållfasthet kan specificeras vid 56 dygns eller 91 dygns ålder

- **Bärande konstruktionsdelar**, där det rekommenderas att betong med hög hållfasthetsklass används, överstigande C50/60. Det rekommenderas också att betongen skall vara pumpbar (vilket normalt åstadkoms genom att ha en viss mängd finmaterial i betongen, vilket i sin tur medför att hållfastheten blir hög). Om betongen pumpas mer än 30 våningar krävs normalt en betong som klassas som höghållfasthet (med dagens betongteknologi).
- **Bjälklag**, där normalt betong med lägre hållfasthetsklass kan användas. Det påpekas dock att detta kan innebära problem i anslutning till pelare, där betongen i en del av pelaren kan få lägre hållfasthet än avsett.

Det bör påpekas att valet av betong inte bara styrs av krav på lägsta bärförmåga utan också av andra faktorer, t.ex. krav på pumpbarhet och uttorkning. Både krav på pumpbarhet och uttorkning medför normalt att en högre betongkvalitet behöver användas än om enbart krav på bärförmåga styr. Det finns många fördelar med att använda en betong med hög hållfasthet, speciellt för lastbärande konstruktionsdelar. Med en hög hållfasthet kan tvärsnittsdimensioner minskas, t.ex. på pelare, och dessutom blir betongens mekaniska egenskaper mer gynnsamma, t.ex. högre E-modul och mindre krypning. Om olika betongkvaliteter används kan dock hänsyn behöva tas till varierande E-moduler, t.ex. med hänsyn till deformationer vid olika spänningar. Det kan också bli problem med den praktiska hanteringen av betongen på arbetsplatsen, där det exempelvis finns risk för sammanblandning av olika betongsorter. För att undvika sammanblandning av olika betongsorter rekommenderas att inte allt för många sorter används, Isgren (2019).

I fib (2014) påpekas också att betong med hög hållfasthet (speciellt hållfasthet överstigande C70/85) kan vara mer känslig för spjälkning (vid brand), speciellt om betongen innehåller tillsatser av silikastoft. För att minska risken för spjälkning anges därför i Eurokod 2 att PP-fiber skall blandas i betongen (dosering överstigande 2 kg/m³). I fib (2014) påpekas också att en annan viktig faktor att ta hänsyn till är ”byggbarheten” där exempelvis hänsyn måste tas till hållfasthetstillväxt och gjutning av konstruktionsdelar med stora mängder armering. ”Byggbarheten” är också något som påpekas i Stein m.fl. (2015) där exempel ges på hur användning av flygaska kan förbättra betongens egenskaper, t.ex. beständighet, hastighet på tillstyvnande, tidig hållfasthet, värmeutveckling samt härdning. I både fib (2014) och Stein m.fl. (2015) påpekas vikten av att betongsammansättningar som används till höga byggnader förprovas innan de används i verkliga gjutningar.

I Bester (2013) ges följande rekommendationer kring sammansättning av betong till höga byggnader:

- **Hållfasthet**, där höga hållfastheter normalt krävs eftersom laster i höga byggnader är stora. Detta kräver normalt en betong med lågt vct och där bindemedlet består av både Portlandcement kombineras med tillsatsmaterial. Det ställs också höga krav på ballasten, som annars riskerar att bli den svaga länken, där exempelvis ballasten behöver vara extra styv (dvs. ha hög elasticitetsmodul).
- **Övriga mekaniska egenskaper**, där betongen bör ha stor styvhet, dvs. hög elasticitetsmodul (E-modul), och låg krypning. Dessa egenskaper uppnås genom att betongen sätts samman på ett lämpligt sätt. I många fall kan betongens E-modul styras genom lämpliga val av ballast, där E-modulen varierar beroende på typ av ballast. Det finns generella värden på betongens E-modul i Eurokod 2, men mätningar visar att dessa värden underskattar betongens styvhet för vissa typer av ballast, Isgren (2019). Detta i sin tur betyder att betongens styvhet underskattas om dessa generella värden används. För att få mer rättvisande värden på betongens styvhet behöver betongens E-modul därför bestämmas experimentellt. Isgren (2019) nämner att detta är något som gjorts i Storbritannien med goda resultat.

- **Värmeutveckling**, där betong med lågt vct (och höga halter bindemedel) riskerar att få hög värmeutveckling. En hög värmeutveckling kan innebära problem, där exempelvis sprickbildning kan uppstå. Därför bör värmeutvecklingen begränsas, t.ex. genom kylning och/eller användning av betong med tillsatsmaterial. I flera projekt har betong med stora tillsatser av flygaska eller GGBS använts med gott resultat för att begränsa värmeutvecklingen. På det sätt kan också behovet av kylning minskas eller helt undvikas.
- **Arbetbarhet**, där många konstruktionsdelar är normalt kraftiga armerade vilket ställer krav på att betongen måste ha tillräckligt god arbetbarhet. Dessutom måste betongen vara pumpbar. Exempelvis kan självkompakterande betong användas, vilket i sin tur också ställer krav på att formar är tillräckligt dimensionerade för att motstå tryck och eventuella läckage.
- **Pumpbarhet**, där betongen i de allra flesta fall skall pumpas till gjutplatsen. För att få en pumpbar betong, behöver sammansättning vara lämplig. Exempelvis bör halten av finmaterial vara tillräckligt hög för att på så sätt få en stabil betong även när den är utsatt för tryck. Om inte halten av finmaterial är tillräckligt hög finns det risk för ”pluggar” bildas av den grövre ballasten, där cementpastan riskerar att ”pressas ur” betongen vid pumpning. Av vikt är också att ha tillräckligt hög dosering av superplasticerare, där det annars finns risk att betongens konsistens blir trögare under pumpning och därför kan orsaka stopp. Oftast avgör pumpbarheten betongens sammansättning, där det behövs en viss mängd finmaterial (bindemedel + filler) för att få en stabil betong som inte riskerar tryckas sönder i samband med pumpning, Isgren (2019). I många fall används flygaska och/eller GGBS som finmaterial, där speciellt flygaska bidrar till att betongen blir mer lättpumpad. En sådan betong får normalt en hållfasthetsklass som överstiger C45/55, vilket också är något som måste tas hänsyn till vid dimensionering av höga byggnader.
- **Utförande**. Det är också av vikt att utförande blir bra, där anvisningar i utförandestandarderna SS-EN 13670 och SS 137006 ska följas (vilket gäller för alla betongkonstruktioner). Ett ej lämpligt utförande kan leda till att betongen inte få avsedda egenskaper.

I Clark (2014) ges också rekommendationer kring val av betong till höga byggnader, där det rekommenderas att betongen normalt bör ha en hållfasthet som överstiger 50-60 MPa, men att i riktigt höga byggnader kan det krävas betong med hållfasthet på upp till 100 MPa. Det påpekas dock att exakt vilka betongkvaliteter som behövs beror på den specifika byggnaden, där t.ex. utformning och användning påverkar. I många fall behövs både en hög sluthållfasthet (för att klara stora belastningar) och en hög tidig hållfasthet (för att få ett effektivt utnyttjande av formar – se vidare i kapitlet om Produktionsteknik.

En viktig aspekt som sällan nämns i litteraturen är grundläggningen av höga byggnader, Isgren (2019). Normalt används dock stora volymer betong till grundläggningen. Vilken typ av grundläggning som behöver beror på hur markförhållandena vid arbetsplatsen ser ut samt vilken belastning grundläggningen utsätts för. Som exempel kan nämnas att för höga byggnader i London är mängden betong normalt större i underbyggnaden än i överbyggnaden, Isgren (2019). Gjutning av stora volymer betong kan medföra en del problem, t.ex. att värmeutveckling blir hög vilket i sin tur medför att höga temperaturer uppstår i betongen. En stor del av belastningen på grundkonstruktioner i höga byggnader kan hänföras till de betongkonstruktioner som finns i byggnaden. För att minska belastningen kan lättballastbetong, med en skrymdensitet på 1800-1900 kg/m³, användas i exempelvis bjälklag. Dock finns det begränsningar i hållfasthet med lättballastbetong, där inte för höga hållfasthetsklasser bör föreskrivas (där tillgängliga lättballastmaterial styr vilken hållfasthet som kan åstadkommas). Isgren (2019) nämner som exempel att i London går det inte att tillverka lättballastbetong med en hållfasthetsklass

överstigande LC40/44 med tillgängliga lättballastmaterial om skrymdensiteten på betongen samtidigt skall vara under ca 1900 kr/m³.

Det finns flera möjligheter att minska värmeutvecklingen från massiva konstruktioner med stora volymer betong. Det vanligaste är att betongen kyls, men det är många gånger inte praktiskt möjligt. Vid många arbetsplatser är det svårt att få tag på vatten till kylning och normalt kan det också svårt att släppa ut kylvatten i vattendrag eller avlopp på grund av miljöskäl, Isgren (2019). För att undvika behov av kylning kan betongsammansättningen väljas så att värmeutvecklingen blir lägre. För att minska värmeutvecklingen behöver mängden cementklinker minskas i betongen. Detta kan antingen göras genom att använda en betong med högre vattencementtal⁹ (vilket medför en lägre cementhalt) och/eller att tillsatsmaterial används i betongen (främst flygaska eller GGBS).

Exempel på val betongkvalitet i projekt

Några exempel på betongkvaliteter som har använts i höga byggnader som har uppförts under de senaste tio åren redovisas i mpa (2015). Det som i stor utsträckning påverkar valet av betongkvalitet i höga byggnader är utformning av den bärande kärnan och bjälklagen. I många konstruktioner finns önskemål på begränsade dimensioner på kärnan och/eller bjälklag, vilket i sin tur förutsätter användning av betong med hög hållfasthet. I flera av byggnaderna som beskrivs har betong med hållfasthet överstigande 100 MPa använts (t.ex. i One World Trade Center i New York). Trots att betong med hög hållfasthet används krävs stora mängder armering. Som exempel kan nämnas att i One World Trade Center är armeringsinnehållet ca 295 ton per våning (dvs. ca 4 m) i de övre delarna och ca 218 ton per våning (upp till våning 20). One World Trade Center är också dimensionerad för en betong med en tryckhållfasthet på ca 100 MPa, vilket medförde att en högpresterande betong fick användas. Det fanns också krav på att både klimatpåverkan och värmeutvecklingen från betongen skulle begränsas. För att minska klimatpåverkan användes en betong med max 237 kg cement per m³. Dessutom skulle betongen ha ett öppethållande på ca 2 tim för att kunna transporteras till arbetsplatsen. Den betong som till slut användes var sammansatt av 237 kg cement, 42 kg flygaska och 281 kg GGBS per m³ kombinerat med speciella tillsatsmedel.

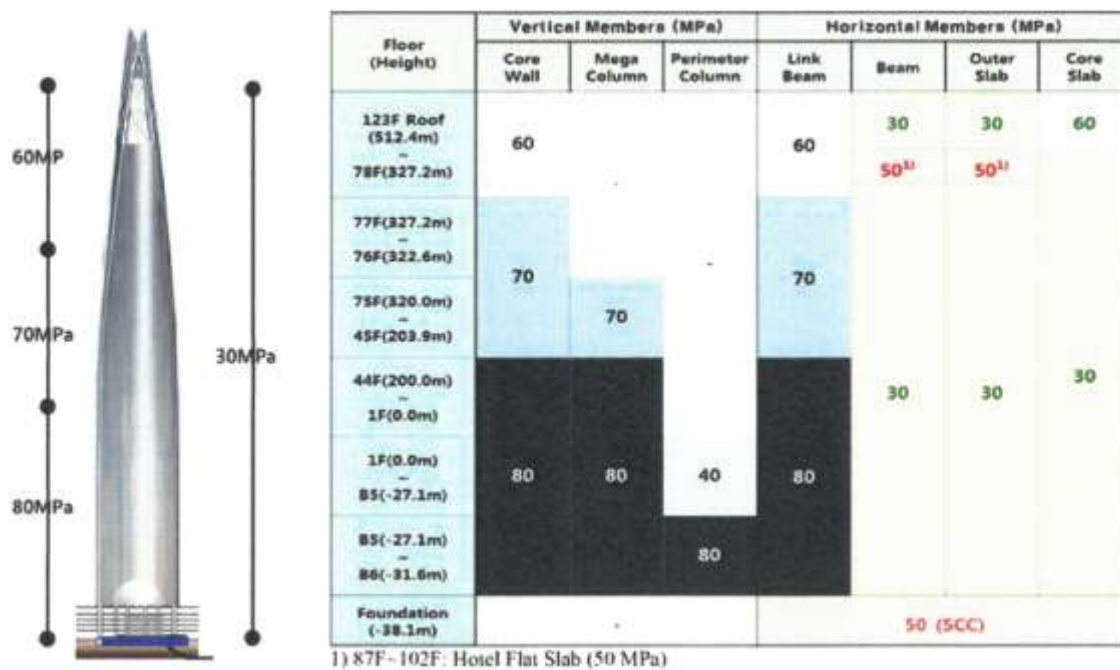
I Guo & Tsai (1996) beskrivs betongen som har använts vid byggnationen av en 85 våningar hög byggnad i Taipei, Taiwan. En ”högpresterande” betong (HPC – High Performance Concrete) har använts, där det med högpresterande inte bara avsågs hållfasthet avses utan även andra egenskaper t.ex. arbetbarhet och beständighet. Den betong som användes var sammansatt av Portlandcement (358 kg/m³), flygaska (141 kg/m³) och GGBS (19 kg/m³). Inga uppgifter om vattenhalt redovisas. Både superplasticerande och luftporbildande tillsatsmedel användes i betongen. Betongen hade bland annat följande egenskaper:

- Lägsta hållfasthet. 56 MPa (560 kg/cm²) vid 56 dygns ålder.
- Arbetbarhet. Sättnått på 25 ± 2 cm, uppmätt 45 min efter blandning.
- Högsta lufthalt på 5 %.

Ett annat intressant projekt som nämns i mpa (2015) är 432 Park Avenue i New York där ett 425 m högt bostadshus har uppförts. Denna byggnad är mycket slank, vilket har medfört att betong med en hållfasthet på ca 111 MPa har fått användas. Det fanns också krav på att synlig betong skulle ha en ljus kulör. För att klara både en hög hållfasthet och en ljus kulör användes metakaolin i betongen. Ursprungligen var förslaget att flygaska skulle användas i betongen, men då hade kulören blivit mörkare.

⁹ Ett högre vattencementtal innebär att betongens hållfasthet blir längre. För att kompensera för en lägre hållfasthet kan en annan referensålder (dvs. den ålder vid vilken betongens hållfasthet definieras) än 28 dygn tillämpas, t.ex. 56 dygn.

I Kim & Oee (2016) redovisas betongen som har använts till byggnationen av det 555 m höga byggnaden "Lotte World Tower" i Seoul i Sydkorea. Ett flertal olika betongkvaliteter har använts till byggnaden för att uppfylla ställda krav på främst hållfasthet men också begränsad värmeutveckling (främst i bottenplattan). I Figur 10 redovisa använda betongkvaliteter i olika delar av byggnaden, där det framgår tydligt att betong med högst hållfasthet används i de nedre delarna av byggnaden där också kraven på bärförmåga är högst.



Figur 10. Betongkvaliteter som har använts vid byggnationen av "Lotte World Tower". Figur från Kim & Lee (2016).

Normalt styrs betongsammansättning av pumpbarheten, där det behövs en viss mängd finmaterial (bindemedel + filler) för att få en stabil betong som inte riskerar tryckas sönder i samband med pumpning. En sådan betong får normalt en hållfasthetsklass som överstiger C45/55, Isgren (2019). Detta betyder att de uppgifter som finns i litteraturen om att betong med hållfasthet som är lägre än C45/55 har använts för gjutningar på höga höjder kan ifrågasättas.

Produktionsteknik

Allmänt

Valet av produktionsteknik påverkas av vilket bärande system som används. Ett exempel är utnyttjandet av formor där det är av vikt att typen av formor anpassas till valet av bärande system för att få ett så effektivt utnyttjande av formarna som möjligt. Det finns flera olika bärande system som kan användas vid byggnation av höga byggnader. I fib (2014) ges följande rekommendationer kring val av bärande system:

- **Bärande kärna**, där olika typer av formsystem som användas. Fyra olika formsystem beskrivs; lyftform som lyfts med kran eller är självlyftande samt två olika varianter av självklättrande glidformor. Krav på betong och utrustning för de olika alternativen beskrivs och diskuteras vidare i följande stycken.
- **Bärande pelare och väggar** kan utformas på flera olika sätt med olika grad av standardisering. Det rekommenderas att ha så hög grad av standardisering som möjligt för att få ett så snabbt byggande som möjligt.
- Följande generella riktlinjer ges kring utformning av **bjälklag**:

- Normalt används platsgjutna bjälklag i höga byggnader. Dock rekommenderas att även prefabricerade bjälklag eller hybridbjälklag kan användas för byggande skall gå snabbare kombinerat med att både säkerhet och kvalitet förbättras.
- Vid platsgjutna bjälklag bör tjockleken göras så liten som möjligt, inte minst med tanke på byggbarheten. Förhöjda balkar bör undvikas.
- Volymen betong per gjutning bör göras så stor som möjligt, där volymen bestäms av logistiken på arbetsplatsen och krav på ytkvalitet. Det kan också finnas restriktioner i arbetstid.
- Tjockleken på bjälklag påverkar materialanvändning, kostnader och vikt. Ett exempel ges där en minskning i tjocklek på 25 mm per bjälklag medför att höjden på byggnaden kan minska med 1,25 m om byggnaden är 50 våningar hög.
- Typen av form som beror på hur laster förs ned i byggnaden och hur tillgängligheten för transport av material är i byggnaden.
- **Typ av armering**, dvs. slakarmering eller spännarmering. Det påpekas att om spännarmering används behöver särskild omsorg ombesörjas. Entreprenören kan föredra spännarmering eftersom detta ger en möjlighet för kortare cykeltider för formar och minskad vikt för armering. Ett alternativ kan också vara att använda ett hybrid- eller förfabricerat system.

En faktor som är viktig är att tidigt planera produktionen för att kunna få ett effektivt byggande, se mpa (2015). Detta rör allt från betongsammansättningar till vilka formsystem som används. Vid uppförande av höga byggnader är bygghastigheten viktig, där det ska fort att uppföra byggnader. Ett snabbt uppförande innebär att beställaren snabbare kan hyra ut eller sälja lokaler i huset. Exempel på sådant som kan snabba på byggprocessen är användning av betong med hög tidig hållfasthet, pumpning av betong och ”standardiserad” formsystem. Under senare år har också åtgärder för att minska klimatpåverkan börjat vidtas. Den mest effektiva åtgärden för att minska klimatpåverkan är att ersätta delar av Portlandklinker i betong med tillsatsmaterial (det finns exempel på användning av flygaska, GGBS eller metakaolin).

Ibrahim & Hamzeh (2015) påpekar att valet av formar måste anpassas till byggnadens utformning och att arbetena skall fortskrida enligt plan. Det är av vikt att ta hänsyn till hur olika moment påverkar varandra, där det exempelvis finns en tydlig koppling mellan formsystem och arbeten med betonggjutning eller andra arbeten. Som ett exempel nämns användning av formar som behöver lyftas med kran, där kranen blir upptagen med att lyfta formar och därmed inte går att använda för andra lyft på arbetsplatsen.

Vid byggnation av höga byggnader är ett optimalt utnyttjande av formar av vikt. Den finns två principiella metoder för detta, se An m.fl. (2004): (i) tidig formrivning, där en betong med hög hållfasthet (högre än vad som egentligen krävs för byggnadens bärförmåga) används för att minimera risk för sprickbildning etc. vid rivningen, eller (ii) använda fler formar. Med dessa metoder kan kostnaderna öka för just betongen eller formarna, men den totala byggkostnaden minskar eftersom det går fortare att bygga byggnadens stomme. Det påpekas att en viktig faktor som påverkar byggtiden är cykeltider för formar, dvs. hur snabbt formarna kan användas för konstruktionsdelar högre upp i byggnaden. Faktorer som påverkar cykeltiderna är tidpunkt för formrivning (dvs. hur snabbt betongen når upp till tillräckligt hög hållfasthet), antalet formar och den tidiga hållfastheten. En metod att få en högre tidig hållfasthet är att använda en betong som har högre kvalitet än vad som egentligen behövs med avseende på bärförmåga.

Ytterligare en metod för att minska cykeltider för formar och på så sätt snabba på byggandet är att använda standardiserade formsystem för exempelvis bjälklag, där geometrin normalt är (nästan) samma mellan olika våningar. I Clark (2014) nämns att med standardiserade formsystem och lämpliga val av betongsammansättning kan cykeltiden per våning kortas ned med upp till 20 %. För

en 50 våningar hög byggnad kan detta innebära en förkortning i byggtid med upp till ca två månader.

Byggnation av höga byggnader är ofta komplicerade projekt med många speciella konstruktionslösningar. För att minimera eventuella problem som kan uppstå vid byggnationen visar erfarenheter att det är viktigt att samtliga involverade parter tidigt samverkar kring utformning av konstruktionslösningar. Exempel på konstruktionslösningar där erfarenheter visar att tidig samverkan krävs för att undvika eventuella problem är, Isgren (2019).

- Genomföringar av pelare i bjälklag. I många fall föreskrivs olika betongkvalitet i pelare och omgivande bjälklag vilket medför två problem: (1) Det går normalt inte att hantera två olika betongsorter vid pumpning och (2) Betongen som används har normalt lös konsistens, vilket gör det praktiskt omöjligt att blanda två betongsorter.
- Styvhet hos slanka höga byggnader, som normalt åstadkoms med ”outriggervåningar”. Dessa ”outriggervåningar” är normalt installationsvåningar där väggarna har gjorts extra styva och där gjutfogar gjuts igen i slutfasen av byggprocessen. Detta arrangemang behöver normalt omfattande planering i konstruktionsskedet för att möjliggöra ett smidigt utförande i produktionsskedet.

Val av formsystem

Valet av ett lämpligt formsystem är av vikt för att få ett så effektivt utnyttjande av formar som möjligt. Normalt är formar en av de stora kostnaderna vid byggnation av höga byggnader, där det gäller att välja rätt formsystem för att hålla kostnaderna nere. I litteraturen finns en del rekommendationer på hur valet av formar kan göras. Ett exempel är Sharmila & Christofer (2016) där fyra nyckelfaktorer vid val av formsystem har identifierats (där de extra viktiga faktorerna har fetmarkerats):

- Möjligheter till anpassning och flexibilitet.
 - **Livslängd för systemet.**
 - **Kvalitet och ytfinish.**
 - Tillgänglighet.
 - **Kostnader.**
 - **Säkerhet.**
 - Anskaffning.
- Byggnadsspecifika faktorer.
 - Typ av konstruktion.
 - Maximal belastning.
- Jobbspecifika faktorer.
 - **Tidsfaktorer**, t.ex. cykeltider för formar.
 - Tillgänglighet på arbetsplatsen.
 - Montering och nedmontering.
 - Anpassning för arbetare?
- Lokala förhållanden.
 - Väderförhållanden.
 - Kompetens hos arbetare.

Valet av formsystem är också något som beskrivs i Ibrahim & Hamzeh (2015), där det bland annat nämns att höga byggnader har många krav och begränsningar kring sig, där det ofta är mycket ont om plats kring arbetsplatsen. Ofta är det också tidspress i projekten vilket kombinerat med att det är många processer som pågår samtidigt på arbetsplatsen gör det än mer komplicerat. Detta gör det svårt att på ett optimalt sätt välja lämpliga formsystem eftersom det finns många påverkande faktorer

I Gnida (2010) görs en systematisk genomgång av de faktorer som påverkar valet av formsystem, där en uppdelning görs i **interna** och **externa påverkande faktorer**, se Tabell 1.

Tabell 1. Faktorer som påverkar vid val av formsystem vid byggande av höga byggnader. Gnida (2010).

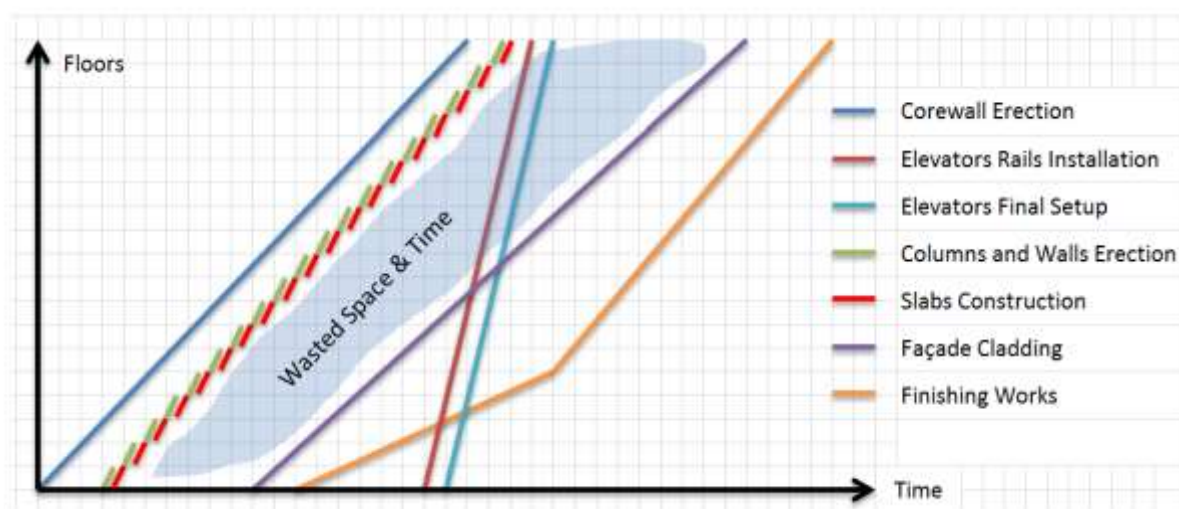
Interna påverkande faktorer		Externa påverkande faktorer	
Geometri	Repetition Enkel/komplex Förändringar i geometri	Utrymme	Begränsningar på grund av omgivande konstruktioner. Lagringsutrymme. Monteringsutrymme.
Betong	Hastighet på gjutning / formtryck. Ytfinish på gjutning. Härtningsförhållanden.	Vind	Vindlast.
Arbetssekvens	Cykeltider.	Kran	Kapacitet. Tillgänglighet. Typ. Räckvidd.
Val av formsystem	Redan använda formmaterial som återanvänds. Hyra eller köpa formmaterial. Bästa värde för nuvarande projekt eller flexibilitet för framtida projekt.	Säkerhet	Speciella behov.
		Planering av byggnation	Viktiga hålltider. Arbetschema och skift. Längd på projekt. Ledigheter.
		Lokala regelverk	Tillstånd. Restriktioner vad gäller oväsen. Krav vad gäller säkerhet.

Baserat på påverkande faktorer kan sedan själva valet av formsystem göras, där en indelning i fyra kategorier kan göras (se Tabell 2).

Tabell 2. Kategorier vid val av formsystem. Gnida (2010).

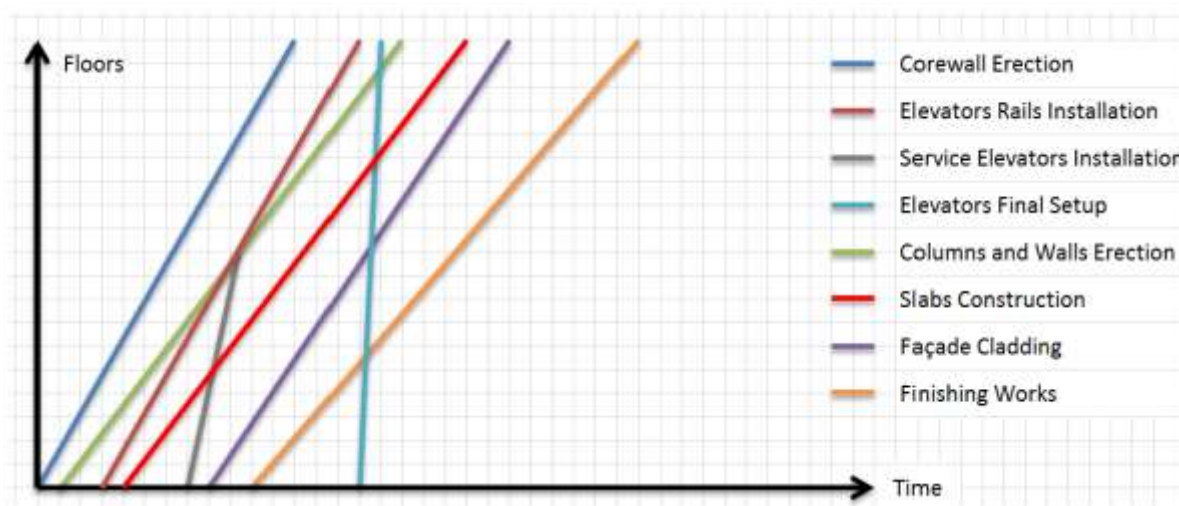
Kategori	Exempel på form		
Storlek på formen	Små. Flyttas manuellt. Stora. Flyttas antingen med kran eller självklättrande.		
System / plats för användning för formen	Traditionell träform / aluminiumform: oregelbundna former. Systemform (gang form) / klätterform / glidform (jump form) : central kärna. Formsystem : bjälklag. Tunnelform : upprepade rektangulära formar.		
Byggnadsmaterial för formen	Trä Går att använda till komplexa konstruktioner. Arbetsintensiv. Ej miljövänlig. Låg startkostnad. Populär.	Stål Värm- eller kallbearbetad. Tung. Lämplig för stora ytor.	Aluminium Styf och med låg vikt. Fina ytor. Hög kostnad för material och arbetskraft.
Användning av formen	Manuell. Självklättrande. Lyft med kran. Olika former av tunnelsystem (formen flyttas varefter konstruktionen byggs).		

Vanligen är det flera olika typer av konstruktionsdelar som ska uppföras i en hög byggnad, där flera av konstruktionsdelarna uppförs parallellt. För att få ett så optimalt utnyttjande som möjligt av formar krävs det planering hur formar utnyttjas, där principiella flödesschema kan användas. Exempel på sådana flödesschema visas i Figur 11 (enklare formsystem) och Figur 12 (avancerade formsystem).



Figur 11. Flödesschema för val av enklare formsystem. Figur från Ibrahim & Hamzeh (2015).

I Figur 11 finns ett område som betecknas "Wasted Space & Time", vilket betyder att formar inte används på ett optimalt sätt. I praktiken innebär detta att formarna inte används.



Figur 12. Flödesschema för val av avancerade formsystem. Figur från Ibrahim & Hamzeh (2015).

I Gnida (2010) ges också rekommendationer för hur formsystem till den centrala kärnan i höga byggnader kan väljas. Tre olika principiella system redovisas:

- **CB.** Traditionell klätterform, där formen får lyftas med kran vid förflyttning. Mest ekonomiskt för byggnader med en höjd på upp till ca 10 våningar.
- **RCS** (Rail Climbing System). Klätterform som förflyttas på skenor. Mest ekonomiskt för byggnader med en höjd mellan ca 10-30/40 våningars. Kriterier för att använda RCS är (i) en låg- medelhög höjd, (ii) begränsad yta för arbetsområde, (iii) begränsad krankapacitet samt

- (iv) kort byggtid. Användning av RCS ställer dock höga krav på den betong som används, där det exempelvis krävs hög tidig hållfasthet.
- **ACS** (Automatic Climbing System). Klätterform som förflyttas med hydraulik. Mest ekonomiskt för byggnader med en höjd över ca 30/40 våningars. Kriterier för att använda ACS är: (i) en hög höjd, (ii) begränsad yta för arbetsområde, (iii) begränsad krankapacitet samt (iv) kort byggtid. Användning av ACS ställer dock höga krav på den betong som används, där det exempelvis krävs hög tidig hållfasthet.

Vilket av dessa system som är mest ekonomiskt för ett specifikt byggnadsprojekt beror på höjden på byggnaden (enligt ovan). System skiljer sig åt vad gäller kostnad för inköp och montage respektive drift. Det billigaste systemet att köpa och montera är den traditionella klätterformen, medan RCS och speciellt ACS har högre kostnader både vad gäller inköp och montage. Vad gäller kostnader för drift har däremot RCS och ACS lägre kostnader per våning jämfört med traditionell klätterform. Därför är traditionell klätterform mest lämplig för låg byggnader medan ju högre byggnaden skall vara blir RCS och speciellt ACS allt mer effektiva. En fördel med RCS är också att dessa formar kan användas vid speciella geometrier, t.ex. vridna och/eller böjda fasader. För att RCS och ACS ska kunna användas effektivt bör en betong med snabb hållfasthetstillväxt användas, för att på så sätt kunna flytta formarna snabbare.

I An m.fl. (2004) redovisas två fallstudier där det illustreras hur byggkostnaden kan minimeras genom lämpliga val av hållfasthet på betongen och antal uppsättningar av formar. I båda fallstudierna visar resultaten att det mest optimala är att ha en betong med hållfasthet 30 MPa och två uppsättningar av formar respektive 35 MPa och två uppsättningar formar. Dock är det vanligaste i Sydkorea att ha en betong med hållfasthet 27 MPa och två uppsättningar formar. Författarna menar att det därför finns en potential att minska byggkostnader genom att bättre val av betongkvalitet och antal formar.

Isgren (2019) påpekar att typen av formsystem beror på utformning av byggnaden. I byggnader med ett centralt trapphus och en yttre stålstomme, vilket är vanligt vid kontorshus, är **glidform** vanligt. I vissa fall kan trapphuset vara ett hinder för krantransporter – i sådana fall kan glidformsgjutningen ”parkeras” för att underlätta krantransporter. Glidformsgjutningar behöver också ”parkeras” när den geometriska utformningen på trapphuset förändras. I byggnader med betongbjälklag, t.ex. bostadshus, är **klätterform** vanligt. Med klätterform kan gjutning av trapphus och bjälklag samordnas. Samordning mellan armerings- och gjutlagen blir också bra när klätterform används. Den vanligaste typen av klätterform är hydrauliska självklättrande klätterformar. Vid gjutning av bjälklag används ofta **valvformar** bestående av paneler. Dessa formar består av relativt små delar och är därför lätta att hantera på arbetsplatsen. Många valvformar har också så kallade ”dropheads”, vilket möjliggör snabbare avformning samtidigt som stämpan kan stå kvar. På detta sätt kan cykeltider för formar kortas ned. För att ytterligare korta ned cykeltider för formar kan en formhiss integreras i säkerhetsskärmen.

Materiallogistik på arbetsplatsen

Allmänt

Materiallogistiken är av stor vikt när höga byggnader uppförs, eftersom det krävs stora mängder material som skall transporteras i vertikal led till höga höjder. Normalt uppförs höga byggnader i stadskärnor, vilket betyder att det också är ont om plats på arbetsplatsen. Detta kan ställa problem både vad gäller transporter av material till arbetsplatsen och transport av material på arbetsplatsen. Om det är ont om plats på byggarbetsplatsen finns det heller inga möjligheter att lagra material på arbetsplatsen i någon större utsträckning utan material måste direkt transporteras till arbetsstället. Detta är också något som rekommenderas av Isgren (2019) där

transporter av material bör göras när materialen behövs i byggprocessen (dvs. "Just-In-time") för att minimera behovet av lagring på arbetsplatsen.

Transporter av material till byggarbetsplatsen sker normalt med lastbil. På arbetsplatsen sker normalt transporten av material till arbetsstället med kran eller pump (för betong). Vid transport av material till höga höjder är säkerheten under transporten av stor vikt, där exempelvis inga delar får lossna under transporten (om transporten sker med kran). Även de minsta små delar, t.ex. skruvar eller handverktyg, kan orsaka stora skador om den faller ned från hög höjd. Detta betyder också att det är en stor utmaning att transportera stora mängder material till höga höjder med kran, där utmaningen blir större ju högre transporten skall ske. Därför är det en fördel om transporter av material kan göras med andra metoder, t.ex. i hissar eller pumpning (av betong). Även transporter av personal vid byggnation av höga byggnader är en utmaning, där transporten normalt sker med hissar. Många gånger kan transporter av material och personal vara det som är den trånga sektionen i tidsplaner. Det är därför viktigt att noggrant planera hur transporter av både material och personal skall göras på arbetsplatsen.

Vad gäller pumpning finns det egentligen inga begränsningar i hur högt eller långt betong kan pumpas, där det är främst pumpning i vertikal led som innebär en utmaning eftersom höga pumptryck kan uppstå. Höga pumptryck kan skada både utrustning och betongen. Betongen måste vara anpassad för pumpning för att inte pumptrycken skall bli för höga.

Det finns flera exempel på höga byggnader där betong har pumpats till höga höjder, där rekordet för närvarande är 621 m vid byggnationen av Goldin Finance 117 (också kallad China 117) i Tianjin. Andra exempel är Burj Khalifa i Dubai (pumpning upp till ca 600 m höjd), se Orchard (2009), Petronas Tower i Malaysia (pumpning upp till ca 380 m), se Kim & Lee (2004), eller Federation Tower i Ryssland (pumpning upp till ca 320 m höjd), se Reina (2008). Ett annat exempel är Lotte world Tower i Korea (pumpning upp till 514 m höjd), se Kim & Lee (2016). Gemensamt för alla dessa projekt använda betongsammansättningar har anpassats för pumpning och extra kraftfulla pumpar har använts.

Vid pumpning av betong rekommenderas att inte allt för många betongsorter används, Isgren (2019). Detta för att underlätta hanteringen när betongen når arbetsstället på hög tid och inte minst undvika sammanblandning av olika betongsorter. Som ett exempel kan nämnas att vid byggnationen av The Shard i London användes i huvudsak två olika betongsorter för byggnadsdelar belägna över våning 20. I pelarna användes betong med hållfasthetsklass C65/80 och för övriga konstruktionsdelar användes betong med hållfasthetsklass C50/60. För varje betongsort togs ett tiotal varianter på sammansättning fram för att kompensera för exempelvis rådande väderlek, höjd till arbetsstället samt volym på gjutningen.

Förutom pumpning är en annan viktig faktor att ta hänsyn vid byggnation av höga byggnader är den vertikala transporten av annat byggmaterial, där tillgång till och placering av kranar är av vikt. Isgren (2019) påpekar att tillgång till kranar bland att bero på rådande väderlek och rekommenderar därför att byggarbetsplatsen bör planeras för att vara oberoende av konstant tillgång till kranar. För minska beroendet av kranar rekommenderar Isgren (2019) att en viss mängd material, t.ex. armering, lagras vid arbetsstället uppe i byggnaden. Vad gäller typ av kran beror detta på vad som skall transporteras i vertikal led. Exempelvis om prefabricerade betongelement används i byggnaden blir kraven på kranar högre, se exempelvis Clark (2014).

Pumpning av betong

Pumpning av betong är den effektivaste metoden att transportera betong på byggarbetsplatser, där stora volymer betong kan transporteras på ett snabbt och enkelt sätt till arbetsstället. Pumpning av betong till höga höjder kan dock innebära en del problem eftersom det uppstår höga pumptryck, som

både kan ge stora påfrestningar på utrustning (pumpar och slangar/rör) och kan påverka betongens egenskaper negativt. Det finns också risk att det blir stopp i eller skador på slangar/rör i samband med pumpning. Därför rekommenderas att slangar/rör för pumpning placeras så att de är åtkomliga från normalt tillgängliga utrymmen för att underlätta felsökning, Isgren (2019).

Normalt används kolvpumpar för pumpning av betong och de pumptryck som kan uppstå vid ”normal” pumpning upp till ca 50 m i vertikal led är ca 10 MPa (100 bar) övertryck och ca 1 MPa (10 bar) undertryck, Fabeko (2015). Vid pumpning i stora avstånd i vertikal led kan betydligt högre pumptryck uppstå. Det ställs också höga krav på både pump och leveransrör för att pumpa till så höga höjder, där dessa måste vara anpassade till varandra. Exempelvis får inte diametern på leveransröret vara för liten eller för stor, då pumptrycken kan bli för stora eller att betongen pumpas under för lång tid.

För att lyckas med pumpning till höga höjder krävs att lämplig pumpteknik används och att betongen är lämpligt sammansatt, exempel på hur detta kan göras ges i Gauld (2010) & Aldred (2010). För att få god pumpbarhet nämner Gauld (2019) att betongen måste vara sammansatt på ett sätt så att friktionen mot pumpslangar blir låg och att låga pumptryck behöver användas. Om för höga pumptryck används finns det en risk att betongen separerar. För att undvika separation måste pumptrycket hållas lägre än det tryck som orsakar separation hos betongen. Pumptrycket beror på flera faktorer, t.ex. diametern på pumpslangar, betongsammansättningen och pumpens egenskaper. Diametern på pumpslangar avgör också hur stora ballast som kan användas i betongen, där för grov ballast kan innebära att det blir stopp i slangarna vid pumpning. Andra faktorer som behöver tas hänsyn till är hur betongens hållfasthetsklass skall anpassas, hur hänsyn ska tas varierande dimensioner på slangar och olika typer formar. En god pumpbarhet fås normalt genom att betongen innehåller en viss mängd finmaterial (bindemedel + filler), där finmaterialet stabiliserar betongen och motverkar att betongen separerar i samband med pumpning. En sådan betong får normalt en hållfasthetsklass som överstiger C45/55. Därför går det i praktiken normalt inte att använda betong med lägre hållfasthetsklass om betongen skall pumpas till höga höjder.

I dagsläget finns det exempel på betong som har pumpats över 600 m i vertikal led i ett svep (vid uppförandet av Burj Khalifa), se t.ex. Orchard (2009). Vid pumpning till så höga höjder kan mycket höga pumptryck uppstå, främst beroende på betongens egenvikt. Exempelvis var de högsta pumptrycken vid pumpningen i Burj Khalifa upp till 400 bar, dvs. fyra gånger så höga som normalt. Detta ställer också höga krav både på pumpar och pumprör. Ursprungligen var det planerat att dela upp pumpningen i deletapper, men detta visade sig inte vara den mest praktiska och ekonomiskt bästa lösningen. I detta projekt användes kraftfulla kolvpumpar och särskilt anpassade pumprör och kopplingar för att kunna motstå de höga tryck som uppstod i samband med pumpning (upp till 200 bar). Pumprören (med diameter 150 mm) var också speciellt anpassade för att ha högt motstånd mot slitage. Under byggtiden (32 månader) pumpades totalt 165000 m³ betong med hållfasthetsklass på upp till C70/85. Tiden det tog att pumpa betongen 606 m var ca 40 minuter, från det att betongen hölldes i pumpen tills att den var pumpad till arbetsstället.

För att betong skall röra sig i ett pumprör eller -slangar krävs att pumptrycket, P , måste vara högre än summan av (i) friktionen mellan betong och rörvägg, (ii) motståndet i betongmassan, (iii) strömningsförlust i röret och (iv) betongens egenvikt (vid pumpning vertikalt). Om pumpningen sker i böjda rör ökar pumptryck.

I Riding m.fl. (2016) redovisas en litteratur- och fältstudie rörande pumpning av betong. Det nämns bland att pumpbarheten för betong beror på om betongen är mättad (de fasta partiklarna i betongen är inte i kontakt med varandra) eller omättad (de fasta partiklarna i betongen är i kontakt med varandra). En mättad betong går att pumpa betydligt lättare och över längre avstånd än en omättad

betong, dvs. betongen måste vara mättad för att gå att pumpa. Vid pumpning av en mättad betong kan tre zoner urskiljas i pumpröret/slangen:

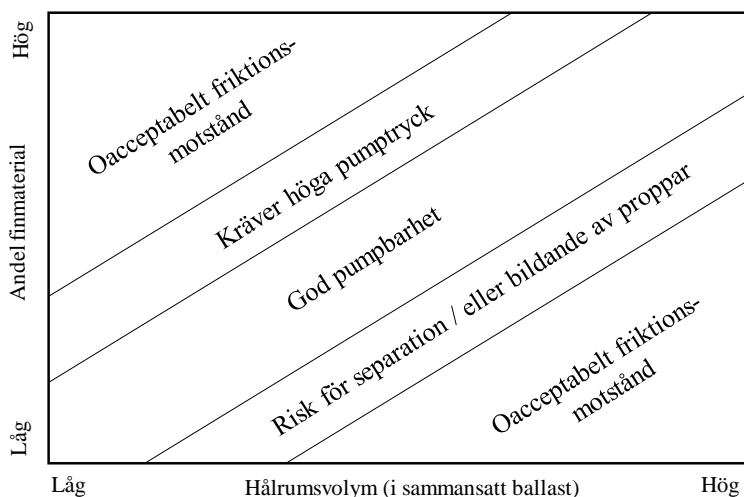
- **En första inre zon** ("pluggen"), där betongen inte skjuvas eftersom skjuvspänningen (τ) inte överstiger flytgränsspänningen (τ_0).
- **En andra zon**, där skjuvspänningen (τ) är lika med eller överstiger flytgränsspänningen (τ_0). Detta betyder att betongen skjuvas i denna zon.
- **En tredje yttre zon** ("smörjlagret" närmast pumpröret/slangen), där skjuvspänningen (τ) är lika med eller överstiger flytgränsspänningen (τ_0). Detta betyder att betongen skjuvas också i denna zon, men inte på samma sätt som i den andra zonen. "Smörjlagret" medför att friktion mellan röret/slangen och betongen minskar och att betongen kan förflyttas lättare. Tjockleken på smörjlagret är ca 1-5 mm och beror främst på betongsammansättningen, Choi m.fl. (2013).

Riding m.fl. (2016) har också gjort fältförsök där bland annat betongens egenskaper före och efter pumpning samt pumstryck har mätts upp. Det visade sig att betongens egenskaper påverkas av pumpning, där konsistensen i de flesta fall blev trögare efter pumpning. Även betongens luftporsystem studerades där det visade sig att luftporsystem blev sämre efter pumpning (vilket i sin tur innebär att betongens beständighet vid frostangrepp kan försämrats). Försöken visade att det finns ett samband mellan pumstryck och påverkan på luftporsystemet, där påverkan blev högre ju högre pumstrycken var. Därför rekommenderar Riding m.fl. (2016) att pumstryck skall hållas så låga som möjligt. De mest effektiva åtgärderna för att minska pumstrycket (och förbättra pumpbarheten) visade vara att ha en stor mängd finmaterial (dvs. bindemedel eller filler) i betongen samt att ha ett högt vct. Användning av tillsatsmaterial (främst flygaska) visade sig minska pumstrycket ytterligare. För att säkerställa att betongen har god pumpbarhet rekommendera Riding m.fl. (2016) att förundersökningar genomförs, där bl.a. provpumpning i full skala görs. Det rekommenderas också att betongens egenskaper bestäms efter pumpning och att proven helst tas från formen.

Det är av vikt att betongens pumpbarhet är god, dvs. betongens förmåga att transporteras genom pumpning i rör eller slangar samtidigt som betongens färska och hårdnande egenskaper inte påverkas negativt. Exempelvis får betongen inte separera under pumpning. En betongs pumpbarhet blir bättre ju lägre pumstryck som behövs för att transportera betongen, se Jacobsen m.fl. (2008). Jacobsen m.fl. (2008) visar att den faktor som i störst utsträckning påverkar pumpbarheten är betongens viskositet, dvs. betongens "interna" motstånd mot flöden. Det som avgör pumpbarheten hos en betong är halten finmaterial och hålrumsvolymen hos den sammansatta ballasten, se t.ex. Fabeko (2015). Hålrumsvolymen hos den sammansatta ballasten kan uttryckas som en funktion av stenandelen i ballasten, där erfarenheter visar att denna ska vara ca 40-55 % för att få en betong med god pumpbarhet. Dessutom påverkas pumpbarheten av exempelvis ballastens vattenbehov och kornformen (t.ex. kubiskt¹⁰ eller flisigt¹¹) samt användning av tillsatsmedel. Pumpbarheten kan uttryckas som ett samband mellan hålrumsvolymen och andelen finmaterial, se Figur 13.

¹⁰ Kubisk ballast minskar pumstrycken normalt.

¹¹ Flisig ballast ökar pumstrycken normalt.



Figur 13. Pumpbarhet, uttryckt som ett samband mellan hålrumsvolym (i den sammansatta ballasten) och andel finmaterial. Baserat på figur från Fabeko (2015).

I Figur 13 framgår att det finns en ”bra” sammansättning av ballast och andel finmaterial, som ger en betong med god pumpbarhet. Om andelen finmaterial är för låg finns det risk för proppbildning, där det finns flera utlösande faktorer: (i) separation under pumpning (där stenar ”trycks” ur betongen), (ii) största stenstorlek är för stor, (iii) variationer i pumphastighet, (iv) betongen innehåller för mycket luft eller (v) det finns föroreningar i betongen. Dessa faktorer medför att betongens viskositet ökar, vilket medför att friktionen i pumpröret eller -slangen blir så hög att pumpens kapacitet överskrids.

Dt finns metoder att prognostisera vilka pumptryck som uppstår i samband med pumpning av betong. Traditionellt har pumptryck prognostiserats baserat på praktiska erfarenheter, t.ex. diagram med samband mellan typ av och längd på pumprör, den färska betongens egenskaper och pumptryck., se t.ex. ACI (1996) eller Fabeko (2015). Dessa erfarenheter är dock baserade på traditionella betonger, där moderna betonger beter sig annorlunda vilket i sin tur medför att erfarenheterna inte går att tillämpa. Ett exempel är självkompakterande betonger, där diagrammen indikerar att pumptrycket ska bli lågt medan praktiska erfarenheter visar att pumptrycken istället blir höga. En förklaring är den ökade användningen av moderna tillsatsmedel som gör att den färska betongen beter sig annorlunda. I De Schutter & Feys (2016) presenteras en litteraturstudie rörande hur pumptryck för moderna betonger kan prognostiseras. I de traditionella diagrammen prognostiseras pumptrycket baserat på betongens sättmått eller utbredningsmått (eller skjvuspänning). De Schutter & Feys (2015) påpekar att mer korrekt är att prognostisera pumptrycket baserat på betongens viskositet.

Betong kan antingen anses vara en koncentrerad suspension av fasta partiklar i vatten eller ett jordliknande material där kontakten mellan partiklar dominerar, se t.ex. Yamine m.fl. (2008). I Browne & Bamforth (1977) görs en liknande indelning, där betongen antingen kan vara fuktmättad (i en suspension) eller ej fuktmättad (jord). För att få låga pumptryck bör betongen vara en suspension. En faktor som avgör om betongen är en suspension eller jord är andelen grov ballast. Om andelen grov ballast är hög kommer ballastkornen vara i kontakt med varandra, vilket i sin tur innebär att den inre friktionen i betongen blir hög i samband med pumpning. Vid en lägre andel grov ballast blir betongen en suspension och den inre friktionen blir lägre. Om betongen övergår från suspension till jord under pumpning, vilket kan ske om dimensionen på pumprören minskar, ökar pumptrycken. Det finns också en risk att proppar bildas i pumprören.

Om betongen är en suspension påverkas pumptrycket också av om flödet av betong är laminärt eller turbulent. Vid laminära respektive turbulenta flöden är pumptryck linjärt respektive kvadratisk proportionellt med flödet. Normalt kan dock betong i samband med pumpning beskrivas som ett laminärt flöde. Pumptrycket kan då beräknas med Poiseuilles ekvation (Newtonisk material¹²) eller Buckingham-Reiners ekvation (Binghammaterial¹³). En faktor som också har visat sig påverka pumptrycket är att det vid pumpning bildas ett smörjande lager i övergångszonen mellan betong och pumprör, se t.ex. Le (2014).

Ytterligare faktorer som påverkar pumptrycken är dimensionen på pumpröret och typer av material i pumprören. Dimensionen på pumpröret påverkar, där pumptrycken minskar ju större dimensionen på rören är. Vad gäller typen av materialet i röret är det speciellt friktionen mellan betong och rör varierar beroende på material. Normalt är friktionen lägre i stålrör jämfört med gummirör, där det i Fabeko (2015) sägs att 3 m stålrör motsvarar 1 m gummirör.

I De Schutter & Feys (2016) redovisas de senaste rönen kring prognostisering av pumptryck för moderna där det finns modeller som ger god överensstämmelse mellan prognostiserade och uppmätta pumptryck. Dock finns det fortfarande en del områden som behöver utredas vidare:

- Pumpning av betong med mycket hög hållfasthet (ultrahög). I dessa betonger bildas inte det smörjande lagret mellan betong och pumprör.
- Utveckling av enkla metoder för att prova pumpbarheten av betong på arbetsplatsen.
- Bättre modeller för att bedöma effekten av böjar och förändringar av dimensioner på pumprör på pumptrycket.
- Variationer i betongens egenskaper under pumpning och hur detta påverkar pumptrycket.
- Utveckling av metoder för att kontinuerligt kontrollera betongens reologi och flödesegenskaper under pumpning.

I Jacobsen m.fl. (2008) sägs också att effekter av pumputrustningen, t.ex. pumprör och pumpar, kombinerat med betongens egenskaper (främst reologi) är något som behöver utredas vidare

Förutom pumptryck är en faktor att ta hänsyn till vid pumpning av betong i höga byggnader slitaget på pumprör. Exempelvis har typen av ballast stor påverkan, vilket nämns i exempelvis Bester (2013). Om en olämplig ballast används finns det risk att slitaget kan bli omfattande. Dessutom är det av vikt att välja rätt dimension på pumprör, för att undvika onödigt slitage och stopp vid pumpning.

En annan faktor att ta hänsyn till vid pumpning av betong i höga byggnader är att det uppstår ett visst spill av betong när pumpningen avslutas för dagen, där det blir betong kvar i pumprör och slangar. Beroende på byggnadens höjd kan det vara upp till ett tiotal kubikmeter betong som blir kvar i pumprör och slangar efter avslutad pumpning. För att även få ut denna volym betong kan de sista leveranserna av betong för dagen pumpas med vatten, Isgren (2019). På detta sätt kan några extra lastbilstransporter med betong till arbetsplatsen undvikas, vilket är en fördel vid arbetsplatser belägna i tätbebyggda områden. Det vatten som används för att trycka ut den sista betongen kan också renas och återanvändas.

Projekt med höga byggnader

I litteraturen finns en hel del information om specifika projekt där höga byggnader har uppförts. I följande stycken redovisas en del av dessa projekt.

¹² Ett Newtoniskt material är ett material som har ett linjärt samband mellan spänning och töjning.

¹³ Ett Binghammaterial är ett material som beter sig en fast kropp vid låga spänningar men blir en vätska vid höga spänningar.

Burj Khalifa

Burj Khalifa är en av världens högsta byggnader och är totalt 828 meter hög och har 164 våningar. Upp till våning 156 är byggnaden uppbyggd av betong, medan högre liggande delar är uppbyggda av stål. Byggnaden uppfördes under perioden 2004-2009.

Materialfrågor

Byggnationen av Burj Khalifa (benämnt Burj Dubai under byggtiden) beskrivs i bland annat Abdelrazq m.fl. (2008) och Orchard (2009).

I Abdelrazq m.fl. (2008) redogörs för det bärande system i Burj Khalifa som är uppbyggt av högpresterande betong i lastbärande väggar, som i sin tur är ihopbundna med yttre bärande pelare. Ihopbindningen har gjorts med armerade betongpaneler. De centrala bärande väggarna har tjocklekar som varierar mellan 500 mm till 1300 mm. Väggarna är ihopbundna med balkar av armerad betong eller komposit på varje våning. Bjälklagen består av 200-300 mm tjocka armerade betongplattor med spännvidder på ca 9 m mellan den centrala kärnan och de yttre pelarna. Grundläggningen består betongpålar (grävpålar med en diameter på 1500 mm som är ca 45 m långa) på vilka en 3700 m tjock bottenplattan har gjutits med självkompakterande högpresterande betong ($v_{ct} < 0,35$). För att skydda grundläggningen har ett katodiskt skydd installerats både på grävpålarna och på bottenplattan.

Abdelrazq m.fl. (2008) redovisar också hur byggarbetena för uppförandet av Burj Khalifa planerades, där bland annat ett strategiprogram togs fram. Detta strategiprogram innefattade följande punkter:

- Uppnä en tredagars cykel för byggarbeten med det bärande systemet.
- Utveckla ett optimalt transportsystem med stor kapacitet och korta transporttider.
- Använda formar som möjliggör att formen på byggnaden kan varieras över höjden.
- Ta fram en plan för hur materiallogistiken på arbetsplatsen skall lösas under byggnationen.
- Använda den bästa tillgängliga kunskap kring uppförande av höga byggnader.

En avgörande punkt var att ta fram lämpliga betongsammansättningar, där det genomfördes omfattande utvecklings- och provningsprogram innan byggarbetena sattes igång. Dessa program innefattade följande steg:

- Provblandningar för alla betongsammansättningar som användes i projektet.
- Provningar av mekaniska egenskaper hos dessa betongsammansättningar, t.ex. hållfasthet och E-modul.
- Provning av beständighetsegenskaper.
- Provning av krypning och krympning.
- Provning av vattenpermeabilitet och motstånd mot kloridinträngning.
- Simulering av pumpning av samtliga betongsammansättningar (pumpning upp till 600 m).
- Bestämning av värmeutveckling och analys av resultat. Dessa provningar har gjorts både i mindre provkroppar (normalt standardkuber) och i full skala (i speciella provkroppar).

Stort fokus har varit på val av produktionstekniker för att kunna få ett effektivt byggande. Bland annat har det funnits önskemål på cykeltider på tre dygn för formar. Följande produktionstekniker valdes till slut:

- Automatiska klätterformar (för byggnation av den centrala kärnan).
- Effektiva formar för byggnation av bjälklag.
- Avancerad teknik för betongpumpning, där betongen pumpades i ett steg till arbetsställena i toppen av byggnaden.
- Prefabricering av armering, där den största delen av armering har varit förtillverkad.

- Högpresterande betong har använts, med fokus på att få god pumpbarhet, hög hållfasthet samt god beständighet.

Totalt har fyra olika betongsorter använts i projektet, uppdelat på tre sorter för vertikala delar och en sort för horisontella delar. Samtliga betongsorter har varit självkompakterande och hållfastheten vid 28 dygn har varierat mellan 50-80 MPa (där betongen med högst hållfasthet användes i de nedre delarna av byggnaden). Den totala volymen betong som användes var 250000 m³, varav 165000 m³ pumpades. Betongen med högst hållfasthet var blandad med ett bindemedel innehållande Portlandcement (77 %), flygaska (13 %) och silikastoft (11 %). Vattencementtalet för den betong som hade högst hållfasthet var ca 0,34 och konsistensen var lös (flytsättningsmått på 600 mm).

Huvuddelen av betongen har pumpats i projektet, där följande punkter har varit väsentliga:

- Betongsammansättningar har valts för att få så goda pumpegenskaper som möjligt.
- Pumprör och utrustning har valts för att få en så effektiv materiallogistik som möjligt. Detta innefattade bland annat:
 - Pumparna som har använts för pumpningen har valts för att kunna pumpa betongen upp till 160 våningar.
 - De pumprör som har använts har valts för att ge en så effektiv pumpning som möjligt.
- Ett kvalitets- och provningsprogram har tagits fram för att säkerställa att betongens egenskaper uppfyller ställda krav.

Provpumpningar har också genomförts innan de egentliga byggarbetena genomfördes, där betong har pumpats upp till 600 m i horisontell led (se vidare nedan).

Materiallogistik på arbetsplatsen

Materiallogistiken vid uppförandet av Burj Khalifa var speciell eftersom byggnaden är så hög. Den centrala kärnan i byggnaden består av betong upp till våning 156 (ca 600 m höjd). I Orchard (2009) redogörs för pumpningen av betong i projektet. För pumpningen användes specialutvecklade pumpar som var dimensionerade att pumpa ca 30 m³ betong i timmen upp till en höjd av ca 600 m. För att klara de stora tryck som uppstod under pumpning fick pumparna förstärkas. De pumprör som användes hade en diameter på 150 mm (för att minska pumptrycken) utom på de översta 10 våningarna, där traditionella pumprör användas. På detta sätt kunde pumptrycken begränsas till ca 130 bar. Under själva pumpningen mättes dock tryck på upp till 200 bar upp. För att pumpa betongen upp till 606 m krävdes ca 40 min tid. Totalt befann sig ca 11 m³ i pumprören under själva pumpningen, vilket motsvarar en vikt på ca 26 ton som verkade på pumpen vid varje pumps slag (en kolvypump användes). Betongarbetena pågick under en period på 32 månader.

När betong pumpas till höga höjder behöver hänsyn tas till förändringar i betongens egenskaper under pumpningen. Detta var något som noterades vid pumpning av betong i Burj Khalifa projektet, där betongen för varje 100 m pumpning i vertikal led tappade ca 25-30 i sättningsmått (dvs. betongen blev trögare), temperaturen ökade med ca 1,0 °C och den tidiga hållfastheten ökade med ca 30 %, se Bester (2013).

Förutom pumpning av betong har en stor del materialtransporterna på arbetsplatsen vid byggnationen av Burj Khalifa gjorts med kranar. Totalt har tre stora kranar funnits på arbetsplatsen, Abdelrazq m.fl. (2008).

Petronas Towers

Petronas Towers är två 452 m höga tvillingbyggnader som är belägna i Kuala Lumpur i Malaysia. Byggnaderna uppfördes under perioden 1993-1998.

Materialfrågor

I Kim & Lee (2004) redovisas användning av betong vid byggnationen av De bärande system i dessa byggnader består av en central betongkärna kombinerat med betongpelare i fasaden. Bjälklagen är uppbyggda av stålbalkar. Betong valdes som material i stommen för det är lättillgängligt i Malaysia och att arbetskraften är välutbildad. De betongkvaliteter som har använts beror på var i byggnaden den aktuella konstruktionsdelen finns, där betong med högre hållfasthet har använts i nedre delarna av byggnaderna, se Tabell 3.

Tabell 3 Betongkvaliteter som har använts i Petronas Tower.

Byggnadsdel	Våning	Tryckhållfasthet [MPa]
Pelare	B6-L22	80 (C80)
	L23-L60	60 (C60)
	L61-L84M2	40 (C40)
Central kärna	B6-L14	80 (C80)
	L15-L44	60 (C60)
	L45-L84M3	40 (C40)
Ring balk	B5-L23	80 (C80)
	L24-L61	60 (C60)
	L62-L84M3	40 (C40)
Bjälklagsplatta på stålbalkar		30 (C30)
CIP bjälklag		40 (C40)

I Tabell 3 framgår att betongens tryckhållfasthet har varierat mellan 40-80 MPa beroende på var i byggnaden den aktuella konstruktionsdelen finns. Betongen med högst tryckhållfasthet har använts i de nedre konstruktionsdelarna, där också kraven på bärförmåga är högst.

Vid byggnationen av Petronas Tower har högpresterande betong använts, där begreppet högpresterande inte bara innefattar en hög hållfasthet utan också andra egenskaper i både färskt och hårdnat tillstånd. Exempelvis har betongens hållfasthet efter 1 dygn varit ca 50 % av 28-dygnshållfastheten eller att beständigheten varit mycket god. Delmaterialen till betongen togs huvudsakligen från området runt Kuala Lumpur. I fabriksbetongen ("MASCRETE") bestod bindemedlet till största delen av Portlandcement (80 %) och flygaska (20 %). För betongerna med hög hållfasthet (C80) tillsattes också silikastoft. Ett noggrant val av ballastmaterial gjordes också, t.ex. med avseende på hållfasthet, kornstorleksfördelning och förekomst av skadliga ämnen, för att få betong med goda egenskaper. Dessutom har tillsatsmedel använts för att betongen skall få lämplig gjutbarhet. För att säkerställa att betongen fick rätt egenskaper genomfördes också ett omfattande förprovningsprogram i laboratorium innan de "riktiga" gjutningar sattes igång. Dessutom genomfördes fullskaleprovningar för att undersöka hur betongen fungerade i verkliga förhållanden. I dessa provningar undersöktes också relevanta egenskaper hos betongen, t.ex. hållfasthet.

Det fanns också krav på att kunna avlägsna formar snabbt (ca tolv timmar efter gjutning). För att klara detta krav togs speciella betongsammansättningar med snabb hållfasthetstillväxt fram i projektet med v_ct ned till 0,27 för C80-betongen. I de fullskaleprovningar som genomfördes mättes tidiga tryckhållfastheter (för C80-betong efter 1 dygn) på 40-45 MPa (kubhållfasthet) respektive 66-68 MPa (cylinderhållfasthet). Efter 28 dygn mättes tryckhållfastheter på över 100 MPa upp.

Produktionsteknik

Vid byggnation av Petronas Tower i Kuala Lumpur transporterades den betong som användes huvudsakligen genom pumpning till respektive arbetsställe, se Kim & Lee (2004). Pumpning gjordes upp till ca 380 m i vertikal led utan någon mellanstation. En liten del av betongen transporterades

också med bask. Pumpningen gjordes med två Schwing BP 8000 pumpar (tornen) respektive en Schwing BP 3000 pump (övriga delar). Väl uppumpad genomfördes gjutningen av betongen med gjutbommar med en räckvidd på 27 m. Härdning av betongen gjordes genom att applicera membranhärdare på den nygjutna betongens yta.

The Shard

The Shard i London är Storbritanniens högsta byggnad med en höjd av 310 m som uppfördes under perioden 2009-2012. I Moazami m.fl. (2008) beskrivs byggnationen av the Shard. Det nämns bland annat projektet var mycket komplext med utmaningar både vad gäller arbetsplatsen (mitt i centrala London med begränsade utrymmen) och den komplicerade strukturella uppbyggnaden där flera olika material kombinerades. För att få tillräcklig strukturell stabilitet är byggnaden uppbyggd av en central kärna av betong och bjälklag uppbyggda antingen av stålramar (lägre delar av byggnaden) eller prefabricerad betong (högre delar av byggnaden). Betongdelarna i byggnaden består av högpresterande betong (C65/80) i pelare (för att genom en hög hållfasthet kunna minska dimensioner och få betongen pumpbar) och C50/60 i bjälklag.

Federation Tower (Ryssland)

Federation Tower är två höga byggnader (östra byggnaden är ca 374 m hög och den västra byggnaden är ca 242 m hög, där de både byggnaderna är förbundna med två broar på olika nivåer). Byggnaderna är belägna i Moskva och uppförda under perioden 2005-2017. Byggnationen av Federation Tower beskrivs i en artikel av Reina (2008). Bland annat nämns de svårigheter som utformningen med två byggnader förbundna med broar innebar. Bland annat var stabiliseringen av den högre av byggnaderna besvärlig vilken löstes genom att ha fackverkskonstruktioner i stommen. Dessa fackverk har utförts både i betong och stål på tre nivåer i byggnaden. Fackverken sträcker sig över mellan två och fyra våningsplan i vertikal led.

Under byggnationen av Federation gjordes ett par mycket stora gjutningar, speciellt när de båda grundplattorna göts. Den västra grundplattan innehåller 9000 m³ betong och den östra grundplattan 15000 m³ betong. Vid uppförandet av det östra tornet användes också ett speciellt framtaget formsystem som möjliggjorde att formar för pelare, kärna och bjälklag kunde lyftas samtidigt. Ett problem som uppstod under byggnationen var att den konstruktiva utformningen ändrades under byggtiden (t.ex. de förstyvande fackverkssystemen), vilket medförde att arbetena tog längre tid än förväntat.

The Capital Market Authority (Saudiarabien)

The Capital Market Authority (CMA) Tower är en 385 m hög byggnad med 80 våningar belägen i Riyadh i Saudiarabien och uppförd under perioden 2010-2014. I Soto & Al-Shihabi (2015) presenteras uppförandet av byggnaden där fokus har varit på att få en hållbar byggnad. Den färdiga byggnaden uppfyller därför kraven för att uppnå LEED guld.

Den arkitektoniska utformningen av byggnaden är gjord för att få ett så optimalt utnyttjande av byggnaden för kontor. Dessutom finns det träningslokaler och en bassäng på våning 54. Byggnaden har en Y-formad kärna runt våningsplanen är byggda. I kärnan finns också de vertikala transportsystemen, t.ex. hissar och nödutrymning.

Kärnan är uppförd i platsgjuten betong och dimensionerad för att både ta upp byggnadens egenvikt och vertikala laster. För att klara detta är kärnan utformad i en hexagonal form, som är kopplad till balkar som tar upp skjivspänningar. Tjockleken på väggarna i kärnan varierar mellan 1500 mm och 600 mm beroende på var i byggnaden väggen finns. Ett typiskt bjälklag utanför kärnan är uppbyggt av en 610 mm stål balk på vilken en 180 mm tjock armerad betongplatta har gjutits. Inne i kärnan

består bjälklaget av ett platsgjutet bjälklag med en tjocklek på 200-700 mm. Grundläggningen består av en platsgjuten 4,0-4,5 m tjock platsgjuten betongplatta.

En utmaning med byggnaden var att få en god termisk komfort i det varma klimatet med stark solstrålning som råder i Saudiarabien. Byggnaden har därför utformats för att minska effekten från solstrålning samt interna värmekällor (exempelvis har mängden kopparkablar i byggnaden minimerats för att minska eventuell värme från dessa). Ett ytterligare potentiellt problem är nedsmutsning från damm. Det är vanligt med sandstormar i regionen, som smutsar ner fasader på byggnader. Därför behövs ofta rengöring av fasader och solenergisystem efter sandstormar.

PRODUKTIONSTEKNIK FÖR HÖGA HUS – FALLSTUDIER

I följande kapitel presenteras erfarenheter från två utvalda projekt där höga byggnader har uppförts, The Shard i London och Turning Torso i Malmö. Erfarenheterna har ställts samman vid intervjuer med nyckelpersoner i respektive projekt:

- The Shard. Christer Isgren OtB Concrete.
- Turning Torso. Ingvar Nohlin Innokonsult.

Uppgifterna har kompletterats med information från främst Wikipedia.

När projektet inleddes var ambitionen att få med erfarenheter från några fler projekt i rapporten. Dock visade det sig inte vara så lätt att få denna information och därför har endast The Shard och Turning Torso tagits upp i rapporten.

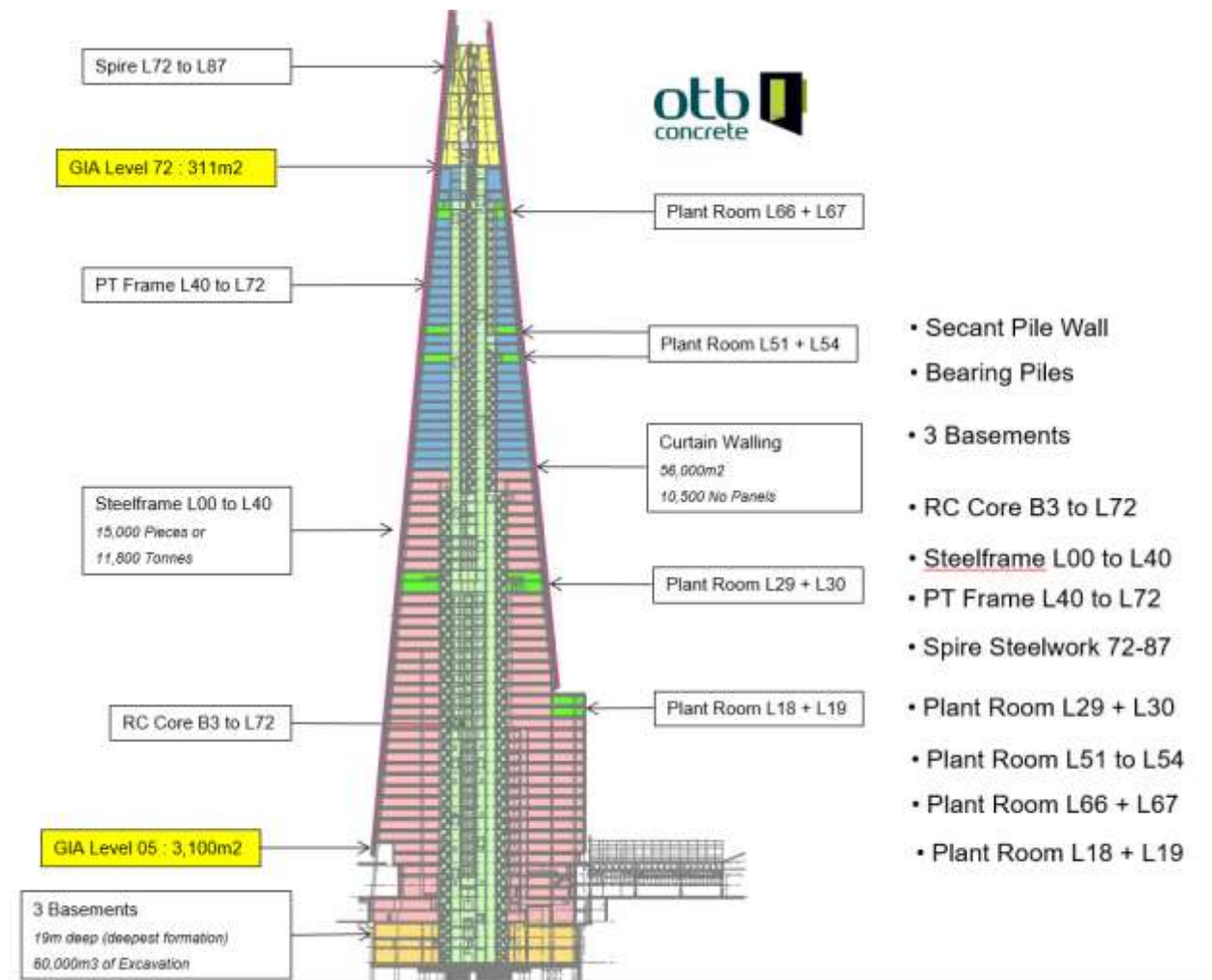
The Shard

The Shard är en 310 m hög byggnad, uppdelat på 87 våningar över mark och tre våningar under mark, som är uppförd i centrala London. Upp till våning 72 är byggnaden uppbyggd av ett centralt trapphus i betong och betongbjälklaget. Mellan våning 72 och 87 består byggnaden av ett ståltorn. Byggnaden är i dagsläget Storbritanniens högsta och en av Europas högsta byggnader, se Figur 14.



Figur 14. The Shard. Foto nedladdat från Wikipedia.

En översiktlig skiss på utformning av The Shard visas i Figur 15.



Figur 15. Översiktlig skiss på utformningen av The Shard.

Grundläggning för The Shard var omfattande, där delarna av byggnaden som är under mark sträcker sig ned till ett djup av 19 m under markytan. Totalt har ca 60000 m³ massor grävts bort för grundläggningen, som var byggd med top-down metodik. Där de första våningarna hålls uppe av pålarna tills bottenplattan var färdiggjuten. Fördelar med denna metodik är att de första ca 8 våningarna kan gjutas parallellt med källarboxen. Bottenplattan är upp till 3.5m tjock och på totalt 7250m³ varav den största gjutningen på 5500m³. C35/45 med betong med 75% GGBS av bindemedelshalten.

Ett fåtal betongsammansättningar användes för att underlätta hanteringen på arbetsplatsen. I de delar av byggnaden som är över våning 20 har huvudsakligen två betongsorter använts. För pelare har en betong med hållfasthetsklass C65/80 använts, medan en betong med hållfasthetsklass C50/60 har använts för övriga konstruktionsdelar. Båda dessa betonger innehöll ca 20 % flygaska (av bindemedelsmängden) för att förbättra pumpbarheten till hög höjd. För att få en betong som både var pumpbar och gjutbar användes olika konsistens beroende på var i byggnaden betongen användes. Upp till våning 30 hade betongen konsistensklass S4+ och högre upp i byggnaden konsistensklass F6. För var och en av dessa betongsorter togs ett tiotal varianter fram främst beroende på väderlek vid gjutstillfället, höjd på arbetsstället samt volym på gjutningen.

Säkerheten har varit viktig vid byggnationen av The Shard, där bland arbetsställen på hög höjd har varit skyddade med säkerhetsskärmar för att undvika att lösa föremål ska falla ned. I Figur 16 visas

hur arbetsstället för gjutning av bjälklaget på hög höjd kan se ut, där säkerhetsskärmarna syns tydligt.



Figur 16. Arbetsställe för gjutning av bjälklag på hög höjd i The Shard, där säkerhetsskärmarna syns tydligt. Foto Christer Isgren OtB Concrete.

Ett potentiellt problem vid betongarbeten på The Shard var transporter av betong till arbetsplatsen, speciellt på sommaren när temperaturen var hög. För att klara transporter sattes betongen samman så att den började hårdna ca 2-6 timmar efter blandning, där retarderande tillsatsmedel användes för att fördröja betongens hårdnande. Vid kritiska gjutningar var det också förberett på byggarbetsplatsen med superplasticerare som kunde sättas till betongen om den var för trög vid leverans till arbetsplatsen.

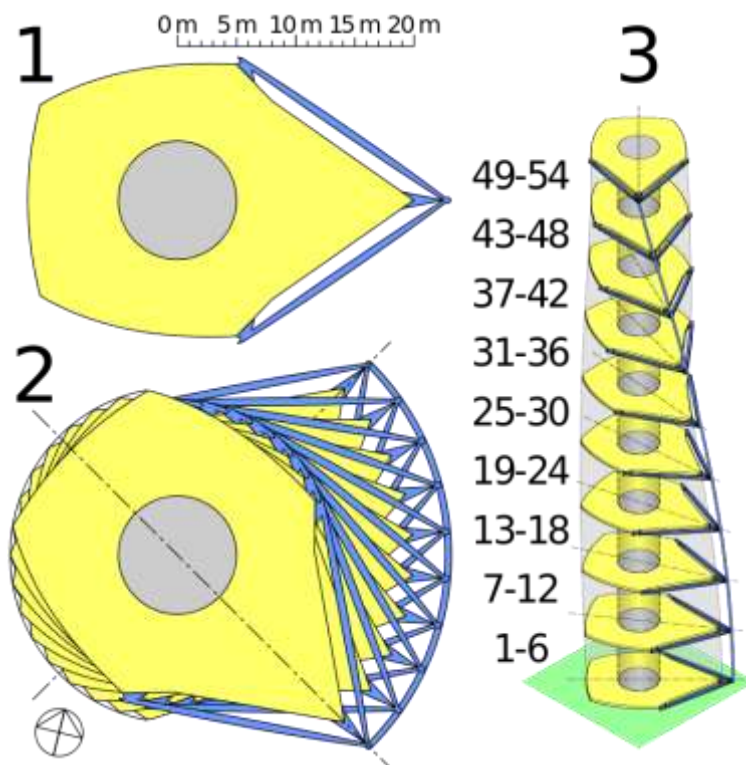
Vid gjutning av trapphuset på The Shard användes glidform. Gjutningen gjordes med två "parkeringar" av glidformen för förändringar av den geometriska utformningen av trapphuset.

Turning Torso

Turning Torso är en 190 m hög byggnad, uppdelat på 54 våningar, som är uppförd i centrala Malmö. För närvarande (2019) är Turning Torso Sveriges och Nordens högsta byggnad (190,4 m hög). Byggnaden är ritad och konstruerad av arkitekten Santiago Calatrava och ägs av HSB Malmö. Ursprungligen skulle byggnaden uppföras inför bostadsmässan Bo01 som arrangerades i Malmö under maj-september 2001. Av olika anledningar blev dock byggnationen försenad och byggnaden var klar för inflyttning i augusti 2005.

Ursprungligen var tanken att Turning Torso skulle bli en 25 våningar hög byggnad, men när Santiago Calatrava blev involverad i projektet blev bygghöjden högre. Detta gjorde också att detaljplanen för området fick göras om vilket försenade projektet. Bygglov för byggnaden blev beviljat 2001.

Den arkitektoniska och konstruktiva utformningen utfördes främst av Santiago Calatrava tillsammans med VBB. Den konstruktiva utformningen bygger på nio "kuber" med fem våningar per kub. Mellan respektive kub finns åtta mellanvåningar och nederst i byggnaden finns ytterligare en våning. Varje våningsplan har en yta på ca 400 m². Totalt består byggnaden av 54 våningar. I kub tre till kub nio finns bostadslägenheter och i de översta två våningarna (våning 53 och 54) finns en konferensavdelning. En speciell sak med utformningen av Turning Torso är att byggnaden är "vriden" där varje bjälklag är vriden ca 1,6° (dvs. varje "kub" är vriden ca 10°), och där hela byggnaden vrids ca 90° runt sin centrala kärna från marknivå till högsta våningen. Varje våningsplan är uppbyggt av en kvadratisk del runt den centrala kärnan och en triangelformad del ut mot fasaden. Spetsen på triangeln pekar i nordostlig riktning vid marknivå och i sydostlig riktning vid översta bjälklaget. En illustration över hur Turning Torso är uppbyggd och hur bjälklagen vrids runt den centrala kärnan visas i Figur 17.



Figur 17. Exempel på hur Turning Torso är vriden runt den centrala kärnan. Ritning nedladdad från Wikipedia.

Utformningen av Turning Torso medförde att den traditionella tekniken vid uppförande av höga byggnader, dvs. med en central kärna och bärande ytterväggar, inte gick att använda. Istället fick en speciell utformning tas fram där den yttre delen av väggarna i byggnaden stabiliserades med ett fackverk och pelare, se exempel i Figur 18.



Figur 18. Turning Torso där det yttre fackverket är tydligt synligt. Foto nedladdat från Wikipedia.

Grundläggningen av Turning Torso består av en 7 m tjock bottenplatta i betongen med en diameter på 30 m. Bottenplattan är gjuten direkt på det underliggande kalkberget, som befinner sig ca 15 m under markytan. Volymen betong i bottenplattan är ca 5300 m³, där krävdes 890 betongbilar för att transportera betongen till arbetsplatsen. När gjutningen genomfördes var den Sveriges största gjutning volymmässigt. Den bärande centrala kärnan är formad som en skorsten med varierande väggjocklek, där väggjockleken nederst i byggnaden är ca 2,5 m medan den är ca 0,4 m överst i byggnaden. I den centrala kärnan finns tre hisschakt. Gjutningen av den centrala kärnan gjordes med en klätterform, där cykeltiden per bjälklag var ca nio till elva dygn. Även bjälklagen uppfördes i platsgjuten betong, där tjockleken på bjälklagen är 230 mm förutom i de nedersta bjälklagen i respektive kub där tjockleken är 230-900 mm. Betongen transporterades huvudsakligen med pumpning till respektive arbetsställe, där betongen som högst pumpades ca 220 m i vertikal led. I vissa fall användes också bask, som lyftes med kran, för att transportera betongen till respektive arbetsställe. Betongarbetena utfördes av två arbetslag som arbetade klockan 7-22 sju dagar i veckan

(lag 1 måndag-torsdag och lag 2 fredag-söndag). Fasaden är uppbyggd av stål, som tillverkades i Spanien.

Vid byggnationen av Turning Torso fanns en hel del utmaningar, exempelvis:

Logistiken på till och från arbetsplatsen, där transporter av material till arbetsplatsen (och även från arbetsplatsen, främst avfall) krävde planering. Detta eftersom arbetsplatsen var centralt belägen i Malmö och att utrymmet för lagring av material på arbetsplatsen var mycket begränsat. För att minska störningar på omgivande trafik genomfördes in- och uttransporter av material nattetid. Transporterna sköttes av det vaktbolag som också skötte bevakningen av arbetsplatsen. En stor del av materialtransporterna genomfördes också när materialet behövdes i byggprocessen, för att minska behovet av lagring på arbetsplatsen.

Transporter av manskap och material på arbetsplatsen. Transport av manskap gjordes med manskapshissar medan transporten av material till respektive arbetsställe i första hand gjordes med kran (det fanns två tornkranar på arbetsplatsen). För att minska transporter av manskap anordnades också både toaletter och pausrum uppe i byggnaden, t.ex. fanns två pausrum på 25:e respektive 43:e våningen.

Väderleken, där speciellt vind kan påverka byggarbeten på hög höjd (normalt är vindhastigheten högre på hög höjd än vid marknivå). För hög vindhastighet kan exempelvis innebära att kranar inte går att använda. Vid byggnationen av Turning Torso var det stillestånd på grund av för hög vindhastighet vid ca 150 dagar, dvs. ca 10 % av den totala byggtiden.

DISKUSSION

Allmänt

En viktig faktor att ta hänsyn vid byggnation av höga byggnader (och även för lägre byggnader naturligtvis) är ”byggbarheten” (Buildability), som beskriver hur en hög byggnad kan uppföras mest effektiv utifrån byggtreprenörens perspektiv. Detta är också något som är av vikt vid planering av höga byggnader, där tidig samverkan är att föredra. Isberg (2019) och fib (2014) nämner följande faktorer som viktiga utifrån en byggtreprenörs perspektiv för att få en god byggbarhet:

- **Säkerheten på byggarbetsplatsen**, både för personal och allmänhet. Säkerheten ska alltid ha högsta prioritet vid byggarbeten. Detta gäller inte minst för arbeten på hög höjd, där det finns flera utmaningar rörande säkerheten.
- **Logistiken till och från arbetsplatsen**, både för inkommande gods och eventuell lagring på arbetsstället. Normalt uppförs höga byggnader i stadskärnor, vilket betyder att det också är ont om plats på arbetsplatsen. Detta medför en del problem vid mottagande av inkommande gods och vid lagring av material på arbetsplatsen:
 - Hantering av inkommande gods. I många fall är det ont om plats på arbetsplatsen för lagring av material, vilket betyder att leverans av inkommande gods måste planeras så att det finns utrymme för lagring. Om det är ont om plats på byggarbetsplatsen finns det heller inga möjligheter att lagra material på arbetsplatsen i någon större utsträckning utan material måste direkt transporteras till arbetsstället. För att minimera behovet av lagring av större mängder material på byggarbetsplatsen kan intransporter av material göras när materialen behövs i byggprocessen (dvs. ”Just-In-Time”).
 - Lagring på arbetsplatsen. Vid arbeten på hög höjd kan det vara problem att både transportera material till arbetsstället och även lagra större mängder material vid arbetsstället. Vad gäller transporter av material görs dessa normalt med kran, där tillgång till kran är väderberoende. För att minska väderberoendet rekommenderas att det planeras för andra transportsätt och även att ha ett lager av material vid arbetsstället. Dock finns det normalt begränsningar i hur mycket material som kan lagras vid arbetsställen på hög höjd.
- **Logistiken på arbetsplatsen**. Normalt sker transport av material genom vertikal förflyttning på arbetsplatsen, t.ex. vad gäller förflyttning av material från marken till arbetsstället i byggnaden. Transporten görs normalt med kranar, där det inte alltid finns tillgång till kranar beroende på rådande väderlek. Därför bör arbetsplatser där höga hus uppförs planeras för att vara oberoende av konstant tillgång till kranar. För minska beroendet av kranar rekommenderar Isgren (2019) att material, t.ex. armering, lagras vid arbetsstället uppe i byggnaden.
- **Standardisering av material och konstruktionsdelar**. Detta kan exempelvis vara att antalet betongsammansättningar begränsas och att samma utformning används på konstruktionsdelar som återkommer på flera platser i byggnaden. På detta sätt kan byggprocessen effektiviseras, t.ex. genom att formar kan återanvändas i flera olika konstruktionsdelar i byggnaden.

Byggnation av höga byggnader är komplicerade projekt, där det är många speciella konstruktionsdetaljer som inte förekommer på lägre byggnader, Isgren (2019). Ett exempel på en detalj där ofta blir fel är pelargenomföringar genom bjälklag, där det normalt föreskrivs hög hållfasthet i pelare och lägre hållfasthet i bjälklag, vilket normalt innebär att två olika betongsorter skall användas. Användning av två betongsorter går att lösa om betongen lyfts med bask till arbetsstället. Om betongen pumpas till arbetsstället, vilket den normalt görs vid byggnation av höga byggnader, är det vanligen inte möjligt att på ett enkelt sätt använda olika betongsorter. Normalt blir det den betongsort som har högst hållfasthet som blir styrande. Det bör också påpekas att valet

av betongsort inte bara styrs av krav på hållfasthet utan också av krav på exempelvis pumpbarhet och/eller uttorkning.

Eftersom höga byggnader är komplicerade projekt är det också av vikt att samtliga aktörer i byggprocessen tidigt blir involverade i planeringen av byggnationen för att få goda förutsättningar för en god byggbarhet. Exempelvis bör föreskrivande led (konstruktör/projektör) bli involverad tidigt så att byggnaderna blir projekterade på ett lämpligt sätt, för att möjliggöra ett effektivt byggande. En lämplig projektering kan exempelvis vara att den konstruktiva utformningen görs så enkel som möjligt, t.ex. utan komplicerade geometrier eller andra former av speciallösningar, eller att mängden betongsorter begränsas. Andra exempel på faktorer som påverkar byggbarheten är valet av bärande system, formsystem och betongsammansättningar. Med lämpliga val av bärande system, formsystem och betongsammansättningar kan byggtiden kortas ned betydligt. Det finns exempel i litteraturen där cykeltiden per våning i en hög byggnad har kunnat reduceras med ca 20 % genom lämpliga val av formsystem och betongsammansättning.

Det finns ett flertal publikationer, främst tidskriftsartiklar, där byggnation i av höga byggnader finns beskriven. I flertalet av dessa publikationer tas främst positiva aspekter kring byggandet upp och det är sällan problem nämns.

Materialfrågor

Frågor rörande material har en central roll vid uppförande av höga byggnader. För att få ett effektivt byggande krävs att lämpliga val av material görs, både med avseende på mekaniska egenskaper och på byggbarhet. Under de senaste 40 åren har det skett en omfattande utveckling av materialet betong, där speciellt betongens mekaniska egenskaper har förbättrats. Detta gäller exempelvis betongens tryckhållfasthet där en modern högpresterande betongen kan ha en hållfasthet som överstiger 80 MPa vid 28 dygns ålder. För 50 år sedan ansågs en betong ”högpresterande” om dess tryckhållfasthet översteg ca 30 MPa. Denna utveckling har varit möjlig både genom användning av nya delmaterial, t.ex. tillsatsmaterial, och en effektivare teknik att både blanda och gjuta betong.

Höga byggnader i betong utgör en stor belastning för grundkonstruktioner, där det normalt krävs en omfattande grundläggning. För att minska belastningen på grundläggningen kan lättballastbetong användas i vissa av de bärande delarna i en hög byggnad, där betongen har en densitet som understiger 1900 kg/m³. Det bör dock noteras att hållfastheten hos lättballastbetong beror på den lättballast som används (och krav på skrymdensitet), där höga hållfastheter kan vara svåra att uppnå om betongens densitet skall vara låg. Exempelvis visar erfarenheter från London att om betongens densitet skall vara under 1900 kg/m³ bör inte krav på hållfasthetsklass överstiga LC40/44 om lokalt tillgänglig lättballast används.

Under senare år har önskemål på minskad klimatpåverkan från betong blivit allt mer aktuella. I dagsläget är den mest effektiva åtgärden att minska klimatpåverkan från betong att minska mängden cementklinker. Detta görs antingen genom att ersätta delar av cementet med tillsatsmaterial, i första hand flygaska och/eller GGBS, kombinerat med att sänka cementhalten. Användning av tillsatsmaterial innebär i sin tur att betongen i många fall får en hög hållfasthet, troligen högre än om inte tillsatsmaterial hade använts.

Det finns risk för problem orsakade av hög värmeutveckling i delar av höga byggnader, främst i massiva konstruktionsdelar och där betong med lågt vct används (och höga cementhalter). Den vanligaste metoden att minska värmeutvecklingen är att kyla betongen genom ingjutna kylrör. Dock kan detta innebära praktiska problem och därför bör betongen sättas samman så att värmeutvecklingen begränsas. Detta görs normalt genom att minska mängden cementklinker i

betongen, antingen genom att använda tillsatsmaterial och/eller höja betongens *vct* (och på så sätt minska cementhalten).

Vid byggnation av höga byggnader i betong krävs normalt en betong med relativt hög hållfasthet kombinerat med exempelvis en hög styvhet (hög elasticitetsmodul) och en snabb hållfasthetstill. Detta innebär att högpresterande betong behöver användas. I Sverige finns en sammanställning av kunskap kring högpresterande betong i Betonghandbok Högpresterande betong – Material och utförande (2000). Underlaget för denna sammanställning togs fram under slutet av 1990-talet och mycket har hänt sedan dess. Exempelvis har nya bindemedel och tillsatsmedel börjat användas som har möjliggjort att betong med allt högre hållfasthet har kunnat tillverkas i stor skala. Detta finns inte med i handboken och därför finns det ett behov att ta fram underlag för en ny sammanställning kring högpresterande betong.

Produktionsteknik

Produktionstekniken har en avgörande roll för att få ett effektivt byggande av höga byggnader. Vilken produktionsteknik som är bäst lämpad beror på det bärande systemet i den byggnad som ska uppföras. Normalt består det bärande systemet i höga byggnader av en central bärande kärna och bärande pelare och/eller väggar. Bjälklagen är normalt uppbyggda av platsgjuten betong, men det förekommer också förtillverkade bjälklag. Det bärande systemet styr sedan vilka formsystem och betongsammansättningar som behöver användas. Ett effektivt byggande förutsätter att dessa val görs med hänsyn till andra arbetsmoment på arbetsplatsen. Ett exempel är behov av lyft med kran där val av formsystem bör göras så att behov av lyft med kran minimeras.

En viktig del av produktionstekniken är formsystemet, där det är av vikt att få ett så effektivt utnyttjande som möjligt av formarna. En viktig faktor som påverkar byggtiden är cykeltiden för formar, dvs. hur snabbt avformning kan ske och formarna kan användas för konstruktionsdelar högre upp i byggnaden. Det finns två principiella metoder för att reducera cykeltiden, antingen genom att med lämpliga val av betongsammansättning möjliggöra tidig formrivning eller genom att använda fler formar. Lämpliga val av betongsammansättning är i första hand att betongen får en snabbt hållfasthetstillväxt, som i sin tur medför att erforderad hållfasthet för formrivning uppnås snabbare och att formen då kan rivas. En vanlig metod för att få en snabbare hållfasthetstillväxt är att höja betongkvaliteten (där kvaliteten i många fall blir högre än vad som egentligen krävs med avseende på bärförmåga). Höga betongkvaliteter används i många fall ändå vid byggnation av höga byggnader, t.ex. om betongen skall pumpas.

För att göra optimala val av formsystem behöver även hänsyn tas till andra faktorer i byggprocessen, t.ex. vilka betongkvaliteter som kan användas. Ett exempel är vid val av formsystem för den centrala kärnan, där i princip tre olika formsystem användas, där höjden på byggnaden avgör vilket system som är mest (ekonomiskt) optimalt:

- **CB (traditionell klätterform)**, där formen förflyttas med kran. Detta system lämpar sig bäst vid byggnader som är upp till ca 10 våningar höga.
- **RCS (Rail Climbing System – klätterform som förflyttas på skenor)**. Detta system lämpar sig bäst vid byggnader som är 10-30/40 våningar höga. Fördelar med systemet är att det kräver liten yta på arbetsplatsen och fungerar oberoende av kranar. För att få en effektiv användning av RCS krävs att betong med hög tidig hållfasthet används vid gjutning.
- **ACS (Automatic Climbing System – klätterform som förflyttas med hydraulik)**. Detta system lämpar sig bäst vid byggnader som är över 30/40 våningar höga. Fördelar med systemet är att det kräver liten yta på arbetsplatsen och fungerar oberoende av kranar. För att få en effektiv användning av ACS krävs att betong med hög tidig hållfasthet används vid gjutning.

Vilket av system är mest (ekonomiskt) optimalt beror på höjden på byggnaden. Det billigaste systemet att köpa in och montera är CB-systemet, medan både RCS och ACS har högre initiala kostnader. Vad gäller kostnader drift har dock RCS och ACS lägre kostnader per våning än för CB-systemet. Dock förutsätter detta att betongen anpassas efter vilket formsystem som används, speciellt för RCS och ACS.

Vädret kan påverka byggnation av höga byggnader och därför bör det planeras för väderberoende byggande. Byggarbeten påverkas normalt av väderleken där speciellt vinden kan ställa till problem. På hög höjd är normalt vindhastigheten högre än vid marknivå, vilket medför att påverkan av väder ökar med ökande höjd. Exempelvis går det inte att använda kranar om vindhastigheten är för hög. För att minska påverkan av väderleken behöver därför byggnation av höga byggnader planeras så att byggnationen blir så väderberoende som möjligt. Detta kan exempelvis innefatta att materialtransporter görs med andra metoder än kran, t.ex. med hiss eller genom pumpning (av betong).

Materiallogistik på arbetsplatsen

Materiallogistiken är viktig när höga byggnader uppförs, eftersom det krävs stora mängder som ska transporteras i vertikal led till höga höjder. Dessutom är det normalt (mycket) begränsat med plats på arbetsplatsen då dessa många gånger är belägna i stadskärnor, vilket betyder att det inte går att lagra några större mängder av material. Detta betyder att när material transporteras till arbetsplatsen måste det direkt transporteras till arbetsstället vid ankomst. Normalt sker huvuddelen av materialtransporterna i vertikal led med kran (eller genom pumpning när det gäller betong). Det är en stor utmaning att transportera stora mängder material till hög höjd, där både tillgång och placering av kranar på arbetsplatsen är av stor vikt för att få en effektiv byggprocess. Transport med kran är också väderberoende (främst av vind), där det bör planeras för väderberoende transporter, t.ex. med hissar, för att göra materialtransporter väderberoende. Det bör också planeras för att kunna lagra en viss mängd material vid arbetsstället, för att på så sätt undvika behov av transporter vid dålig väderlek.

Transporter av material till arbetsplatsen sker normalt med lastbil, där behövs planering av transportererna för att exempelvis undvika trafikproblem eller problem vid transport till arbetsstället på arbetsplatsen. Även transporter från arbetsplatsen, t.ex. av avfall, kräver planering. Exempel på lösningar av transporter till och från arbetsplatsen kan vara att ha någon form av "slotsystem" där varje transport har ett visst tidsfönster när den får utföras eller att transporter görs under tider när annan trafik är mindre intensiv. Vid transport av betong, som är en färskvara, behöver extra hänsyn tas till trafiksituationen. Vid behov kan också retarderande tillsatsmedel användas för att fördröja betongens hårdnande. Betongens färskas egenskaper bör kontrolleras vid ankomst till arbetsplatsen och det bör finns beredskap för att justera betongen så att de färskas egenskaperna blir korrekta innan gjutning.

Vid transporter av material på arbetsplatsen är säkerhetsaspekten viktig, där inga delar av lasten får lossna under transport eller vid arbetsstället. Även de minsta små delar, t.ex. skruvar eller handverktyg, kan orsaka stora skador om de faller från hög höjd. För att minimera risken för att delar av lasten lossnar behöver lasten säkras, t.ex. med nät. Det är också viktigt att material som lagras vid arbetsställen på hög höjd säkras, t.ex. genom säkerhetsskärmar (se exempel i Figur 16).

En stor del av transporter av betong vid byggnation av höga byggnader görs med pumpning, där stora volymer kan transporteras på ett snabbt och enkelt sätt till arbetsstället. Pumpning av betong kan dock ställa till en del problem eftersom det uppstår höga pumstryck som kan ge stora påfrestningar på utrustning och också påverka betongens egenskaper negativt. Det finns också risk att det blir stopp i eller skador på slangar/rör i samband med pumpning. Pumpning av betong ställer

en del krav på betongsammansättning, där betongen måste gå att pumpa utan att dess egenskaper påverkas negativt, dvs. betongen måste ha god pumpbarhet. En god pumpbarhet uppnås normalt genom att ha en viss mängd finmaterial (bindemedel och/eller filler) i betongen. En sådan betong får normalt en hållfasthetsklass som överstiger C45/55. Därför går det i praktiken normalt **inte** att använda betong med lägre hållfasthetsklass om betongen skall pumpas. Av praktiska skäl bör heller inte för många olika betongsorter användas vid arbeten på hög höjd i höga byggnader, för att underlätta hanteringen av betongen vid arbetsstället. Detta är också något som måste tas hänsyn till vid projektering av höga byggnader, där det inte är realistiskt att föreskriva varierande och/eller för låga betongkvaliteter för betong som skall pumpas.

Det rekommenderas att också antalet betongsorter vid pumpning begränsas, för att underlätta hanteringen när betongen når arbetsstället och inte minst för att undvika sammanblandning av betongsorter. I litteraturen förekommer uppgifter om att olika betongkvaliteter har använts i t.ex. pelare och bjälklag, där betongen har ”skräddarsytt” för sin användning. Dessa uppgifter kan ifrågasättas, där det i praktiken inte går att blanda för många olika betongsorter vid uppförande av höga byggnader.

Vid pumpning av betong bör förundersökningar genomföras. Dessa innefattar bl.a. framtagande av lämpliga betongsammansättningar för att få god pumpbarhet och provpumpningar i full skala. Vid pumpning av betong till höga höjder (eller över långa avstånd) behöver också hänsyn tas till hur betongens egenskaper påverkas av pumpningen. Betongens egenskaper kan påverkas både av själva pumpning (främst av de tryck som uppstår under pumpning) och av den tid under vilken pumpningen görs. Det finns modeller för att prognostisera vad som händer med betongen under pumpning, men dessa modeller tar inte hänsyn till alla inverkanse faktorer. Därför bör provpumpningar utföras, där den verkliga pumpningen simuleras, för att undersöka hur betongen påverkas. Dessutom bör betongens egenskaper följas upp i samband med byggarbeten.

REKOMMENDATIONER

Baserat vad som framkommit i projekt kan följande rekommendationer ges rörande byggnation av höga byggnader (uppdelat på **allmänna frågor**, **materialfrågor**, **produktionsteknik** samt **logistik till och från samt på arbetsplatsen**):

Allmänna frågor

Säkerhet på arbetsplatsen, som alltid skall ha högsta prioritet vid byggnation av höga byggnader (och även på andra arbetsplatser). Vid byggnation av höga byggnader där arbeten utförs på hög höjd är förhållandena speciella, t.ex. vad gäller utrymning eller lösa föremål som riskerar att ramla ned. Det är därför av vikt att planera arbeten på hög höjd. Detta kan exempelvis innefatta utbildning för involverad personal så att manskapet vet vad som gäller vid olika scenarier. Dessutom är det viktigt att ha tydligt utmärkta utrymningsvägar för att säkerställa att manskapet hittar lätt om arbetsplatsen skulle behöva utrymmas.

Tidig samverkan. Byggnation av höga byggnader är komplicerade projekt med många komplicerade konstruktionslösningar. Det rekommenderas att samtliga aktörer i byggprocessen tidigt blir involverade i planeringen kring hur dessa konstruktionslösningar skall utföras praktiskt på arbetsplatsen. På detta sätt ges också bättre förutsättningar för en god byggbarhet ("Buildability"), som beskriver hur en hög byggnad kan uppföras mest effektiv utifrån byggtreprenörens perspektiv.

Planera för **väderberoende byggnation**, där exempelvis transporter med kran kan påverkas om vindhastigheten är för hög. Om möjligt bör därför transporter av material och personal göras inne i byggnaden, t.ex. i hissar. Dessutom bör det planeras för att kunna lagra en viss mängd material vid arbetsstället vid toppen av en hög byggnad. Det rekommenderas också att planeras för lagring av en viss mängd material vid arbetsstället för att på så sätt undvika transporter vid dålig väderlek.

Materialfrågor

Följande rekommenderas kring sammansättning av betong till höga byggnader:

- **Hållfasthet**, där det normalt krävs höga hållfastheter för att få en tillräcklig bärförmåga (och god pumpbarhet). Detta i sin tur innebär att betong med låga vct behöver användas och där tillsatsmaterial används som bindemedel.
- **Övriga mekaniska egenskaper**, där det i flera fall är önskvärt med en betong som har hög styvhet (E-modul) och låg krympning. Dessa egenskaper går att uppnå genom att sätta samman betongen på ett lämpligt sätt, t.ex. genom lämpliga val av ballast. Det finns värden på betongens E-modul i Eurokod 2, men dessa underskattar i många fall den verkliga E-modulen. För att kunna tillgodoräkna sig de förbättrade mekaniska egenskaperna vid dimensionering behöver därför betongens styvhet bestämmas experimentellt.
- **Värmeutveckling**, där massiva konstruktioner med betong med låga vct riskerar att få hög värmeutveckling. För att minska värmeutvecklingen kan mängden cementklinker i betong minskas genom att istället använda tillsatsmaterial (i första hand flygaska och/eller GGBS). På detta sätt minskas också behovet av kylning. På många arbetsplatser kan det vara begränsad tillgång på vatten och inte tillåtet att släppa ut använt vatten, vilket betyder att möjligheten att kyla betongen är begränsad.
- **Pumpbarhet**, där betongen behöver vara sammansatt på ett speciellt sätt för att vara pumpbar. Det krävs en sammansättning med en viss mängd finmaterial (bindemedel + filler). Det bör noteras att en sådan betong får normalt en hållfasthetsklass som överstiger C45/55. Därför går det i praktiken normalt inte att använda betong med lägre hållfasthetsklass om betongen skall pumpas.

- **Utförande**, där betongen måste vara sammansatt så att utförandet går att genomföra enligt de anvisningar som finns i utförandestandarden SS-EN 13670 och SS 137006. Om betongsammansättningen inte är lämplig kan problem dyka upp, t.ex. sprickbildning orsakad av krympning.

Begränsa antalet betongsorter, där det rekommenderas att inte använda allt för många betongsorter för att underlätta hanteringen av betongen på arbetsplatsen. Detta för att underlätta vid pumpning och att undvika sammanblandning av betongsorter på arbetsstället. Om betongen skall pumpas till arbetsstället rekommenderas också att inte för låga betongkvaliteter föreskrivs, eftersom en pumpbar betong normalt får en relativt hög hållfasthet (på grund av det höga innehållet av finmaterial).

Planera för en minskad klimatpåverkan, där den mest effektiva åtgärden i dagsläget är att minska mängden cementklinker i betongen. Detta görs antingen genom att ersätta delar av cementet med tillsatsmaterial, i första hand flygaska och/eller GGBS, kombinerat med att sänka cementhalten.

Det ställs **krav på betongtillverkaren** för att kunna tillverka betong enligt ovan, där tillverkaren behöver ha **tillgång till de delmaterial som behövs**. Det kan behövas minst fyra silos för bindemedel; två silos för cement och två silos för tillsatsmaterial (t.ex. flygaska och/eller GGBS). Om betongen ska innehålla kalkfiller behövs också en silos för detta material. Det behövs också tillgång till tillsatsmedel, vilket alla större betongtillverkare har tillgång till.

Produktionsteknik

Produktionstekniken har stor påverkan på hur effektivt byggande av en hög byggnad blir. Vilken produktionsteknik som är bäst lämpad beror på det bärande systemet i den byggnad som ska uppföras. Därför är det svårt att ge några generella rekommendationer rörande val av produktionsteknik. En viktig faktor är dock att lämpliga val av formsystem görs, där hänsyn behöver tas till följande fyra nyckelfaktorer:

- Möjligheter till anpassning och flexibilitet.
 - **Livslängd för formsystemet.**
 - **Kvalitet och ytfinish.**
 - Tillgänglighet.
 - **Kostnader.**
 - **Säkerhet.**
 - Anskaffning.
- Byggnadsspecifika faktorer.
 - Typ av konstruktion.
 - Maximal belastning.
- Jobbspecifika faktorer.
 - **Tidsfaktorer**, t.ex. omsättningstider.
 - Tillgänglighet på arbetsplatsen.
 - Montering och nedmontering.
 - Anpassning för arbetare?
- Lokala förhållanden.
 - Väderförhållanden.
 - Kompetens hos arbetare.

För att få ett så effektivt utnyttjande av formar som möjligt bör cykeltider för formar göras så kort som möjligt, dvs. att formarna snabbt kan användas för konstruktionsdelar högre upp i byggnaden. Det finns två principiella metoder för att reducera cykeltider, antingen genom att med lämpliga val av betongsammansättning möjliggöra tidig formrivning, t.ex. genom att använda betong med snabb

hållfasthetstillväxt, eller genom att använda fler formar. En ytterligare metod att minska cykeltider är att använda standardiserade formsystem, vilket förutsätter att geometrier på konstruktionsdelar är ungefär samma.

Byggnation av höga byggnader kan i stor utsträckning påverkas av väderleken, där speciellt vinden kan påverka. Därför rekommenderas att produktionstekniken så att den påverkas så lite som möjligt av väderleken. Exempelvis påverkas transporter med kran av vinden, där transporterna inte går att göra om vindhastigheten är för hög. För att minska den påverkan kan tekniker väljas som inte kräver transport med kran, t.ex. självklättrande formsystem.

Materiallogistik till och från samt på arbetsplatsen

Materiallogistiken till och från arbetsplatsen är av stor vikt vid uppförande av höga byggnader, eftersom stora mängder material skall transporteras till en begränsad yta. Väl på plats lufts sedan materialen till arbetsställen på hög höjd. Även transporter från arbetsplatsen, t.ex. avfall, är viktiga. För att underlätta materiallogistiken rekommenderas **noggrann planering av materiallogistiken innan byggarbeten sätts igång**. Exempel på sådant som behöver planeras är in- och uttransporter av material (t.ex. kan någon form av "slottidssystem" behövas för att transporter skall ske på lämpliga tidpunkter), platser för lagring av material (på marken och uppe i byggnaden), behov av kranar (t.ex. typer, antal och placering) och pumpning av betong.

Normalt pumpas betong vid byggnation av höga byggnader.

- Vid pumpning behöver betongen sättas samman så att den blir pumpbar. En **god pumpbarhet** uppnås normalt genom att ha en viss mängd finmaterial i betongen (bindemedel och/eller filler). En sådan betong får också en hög kvalitet (ofta överstigande C45/55), där det i praktiken inte att föreskriva lägre betongkvalitet än vad som krävs för att få betongen pumpbar. Antalet betongsorter som pumpas bör också begränsas för att underlätta den praktiska hanteringen på arbetsplatsen. Detta är något som behöver tas hänsyn till vid projektering, där ett **begränsat antal betongsorter av rätt kvalitet bör föreskrivas**.
- Vid pumpning av betong bör också **förundersökningar genomföras** innan den egentliga pumpningen inleds. Dessa innefattar bl.a. framtagande av lämpliga betongsammansättningar för att få god pumpbarhet och provpumpningar i full skala. Vid pumpning bör betongens egenskaper bestämmas efter pumpning.

Säkerhetsaspekten är viktig även vid transporter av material till/från och på arbetsplatsen samt vid lagring på arbetsplatsen (speciellt på hög höjd). Exempelvis får inga lösa delar lossna från transporter och ramla ned från hög höjd. Därför måste det **planeras för säkerheten på arbetsplatsen**, t.ex. genom lastsäkring och användning av säkerhetsskärmar.

Förutom transport av material behöver det även planeras för transport av manskap. För att minska behov av vertikala transporter av manskap kan exempelvis utrymmen för raster och toaletter placeras uppe i byggnaden.

FÖRSLAG PÅ FORTSATTA STUDIER

I den genomförda studien har en del områden där det behövs fortsatta studier identifierats.

Egenskaper hos modern högpresterande betong. En förutsättning för att kunna uppföra höga byggnader i betong är användning av högpresterande betong. I Sverige finns en sammanställning av kunskap kring högpresterande betong i Betonghandbok Högpresterande betong – Material och utförande (2000). Underlaget för denna sammanställning togs fram under slutet av 1990-talet och mycket har hänt sedan dess. Exempelvis har nya bindemedel och tillsatsmedel börjat användas som har möjliggjort att betong med allt högre hållfasthet har kunnat tillverkas i stor skala, vilket inte finns med i handboken. Därför finns det behov av att ta fram underlag för en ny handbok om modern högpresterande betong.

Minskad klimatpåverkan (kopplat till byggnation av höga byggnader), där det finns ytterligare behov av att utreda och ställa samman kunskap kring hur klimatpåverkan från betong minskas. Betongbranschen har under de senaste åren gjort omfattande studier för att minska klimatpåverkan från betongbyggande, t.ex. genom färdplaner för cement- och betongbranscherna¹⁴ och betonginitiativet. Det finns ett behov av att utreda vilka konsekvenser dessa färdplaner får för byggande av höga byggnader i betong.

Pumpning av betong, där det finns ytterligare behov av att ställa samman kunskap och erfarenheter av pumpning till höga höjder. Exempel på sådant som kan behöva ställas samman är använda betongkvaliteter och typen av utrustning som användes för pumpningen. Det är också intressant att ställa samman vad resultatet av pumpningen blev, t.ex. pumptryck, eventuella problem som uppstod i samband med pumpning och betongens egenskaper före samt efter pumpning.

Formsystem, där det finns ytterligare behov av att ställa samman erfarenheter av formsystem för byggnation av höga byggnader.

Fler fallstudier, där det finns behov av att göra fler systematiska sammanställningar av erfarenheter från byggnation av höga byggnader (i första hand internationellt).

¹⁴ Se ”Färdplan för klimatneutral konkurrenskraft för Betongbranschen” och ”Färdplan cement för ett klimatneutralt betongbyggande”, som finns att ladda ned från Fossilfritt Sveriges webbplats (<http://fossilfritt-sverige.se/>).

LITTERATURFÖRTECKNING

- Abdelrazaq, A. (2012), Validating the Structural Behavior and Response of Burj Khalifa: Synopsis of the Full Scale Structural Health Monitoring Programs, *IJHRB Research Journal*, Vol. 1, 2012.
- Abdelrazaq, A., Kim, S.E.K.J. & Kim, J.H. (2008), Brief on the Construction Planning of the Burj Dubai Project, artikel presenterad vid "CTBUH 8th World Congress, Dubai, March 3-5, 2008".
- ACI (2010), Report on High Strength Concrete, ACI 363R-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2010.
- ACI(1996), Placing Concrete by Pumping Methods, ACI 304.2R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1996.
- Aldred, J. (2010), Burj Khalifa – a new high for high-performance concrete, *Civil Engineering*, Vol. 163, 2010, sid. 66-73.
- Ali, M.M. & Kyoung, S.M. (2007), Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects, *Architectural Science Review*, Vol. 50.3, 2007, sid. 205-223.
- Ali, M.M. (2001), Evolution of Concrete Skyscrapers: from Ingalls to Jinmao, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 1, 2001.
- Ali, M.M. (2001), Evolution of Concrete Skyscrapers: from Ingalls to Jin mao, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2001, sid. 2-14.
- Alsamasam, I., M., Lemay, L. & VanGeem, M.G. (2008), Sustainable High Performance Concrete Buildings, artikel presenterad vid Structures Congress 2008, Vancouver, 2008.
- An, S.-H., Kang, K.-I., Kim, G.-H. & Park, U.-Y. (2004), Optimal Combination between Concrete Strength and Sets of Forms in High-rise Building, Artikel presenterad vid *CTBUH 2004 Conference*, Seoul, 2004.
- Baker, W.F. (2010), Utilizing Concrete in High-Rises: Case Studies of the Burj Dubai, Trump Tower and Infinity Tower, *Detail*, Nr. 2, 2010, sid. 174-177.
- Baker, W.F., Korista, D.S. & Novak, L.C. (2007), Burj Dubai: Engineering the world's tallest building, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 16, 2007, sid. 361-375.
- Bester, N. (2013), Concrete for high-rise buildings: Performance requirements, mix design and construction considerations, *Structural Concrete Properties and Practice*, September, 2013.
- Betonghandbok Högpresterande betong – Material och utförande (2000), Svensk Byggtjänst, Stockholm, 2000.
- Browne, R. & Bamforth, P. (1977), Tests to establish concrete pumpability, *ACI-Journal*, Vol. 74, 1977, sid. 193-203.
- Choi, M., Rousell, N., Kim, Y. & Kim, J. (2013), Lubrication layer properties during concrete pumping, *Cement and Concrete Research*, Vol. 45, 2013, sid. 69-78.
- Chung, K.R., Park, C. & Kim, D.H. (2016), Design Considerations for Concrete High-Rise Buildings, *International Journal of High-rise Buildings*, Vol. 5, 2016, sid. 187-193.
- Clark, G. (2014), Challenges for concrete in tall buildings, *Structural concrete*, Vol. 15, no. 4, 2014, sid. 448-453.
- Concrete Construction (1979), Tolerances in concrete construction, *Concrete construction magazine*, October, 1979.
- Concrete Construction Staff (1961), Concrete for high-rise buildings, *Concrete Construction*, Nov 01, 1961.
- Condit, C.W. (1968), The First Reinforced-Concrete Skyscraper: The Ingalls Building in Cincinnati and Its Place in Structural History, *Technology and Culture*, Vol. 9, Nr 1, 1968.
- Corres Peiretti, H. & Gomez Navarro, M. (2010), Concrete in high-rise buildings: practical experiences in Madrid, *Structural Concrete*, Vol. 11, Nr. 2, 2010, sid. 83-91.
- Davids, A., Buttgerist, V. & Burton, M. (2012), The Next Generation of Ultra High Rise Buildings, presentation vid "CTBUH 9th World Congress, Shanghai, September 19-21, 2012.
- De Schutter, G. & Feys, D. (2016), Pumping of Fresh Concrete: Insight and Challenges, RILEM

- Technical Letter 1, 2016, sid. 76-80.
- Drew, K. (2016), The only way is up, artikel i "Europé Real Estate", 2016, sid. 70-75.
- Fabeko (2015), Pumpning av Betong, Informationsskrift från Fabeko – Norsk Fabirkkbetongforening, Oslo, 2015.
- fib (2014), Tall buildings – Structural design of concrete buildings up to 300 m tall, State-of-the-art report, fib & mpa The Concrete Centre (arbetet lett av M. Moussard, ordförande, och A. Truby, sammankallande), Lausanne, 2014.
- Gauld, J. (2010), Aiming high with pumping solutions, *Concrete Magazine*, Vol. 44, Nr. 3, The Concrete Society, 2010, sid. 49-50.
- Gnida, J. (2010), Formwork for High-Rise Construction, CTBUH World Conference, Mumbai, 2010.
- Guo, S.-J. & Tsai, T.-H. (1996), Application of High Performance Concrete on a 85-story High Rise Building in Taiwan, artikel presenterad vid ISARC 1996, Tokyo, 1996.
- Ibrahim, H.A.A & Hamzeh, F.R. (2015), Role of formwork in high-rise construction, artikel presenterad vid *5h international/11th Constructin Speciality Conference*, Vancouver, 2015. sid.349-1-349-10.
- Isgren, C. (2019) Personlig kommunikation under mars 2019.
- Izumi, N., Akita, T., Yasui, M., Arai, K. & Sugawara, K. (2012), Structural characteristics of existing high-rise RC buildings in Japan, artikel presenterad vid "15th World Conference on Earthquake Engineering (15 WCEE) 2012", Lissabon, 2012.
- Jacobsen, S., Mork, J.H., Lee, S.F. & Haugan, L. (2008), Pumping of concrete and mortar – State of the art, COIN Project report 5 – 2008, SINTEF Building and Infrastructure, Oslo, 2008.
- Khan, F.R. (1969), Recent structural systems in steel for high-rise buildings, I Proceedings of the *British Constructional Steelwork Association Conference on Steel in Architecture*, London, British Constructional Steelwork Association.
- Khan, F.R. (1972), Influence of design criteria on selection of structural systems for tall buildings, I Proceedings of the *Canadian Structural Engineering Conference*, Toronto, Canadian Steel Industries Construction Council, sid. 1-15.
- Khan, F.R. (1973), Evolution of structural systems for high-rise buildings in steel and concrete, I J. Kozak (Ed.), *Tall Buildings in the Middle and East Europe: Proceedings of the 10th Regional Conference on Tall Buildings-Planning, Design and Construction*. Bratislava: Czechoslovak Scientific and Technical Association, 1973.
- Kim, G.D. & Lee, J.H. (2016), Key Technologies for Super Tall Building Construction: Lotte World Tower, *International Journal of High-rise Buildings*, Vol. 5, 2016, sid. 205-11.
- Kim, J.H. & Lee, S.-H. (2004), Application of High Performance Concrete in Petronas Twin Tower, KLCC, Artikel presenterad vid *CTBUH 2004 Conference*, Seoul, 2004.
- Le, H. (2014), Study on the influence of the lubrication layer on velocity profiles during concrete pumping (på franska), Cergy-Pontoise: Universite Cergy-Pontoise, Ghent University, 2014.
- Moazami, K., Parker, J. & Giannini, R. (2008), Steel-Concrete-Steel: Unique Hybrids at London Tallest, Artikel presenterad vid *CTBUH 2008 8th World Concrete*, Dubai, 2008.
- Mpa (2015), Tall Buildings, *Concrete quarterly special issue*, No. 1, 2015.
- Ohno, Y., Sumi, A. & Seo, T. (2004), High-rise Reinforced Concrete Building in Japan, Artikel presenterad vid "CTBUH 2004", Seoul, 2004, sid. 286-289.
- Ohno, Y., Sumi, A. & Seo, T. (2004), High-rise Reinforced Concrete Building in Japan, Artikel presenterad vid *CTBUH 2004 Conference*, Seoul, 2004.
- O-Kyung, K. & Jong-Hoon, K. (2004), The Roles of Construction Management in Super High-Rise Building Projects, Artikel presenterad vid *CTBUH 2004 Conference*, Seoul, 2004.
- Orchard, B. (2009), New heights reached in concrete pumping, *World Pumps*, September, 2009, sid. 18-20.
- Orchard, B. (2009), New heights reached in concrete pumping, *World Pumps*, September, 2009.
- PCA (1994), High-Strength Concrete, *Concrete Technology Today*, PCA – Portland Cement

Association, Vol. 15, Nr. 1, 1994.

Pietrzak, J. (2018), Development of high-rise buildings in Europe in the 20th and 21st centuries, Faculty of Architecture, Civil Engineering, Urban Planning and Architecture, Warszawa, 2018.

Portland Cement Association (1994), High-Strength Concrete, *Concrete Technology Today*, Vol. 15, Nr. 1, 1994.

Reina, P. (2008), Europe's Height-Record Buster Is on Russia's Cutting Edge, *Engineering News-Record*, Nr. 15 December, 2008, sid. 114-116.

Riding, K.A., Vosahlik, J., Feys, D., Malone, T. & Lindquist, W. (2016), Best Practices for Concrete Pumping, Report No. K-Trans: KSU-14-2, Final Report, Kansas Department of Transportation, Manhattan, 2016.

Rizk, A. S. S. (2010), Structural Design of Reinforced Concrete Tall Buildings, *CTBUH Journal*, 2010. sid.34-41.

Sharmila, A. & Christober, A.A. (2016), Effective selection of form work for high rise buildings, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 7, Nr 4, 2016. sid 17-28.

Singh, P. (2013), Concrete in Residential Construction, Pennsylvania Housing Research Center, University Park, 2013.

Stein, B., Ryan, R., Vitkus, L. & Halverson, J. (2015), Beneficial Use of Fly Ash for Concrete Construction in California, artikel presenterad vid *2015 World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Nashville 5-7 Maj, 2015.

Tarmac (2015a), Value of special concretes in steel framed buildings, *Tarmac*, Issue 1, 2015, sid. 1-7.

Tarmac (2015b), Value of special concretes in concrete buildings, *Tarmac*, Issue 1, 2015, sid. 1-10.

Watanabe, H., Katori, K., Shinohara, Y. & Hayashi, S. (2004), Development of High Durability of Reinforced Concrete Column by Using Prestress, Artikel presenterad vid *CTBUH 2004 Conference*, Seoul, 2004.

Yamine, J., Chaouche, M., Guerin, M., Moranville, M. & Roussel, N. (2008), From Ordinary Rheology Concrete to Self Compacting Concrete: A Transition between Frictional and Hydrodynamic Interactions, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, 2008, sid. 890-896.

Yeo, D.H. & Simiu, E.S. (2011), High-Rise Reinforced Concrete Structures: Database-Assisted Design for Wind, *Journal of Structural Engineering*, September, 2011, sid. 1340-1349.