



CHALMERS



Branden i World Trade Center

En studie av höghus svagheter ur ett
brandsäkerhetsperspektiv

Kandidatarbete inom Väg- & Vattenbyggnad

DAVID GRÖNBÄCK

JONAS PETTERSSON

FREDRIK TVETER

RIKARD ÖSTERLUND

Institutionen för Bygg- och Miljöteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

KANDIDATARBETE VT 2015

Branden i World Trade Center

En studie av höghus svagheter ur ett
brandsäkerhetsperspektiv

Kandidatarbete inom Bygg- och Miljöteknik

David Grönbäck

Jonas Pettersson

Fredrik Tveter

Rikard Österlund

Institutionen för Bygg- och Miljöteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

Branden i World Trade Center: En studie av höghus svagheter ur ett brandsäkerhetsperspektiv

David Grönbäck
Jonas Pettersson
Fredrik Tveter
Rikard Österlund

© David Grönbäck, Jonas Pettersson, Fredrik Tveter, Rikard Österlund, 2015

Institutionen för Bygg- och Miljöteknik
Avdelningen Byggnadsteknologi
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg
Sverige

(+46) 31 – 772 10 00

www.chalmers.se

Omslagsbild: En ögonblicksbild då det andra planet flyger in i det södra World Trade Center tornet.[1], CC-BY 2,0.

Institutionen för Bygg- och Miljöteknik
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige, 2015

Abstract

In 2001, two airplanes flew into the World Trade Center in New York. The force from the aircraft severely damaged the towers' supporting structure and the planes' fuel tanks which exploded and ignited the interior as well as the office supplies. The fire that followed led to the steel being weakened to the point where both towers collapsed.

The report is a case study of the World Trade Center attack with the aim to highlight weaknesses in high-rise buildings from a fire safety perspective. The focus of the report will be on the new rules and recommendations regarding passive fire protection, sprinkler systems and escape routes, which arose as a consequence of the attack. Furthermore, suggestions will be presented on how these new rules can be achieved in practice.

Of a total of 23 new rules that emerged as a result of the attack, 11 rules affect the report's three main areas. The new rules intend to improve the fire safety in high-rise buildings by strengthening and increasing reliability of the fire protection systems.

The rules and recommendations clearly show that several lessons can be learned from the incident. Evacuation time for a high-rise building is considerably longer than a lower building and the consequences can be far more severe as there are more people living or working there. Fireproof elevators must be implemented to ensure a swift and safe evacuation. Passive fire protection has to be strengthened and maintained to delay the time it takes for the building's load-bearing structure to weaken. The sprinkler systems must be more reliable to ensure sufficient water supply to all parts of the building.

The report is written in Swedish.

Keywords: World Trade Center, fire, passive fire protection, sprinkler, fire proof elevators, high-rise buildings

Sammanfattning

År 2001 flögs två flygplan in i World Trade Center i New York. Kraften från flygplanen skadade kraftigt tornens bärande struktur samtidigt som bränsletankarna exploderade och antände mycket av det kontorsmaterial som fanns på de utsatta våningarna. Branden som följde ledde till att stålet försvagades till den punkt att båda tornen rasade.

Rapporten är en litteraturstudie med World Trade Center som utgångspunkt med det övergripande syftet att belysa höghus svagheter ur ett brandperspektiv. Fokus i rapporten kommer att ligga på nya regler och rekommendationer gällande passiva brandskydd, sprinklersystem och utrymningsvägar, som uppkom som en konsekvens av attentatet. Vidare ges förslag på hur dessa nya krav kan uppnås rent praktiskt.

Av totalt 23 nya regler som uppkom till följd av attentatet berör 11 stycken rapportens tre huvudområden. De nya reglerna syftar främst till att öka brandsäkerheten i höghus genom förstärkningar och ökad tillförlitlighet hos de brandtekniska systemen.

Reglerna och rekommendationerna visar tydligt att flera lärdomar kan dras av händelsen. Evakueringstiden för ett höghus är avsevärt längre än en lägre byggnad och konsekvenserna vid brand kan bli större då det befinner sig fler människor där. Brandsäkra hissar måste implementeras i alla höga byggnader för att möjliggöra en snabb och säker evakuering. Det passiva brandskyddet skall förstärkas och underhållas för att fördröja tiden det tar innan byggnadens bärande struktur försvagas. Sprinklersystemen måste bli mer tillförlitliga för att försäkra vattentillförseln till alla delar av byggnaden.

Nyckelord: World Trade Center, brand, passiva brandskydd, utrymningsvägar, sprinkler, höghus

Definitioner/Ordlista

Orden i ordlistan markeras med ”*” när de förekommer i texten.

Abrasion - Mekanisk nötning där det skapas friktion mellan en yta och små rörliga partiklar som transporterats av vind, vågor eller rinnande vatten.

Brandskydd, aktivt - Brandskydd designat att aktivera efter att brand utvecklats. Exempelvis sprinklersystem, ventilation av rök och brandgas eller insats av räddningstjänst.

Brandskydd, passivt - Konstruktionsmässigt inbyggt brandskydd designat att förhindra brandutveckling eller spridning av brand. Exempelvis brandfasta material så som: SFRM, brandskyddsfärg eller gipsskivor.

Halogenbaserat släckningssystem - Ett släckningssystem där ett eller flera av följande halogena grundämnen används: fluor, klor, brom eller jod.

Hissfoajé - Området utanför hissen på varje våning som utgör en egen brandcell.

Höghus - I denna rapport syftar begreppet på byggnader som är över 128 meter.

ICC - International Code Council.

I-Codes - International Codes, publicerad av ICC. Innehåller ett samordnande av byggsäkerhets- och brandskyddsregler.

NIST - National Institute of Standards and Technology. En statlig amerikansk organisation som ansvarade för den officiella World Trade Center utredningen.

Perlit - Ett vulkaniskt glasmineral med relativt hög vattenhalt.

Pyrolys - Den kemiska process då ett brännbart material hettas upp och frigör brännbara gaser.

SFRM - Sprayed Fire-Resistive Material. Ett skumliknande material, ofta baserat på cement och glasull, som isolerar stålkomponenter från värme.

Vermikulit - Mineral som expanderar när det upphettas.

WTC - World Trade Center, här menat det i New York City, USA.

WTC 1 - World Trade Center 1, det norra tornet.

WTC 2 - World Trade Center 2, det södra tornet.

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Metod	2
2 Brandsäkerhetsklass och brandteknisk klass	3
3 Brandförlopp	4
3.1 Brandförloppet i World Trade Center.....	4
3.2 Materialegenskaper vid brand.....	6
4 Brandtekniska system	7
4.1 Passiva brandskydd	7
4.1.1 Nya regler gällande passivt brandskydd	7
4.1.2 SFRM.....	8
4.1.3 Svällande brandfärg	9
4.1.4 Isolerande skivmaterial	10
4.1.5 Betong som brandskydd.....	11
4.1.6 Passivt Brandskydd i World Trade Center.....	12
4.1.7 Passiva brandskydd för att uppfylla nya reglerna	13
4.2 Sprinklersystem	14
4.2.1 Sprinklersystemen i World Trade Center	14
4.2.2 Nya regler gällande sprinklersystem	15
4.2.3 Tekniska lösningar för att öka pålitligheten på sprinklersystemen	15
4.3 Brandsäkra utrymningsvägar i höghus	16
4.3.1 Nya regler gällande utrymningsvägar	16
4.3.2 Tekniska lösningar för att nå de nya reglerna	17
5 Diskussion.....	19
6 Slutsats	22
7 Källförteckning.....	24
7.1 Bildkällor.....	25
8 Bilagor.....	26
Bilaga 1 - Tillkomna regler	26
Bilaga 2 - Sprinklersystemet i World Trade Center	30
Bilaga 3 - Hissystemet i World Trade Center.....	31

1 Inledning

Den 11 september 2001 skedde ett av de värsta terrorattentaten någonsin i världen. Klockan 08.46 flög terrorister in i det norra World Trade Center-tornet och bara 17 minuter senare flög ett annat plan in i det södra tornet. På grund av bränderna som startades när flygplanen flög in blev de bärande strukturerna försvagad till den punkt att byggnaderna föll. Det södra tornet stod i 56 minuter och det norra stod i 102 minuter efter kraschen. 2997 personer dog, bland dessa var det räddningspersonal som inte hann ut när byggnaderna föll, kapare och passagerare i flygplanen samt människor som satt fast på de övre våningarna. [1]

Rapporten är en fallstudie som undersöker denna unika händelse, analyserar hur byggreglerna förändrades i USA och beskriver hur tekniken anpassats för att klara dessa förändringar.

1.1 Bakgrund

Allt fler människor väljer att jobba och bo i städer. 2012 uppskattades stadsbefolkningen i världen till 3,6 miljarder och den förväntas passera 6 miljarder år 2050 [2]. Det betyder att det kommer att byggas allt fler *höghus** i världen. När allt fler människor väljer att bo och jobba i höghus så blir det också viktigare att förbättra brandskydden i de höga byggnaderna.

De svårigheter som generellt uppkommer i höghus är ofta kopplade till att det är många människor som vistas i byggnaden. Det stora antalet människor samt den höga höjden på byggnaden gör att det kan ta lång tid att utrymma. Höghus måste därför dimensioneras så att de kan stå emot bränder längre än lägre byggnader. För att minimera evakueringstiden är det också viktigt att utrusta byggnaden med tillräckliga utrymningsvägar.

Branden i World Trade Center är det mest kända fallet av ett höghus som har rasat i samband med en brand. Trots all uppmärksamhet är det dock relativt få som vet vad som faktiskt hände med tornens inre brandtekniska system vid händelsen. Skadan som attentatet åsamkade på dessa system ledde till att tornen föll och gav senare upphov till en mängd nya regler och rekommendationer gällande brandsäkerhet. Genom att studera branden i World Trade Center kan lärdomar dras som gör att delar av problematiken gällande brand i höghus förhoppningsvis kan undvikas.

1.2 Syfte

Rapporten skall, med WTC-attentatet som utgångspunkt, visa på höghus svagheter ur ett brandsäkerhetsperspektiv och utvärdera hur dessa kan åtgärdas. Vidare syftar rapporten till att visa på hur brand påverkar stål och betong, samt hur detta gjorde sig uttryck i World Trade Center. Mer specifikt skall det undersökas vilka lärdomar som dragits av attentatet och hur dessa har lett till regel- och rekommendationsändringar för ett mer brandsäkert byggnadssätt.

1.3 Avgränsningar

För att få en studie som är relevant ur ett byggnadstekniskt perspektiv fokuserar arbetet på de brandskydd som är integrerade i konstruktionerna. Exempel på brandskydd som inte behandlas är släckning av räddningstjänst och de rutiner som verksamheten i byggnaden har vid evakuering.

Vid analysen av World Trade Center kommer inga sociala aspekter beaktas. Rapporten kommer inte behandla varför attacken skedde eller vilka sociala effekter detta hade på världen.

*WTC** bestod av flertalet byggnader men rapporten fokuserar på *WTC 1** och *WTC 2**, vilket var de torn som flygplanen flög in i. Rapporten beaktar enbart höga hus som är över 128 meter höga. Detta eftersom flera av de nya krav som rapporten baseras på endast gäller för dessa höjder.

I redogörelser av brandskyddet och brandförloppet i WTC utgås det från att officiella rapporter och utlåtanden är korrekta.

1.4 Metod

Den primära metoden för framtagandet av information till rapporten är litteraturstudier. Källorna består bland annat av officiella utredningsrapporter framtagna av National Institute of Standard and Technology (*NIST**), byggnadsföreskrifter i New York City och International Building Codes. Samtliga källor redovisas i Vancouver-systemet. Bildhänvisningen sker separat med romerska siffror.

För att bättre kunna granska informationen i litteraturstudien och för att få en fördjupad kunskap har Bijan Adl-Zarrabi, forskargrundsledare och universitetslektor för bygg- och miljöteknik på Chalmers tekniska högskola, intervjuats.

2 Brandsäkerhetsklass och brandteknisk klass

Brandsäkerhetsklassen avgörs beroende på risken för personskada vid kollaps av den bärande konstruktionen [3]. Klassen anges i Sverige med en siffra, 1-5, där risken vid brandsäkerhetsklass 1 är ringa och vid 5 är mycket stor. Hur hög brandsäkerhetsklass konstruktionen skall ha påverkas också av vad byggnaden används till, t ex om det är en kontorsbyggnad eller ett bostadshus. Brandsäkerhetsklassen sätter krav på vilken brandteknisk klass varje byggnadskomponent skall ha. Den brandtekniska klassen anges med en bokstav som visar vilket funktionskrav det är och en siffra som visar hur länge det kravet ska uppfyllas. Till exempel betyder brandklass R90, där R är bärförmåga, att byggnadselementet kan motstå en brand i 90 minuter utan att förlora sin stabilitet [4]. För att uppfylla kraven är det vanligt att använda olika typer av isoleringar och brandfärger eftersom dess låga värmekonduktivitet ökar konstruktionens tålighet mot brand. Tidigare var det vanligt med brandskydd som innehöll asbest, men på grund av hälsorisker är det inte längre tillåtet att använda sig av dem. Istället är det idag vanligt att använda material som gips, betong och brandfärger [5].

USA använder ett liknande klassningssystem som i Sverige. Enligt New Yorks building code från 1968 hade World Trade Center klass 1B vilket innebär att pelare är dimensionerade att tåla brand 180 minuter och bjälklag 120 minuter [7]. Efter attentatet utfördes tester i Toronto för att säkerställa brandklassen på ett likvärdigt bjälklag som hade både samma spännvidd och tjocklek på brandskyddet som det i WTC. Golvsystemet som testades var ett stål- och betongkompositfackverk med ett 19 millimeters brandskydd av *SFRM**. Resultatet av testen uppfyllde kraven som fanns när tornen byggdes 1968. Dock utfördes testen i en klinisk miljö vilket kan göra att resultatet skiljer sig från en riktig byggnad. 1969 förstärktes lagret med *SFRM* på alla balkar, fackverk etc, för att uppgradera till klass 1A vilket innebär att brandsäkerhetsklassen för pelare blir 240 minuter och för golven 180 minuter. En undersökning som utfördes år 2000 kom fram till att WTC dock endast uppfyllde kraven för brandsäkerhetsklass 1B för de då gällande lagarna.

3 Brandförlopp

Begreppet brand syftar oftast på en okontrollerad eld. För att en brand skall kunna uppstå och bestå finns det tre grundläggande förutsättningar.[8]

- Tillgång till oxidationsmaterial; vanligtvis syre.
- Tillgång till bränsle; exempelvis bensin, textilier eller trä.
- En temperatur som får det aktuella bränslet att antändas.

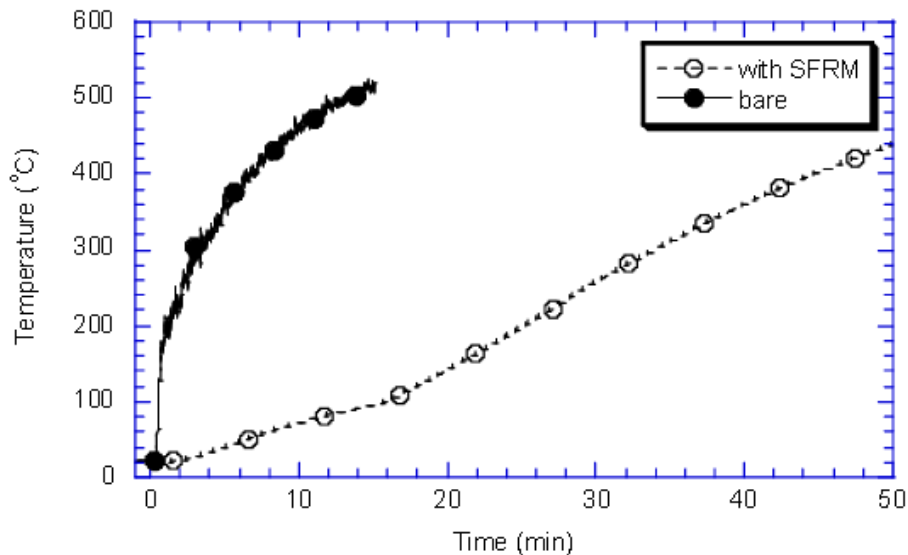
Saknas en av de ovan listade kriterierna kommer elden att slockna. Släckningsarbetet syftar därför till att ta bort en av de tre. Bränslet är ofta ganska svårt att avlägsna vilket gör att sänkning av temperaturen och kvävning är de två vanligaste släckningsmetoderna. Temperatursänkning åstadkoms genom vattensläckning, antingen via slang eller sprinklers. Kvävning kan exempelvis ske genom användning av en brandsläckare med skum.

3.1 Brandförloppet i World Trade Center

Händelseförloppet för WTC 1 och WTC 2 var relativt lika. Då flygplanen kraschade in i World Trade Center förstördes planens bränsletankar och bränsle spreds över stora delar av de drabbade våningsplanen [9]. Vid kollisionen antändes bränslet och skapade ett eldhav som också fick omringvarande inredning att fatta eld. Explosionen fortplantade sig också till viss del genom hisschakten vilket fick dörrar och fönster att blåsas ut även i andra delar av byggnaden. De våldsamma krascherna fick samtidigt delar av det *passiva brandskyddet** att förstöras. Det berodde bland annat på själva sammanstötningen, men också på att vibrationer och flygande delar fick gipsskivor och SFRM att skadas. Följaktligen blev det värmekänsliga stålet exponerat för branden.

Inledningsvis brann det endast i anslutning till de påverkade våningsplanen men elden spred sig snabbt vidare till fler våningar. Allt eftersom branden ökade i omfattning behövde den mer syre, vilket den fick då den allt mer stigande värmen fick fönstren på flera våningsplan att krossas. Människor på de övre våningsplanen krossade också fönster för att undkomma brandröken.

Gipsskivor och täckande lager av betong saktade ned brandförloppet något men var inte i närheten av att kunna stoppa branden. På de platser där brandskyddet var avlägsnat ökade temperaturen väldigt snabbt i jämförelse med de områden som var skyddade, enligt figur 1 nedan.



Figur 1 Temperaturskillnaden mellan skyddat och oskyddat stål [ii].

Värmen påverkade de slanka stålpelarna mest eftersom de större pelarna hade en större tvärsnittsarea som värmen kunde sprida sig genom. De bärande stålstrukturer med mindre tvärsnittsarea var dels det fackverksystem som höll upp golvbjälklaget men också de yttre fasadpelarna. Därför var det dessa delar som började ge efter först. För både WTC 1 och WTC 2 visades det genom att fackverket och dess bjälklag började att böja ned. Det resulterade i att de yttre pelarna påverkades av en kraft som ville dra dem inåt mot husets betongkärna. Detta fick flera av de återstående pelarna längs den utsatta fasaden att buckla och därmed förlora stora delar av sin bärförmåga. Lasten från våningarna ovan omfördelades då till resterande fasadpelare som fick ta upp till 20 % extra last. Omfördelning blev slutligen för mycket för pelarna som kollapsade och drog resten av konstruktionen med sig i raset.

3.2 Materialegenskaper vid brand

Ett materials värmepåverkan brukar beskrivas med de två begreppen *specifik värmekapacitet* [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], och *värmekonduktivitet* [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] [10]. Den specifika värmekapaciteten beskriver den energi som krävs för att värma upp materialet, medan värmekonduktiviteten är ett mått på hur mycket värme som transporteras genom materialet. Stål har exempelvis den specifika värmekapaciteten $460 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, vilket kan jämföras med betong som har $1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Jämförs värmekonduktiviteten har stål $60 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ och betong $1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Det kan därför konstateras att stål kräver mindre energi för att värmas upp, samt att det leder värme väldigt bra medan betong kräver mer energi för att värmas upp och är sämre på att leda värme.

Stål är ett mycket bra byggnadsmaterial ur hållfasthetssynpunkt och på grund av dess formbarhet. Nackdelen med materialet är dock, som ovan nämnt, att det är känsligt mot höga temperaturer. För stål innebär en temperaturökning att den kristallina strukturen hos materialet förändras. Detta påverkar parametrar som hållfasthet och E-modul samtidigt som stålet expanderar. Förändringen av mikrostrukturen medför en minskning av den bärande förmågan som slutligen kan leda till brott. Den vanligaste typen av konstruktionsstål mjuknar vid ca 450°C , och vid 650°C räknas det med att materialet har förlorat 50 % av sin totala bärförmåga [9]. De kritiska temperaturerna varierar dock beroende på stålets komposition. Oavsett stålets uppbyggnad är det oftast nödvändigt att skydda stålet med någon typ av brandskydd, exempelvis gips, SFRM eller brandskyddsfärg.

Betong har bra egenskaper vad gäller brandsäkerhet eftersom det varken brinner eller ger ifrån sig farliga brandgaser. Ett fenomen som dock kan uppstå vid brand är spjälkning av betongen. Det innebär att det kemiskt bundna vattnet i betongen når kokpunkten och vill expandera vilket leder till att inre spänningar uppstår. Då dessa spänningar blir tillräckligt stora kan bitar av betongen spjälkas av. Spjälkning innebär att flagor av betongen bryts loss. Detta medför en minskning av konstruktionens brandskydd då armeringen kan exponeras och betongkonstruktionens tvärsnitt minskar. Vid en mindre brand medför i regel inte det någon större påverkan av betongens hållfasthet eftersom det är väldigt små bitar som spjälkas av. Vid användandet av högpresterande betong, HPC, som är väldigt kompakt, kan explosiv spjälkning förekomma. Det beror på att det expanderande vattnet inte har några vägar att ta sig ut och bygger upp ett sådant tryck att bitar av betongen skjuts loss med en stor kraft.

4 Brandtekniska system

Brandtekniska system syftar på de installationer som är till för att skydda människor som befinner sig i en brinnande byggnad. Dessa kan innefattas av allt från brandsäkrade hissar till ytskikt på bärande stålkomponenter. I detta kapitel kommer tre olika typer av brandtekniska system att beskrivas och nya regler gällande respektive system kommer att redogöras för. En komplett redovisning av alla regler som uppkom till följd av attentatet visas i Bilaga 1.

4.1 Passiva brandskydd

Stål som är ett vanligt byggnadsmaterial i höga hus tappar mycket av sin hållfasthet vid de höga temperaturer som kan förekomma vid brand. Därför är det nödvändigt att skydda pelare och balkar för att byggnaden inte ska rasa inom en utsatt tid. Det åstadkoms oftast genom att använda olika isolerande material, så kallade passiva brandskydd. Några av de vanligaste material som används är SFRM, svällande brandfärger, olika typer av skivmaterial och betong. Passiva brandskydd är viktiga för att åstadkomma den brandtekniska klass som krävs i byggnaden.

I ett projekt finns det många olika intressenter, bland annat arkitekter, ingenjörer, ägare och försäkringsbolag, varav alla har olika krav på brandskyddet. Därför är det viktigt att ta hänsyn till flera olika kriterier vid val av brandskydd, bland annat kostnad, underhåll, stöttålighet, estetik och brandmotstånd.

4.1.1 Nya regler gällande passivt brandskydd

De regler som uppkom efter attentatet mot WTC som involverade passiva brandskydd är:

- En timmes ökning i brandklass av strukturella komponenter i byggnader högre än 128 meter.
- Uttryckligt införande av den "bärande strukturen". Detta tankesätt angående brandklassen kräver att alla delar i den primära bärande strukturen har en högre brandklass än det som vanligtvis krävs för pelare. Den primära bärande strukturen inkluderar pelare; övriga bärande system så som bjälkar, balkar och fackverk som har kontakt med pelarna och delar som stöttar strukturen och bär upp strukturen.

De två nya reglerna säger inte specifikt hur det passiva brandskyddet ska utformas, däremot säger de en del om brandklassen. Det är oftast med hjälp av olika passiva brandskydd som det går att påverka brandklassen för strukturella komponenter.

4.1.2 SFRM

SFRM, sprayed fire-resistive material, är en typ av brandskydd som oftast är cement- eller gipsbaserad med ett lättare material, t ex *vermikulit**, *perlit** eller polystyrenkorn, och någon typ av fibrer som förstärker brandskyddet, vanligtvis glasfiber [5]. För att veta hur tjockt lager som krävs för att uppfylla kraven på brandklassen behövs en sektionsfaktor (H_p/A), där H_p beror på hur tvärsnittet ser ut på balken samt hur många sidor av balken som ska skyddas och A är arean på tvärsnittet av balken [11]. Till exempel om en gipsbaserad vermikulitprodukt används på en stålbalk med en sektionsfaktor på 180 och ett krav på att balken inte får nå 550°C på 60 minuter skulle det behövas en tjocklek på 16 mm. I figur 2 nedan visas det hur balkar med SFRM kan se ut.



Figur 2 Stålstrukturer inklädda i SFRM [II]

Det finns flera fördelar med denna typ av brandskydd där en av dem är att det är billigare än de flesta andra brandskydd, samt att det är lätt och smidigt att applicera på komplexa detaljer[12]. Utöver det kan vissa typer användas utomhus och på stål som inte blivit förbehandlat.

Nackdelarna med SFRM är att processen är blöt och det kan ofta bli komplicerat när det ska appliceras, det kan medföra att schemat och kostnader för andra delar i projektet påverkas. Även om det finns de produkter som går att applicera på obehandlat stål så behöver det oftast vara behandlat för att uppnå önskat resultat. Det skapar också en grov yta som oftast inte uppfyller de estetiska krav som finns. Dessutom är brandskyddet relativt mjukt och behöver därför täckas om det är på en utsatt plats där det kan bli skadat.

4.1.3 Svällande brandfärg

Brandfärg består i huvudsak av två komponenter, ett bindemedel och en blandning av olika kemikalier som när de utsätts för värme bryts ned och frigör en gas [12]. Vid en bestämd temperatur smälter bindemedlet samtidigt som gasen frigörs och bildar ett lager med skum som isolerar mot värme. Brandfärg kan expandera och kan bli 15-30 gånger så tjock som den ursprungliga tjockleken. Färgen sväller vanligtvis runt 200-250°C och vid den temperaturen påverkas inte stålets egenskaper nämnvärt.

Brandfärger brukar delas in i tre kategorier:

- Lösningemedelsbaserad: Denna typ av brandfärg används oftast utomhus och testas mot väder och temperaturskillnader.
- Vattenbaserade: Dessa brandfärger har inte lika stark odör som de som baserats på lösningemedel, dock är de känsliga mot luftfuktighet och låga temperaturer. De används därför oftast inomhus.
- Epoxi: Kan vara både lösningemedelsbaserad samt utan lösningemedel. Dessa typer av brandfärger används oftast i de mest krävande miljöerna. De används till exempel i kemisk industri eller områden som är svåra att komma åt att underhålla samt där det finns en hög risk för att färgen skadas. Skummet som bildas är tunnare än av andra färger men är tåligare för att kunna stå emot högre värmefflöde och gaser.

Fördelarna med brandfärg är bland annat estetiska då det tunna lagret gör att formen på det underliggande stålet syns samt att det är möjligt att få en fin yta. Dessutom är det lätt att täcka komplicerade detaljer och det är lätt att rätta till fel och skador i efterhand. Tjockleken på brandfärg är vanligtvis mellan 0,5-5 mm, epoxifärg är oftast tjockare och brukar vara mellan 5-25 mm.

Denna typ av brandskydd har också några nackdelar. Brandfärger är relativt dyra, oftast dyrare än SFRM, och speciellt när det är högre brandsäkerhet som eftersöks. Dessutom är brandfärger våta och lämplig miljö krävs när det ska appliceras och färger som är lösningemedelsbaserade kräver att det är bra ventilerat. Brandsäkerhetsklassen för brandfärger är begränsad då de traditionellt kan ge 60 minuters skydd och samtidigt vara ekonomiskt försvarbart. Dock har tekniska förbättringar gjort att tjockleken som krävs har minskat och det är inte längre ovanligt att de kan ge 90 minuters skydd med några få färger som kan ge upp till 120 minuter.

4.1.4 Isolerande skivmaterial

Vanliga skivmaterial med goda brandegenskaper är bland annat gipsskivor, fibersilikatskivor, cementbundna fiberskivor och asbestcementskivor (som inte längre används efter att det framkom att asbest var cancerogent)[10]. Skivmaterialen fästs oftast på en trä- eller stålram som i sin tur fästs på pelaren eller balken.

Beroende på vilket material som används samt vilken tjocklek så kan isoleringskivor ge en brandklass på mellan 30 och 240 minuter.

Dessa skivmaterial har relativt låg värmekonduktivitet, till exempel har gipsskivor ca 0,25 W/m·K [13]. Den tjocklek som krävs beror på vilket material som används, sektionsfaktor (H_p/A) om det är en I-balk som ska skyddas, vad den kritiska temperaturen är samt vilken brandklass som efterfrågas. Till exempel om den kritiska temperaturen är 500°C, sektionsfaktorn är 260 m⁻¹ brandklassen är 120 minuter samt att materialet som används är en fibersilikatskiva så skulle det ge en tjocklek på 40 mm [11].

I gipsskivor finns det kemiskt bundet vatten som frigörs när de upphettas, med en process som kallas kalcinering [10]. Processen kräver stora mängder energi som gör att det tar längre tid för gipsskivan att värmas upp vilket ger ett bra skydd för strukturella komponenter. Dock påbörjas kalcineringsprocessen redan vid 50°C och som permanent försämrar hållfastheten. Fibersilikatskivor har däremot lägre vattenhalt än gipsskivor (ca 3-5%) vilket gör att de generellt inte står emot brand lika bra som gipsskivor, dock förlorar de inte lika mycket av hållfastheten[5].

En fördel med skivor är att det oftast är lätt att montera dem. De kan också monteras direkt på stål med lite eller inget förarbete. En annan viktig fördel är att de tillverkas i fabriker där tjocklek och komposition kan kontrolleras vilket medför att det går att hålla högre kvalitet. Det tar dock längre tid att montera och de är dyrare än en del andra typer av brandskydd. Därför används det oftast på konstruktionsdelar som är synliga. Det kan också vara svårt att montera runt komplexa detaljer. Dessutom är det viktigt att eventuella skador som uppkommer åtgärdas eftersom de kan sänka brandmotståndet betydligt.

4.1.5 Betong som brandskydd

Betong kan användas som brandskydd genom att täcka stålet med betong. Med en låg värmekonduktivitet (ca 1-3 W/mK) så kan betong fördröja värmeöverföringen till stålet avsevärt. Fram till 1970 var betong det vanligaste brandskyddet men har tappat marknadsandelar efter att skivmaterial, SFRM och brandfärger har blivit introducerade [12]. Autoklaverad betong kan också användas utöver vanlig betong. På grund av att autoklaverad betong har upp till 80 procent lufthalt så har den väldigt bra isolerande förmåga. Antingen kan den göras i block som täcker stålstrukturen eller så kan det appliceras direkt på stålet [5]. Det kan vara nödvändigt att armera betongen om den är tillräckligt tjock och om den är armerad kan det dessutom ta en del last.

Det finns en del fördelar med att använda betong som brandskydd men den viktigaste är dess hållbarhet. Betong står emot stötar och *abrasion** väldigt bra. Vanliga användningsområden är därför i parkeringshus, utvändiga strukturer, oljeplattformer och lagerlokaler.

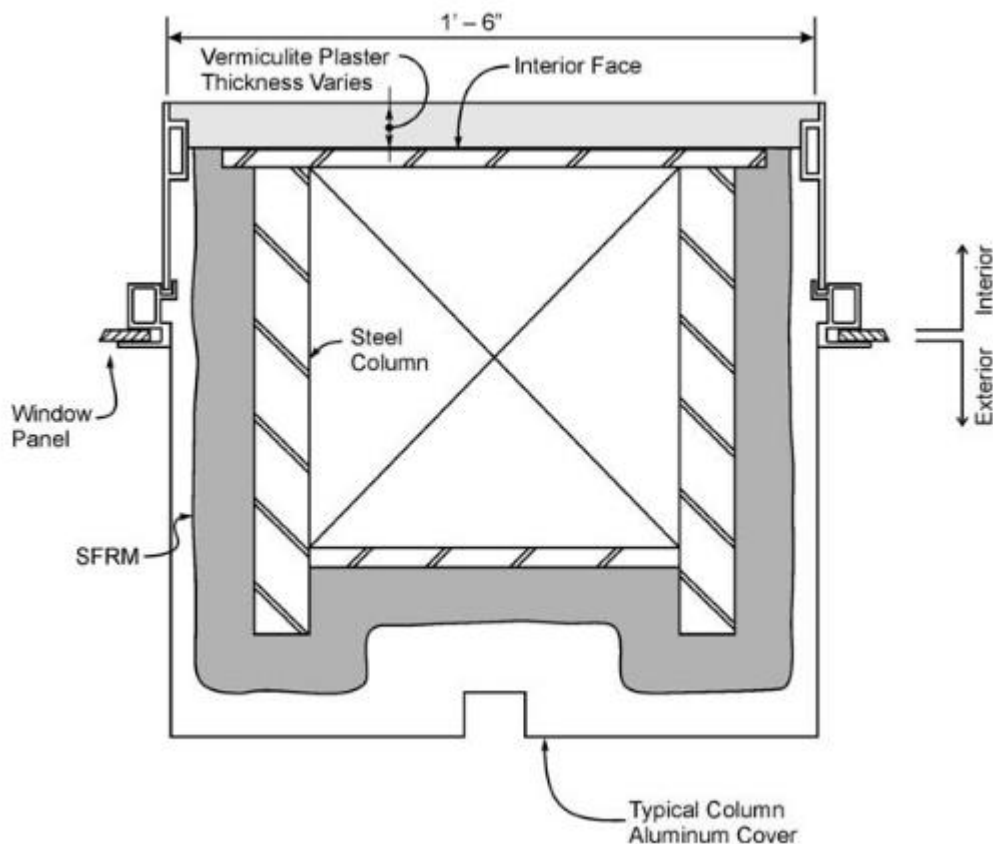
Att använda betong som brandskydd har dock några nackdelar. Tjockleken som krävs på betongen kan göra att den tar upp värdefull plats. Dessutom tar det lång tid att applicera om det görs på plats och det är relativt dyrt jämfört med andra brandskydd. Betong är tungt och kan öka den totala tyngden på byggnaden. Spjälkning kan också förekomma i betongen om den utsätts för höga temperaturer vilket kan försämra förmågan att stå emot brand.

4.1.6 Passivt Brandskydd i World Trade Center

Brandskyddet för stålstrukturerna i World Trade Center bestod av täckande gipsskivor samt SFRM, mer specifikt BLAZE-SHIELD D respektive BLAZE-SHIELD DC/F (hädanefter refererade till som tidigare beskrivna SFRM)[9].

Fackverkssystemet som höll upp betongbjälklaget brandskyddades med SFRM. Vid tiden för attentatet var tjockleken på brandskyddet ca 3.8 cm (1.5 inches) som vid normala förhållanden skulle ge en brandklass på upp till 2 timmar.

För de yttre fasadpelarna samt de inre pelarna användes en kombination av olika brandskydd. För de tre yttre pelarsidorna användes SFRM medan den inre sidan brandskyddades med gipsskivor, vilket illustreras i figur 3 nedan.



Figur 3 En sektion av de yttre fasadpelarna som visar brandskyddet runt pelarna [II].

På de yttre pelarna längs fasaden som hade en flänsbredd över 35,6 cm och vägde över 340 kg per meter användes 3 cm SFRM. För pelare mindre än det användes 5,6 cm SFRM. Tjockleken på de täckande gipsskivorna var mellan 20-22 mm. Pelarna som var placerade i kontorsdelarna och i anslutning till serviceutrymmen hade liknande dimensioner på brandskyddet som fasadpelarna men var i huvudsak skyddade av gips. I de utrymmen där det var svårt att fästa gipsskivor användes SFRM.

4.1.7 Passiva brandskydd för att uppfylla nya reglerna

World Trade Center hade som nämnts tidigare brandklass 1B vilket innebär ett brandskydd på 180 minuter för pelare samt 120 min för bjälklag. För att bygga ett liknande höghus med klass 1B som skall uppfylla de nya reglerna som uppkommit så skulle det innebära att brandskyddet för pelare istället är 240 minuter och 180 för bjälklag. De olika passiva brandskydden har olika för- och nackdelar och för att kunna uppfylla de högre kraven kan det behövas användas en kombination av olika brandskydd.

Eftersom brandfärger bara kan uppnå en brandklass på 120 minuter kan de inte själva uppnå den brandklass som skulle krävas i ett höghus av klass 1B. Om brandfärger används behövs förmodligen ett annat brandskydd också, till exempel gipsskivor eller något liknande. I det fall brandfärgen täcks med ett lager av gipsskivor måste det lämnas utrymme för brandfärgen att expandera för annars får färgen inte samma isolerande förmåga. Ett tillräckligt tjockt lager av skivmaterial kan dock på egen hand uppfylla en brandklass på 240 minuter. Problemet med skivmaterial blir när de ska monteras på svåråtkomliga ställen samt över komplicerade detaljer och det kan då vara lämpligt att välja ett annat material på dessa ställen.

På de mer svåråtkomliga områdena kan det därför vara bra att använda SFRM, som var det som användes i WTC på till exempel fackverk. I *Fire protection for structural steel in buildings* [11] som innehåller brandklasser för ett flertal passiva brandskydd så finns det typer av SFRM som kan ge upp till 240 minuters brandskydd. Därför skulle de högre kraven kunna uppfyllas med enbart SFRM. Det är därför ett bra alternativ speciellt i svåråtkomliga utrymmen och där det inte syns eftersom det inte anses vara estetiskt tilltalande.

Stöttålighet är en annan sak som behöver beaktas eftersom brandskyddet i WTC förstördes vid kollisionen. Med hänsyn till stöttålighet är SFRM inte optimalt då det är relativt mjukt. Betong som brandskydd hade därför varit ett alternativ om det efterfrågas ett stöttåligt brandskydd. Med högre krav behövs också ett tjockare lager betong och på grund av den extra tyngden kan det medföra att det är olämpligt att använda i höga byggnader.

Den ekonomiska aspekten får också tas i beaktning. I teorin skulle ett höghus kunna konstrueras i princip 100 % brandsäkert, problemet är att priset för detta projekt skulle bli oförsvarbart. I ett möte med Bijan Adl-Zarrabi, universitetslektor och forskargrundsledare på Chalmers tekniska högskola, jämför han med ett fall där en vanlig villa, ungefär 180 m², konstruerades för att vara helt brandskyddat. Detta kostade beställaren uppemot 20 miljoner kronor. Priset på ett helt brandskyddat höghus skulle säkerligen bli avsevärt mycket högre än det ursprungliga priset.

4.2 Sprinklersystem

Ett vanligt *aktivt brandskydd** i höghus är automatiskt sprinklersystem. Systemet består oftast av trycksatta vattenrör och sprinklerhuvuden med en glasampull som förhindrar att vattnet kommer ut [14]. Glasampullen är fylld med en vätska som vid en viss temperatur expanderar tillräckligt för att glasampullen ska gå sönder. Beroende på hur tidigt sprinklern designas att lösa ut i händelse av brand så väljes olika glasampuller. Rören får sitt vatten antingen från tankar på taket via gravitation, eller underifrån via pumpar [15]. Sprinklersystemets uppgift är att förhindra att branden eskalerar genom att kyla brandgaserna och förhindra *pyrolys** i de brännbara material som finns i byggnaden [14]. Effekten av att ha ett sprinklersystem installerat är väl dokumenterat men det förutsätter att systemet förblir intakt [16].

4.2.1 Sprinklersystemen i World Trade Center

All dokumentation om installationen av sprinklersystemen i World Trade Center förvarades på våning 81 i WTC 1 och gick förlorat när byggnaden rasade [9]. I NIST:s utredning av attentatet och analysen av systemen har utredarna förlitat sig på information samlad från byggherren, förvaltare, entreprenörer, konsulter och personalen som skötte sprinklersystemen. Enligt utredningen bestod WTC:s sprinklersystem av sex stycken 19000 liters vattentankar i vardera torn, tre stycken högst upp på 110:e våningen och tre stycken fördelade till 20:e, 41:e och 75:e våningen, se bilaga 2. Försörjningen av vatten till dessa skedde genom byggnadernas vanliga vattensystem distribuerat från stadens vattennät. Från tankarna skulle vattnet, via gravitation, flöda till de sprinklers som aktiverats i händelse av brand. Ytterligare vatten kunde försörjas uppåt, både med hjälp av manuellt startade pumpar som var kopplade till stadsvattennätet eller via lastbilsbaserade pumpar från räddningstjänsten. Det fanns tillräckligt med vertikala försörjningsledningar men endast en anslutning till de olika sprinklermunstyckena på en viss våning.

Enligt NIST:s utredning var sprinklersystemen i WTC designade för att förse ungefär åtta stycken sprinklermunstycken i taget med vatten. Detta är tillräckligt för att täcka en yta på 140 m². De aktiva brandskydden i WTC nådde, eller till och med överskred, de krav och rekommendationer som fanns när byggnaderna konstruerades. Dock hade de liten, om någon, inverkan på följderna av attentatet den 11:e september 2001. Vattenförsörjningen till sprinklersystemen blev i båda tornen kapade när flygplanen flög in i dem, vilket gjorde att vattnet inte nådde sprinklermunstyckena på de aktuella våningarna utan rann ner i trappgångar och hisschakt. Det fanns självständiga koldioxid- eller *halogenbaserade släckningssystem** men endast i utrymmen där släckning med vatten vore olämpligt, som exempelvis i serverrummen.

4.2.2 Nya regler gällande sprinklersystem

Följande regler lades till i 2009:s version av *I-Codes** efter rekommendationer från NIST:

403.3.1 Number of sprinkler risers and system design. *Each sprinkler system zone in buildings that are more than 420 feet (128 m) in building height shall be supplied by a minimum of two risers. Each riser shall supply sprinklers on alternate floors. If more than two risers are provided for a zone, sprinklers on adjacent floors shall not be supplied from the same riser.*

403.3.1.1 Riser location. *Sprinkler risers shall be placed in exit enclosures that are remotely located ... [17]*

Sammanfattningsvis syftar reglerna till att öka pålitligheten hos sprinklersystemen i höga byggnader genom att ha ett minimum av två ledningar för vattentillförsel för varje sprinklerzon i byggnader som är över 128 meter höga. Varje ledning ska ge vatten till sprinklers på varannan våning och skall placeras i separata trapphus.

4.2.3 Tekniska lösningar för att öka pålitligheten på sprinklersystemen

Varje komponent i ett sprinklersystem har en viss sannolikhet att den brister och den stora mängden komponenter som ingår i systemet medför att den totala sannolikheten för dysfunktionalitet ökar. Beroende på hur sprinklersystemet i en viss byggnad är utformat så finns olika risker som kan påverka dess förmåga att bibehålla sin funktion. Om det inte kommer något vatten från ett sprinklerhuvud så kan detta bero på att sprinklerhuvudet är ur funktion eller att det inte kommer något vatten dit. Att det inte kommer något vatten dit kan bero på att rören som skall transportera vattnet är trasiga eller att det inte är något vatten i tankarna. Att det inte är något vatten i tankarna kan bero på läckage i huvudledningen eller bristande pumpar etc. [15]. Det är enkelt att se svagheten i att ha ett sådant seriekopplat system där varje komponent är beroende av en kedja av andra komponenter.

Ett alternativ till att öka pålitligheten på sprinklersystemet är att göra varje komponent mer tolerant. Exempelvis kan de vanliga fasta rören bytas ut mot böjliga rör som kan vara mer stöttåliga samt öka flexibiliteten vid en eventuell ombyggnation [15]. Ett bättre alternativ är som sagt att få systemet mindre seriekopplat. Detta kan göras genom att ha flera, näst intill helt separata, system av pumpar, tankar, rör och sprinklerhuvuden. Dessa system kommer troligen inte kunna bli helt oberoende då de tar vatten från samma huvudledning i stadens vattennät men antalet beroende komponenter sjunker avsevärt. I tillägg till detta finns det ofta möjlighet för räddningstjänst att pumpa upp vatten till gravitationstankarna via tankbilar vilket gör systemen mindre beroende av huvudledningen.

4.3 Brandsäkra utrymningsvägar i höghus

Bland de största begränsande faktorerna i höghus finns hissarna. World Trade center var inget undantag, väldigt stor fokus lades på att designa och optimera hissarna. Vanligtvis tog hissarna uppemot 38 % av all yta och gjorde denna yta omöjlig att hyra ut. Vid byggandet av WTC lyckades denna siffra sänkas till ungefär 25 %. Hela World Trade Center var 930 000 m² vilket ledde till en ökning på 120 900 m² som kunde hyras ut [18].

Den lösning som användes var att ingenjörerna begränsade antalet hisschakt. Som Bilaga 3 visar, användes ett system som liknar det som New Yorks tunnelbana använder med knutpunkter [19]. Vid dessa knutpunkter kunde passagerarna hoppa av de snabba expresshissarna och byta till hissar som gick till rätt våning. Dessa lokala hissar gick i samma schakt som de andra lokala hissar på de övriga nivåerna. Trots detta hade World Trade Center 95 express- och lokalhissar som sammanlagt tog mindre plats än vad färre hissar gjorde i jämförbara höghus [20].

Trots det effektiva utnyttjandet av utrymmet fanns det säkerhetsdetaljer som förbisågs. I och med att hissarna var i samma hisschakt skapades ett enda långt schakt, nästan en stor skorsten. Denna skorstenseffekt gjorde att eld och rök kunde sprida sig lättare. Något som också måste hållas i åtanke är att när ett hisschakt blev satt ur funktion låste detta en stor mängd hissar. Skulle expresshissarna bli utslagna låste detta all transport med hissarna då lokalhissarna bara kunde hjälpa de som var på den lägsta tredjedelen att komma till botten. Resten skulle bli tvingade att ta trapporna som lätt kunde korka igen på grund av det ökade flödet. Trapphusen var placerade långt ifrån varandra vilket gjorde utrymningsvägen längre. Detta tillsammans med den stora mängden trappor gjorde det väldigt fysiskt ansträngande att evakuera.

4.3.1 Nya regler gällande utrymningsvägar

Reglerna och rekommendationerna gällande utrymningsvägar som uppkom efter World Trade Center attentatet är följande:

- Avstånd mellan anslutande trapphus får ej överstiga 10 meter eller maximalt en fjärdedel av byggnadens diagonal, beroende på vilket som är minst.
- Ett ytterligare (tredje) trapphus för byggnader över 128 meter.
- En breddökning på 50 % i trapphus i nya hus med sprinklersystem.
- Tillåtandet av användandet av hissar för att evakuera personer i byggnaden vid brand eller andra nödlägen (...) som är högre än 128 m. Personhissarna måste möta specifika krav för att tillåtas användas för evakuering. Förstärkning av väggarna för utrymningstrappor, utrymningsgångar och hisschakt för alla byggnader över 128 m. (...)
- Ett minimum av en brandsäker räddningshiss för byggnader högre än 37 m.
- *Hissfoajén** till de brandsäkra hissarna måste minst vara 14m² med sidor som är åtminstone 1 m [21].

4.3.2 Tekniska lösningar för att nå de nya reglerna

Tekniska lösningar till dessa krav kan vara att brandsäkra hissar, använda effektivare material i väggar och planera byggnaderna annorlunda. För att kunna brandsäkra hissar finns det flera olika riskfaktorer att beakta. Bland dessa finns:

- Elden eller värmen får antingen hissen eller hissfoajén att sluta fungera som det var tänkt.
- Vattnet som används för att släcka elden rinner ner i hisschaktet.
- Strömmen kan brytas, vilket leder till att hissen stannar.
- Brand kan uppstå i hissen.
- Hisschaktet fylls med brandgas.
- Övertrycket som vill skapas i hisschaktet för att förhindra brandgasspridning försvinner.

Ett stort problem är även att hissen kan stanna på en våning där det brinner eller bli väldigt ineffektiv på grund av att den stannar på många olika våningar och därigenom tappar mycket hastighet. Sensorer kommer därför vara väldigt viktiga i brandhissens utformning. Sensorer på varje nivå berättar för hissen om vilka våningar som är möjliga att stanna på. Sensorer i hisskorgen avslöjar hur många som är i hissen och optimerar mängden stopp. Detta är dock inte det enda som krävs. En väl fungerande nöddator som styr hissen är också väldigt viktig. Om den vanliga hissdatorn skulle slås ut på grund av branden och hissen stannar kan detta leda till att alla inte kommer ut. Därför borde en nöddator installeras som aktiveras vid brand och som drivs från en extern källa, någonting som kommer fungera även om det börjar brinna. Nöddatorn skall vara programmerad så att den så snabbt som möjligt tar ner personerna i byggnaden till marknivå utan onödiga stopp.

Ett brandsäkert hisssystem måste även vara vattensäkert. Vid en brand kommer sprinklersystemen att lösas ut och en stor mängd vatten kommer användas för att försöka släcka elden. Problemet för hissar är var vattnet kommer ta vägen sen. En enkel väg för vattnet att rinna är rakt ner i hisschaktet, någonting som kan slå ut de nuvarande hissarna. För att förhindra att detta händer behöver ledningarna som ger ström till hissen vattensäkras. Strömmen är det allra viktigaste, utan ström kommer inte hissen kunna användas till varken utrymning eller räddningsinsatser. Ett effektivt vattenavrinningssystem behöver också installeras längst ner i hisschaktet för att ta hand om vattnet som rinner ner där.

För att förhindra att farliga brandgaser påverkar passagerarna i hisskorgen trycksätts hisschaktet. Detta görs med hjälp av en fläkt som installeras i anslutning till hisschaktet. Fläkten måste vara ansluten till en extern kraftkälla så att den fortsätter att arbeta trots att det brinner i huset. Övertrycket som skapas får inte vara för lågt, då kommer brandgaser kunna tränga in i hisschaktet och göra hissen obrukbar för utrymning. Skulle däremot övertrycket vara för högt kan detta förhindra att dörrarna till området utanför hissen, hissfoajén, öppnas. Det mest effektiva i utrymningsväg är om dörrarna till hissfoajén öppnas inåt mot hissarna då människorna springer i denna riktning vid utrymning med brandhiss. Ett stort övertryck inifrån skulle då kunna hindra att dörrarna öppnas.

Under byggandet av ett höghus med brandsäkrade hissar behöver delar av utrymningsvägarna planeras ordentligt. En central fråga är huruvida hissarna och trapphuset ska placeras i anslutning till varandra. Skulle hissarna och trapphuset placeras i anslutning till varandra skulle detta kunna underlätta vid utrymning, då valet mellan trappor och hiss blir mycket lättare. Vissa problem kan dock uppkomma. De som väntar på hissen kan blockera vägen för de som vill ta trapporna, vilket leder till längre utrymningsstid och potentiellt till fler skadade. Ett annat problem är om det börjar brinna i området utanför hissen, då kan båda utrymningsvägarna blockeras och de andra trapphusen och hissarna bli överbelastade. För att förhindra att elden och värmen kommer åt hissen behövs det en effektiv brandcellsindelning. Både hissfoajén och själva hissen behöver vara egna brandceller med en viss tid de skall motstå branden.

När det gäller att uppfylla kraven för trapphus krävs inte avancerade tekniska lösningar, det krävs mer säkerhetstänk. Ett ytterligare trapphus och större trapphus betyder mindre yta att hyra ut, vilket gör byggnaden mer ekonomisk. Maxavståndet mellan anslutande trapphus blir med tre trapphus istället för två mycket lättare att understiga. Det som krävs är att säkerheten prioriteras högre än den ekonomiska vinningen.

5 Diskussion

Det finns mycket att diskutera kring brandskyddet i World Trade Center och brandsäkerhet i höghus. Fokus i detta kapitel ligger på tre frågeställningar som behandlar de brandrelaterade problem som finns vid byggandet av höghus. Problemen är aktuella eftersom mycket talar för att det i framtiden kommer byggas fler höghus i världen.

Hade de nya kraven kunnat rädda fler liv?

Efter World Trade Center-attentatet var det många som frågade sig om det fanns något som kunde ha gjorts för att förhindra att tornen rasade. Från den efterföljande utredningen framkom, som tidigare nämnts, flertalet rekommendationer för att förbättra brandsäkerheten i höghus. Frågan är om dessa förbättringar skulle kunna ha räddat fler människoliv vid en rekonstruktion av attentatet.

Det passiva brandskyddet i WTC dimensionerades så att pelarna skulle kunna stå emot en brand i 3 timmar och bjälklagen 2 timmar. Om WTC däremot dimensionerats efter de nya reglerna som kräver en extra timmes brandskydd innebär det i teorin att byggnaden skulle kunna stå emot branden upp till en timme längre utan att kollapsa. Det skulle ha inneburit att fler människor skulle ha hunnit evakuera samt att brandmännen skulle haft längre tid på sig att släcka branden.

Det tog dock betydligt kortare tid för tornen att rasa än de 2-3 timmar som det var dimensionerat för att tåla. Anledningen var med största sannolikhet att brandskyddet skadats i kollisionen och det därmed förlorade mycket av sin isolerande förmåga. Därför behöver det inte ha betytt att byggnaden stått en timme längre utan att kollapsa om den dimensionerats med en timme längre brandskydd. Även om ett tjockare lager med till exempel gipsskivor skulle stå emot stötar bättre än ett tunnare lager så hade det förmodligen inte varit tillräckligt för att stå emot den kraft som WTC utsattes för. Vid en kraftig kollision är tjockleken på materialet mindre relevant så länge inte något stöttåligare brandskydd används. Skulle pelare och bjälklag klänts in i ett material som till exempel betong hade brandskyddet kanske haft en större chans att stå emot kollisionen. Betong är dock inte ett attraktivt val att använda i höghus, framförallt beroende på tyngden som det tillför byggnaden.

Som nämnt i kapitel 4.2.1 var sprinklersystemen i WTC designade för att förse ungefär åtta sprinklermunstycken i taget med vatten, motsvarande en yta på 140 m². Räknas säkerhetsmarginalen med var vattentillförseln troligen tillräcklig för upp till tre gånger så stor area. Branden utvecklades snabbt till mycket mer än detta, så även om vattentillförseln hade förblivit intakt är det osannolikt att sprinklersystemet hade varit tillräckligt för att kontrollera branden. Det är dock troligt att ett fungerande sprinklersystem hade lett till en långsammare temperaturökning, vilket eventuellt hade medfört att stålpelarna hade bevarat sin bärande förmåga en längre tid.

När flygplanen kraschade in i World Trade Center blev omedelbart en stor mängd personer inlåsta på de övre våningarna, helt utan möjlighet att ta sig förbi de brinnande våningarna. Detta ledde till tusentals döda, någonting som kunde förhindrats med bland annat brandhissar. Om de nya reglerna angående utrymningsvägar applicerats på WTC hade antagligen inte hissarna slagits ut. Med fungerande brandhissar och väl fungerande hissdatorer skulle personer snabbt kunnat färdas från de utsatta våningarna hela vägen ner till bottenplanet. Evakueringen hade gått snabbare och inte lika många räddningsarbetare hade behövt använda trapphusen.

Hur har attentatet påverkat omvärlden?

Attentatet mot World Trade Center påverkade inte bara USA utan även resten av världen. Händelsen fick troligtvis många länder att se över sina regler gällande brandsäkerhet i höga byggnader. Det är svårt att hitta en direkt koppling mellan WTC-attentatet och andra länders regeländringar, men det är värt att notera att USA är ett mycket uppmärksammat och byggnadsmässigt välutvecklat land. Det gör det troligt att andra länder tar inspiration från dem vid införandet av sina byggregler. Om NIST:s föreslagna regler dessutom tas upp av internationella byggnadsorganisationer, så som ICC*, ökar chanserna att dessa regler blir gällande i fler länder. På så sätt skulle attentatet få en global påverkan på hur höga hus byggs nu och i framtiden.

Om kraven blir hårdare på material och kunskap finns det större möjligheter för forskningen att få utökade resurser för att möta det ökande behovet för nya och effektivare material. De brandtekniska systemen i höga byggnader kommer därmed att effektiviseras, någonting som kommer göra höghus säkrare ur ett brandperspektiv. WTC-attentatet var en tragedi, men händelsen gjorde att byggbranschen fick upp ögonen för de vitala systemen som behövs vid extrema olyckor i höghus. Skulle ett sådant attentat inträffa igen har det förhoppningsvis tagits vara på lärdomarna så att höghuset kan utrymmas innan det faller.

Vilka lärdomar har dragits av attentatet?

Reglerna och rekommendationerna som tillkommit efter attentatet visar tydligt att flera lärdomar kan dras av händelsen. Höghus har väldigt lång utrymningstid och för att förhindra att trapphusen korkas igen behövs effektiva brandhissar som kan föra människor förbi brinnande våningar. I kapitel 4.3 framgår det att brandhissar är en nödvändighet i höghus, oavsett vilka regler som finns i landet. Det kan tänkas att brandhissar är för dyra sett till sannolikheten att stora bränder inträffar. Emellertid kan brandhissar potentiellt rädda ett stort antal människoliv och kan därmed vara en skäligen investering. Skulle brandhissar bli standardiserat i alla höghus kommer den ökade efterfrågan sannolikt leda till att utvecklingen tar fart. Detta skulle innebära att priset på brandhissar troligtvis kommer att sjunka.

Då passiva brandskydd förlorar mycket av sin isolerande förmåga om de blir skadade så blir det viktigt att fokusera på att utveckla mer stöt- och slittåliga brandskydd. Det kan vara tänkbart att det går att uppnå genom att kombinera olika material, förslagsvis ett stöttåligt material med ett bra isolerande material. Ett material som är både stöt- och slittåligt och har bra isolerande egenskaper vore optimalt, dock krävs det mer forskning på det området. För att ett nytt material eller en ny kombination ska tas i bruk så måste det också uppfylla andra kriterier. Kostnaden för materialet bör vara överkomlig, det ska inte ta upp för mycket plats eller väga för mycket. Det måste även vara möjligt att klä in komplicerade detaljer med det nya materialet.

Attentaten visade att sprinklersystemen inte har någon större effekt vid bränder av den storleken. Att öka pålitligheten på systemen, genom att göra det mindre seriekopplat, kan vara ett steg men oavsett kommer det troligen bli svårt att dimensionera ett sprinklersystem som klarar av motsvarande påfrestning. Något som kan vara värt att forska på är om separata halogenbaserade släckningssystem kan användas i större utsträckning än bara serverrum. Av hälsoskäl är de inte optimala att använda på samma sätt som vattenbaserade sprinklersystem, men de skulle kunna vara konstruerade att aktivera när temperaturen i rummet är så hög att sannolikheten för överlevande är försummande liten. De skulle då, mer effektivt än vatten, sänka temperaturen vid branden och därmed sänka påfrestningarna på den bärande konstruktionen.

En annan lärdom som kan dras är att konsekvenserna av en brand i ett högt hus är många gånger större än i ett lägre. Det beror främst på att fler människor brukar vistas där och att det är svårare och tar längre tid att utrymma. Skulle ett höghus börja brinna blir den aktuella våningen oframkomlig. Det medför risker för personer på det våningsplanet men också för personer på våningar intill. För att begränsa branden och hindra den från att spridas ställs självklart höga krav på brandskyddet, men även på interiören. Som framgår i kapitel 3.1 var det interiören, främst kontorsmaterial, som fick branden i World Trade Center att utvecklas till den grad att stålet tappade bärförmågan. En tänkbar lösning till detta scenario skulle vara att regler skapas för att begränsa interiören, någonting som dock inte är särskilt praktiskt. Detta eftersom verksamheten i höghuset skulle inskränkas och höghuset skulle inte bli lika attraktivt för investerare och företag. Kontorslandskap skulle inte kunna organiseras lika tätt, bekvämligheter som soffor och fåtöljer riskerar att försvinna och de estetiska föremålen, till exempel gardiner, skulle begränsas. Det hade bland annat kunnat medföra både minskad ekonomisk lönsamhet och försämrad arbetsmiljö för de anställda.

6 Slutsats

Händelseförloppet under WTC-attentatet visar på flertalet svagheter som kan finnas med höghus ur ett brandsäkerhetsperspektiv. Den höga höjden på byggnaderna gör att det blir tidskrävande att utrymma, vilket innebär att det krävs mer av de passiva och aktiva brandskydden för att hålla branden under kontroll en längre tid.

Det finns passiva brandskydd i nuläget som klarar av att motstå brand tillräckligt lång tid, det handlar bara om att ha ett tillräckligt tjockt lager av det. Den största svagheten med de flesta av dessa är dock att de är känsliga mot mekaniska stötar och slitage. I dessa fall sänks brandskyddens isolerande förmåga avsevärt. Betong som är ett stöttåligare material är för tungt för att det skall vara lämpligt att användas i större utsträckning i höga hus. Det är svårt att skydda byggnader mot den typen av inverkan som blir av ett kolliderande flygplan, så att dimensionera brandskydden efter detta kan anses orealistiskt. Vid en vanlig brand är stöttåligheten hos brandskydden i de flesta fall tillräcklig, så vikten och kostnaden på materialen i brandskydden blir prioriterat.

Det primära aktiva brandskyddet för att kontrollera brand är sprinklersystem. Svagheten med dessa system är ofta att de består av flertalet seriekopplade komponenter, exempelvis tank, ledningsrör och sprinklerhuvuden. Om en komponent fallerar sätts hela systemet ur funktion. Tekniska lösningar för att öka pålitligheten på vissa individuella komponenter finns, men generellt sett så är flera separata system en bättre lösning. Då minskar beroendet av att varje komponent måste förbli intakt och sannolikheten att systemet i helhet fungerar ökar.

Vid utrymning av höghus är det kritiskt att hissar och trapphus fungerar optimalt för att minimera utrymningstiden. Om hissarna blir utslagna vid brand i ett höghus och all utrymning måste ske via trapphusen blir detta mycket tidskrävande och fysiskt krävande, både för de evakuerande och räddningstjänsten som skall hjälpa till. För att minska risken att hissarna sätts ur funktion vid brand kan de brandsäkras. Detta kan göras genom att koppla in extern kraftkälla som kan driva hissen, vattensäkra den för att förhindra att sprinklervatten förstör systemen, samt trycksätta hisschaktet för att förhindra att farliga brandgaser kommer in.

Om dessa lösningar appliceras vid dimensionering av brandtekniska system uppnås sannolikt de regel- och rekommendationsändringar som uppkommit som följd av WTC-attentatet. Dessa är redovisade i Bilaga 1.

De tillkomna reglerna visar tydligt att flera lärdomar kan dras av händelsen. Evakueringstiden för ett höghus är avsevärt längre än en lägre byggnad och konsekvenserna vid brand kan bli större då det ofta befinner sig många fler människor där. Brandsäkra hissar måste implementeras i alla höga byggnader för att möjliggöra en snabb och säker evakuering. Det passiva brandskyddet skall förstärkas och underhållas för att fördröja tiden det tar innan byggnadens bärande struktur försvagas. Sprinklersystemen måste bli mer tillförlitliga och hållbara för att försäkra vattentillförseln till alla delar av byggnaden.

Det skulle vara intressant att jämföra hur brandskyddet dimensionerats i byggnader som liknar WTC och byggdes efter att de nya reglerna genomförts. One World Trade Center, även kallat Freedom Tower, hade varit ett bra exempel att jämföra med eftersom det ligger på samma plats, är i ungefär samma storleksordning och byggdes efter att de nya reglerna införts. Mycket av informationen om One World Trade Center är dock hemligstämplad och det gör att det blir väldigt komplicerat att få tag på relevant information och därför görs inte den jämförelsen i denna rapport.

Det finns stor potential för vidare undersökning inom området brandsäkerhet. Vissa aspekter behandlas inte särskilt ingående i rapporten men de är fortfarande viktiga ur en brandsynpunkt. Interiören är ett område som är viktigt i och med att den påverkar hur mycket bränsle branden får och hur den kan spridas. Det kan därför vara av betydelse att undersöka närmare hur interiören påverkar brand och om det är möjligt att ändra regler för att öka brandsäkerheten. Brandcellsindelning är ett annat område som är viktigt för att kunna öka brandsäkerheten i höga byggnader. Det skulle därför kunna vara intressant att undersöka närmare hur brandcellerna såg ut i World Trade Center och hur de skulle kunna göras bättre.

Det finns fler områden inom brandsäkerhet som är viktiga att vidareutveckla, i synnerhet i nuläget när höghus blir allt vanligare. Att konstruera ett höghus som är helt brandsäkert är orealistiskt ur ett ekonomiskt perspektiv men förhoppningsvis har WTC-attentatet lett till större medvetenhet när det gäller brand i höga byggnader.

7 Källförteckning

1. The 9/11 Commission. Final Report of the National Commission on Terrorist Attacks Upon the United States [Internet]. Washington: The U.S. Government publishing office; 2004.[citerad 16 mars] Tillgänglig från: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/GPO-911REPORT/pdf/GPO-911REPORT.pdf>
2. Världens städer växer allt snabbare [Internet]. Stockholm: Statistiska Centralbyrån; 2013.[citerad 28 mars] Tillgänglig från: <http://www.scb.se/sv /Hitta-statistik/Artiklar/Varldens-stader-vaxer-allt-snabbare/>
3. Brandteknisk klass och brandsäkerhetsklass [Internet]. Stockholm: Svensk Betong; 2015. [citerad 18 maj 2015]. Tillgänglig från: <http://svenskbetong.se/brand/brandteknisk-klass-och-brandsaekerhetsklass.html>
4. Brandtekniska klasser [Internet]. Borås: SP; 2015.[citerad 5 februari] Tillgänglig från: http://www.sp.se/sv/index/services/fire_classes/Sidor/default.aspx
5. Goode, M. Fire Protection of Structural Steel in High-Rise Buildings [Internet]. Gathinsbourg: NIST; 2004.[citerad 5 februari] Tillgänglig från: <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build04/PDF/b04047.pdf>
6. NIST Tests Provide Fire Resistance Data on World Trade Center Floor Systems [Internet]. Washington: NIST; 2004.[citerad 20 februari] Tillgänglig från: http://www.nist.gov/public_affairs/releases/wtc_fire_resistance_data.cfm
7. Gross, J., McAllister, T. Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Towers [Internet]. Washington: NIST; 2004.[citerad 20 februari] Tillgänglig från: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build05/PDF/b05040.pdf>
8. Bengtsson L.G. Inomhusbrand [Internet] Karlstad: Räddningsverket; 2001.[citerad 5 februari] Tillgänglig från: <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/17521.pdf>
9. National Institute of Standards and Technology, NIST. Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers. Washington; 2005. [citerad 2 februari 2015]. Tillgänglig från: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=909017
10. Burström P.G. Byggnadsmaterial. 2 uppl. Lund: Studentlitteratur; 2007.
11. Association for Specialist Fire Protection. Fire protection for structural steel in buildnings [Internet]. Hampshire: ASFP; 2004.[citerad 2 mars] Tillgänglig från: http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/DataBase/References/ASPE%20publications/ASFP04_Fire%20protection%20for%20structural%20steel%20in%20buildings%20%28Yellow%20book%29.pdf
12. Fire Resistance of Steel-framed Buildings [Internet] Manchester: Corus Construction & Industrial; 2006.[citerad 20 februari] Tillgänglig från: <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/DataBase/References/Fire%20resistance%20FINAL.pdf>
13. Beräkning av U-värde enligt standard [Internet]. Trosa: Swedisol; 2015. [citerad 3 mars] Tillgänglig från: http://www.swedisol.se/sites/default/files/undersidor/filer/pdf_bilaga_A.pdf
14. Brandlarm och Sprinkler [Internet] Stockholm: Brandskyddsföreningen; 2015 [citerad 2 mars 2015]. Tillgänglig från: <http://www.brandskyddsforeningen.se/pa-arbetet/valj-omrade-har/sprinkler-brandlarm>

15. Moinuddin K.A.M. Reliability of sprinkler system in Australian high rise office buildings. Melbourne: Elsevier Ltd; 2013. [citerad 4 mars 2015]. Tillgänglig från: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711213002257>
16. Poon, L. Assessing the Reliance of Sprinklers for Active Protection of Structures. Hong Kong: Elsevier Ltd; 2013. [citerad 4 mars 2015]. Tillgänglig från: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813012897>
17. International Code Council, Inc. International Building Code. Washington: International Code Council, Inc.; 2009.[citerad 3 mars] Tillgänglig från: <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/icc.ibc.2009.pdf>
18. Gillespie A.K. Twin Towers: The Life of New York City's World Trade Center. New Brunswick: Rutgers University Press; 1999.
19. Ruchelman L.I. The World Trade Center: Politics and Policies of Skyscraper Development. New York: Syracuse University Press; 1977.
20. US Fed News Service. Safer Buildings Are Goal Of New Code Changes Based On Recommendations From NIST World Trade Center Investigation [Internet]. Washington, D.C: HT Media Ltd; 2008. [citerad 2 februari]Tillgänglig från: <http://proxy.lib.chalmers.se/login?url=http://search.proquest.com/docview/473109725?accountid=10041>
21. Ardenmark J. Utrymning med hjälp av brandhissar [Internet]. Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lunds universitet; 1999.[citerad 14 april] Tillgänglig från: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=1767188&fileOId=1770021>

7.1 Bildkällor

- I. 9/11 photos, 2012 [Elektronisk bild]. Tillgänglig från: <https://www.flickr.com/photos/911pics/7835973648>
- II. NIST. Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers. Washington; 2005. [Elektronisk bild]. Tillgänglig från: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=909017

8 Bilagor

Bilaga 1 - Tillkomna regler

Alla nya brandsäkerhetsregler som införts till följd av World Trade Center attentatet.

*** An additional (third) exit stairway for buildings more than 420 feet high.**

Ett ytterligare (tredje) trapphus för byggnader över 128 meter.

*** An increase of 50 percent in the width of exit stairways in new sprinklered buildings.**

En breddökning på 50 % i trapphus i nya hus med sprinklersystem.

*** Permitting the use of elevators for occupant evacuation in fires and other emergencies for all buildings, and as an alternative to the required additional exit stairway for buildings more than 420 feet high. Passenger elevators must meet specific criteria to be used for evacuation purposes.**

Tillåtandet av användandet av hissar för att evakueras personer i byggnaden vid brand eller andra nödlägen, och som ett möjligt alternativ till det extra trapphuset i byggnader som är högre än 128 m. Personhissarna måste möta specifika krav för att tillåtas användas för evakuering.

*** Hardening of exit stairway and passageway enclosures, and elevator shaft enclosures, in buildings - for all buildings more than 420 feet high, for buildings 75-420 feet high where failure of the enclosure would substantially jeopardize human life, and in essential facilities such as hospitals.**

Förstärkning av väggarna för utrymningstrappor, utrymningsgångar och hisschakt för alla byggnader över 128 m. Detta gäller även för byggnader mellan 23 och 128 meter om det skulle innebära extrem fara för människoliv om utrymningsvägarna förstördes. Även livsnödvändiga byggnader som t.ex. sjukhus innefattas.

*** A minimum of one fire service access elevator for buildings more than 120 feet high.**

Det skall finnas minst en brandsäker räddningshiss i byggnader högre än 37 m.

*** Separating exit stairway enclosures by a distance not less than 30 feet or not less than one-fourth of the maximum building diagonal, whichever is less.**

Avstånd mellan anslutande trapphus får ej överstiga 10 meter eller maximalt en fjärdedel av byggnadens diagonal, beroende på vilket som är minst.

*** Fire service access elevator lobby sizes that are a minimum of 150 square feet in area with sides at least 8 feet long.**

Hissfoajén till de brandsäkrade hissarna måste åtminstone vara åtminstone 14m² med sidor som är åtminstone 3 m.

*** Keeping fire service access elevator lobbies free of storage.**

Lobbies med brandsäkra hissar får ej användas som lagringsutrymme.

*** Greater reliability of sprinklers with a minimum of two water supply risers for each sprinkler zone in buildings more than 420 feet high. Each riser is required to supply sprinklers on alternate floors and will be placed in remotely located stair enclosures.**

Större tillförlitlighet hos sprinklersystemet med ett minimum av två ledningar för vattentillförsel för varje sprinklerzon i byggnader som är över 128 meter höga. Varje ledning ska ge vatten till sprinklers på varannan våning och skall placeras i separata trapphus.

*** A one-hour increase in the fire-resistance rating of structural components and assemblies in buildings more than 420 feet high.**

En timmes ökning i brandsäkerhetsklass av strukturella komponenter i byggnader högre än 128 meter.

*** Explicit adoption of the "structural frame" approach to fire resistance ratings that requires all members of the primary structural frame to have the higher fire resistance rating commonly required for columns. The primary structural frame includes the columns; other structural members including the girders, beams, trusses and spandrels having direct connections to the columns; and bracing members designed to carry gravity loads.**

Uttryckligt införande av den "bärande strukturen". Detta tankesätt angående brandsäkerhetsklassen kräver att alla delar i den primära bärande strukturen har en högre brandsäkerhetsklass än det som vanligtvis krävs för pelare. Den primära bärande strukturen inkluderar pelare; övriga bärande system så som bjälkar, balkar och fackverk som har kontakt med pelarna; och delar som stöttar strukturen och bär upp strukturen.

*** Broadening the definition of the primary structural frame to include bracing members essential to vertical stability (such as floor systems or cross bracing) whether or not they carry gravity loads.**

Breddning av definitionen av den primära bärande strukturen så att stödjande delar som är nödvändiga för den vertikala stabiliteten inkluderas, oavsett om de bär upp strukturen eller ej.

*** Increasing bond strength for fireproofing to nearly three times greater than currently required for buildings 75-420 feet high and seven times greater for buildings more than 420 feet high.**

Ökning av bindningsstyrkan för brandskyddssytskikt till tre gånger större än det som tidigare krävdes för byggnader mellan 23 och 128 meter höga och sju gånger större för byggnader som är högre än 128 meter.

*** Field installation requirements for fireproofing to ensure that:**

- Installation complies with the manufacturer's instructions
- The substrates (surfaces being fireproofed) are clean and free of any condition that prevents adhesion
- Testing is conducted to demonstrate that required adhesion is maintained for primed, painted or encapsulated steel surfaces
- The finished condition of the installed fireproofing, upon complete drying or curing, does not exhibit cracks, voids, spalls, delamination or any exposure of the substrate.

Krav på installationer av brandskydd för att försäkra att:

- Installationen sker som tillverkaren instruerat.
- Ytan där brandfärg eller annat brandskydd appliceras är rent och fritt ifrån allt som skulle leda till att brandskyddet inte fastnar.
- Tester genomförs som visar att brandskyddet sitter ordentligt fast och kommer att fortsätta göra det.
- Den slutgiltiga kvaliteten av brandskyddet skall inte uppvisa sprickor eller hål som gör brandskyddet ineffektivt och ytan där brandskyddet applicerades skall vara helt täckt.

*** Special field inspections of fireproofing to ensure that its as-installed thickness, density and bond strength meet specified requirements and that a bonding agent is applied when the bond strength is less than required due to the effect of a primed, painted or encapsulated steel surface. The inspections are to be performed after the rough installation of mechanical, electrical, plumbing, sprinkler and ceiling systems.**

Inspektioner av brandskyddet ska genomföras som försäkrar att deras tjocklek, täthet och vidhäftningsförmåga möter alla krav och se till att dessa uppehålls. Inspektionerna ska genomföras efter installation av mekaniska-, elektriska-, avlopps-, sprinkler-, och taksystem.

*** Luminous markings delineating the exit path (including vertical exit enclosures and passageways) in buildings more than 75 feet high to facilitate rapid egress and full building evacuation.**

Självlysande linjer markerar utrymningsvägar (inkluderat vertikala utrymningsvägar) i byggnader högre än 23 meter för att underlätta snabb utrymning och fullständig byggnadsevakuerings.

*** Broadening the use of luminous markings to identify obstacles, exit doors, exit signs and floor numbers in the exit path in buildings more than 75 feet high.**

Ökat användande av självlysande markeringar för att identifiera hinder, utrymningsdörrar, utrymningsskyltar och våningsnummer i utrymningsvägarna i byggnader högre än 23 meter.

*** Luminous exit path markings in existing buildings more than 75 feet high with the exception of open, unenclosed stairs in historic buildings.**

Självlysande linjer som visar utrymningsvägarna i existerande byggnader högre än 23 meter med undantaget av historiska byggnader med öppna, oskyddade trappor.

*** Increasing the area of the Fire Command Center (the area from which all fire department operations are directed and usually housing the control panel for alarms, sprinklers, etc.) from 96 square feet to 200 square feet with at least one side 10 feet long in buildings more than 75 feet high.**

Ökning av brandledningsområdet (området som organiserar och sköter brandbekämpningsarbetet och vanligtvis har kontrollpanelen till alarm, sprinklers osv.) från 9 m² till 18 m² med åtminstone en sida som är 3 meter lång i byggnader över 23 meter.

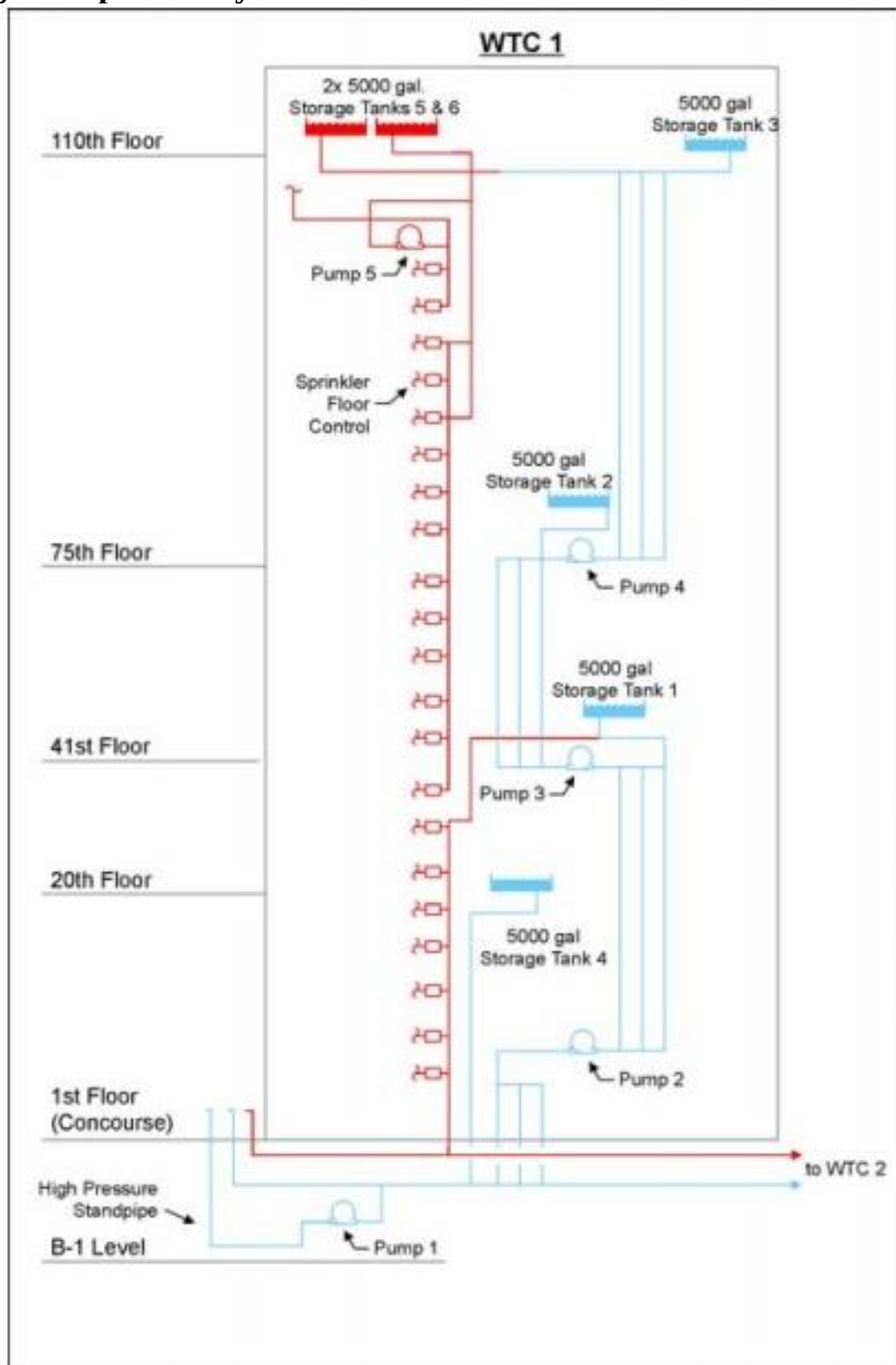
*** Approved radio coverage for all buildings for emergency responders within the building based upon the existing coverage level of public safety communications systems at the exterior of the building. Approved coverage includes specific requirements for signal strength, system design, installation and maintenance.**

Godkännande av radiotäckning för alla byggnader för räddningspersonal inom byggnaden som grundas på den existerande nivån av allmänna system för säkerhetskommunikation på utsidan av byggnaden. Godkänd täckning inkluderar specifika krav på signalstyrka, systemets design, installation och underhåll.

*** Installing an emergency responder radio communications system to provide the required level of radio coverage throughout a building. Typical hardwired communications systems would be replaced.**

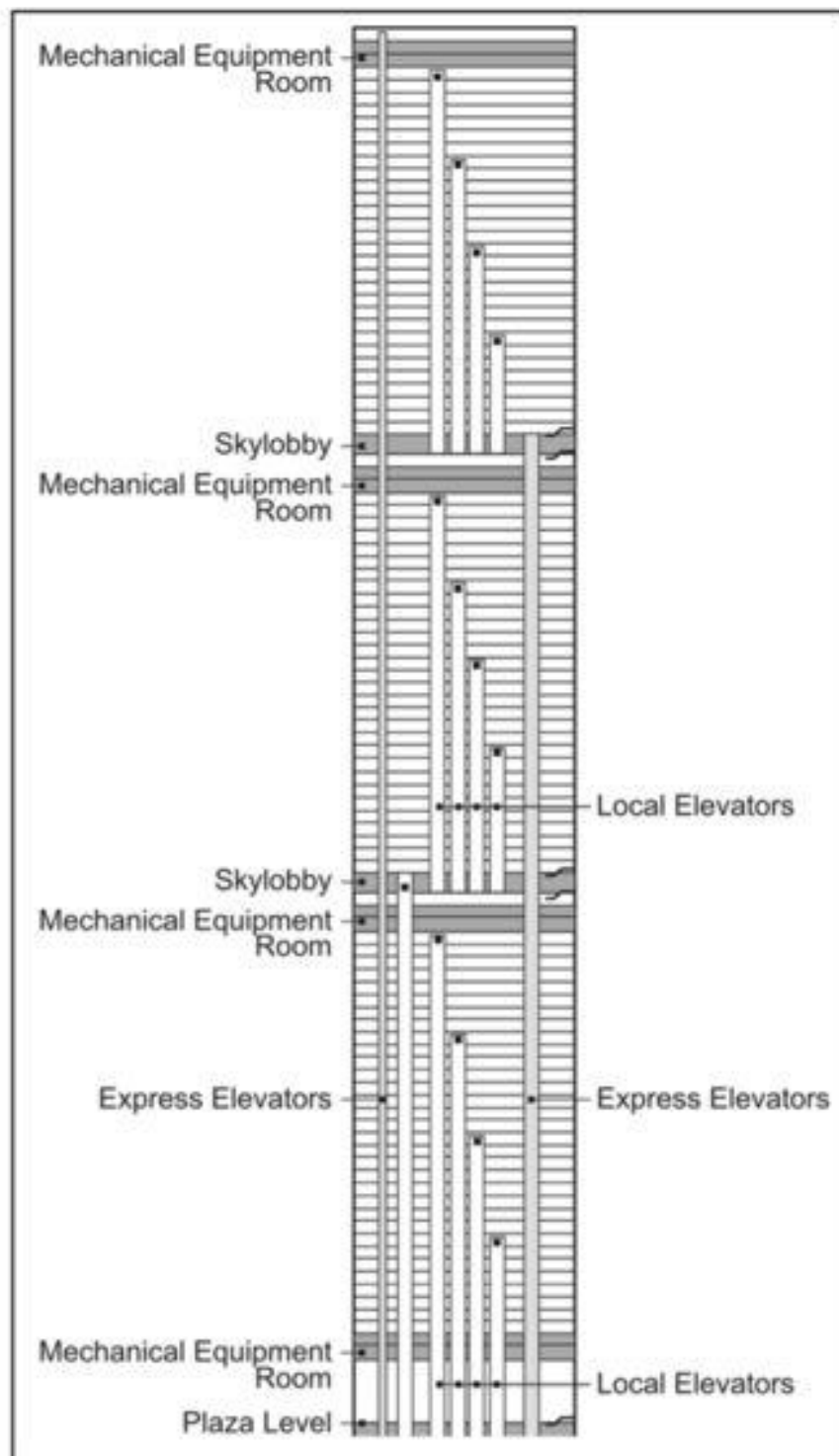
Installerandet av ett radiokommunikationssystem för räddningspersonal för att klara kravet på radiotäckning för hela byggnaden.

Bilaga 2 - Sprinklersystemet i World Trade Center



Figur som visar sprinklersystemet i WTC1. WTC2:s sprinklersystem var utformat likartat [II].

Bilaga 3 - Hissystemet i World Trade Center



Figur som visar hur WTCs hisssystem såg ut. Notera expresshissarna till höger och vänster och lokalhissarna i mitten [II].

© David Grönbäck, Jonas Pettersson, Fredrik Tveter, Rikard Österlund, 2015

Institutionen för Bygg- och Miljöteknik
Avdelningen Byggnadsteknologi
Chalmers Tekniska Högskola