



Slutrapport

Lokalisering och värdering av brandspridningsvägar i byggnader

Kista 2002-01-30

Johan Lins, BELAB
Leif Rydén, Ingemansson Technology AB
Fredrik Sonnegård

Lokalisering och värdering av brandspridningsvägar

Innehållsförteckning

1. Sammanfattande rapport, Leif Rydén
2. Rapporten "Läckage i brandavskiljande byggnadselement" av Fredrik Sonnegård
3. Handbok för akustiskt läcksökning, Leif Rydén
4. CD skiva med testsignaler:

Innehållsförteckning på CD skivan

- | | |
|-------------------------------|--------|
| 1. Skärt brus | 10 min |
| 2. Vitt brus | 10 min |
| 3. Vitt pulsat brus | 5 min |
| 4. Oktavfiltrerat brus 125 Hz | 6 min |
| 5. Oktavfiltrerat brus 250 Hz | 6 min |
| 6. Oktavfiltrerat brus 500 Hz | 6 min |
| 7. Oktavfiltrerat brus 1 kHz | 6 min |
| 8. Oktavfiltrerat brus 2 kHz | 6 min |
| 9. Oktavfiltrerat brus 4 kHz | 6 min |
| 10. Vagg utan läckor | |
| 11. Vagg med springa | |
| 12. Vagg med hål | |
| 13. Läckage via ventilation | |

Sammanfattande rapport

LOKALISERING OCH VÄRDERING AV BRANDSPRIDNINGSVÄGAR I BYGGNADER

Sammanfattning

Avsikten med projektet är att undersöka om det går att finna potentiella brandspridningsvägar, läckor, i byggnader med hjälp av akustiska metoder samt att utveckla en beräkningsmetod för att värdera risken för brandspridning genom läckor.

Tre metoder för läcksökning har provats: ljudisoleringsmätningar, lyssningstester och mätning med skärmad mikrofon.

- Ljudisoleringsmätningar indikerar om det finns en läcka och ger information om läckans storlek och utseende, men inte om var den kan befinna sig.
- Lyssningstester ger snabbt information om huruvida det finns någon läcka och om läckans position. En nackdel med metoden är att den största läckan vanligen maskerar övriga läckor. Den största måste då tätas eller byggas för innan nästa kan upptäckas.
- Mätning med skärmad mikrofon ger snabbt upplysning om genom vilka delar av väggen som mest ljud transmitteras. Det är alltså med denna metod möjligt att finna samtliga läckor.

Den av Avdelningen för Teknisk Akustik, LTH, föreslagna tuff-tuff-metoden har undersökts och funnits vara användbar vid lyssningstest.

Brandprovning har utförts för att undersöka utflödestemperaturen vid springor i betong- och lättbetongvägg.

Teoretiska beräkningar har gjorts på brandgasströmning genom hål i väggar och beräkningsresultaten har visat sig stämma väl med resultaten från brandprov. De parametrar som har störst inverkan på brandgasens utströmningstemperatur är hålets dimensioner, vägg tjockleken och väggmaterialets värmekonduktivitet. Resultaten visar

att redan så smala springor som 5 mm i betong- och tegelväggar innebär risk för brandspridning.

Referat av tidigare arbeten

Sten Ljunggren: Bestämning av brandspridningsvägar med akustiska mätmetoder, KTH 1995:3 och 1995:6

Mätningar och lyssningstester har gjorts på Kungliga Slottet i Stockholm.

Ljudisoleringsmätningar har utförts på likartade konstruktioner, med och utan läckor, och läckorna indikeras väl av skillnaden i ljudisolering, d.v.s. finns det en läcka påverkar den utseendet på reduktionstalskurvan. Av kurvformen går det också att dra slutsatser om läckornas typ.

För lokalisering av läckorna användes lyssningstester. En högtalare, som sände ut ett brusljud med hög nivå, placerades i ett rum och i rummet intill utfördes lyssningstesten. Det var då ofta lätt att höra var läckan fanns, men i vissa fall fanns branddörrar med låg ljudisolering i skiljeväggarna och ljudtransmissionen genom dessa maskerade andra läckor. Detta åtgärdades genom att dörrarna tilläggsisolerades med gipsskivor och mineralull.

I något fall gav ljudisoleringsmätningen en indikation på att det fanns en läcka, men det visade sig att den sämre isoleringen berodde på att en del av tegelväggen var väsentligt tunnare och därför transmitterade betydligt mera ljud. I och med att det inte fanns någon läcka fanns det inte heller någon risk för brandspridning.

**Johan Lins och Fredrik Olsson: Localisation of Fire Spread Paths in Old Buildings,
Use of acoustical methods for localisation of possible paths for hot gas propagation.
Examensarbete, Avdelningen för Byggnadsteknik, KTH 1996**

Avsikten med examensarbetet var att utveckla en metod för att med hjälp av ljudisoleringsmätningar kunna avgöra om det finns dolda eller svårupptäckta läckor i skiljekonstruktioner som kan sprida brand i byggnader.

För detta ändamål byggdes en testvägg med hög ljudisolering mellan två rum. Väggen kunde förses med olika öppningar och ett stort antal mätningar utfördes på dessa. Dessutom mättes med olika ytskikt över öppningarna. Mätresultaten sammanställdes till en katalog som visar hur ljudisoleringen påverkas av olika öppningar och hur öppningarnas ljudisolering dessutom påverkas av olika ytskikt.

Katalogen över mätkurvor används som referens. Genom att mäta ljudisoleringen för en vägg, där läckor kan finnas, och jämföra med reduktionstalskurvan för en liknande vägg, utan läckor, erhålls läckans påverkan på väggens reduktionstal vid olika frekvenser. Med hjälp av reduktionstalskurvorna i katalogen är det sedan möjligt att göra en bedömning av läckans typ.

Johan Lins: Slutrapport till Förstudie för Projektet "Lokalisering och värdering av brandspridningsvägar i byggnader, BELAB, KTH 1997

Utgående från tidigare rapporter av Ljunggren respektive Lins och Ohlsson samt en omfattande litteratursökning har en förstudie utförts för Brandforsk projekt nr 301-971. Slutsatsen av denna förstudie är att det är fullt möjligt att utveckla en praktiskt användbar metod för lokalisering och värdering av brandspridningsvägar med akustiska metoder. Utvärdering av den föreslagna metoden med en kombination av ljudisoleringsmätningar och lyssningstester visar att den uppfyller de ställda kraven på att den skall vara

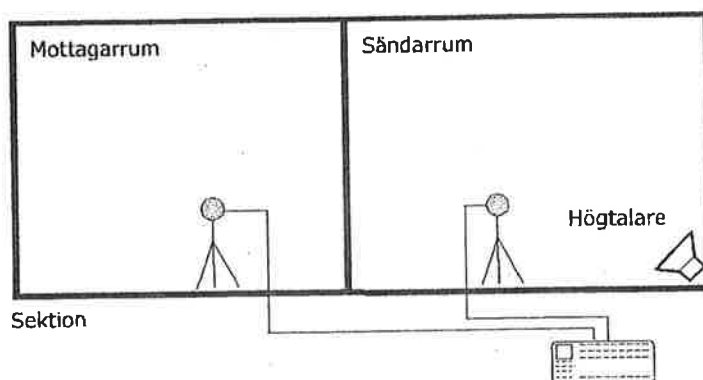
- Fältmässig
- Oförstörande
- Ekonomisk
- Enkel
- Snabb
- Säker

I projektet skall också teorin för brandgasflöden utvecklas så att risken för brandspridning kan bedömas med större noggrannhet. Dessutom skall "tuff-tuff"-metoden utvärderas, alltså lyssningstestning med hjälp av en pulserande brussignal.

LÄCKSÖKNING MED LJUDISOLERINGSMÄTNINGAR OCH MED LYSSNINGSTESTER

Ljudisolering

Med ljudisolering avses skillnaden i ljudtrycksnivå mellan två rum då det finns en ljudkälla i det ena. Ljudtrycket påverkar tak, väggar och golv som en med tiden varierande kraft, som visserligen är liten, men dock tillräcklig för att t.ex. en vägg skall vibrera. På grund av rörelsen strålas då ljud ut från väggen. Uppenbarligen är det så att ju tyngre väggen är desto mindre kommer den att röra sig, för ett givet ljudtryck i sändarrummet, och desto mindre ljud kommer att strålas ut i mottagarrummet. En tyngre vägg kommer alltså att ha bättre ljudisolering. Grovt räknat ligger ljudisoleringen för vanliga väggar inom området 30-60 dB, vilket innebär att mellan en tusendel och en miljondel av den ljudeffekt som faller in mot väggen strålas ut i mottagarrummet.



Figur 1. Mätning av luftljudsisolering

Praktiskt går ljudisoleringsmätningar till enligt ovanstående figur. I sändarrummet ställs en högtalare i ett hörn som inte ligger vid den konstruktion, t.ex. en vägg, som skall mätas och riktas längs rummets rymddiagonal. Högtalaren sänder ut ett bredbandigt brusljud med hög ljudnivå, typiskt 100-110 dB(A) för att ljudnivån i mottagarrummet

skall bli tillräckligt hög så att mätningen inte störs av annat buller. Mätningen utförs sedan i följande steg.

- I sändarrummet ställs en mikrofon och ljudnivån mäts.
- mikrofonen flyttas till mottagarrummet och ljudnivån mäts där.
- högtalaren flyttas till mottagarrummet för en mätning av efterklangstiden.
- mottagarrummets volym och skiljeytans area mäts.

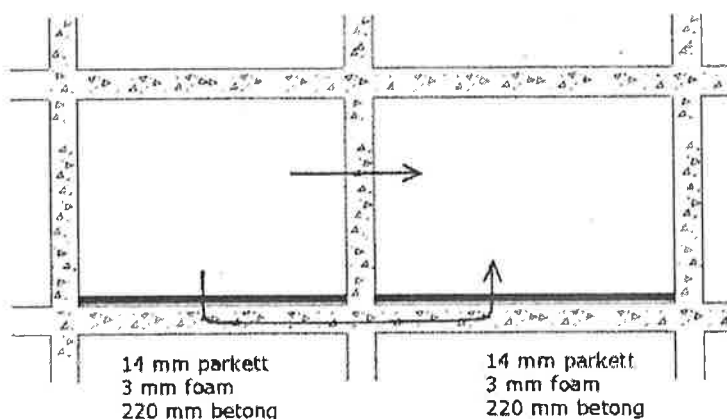
Utgående från dessa värden beräknas isoleringen (reduktionstalet) i varje tersband (50, 63, 80, 100, 125.....3150 Hz) som redovisas i ett diagram enligt figur nedan. Generellt ökar isoleringen med frekvensen, d.v.s. den är lägst vid låga och högst vid höga frekvenser. För att göra det enklare att jämföra olika konstruktioner beräknas också ett reduktionstal som är vägt med avseende på frekvensen: R'_w - ett ensiffervärde (exempelvis $R'_w = 52$ dB) som skall motsvara den upplevda ljudisoleringen.

För en öppning i en vägg kan reduktionstalet överslagsmässigt sättas till 0 dB, d.v.s. ljudet går rakt genom utan någon dämpning. Genom ett hål på 1 cm^2 i en vägg på 10 m^2 transmittteras då ungefär lika mycket ljud genom det lilla hålet som genom resten av väggen.

Läcksökning med hjälp av ljudisoleringsmätningar

Som visats i tidigare undersökningar ger läckor upphov till mer eller mindre karakteristiska avvikelser i reduktionstalskurvan, vilket innebär att läckor kan detekteras med hjälp av ljudisoleringsmätningar.

I praktiken är det emellertid inte alltid så enkelt, i många byggnader finns sammansatta konstruktioner vars egenskaper påverkar ljudisoleringen på ett sätt som kan uppfattas som om det funnes en läcka. Ett exempel:



Figur 2. Försämring av ljudisoleringen för en skiljevägg p.g.a. parkettresonans.

Reduktionstalskurvan för väggen mellan två vardagsrum uppvisar en ordentlig svacka vid 400 Hz, vilket skulle kunna innebära att det finns en läcka, men okulärbesiktning och lyssningstest avslöjar ingenting. Bjälklaget är emellertid av betong och golven är försedda med parkett på ett stegljudsdämpande underlag av 3 mm skumplast, vilket är det normala sättet att klara stegljudskraven. Parkettens massa och skumplastens fjädring ger en resonans vid 400 Hz och det är denna som orsakar svackan i reduktionstalskurvan. Vid mätningen transmittas nämligen ljudet inte enbart genom skiljeväggen utan även via flankerande konstruktioner: sidoväggar, golv och tak. Vanligen är ljudöverföringen genom den gemensamma ytan dominerande, men i detta fall förstärks

flanktransmissionen genom bjälklaget så kraftigt vid parkettresonansen att det ger ett tydligt utslag på reduktionstalskurvan.

Det finns många exempel som visar att avvikelser i reduktionstalskurvan kan bero på andra effekter än läckor. Det är alltså inte tillräckligt att bara studera mätresultat utan skiljekonstruktionen måste också undersökas på plats. En ljudisoleringsmätning ger inte heller någon anvisning om läckans placering, detta kan enbart avgöras genom lyssningstest.

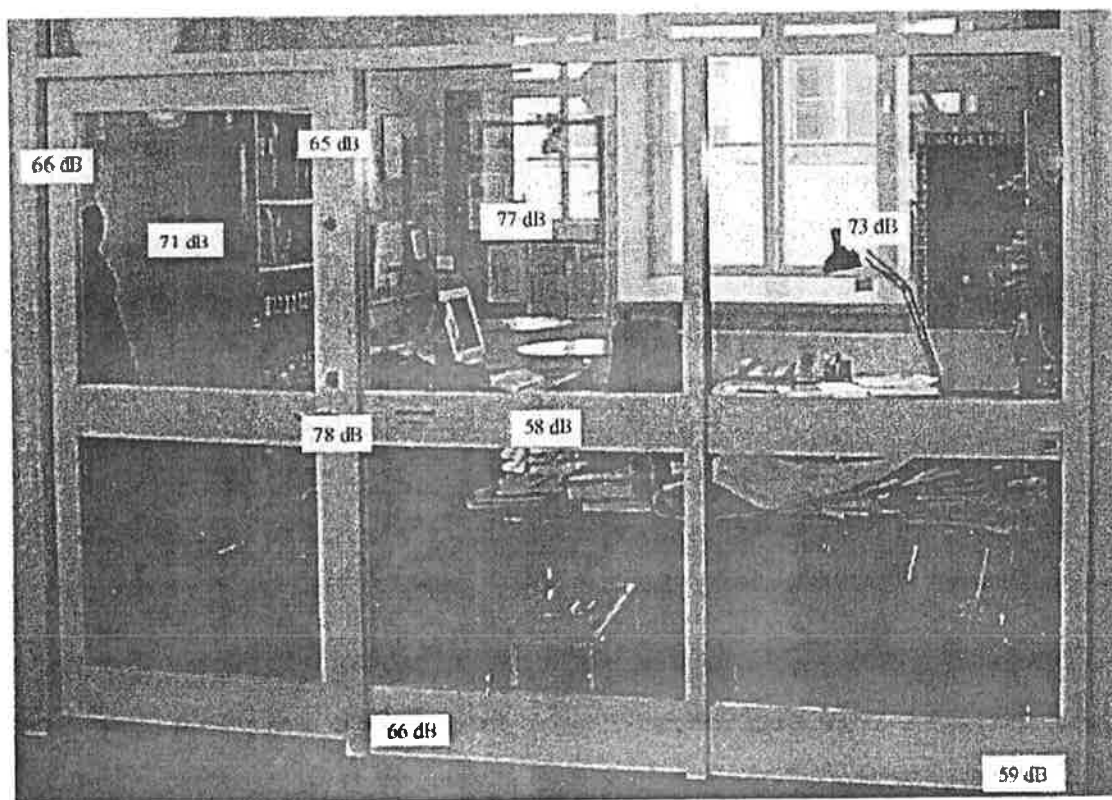
I praktiken räcker det med lyssning och okulärbesiktning, ljudisoleringsmätningar kan visserligen tillföra ytterligare information, men inte på något avgörande sätt och inte i proportion till tidsåtgång och behov av utrustning. Erfarenhetsmässigt kan konstateras att enbart ljudisoleringsmätningar inte är tillräckligt för att lokalisera läckor, vilket däremot är möjligt med enbart lyssningstestester i nästan alla fall.

Det största problemet i samband med lyssningstester är att det vanligen är svårt att finna annat än den största läckan. Först när denna har tätats är det möjligt att undersöka om det finns ytterligare läckor.

Läcksökning med skärmad mikrofon

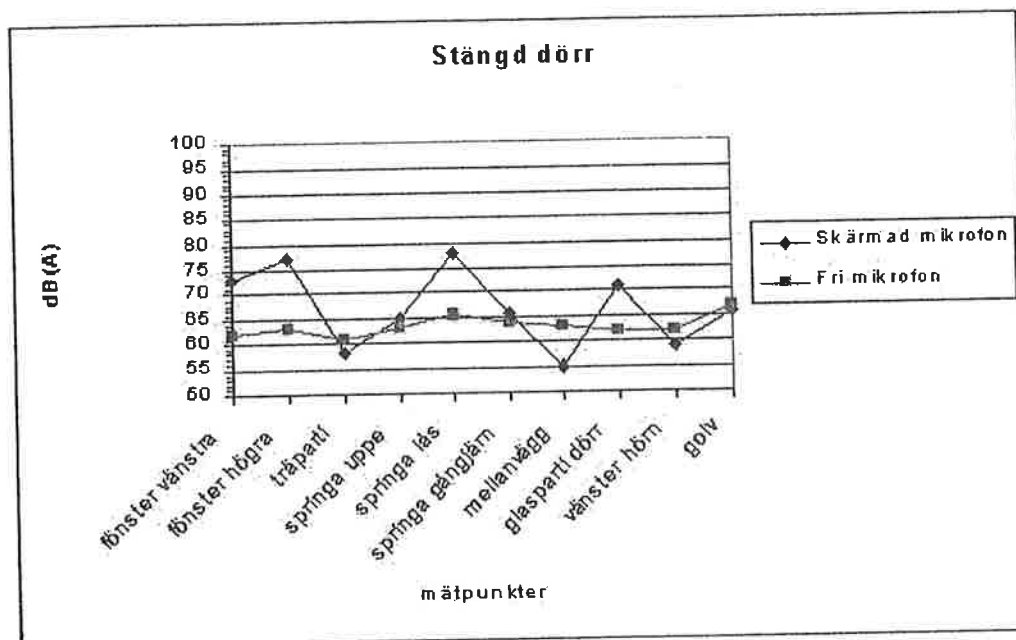
Det är också möjligt att söka läckor med hjälp av en mikrofon som förs intill provobjektet. Genom att samtidigt observera ljudnivån på ett instrument är det möjligt att se var ljudnivån är högst. Tyvärr fungerar detta inte så bra i praktiken, eftersom mikrofonen påverkas mera av övrigt ljud i rummet än vad en lyssnare gör. Hörseln har en riktningskänslighet och en förmåga att differentiera mellan olika ljud som en mikrofon inte har. Det finns metoder som fungerar bättre än en enkel mikrofon, t.ex. intensitetsmätning, men de uppfyller inte kraven på att vara enkla att använda.

Inom projektet har därför utvecklats en metod för läcksökning med skärmad mikrofon. Principen är att en mikrofon monteras i en dämpad kåpa som har en öppen sida. Öppningen har en tättningslist som tätar mot väggen och när kåpan hålls mot t.ex. en vägg hindrar den ljudet i rummet att nå mikrofonen och bara det ljud som kommer direkt från väggen tas upp. På så vis är det möjligt att inte bara finna läckor utan även att se skillnad i ljudisolering mellan olika partier av samma vägg. Vid provningen används en bullermätare med A-vägning. Den bör ha en lös mikrofon som ansluts med en kabel.



Figur 3. Ljudnivåer mätta med skärmad mikrofon på en korridorvägg. 55 dB(A) är mätt på mellanväggen till nästa rum.

I figuren ovan visas en korridorvägg som huvudsakligen består av glaspartier. Mätningar har skett på glas- och träpartierna på väggen, på glasningen och springorna på dörren samt på mellanväggen till nästa kontor. De uppmätta ljudnivåerna med skärmad mikrofon är noterade på varje mätpunkt. Som synes är det stora skillnader i ljudnivå mellan olika punkter, totalt ett spann på ± 11 dB(A).



Figur 4. Jämförelse mellan mätningar med skärmad och med fri mikrofon på väggen i figur 3.

I figuren ovan är mätvärdena inritade för både skärmad och för fri mikrofon. Med den fria mikrofonen syns i viss mån samma tendenser, som för den skärmade, men för punkterna "mellanvägg" och "glasparti dörr" erhålls inget utslag. Dessutom är skillnaden mellan högsta och lägsta nivåer för fri mikrofon bara ± 3 dB(A), vilket gör det svårt att upptäcka problemområdena.

Det bör kanske påpekas att detta inte är en egentlig mätmetod utan ett sätt att jämföra ljudisoleringen mellan olika delar av en vägg. Den stora fördelen med metoden är att det är möjligt att finna alla läckor, inte bara den största som ofta blir fallet vid lyssningstest.

I prototypen används en kåpa från ett hörselskydd som visat sig vara idealisk för ändamålet: den är konstruerad för att utestänga ljud, den innehåller akustiskt absorptionsmaterial för att dämpa resonanser och den är försedd med en mjuk tättningsring som sluter tätt mot provobjektet. Kåpan har försetts med en hållare för mikrofonen och ett teleskopisk skaft så att alla delar av t.ex. en vägg lättare kan nås.



Figur 5. Läcksökaren i användning. Kåpan hålls mot väggen och ljudnivån avläses på bullermätaren.

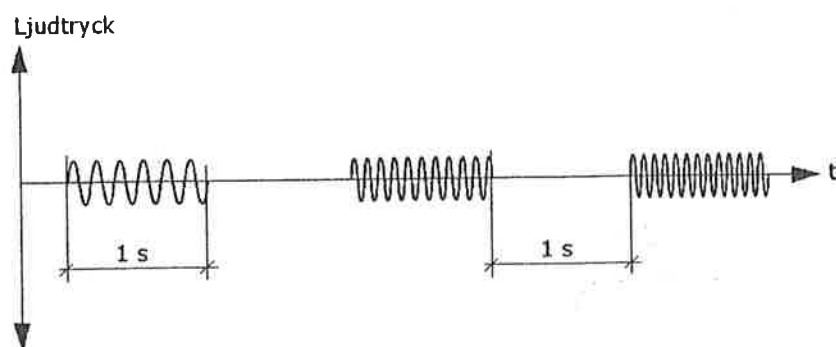
Genom att hålla kåpan mot olika punkter på väggen och notera dB(A)-värdena detekteras de ställen där ljudnivåerna är högst. Dessa värden kan föras in på en bild av provobjektet för att ge en tydlig bild av var läckorna finns och deras utsträckning.

Tuff-tuff-metoden

På Avdelningen för Teknisk Akustik på LTH har utvecklats metoder för mätning av akustiska parametrar med hjälp av amplitudmodulerat brus. En typ av modulation är att modulera bruset med en fyrkantsvåg, vilket i praktiken innebär att bruset slås av och på i en viss takt. Detta låter då som ett ånglok, därav namnet på metoden. Denna typ av signal har också föreslagits kunna användas för att lokalisera läckor genom lyssningstest och det har då antagits att en lämplig modulationsfrekvens borde vara 4 Hz, det mänskliga talets modulationsfrekvens.

Riktningshörandet beror till stor del på att hörseln kan avgöra varifrån den första ljudvågen kommer, genom att det oftast blir en liten tidsskillnad mellan ljudets ankomst till de två öronen, om inte ljudkällan befinner sig rakt framför åhöraren. Hörseln är alltså mycket känslig för början av en ljudpuls och detta kan utnyttjas för att lättare lokalisera läckor.

I brandspridningsprojektet har utförts lyssningstester med modulationsfrekvenser inom området 0,1 - 8 Hz och med olika läckor. Det visade sig då att de lägre frekvenserna ger tydligare utslag. Vid högre frekvenser maskeras början av nästa puls av att efterklangsnivån inte hunnit sjunka tillräckligt. Resultatet av testerna blev att det mest ändamålsenliga är 0,5 Hz, vilket innebär att bruset är tillslaget en sekund och av lika länge.



Figur 6. Tuff-tuff-brus med 1 s bruspuls och 1 s tystnad.

Läckage i brandavskiljande byggnadselement

Läckage i brandavskiljande byggnadselement

Experimentella studier på brandgastemperaturer i sprickor

Av
Fredrik Sonnegård

Abstract:

The objective of this study was to investigate the risk of fire spread through cracks or holes in between building rooms. One assumption is that fire spread occurs when hot fire gases flows through apertures in a fire separating construction part. To judge the risk it may in that case be done through measuring fire gas temperatures in and close next to a wall crack that is connected to a fully developed room fire.

At experimental small scale tests where an investigation done on concrete and lightweight concrete elements with a thickness of 100 mm where the leakage was a slit formed opening with a width of 3 mm. The results showed that the fire gas temperature in and close next to the leakage quiet largely depended on the material. The highest outflow temperatures reached 200 °C for the concrete and about 450 °C for the lightweight concrete element. The ruling parameter in this case is the materials thermal conductivity where $\lambda_{concrete} = 1,7 \text{ W/mK}$ and $\lambda_{lightconcrete} = 0,1 \text{ W/mK}$.

Key words: Fire spread

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	4
1.1 PROBLEMSTÄLLNING	4
1.2 MÅLSÄTTNING.....	5
1.3 METODIK.....	5
1.4 VAD SÄGER BOVERKETS BYGGREGLER OM BRANDAVSKILJANDE BYGGNADSEDELAR.	5
2. TEORI KRING VÄRMEÖVERFÖRINGEN.....	8
2.1 MODELLEN	8
2.2 PARAMETERVÄRDEN	10
2.3 NUMERISKA RESULTAT	11
3. EXPERIMENTELL UNDERSÖKNING	14
4. EXPERIMENTANORDNING OCH MÄTNINGAR.....	15
4.1 UGN.....	15
4.2 KALIBRERING	15
5. MÄTRESULTAT	16
5.1 PROVKROPPAR I BETONG	16
5.2 PROVKROPPAR AV LÄTTBETONG.....	17
6. UTVÄRDERING OCH SLUTSATSER UTIFRÅN MÄTRESULTATEN.....	18

Sammanfattning:

I denna undersökning har risken för brandspridning genom väggspäckor mellan bostadsrum studerats. Ett antagande är att brandspridning sker genom strömning av heta brandgaser i spräckor och hål i en brandavskiljande byggnadsdel. Bestämning av risken kan i så fall bedömas genom att mäta brandgasernas temperatur i och intill en väggspäckan som angränsar till ett rum utsatt för fullt utvecklad brand.

Vid experimentella försök i liten skala undersöktes ett betongelementet och ett lättbetongelement med en tjocklek av 100 mm där läckaget var en springa med en bredd på 3 mm. Av resultatet att döma är brandgastemperaturen i och utanför läckaget kraftigt beroende av materialet. Högsta utflödestemperaturen på brandgasen registrerades till ca. 200 °C för betongelementet och ca. 450 °C för lättbetongelementet. Den styrande parametern i dessa fall är materialens värmekonduktivitet där $\lambda_{betong} = 1,7$ W/mK och $\lambda_{lätbetong} = 0,1$ W/mK.

1. Inledning

1.1 Problemställning

Läckage i form av sprickor och håligheter i en brandvägg kan sprida brandgaser. Detta kan i sin tur medföra att en brands förlopp blir oförutsägbart och dess konsekvenser betydligt allvarligare än nödvändigt. I tidigare studier har det visats att en lämplig metod att lokalisera läckage med är genom att mäta ljudtransmissionen mellan två rum, och utifrån resultatet utläsa om luftläckor förekommer. En viktig del att utreda är dock hur pass stora läckage som kan vara av betydelse för att risk för brandspridning kan förekomma. Därför krävs det en undersökning för att ta fram data som kan vägleda arbetet mot en avgränsande storlek på läckage som kan betraktas som riskabla i brandspridningshänseende.

Syftet med denna undersökning är således att studera risken för brandspridning genom väggsprickor mellan bostadsrum. Ett antagande är att brandspridning sker genom strömning av heta brandgaser i sprickor och hål i en brandavskiljande byggnadsdel. Bestämning av risken kan i så fall bedömas genom att mäta brandgasernas temperatur vid olika punkter intill en väggsprickan i ett rum utsatt för fullt utvecklad brand.

1.2 Målsättning

Undersökningens målsättning är att ta fram temperaturdata för brandbelastade byggnadselement där konstruerade sprickor finns. Utifrån gällande krav i BBR bör sedan ett minsta läckage, som kan betraktas som brandfarligt, utvärderas beroende på byggnadselementets tjocklek. Då läckage av en given storlek har fastställts är det sedan möjligt att inrikta ljudtransmissionsmätningar mot att försöka lokalisera håligheter av denna storlek eller större.

1.3 Metodik

Metoden för undersökningen utgörs av att först utreda det teoretiskt fysikaliska händelseförloppet som sker då heta brandgaser sprids via läckage över en brandavskiljande byggnadsdel. Experimentella försök utförs sedan i en småskalig modell där förhållanden som vid en fullt utvecklad rumsbrand efterliknas. Utifrån resultaten bör sedan möjlighet finnas att bedöma hur pass små läckage som kan klassas som ofarliga i brandspridningshänseende.

1.4 Boverkets byggregler om brandavskiljande byggnadsdelar.

Enligt BBR 5:62 skall brandavskiljande byggnadsdelar vara täta mot genomsläpp av flammor och gaser och vara så värmeisolerande att temperaturen på den av brand påverkade sidan inte medför risk för brandspridning. Byggnadsdelen skall utformas så

att den upprätthåller sin avskiljande funktion under den tidsperiod som anges som brandteknisk klass med brandpåverkan enligt SIS 02 48 20 eller enligt dimensionering baserad på modell av naturligt brandförlopp.

Avskiljande konstruktioners brandmotstånd bedöms efter provning enligt SIS 02 48 20 (NT FIRE 005, ISO 834) med krav enligt följande:

- Isolering **I**, enligt grupp 1 nedan
- Integritet (täthet) **E**, vid brand
Kravet på täthet bedöms uppfyllt om byggnadsdelen:
 1. Inte släpper igenom mer än enstaka lågor med längre varaktighet än 10 s.
 2. Inte släpper igenom varma gaser eller rök som kan antända en bomullstuss. Vid provning av konstruktioner vars medeltemperatur på den från elden vända sidan överstiger 300°C, bedöms genomsläppligheten av varma gaser efter mätning av uppkomna springor och dylikt enligt mättningsförfarandet angivet i British Standard BS 476:Part 20:1987.
 3. Inte kollapsar.
- Bärförmåga **R** i tillämpliga fall.

Vid yttemperaturer över 300°C mäts integriteten (tätheten) med tolkar därför att bomullen kommer att antändas på grund av värmestrålningen.

Det mättningsförfarande av uppkomna springor och dylikt som anges i British Standard BS476:Part 20:1987 innebär mätning av springor med diametern 6 respektive 25 mm. Tolk med diametern 25 mm får ej kunna föras igenom provföremålet in i brandrummet. För tolk med diametern 6 mm gäller att den inte får kunna föras igenom provföremålet in i brandrummet och i detta läge förflyttas mer än 15 cm längs en springa eller spricka i provföremålet. Detta mättningsförfarande tillämpas endast på konstruktioner i brandteknisk klass **E**.

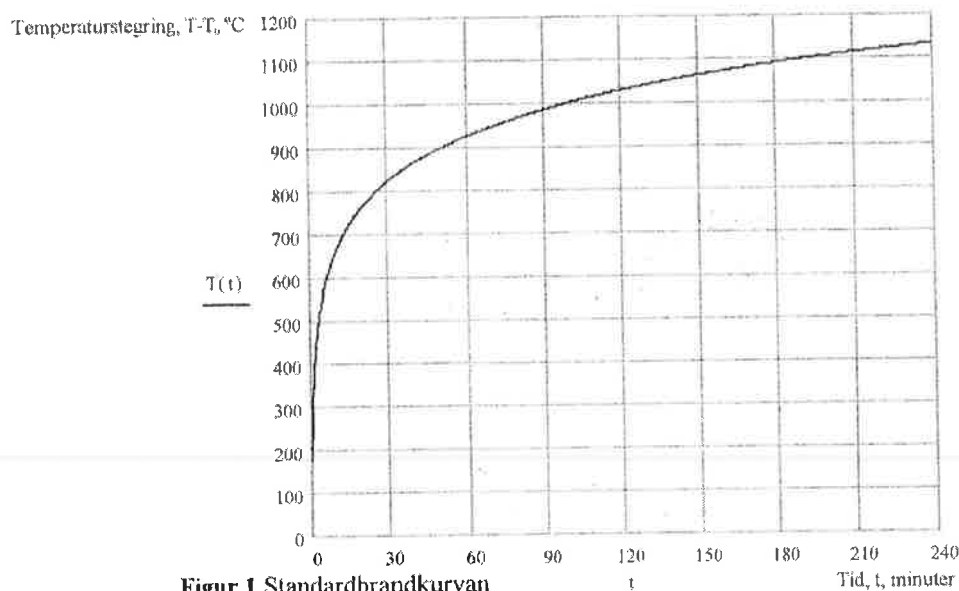
Kravet på isolering, **I**, avser maximal temperaturstegring på den från elden vända sidan och delas in i följande grupper:

1. Medeltemperaturstegring 140°C samt maximal temperaturstegring på enstaka punkt 180°C
2. Medeltemperaturstegring 280°C samt maximal temperaturstegring på enstaka punkt 330°C
3. Inga temperaturkrav

Temperaturkrav enligt grupp 2 tillämpas vid genomföringar av rör, kablar, kabelstegar och dylikt samt för den gamla A-klassen för obrännbara dörrar. Temperaturkrav enligt grupp 2 innebär en tillåten medeltemperaturstegring av 280°C samt maximal temperaturstegring på enstaka punkt 330°C. Användning av täthetsprov med bomullstuss gäller ej för dörrar i klass A.

Grupp 3 tillämpas för konstruktioner i brandteknisk klass E.

Vid provning och klassificering av byggnadsdelar utgår man från standardbrandkurvan som finns redovisad i SIS 02 48 20. Denna kurva visar sambandet mellan tid och temperatur. Observera att axeln för temperatur avser temperaturstegring, $T-T_0$. Normalt är begynnelsestemperaturen, $T_0 = +20^\circ\text{C}$. Standardbrandkurvan ses i fig. 1 nedan.



Figur 1 Standardbrandkurvan

Sambandet tid och temperatur enligt standardbrandkurvan kan även beräknas enligt $T-T_0=345 \log(8t+1)$ där

T är temperaturen i brandrummet i °C vid tiden t

T_0 är begynnelsestemperaturen i °C ($t=0$)

t är tiden i minuter.

En byggnadsdel som uppfyller brandteknisk klass EI 60 är provad i 60 minuter vilket innebär att den utsatts för en temperaturstegring upp till 925°C som motsvarar en sluttemperatur i brandrummet av +945°C. På den från elden vända sidan uppfylls temperaturkravet enligt grupp 1, vilket innebär maximal sluttemperatur som medel +160°C och på enstaka punkt +200°C. Med enstaka punkt menas eventuella värmebryggor som finns i konstruktionen. Även kravet på integritet (täthet) skall uppfyllas, dvs. byggnadsdelen får ej släppa igenom mer än enstaka lågor med en längsta

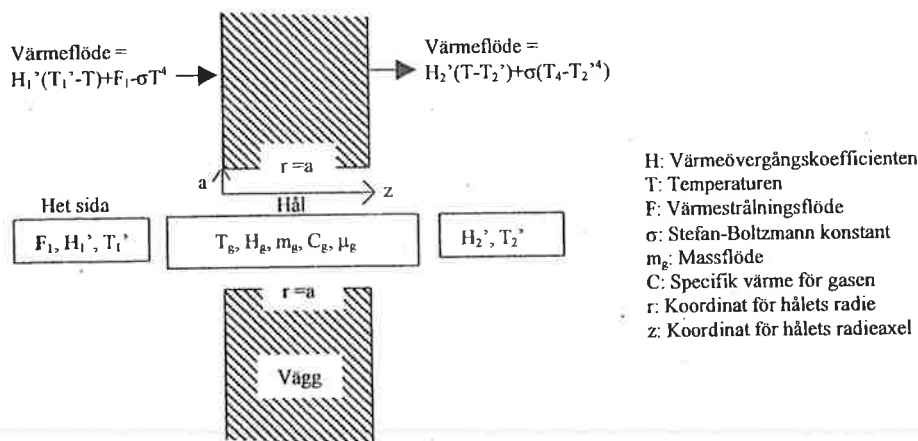
varaktighet av 10 s, ej heller varma gaser eller rök som kan antända en bomullstuss. På motsvarande sätt klassificeras en byggnadsdel i brandteknisk klass EI 120, dock gäller här att den provats i 120 min. vilket ger en sluttemperatur i brandrummet av $+1049^{\circ}\text{C}$.

2. Teori kring värmeöverföring

2.1 Modellen

En tidigare teoretisk undersökning av temperaturen i en hålgenomförd vägg där den ena sidan är utsatt för brand, finns publicerad i *Fire Safety Journal*, 6 (1983) och är utförd av L. W. Hunter, J. R. Kuttler och S. Favin [1]. Deras arbete visar på följande:

Systemet kan ses i figur 2. En vägg med ett cirkulärt läckage är utsatt för brand på den ena sidan. Värmen som den brandutsatta väggen samt hålets sidor påverkas av, leds radiellt och axiellt in i väggen. Speciellt den brandutsatta väggytan tar emot strålning från brandhärden inne i rummet samt utsätts för påtvingad konvektion från brandgaserna som är i kontakt med väggen. Även strålning från den heta väggen reflekteras tillbaka mot brandhärden. Den kalla icke brandutsatta sidan av väggen avger värme genom strålning och konvektion med det angränsande icke brandutsatta rummet. Insidan av hålet tar endast emot värme genom påtvingad konvektion.



Figur 2 Ett hål i en vägg som avskiljer en brand och ett icke brandutsatt utrymme.

I Hunters modell är förenklingar gjorda. Han visar att det icke linjära värmeutbytet vid väggytan kan approximeras med linjärt påtvingat konvektionsflöde, om rätt anpassning sker.

En fortsatt förenkling avser värmeöverföringen i hålet. Av praktiskt intresse är om brandgasflödet inne i hålet är laminär eller turbulent. Även tryckfallet över väggen varierar kring ett medelvärde, insidan av hålet är grovt ojämn, samt att flödet ej är fullt utvecklat. Dessa faktorer gör det svårt att förutse ett detaljerat värde av värmeöverföringskoefficienten i hålet trots att mycket arbete kring detta har utförts. Därför har det i modellen antagits ett konstant medelvärde för värmeöverföringskoefficienten samt att gasen i hålet betraktas som radiellt isotermisk. Värmebalans ekvationen över problemet är följande:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad 0 < z < l, \quad a < r < \infty \quad (1)$$

$$\frac{dT_g}{dz} + \frac{2\pi a H_g}{m_g C_g} (T_g - T) = 0 \quad 0 < z < l, \quad r = a \quad (2)$$

Märk att ekv. (2) endast beror på z . Gränsvillkoren är följande:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = H_1 (T_1 - T_2) \quad z = 0, \quad a < r < \infty \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = H_2 (T - T_2) \quad z = l, \quad a < r < \infty \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = H_g (T_g - T) \quad 0 < z < l, \quad r = a \quad (5)$$

$$T_g = T_1' \quad z = 0 \quad (6)$$

Vid den brandutsatta sidan av väggen är $z = 0$, och vid den icke brandutsatta sidan är $z = l$. Vid axeln genom hålet är $r = 0$ medan vid insidan av hålet är $r = a$. I ekv. (1) – (6) är T temperaturen inne i väggen, T_g är brandgastemperaturen i hålet, och T_1' är temperaturen av brandgasen i brandrummet. H_g är värmeövergångs koefficienten i hålet, C_g är gasens specifika värme och k är väggens värmekonduktivitet.

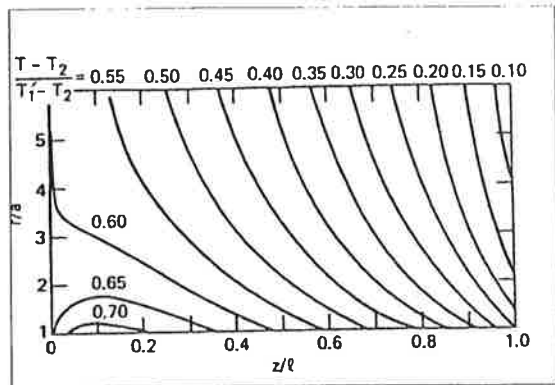
T_1 och T_2 är den "effektiva" temperaturen i det kalla respektive varma rummet, medan H_1 och H_2 är respektive "effektiv" värmeövergångskoefficient vid väggen där $z = 0$ samt $z = l$. Hunter väljer dessa parametrar för att representera de kombinerade effekterna p.g.a. påtvingad konvektion och strålning i de linjära ekvationerna (3) och (4). Under stationära förhållanden är den brandutsatta väggen i termisk jämvikt med den varma brandgasen och den omgivande strålningen. Då gäller att värmeflödet vid den varma sidan i fig. 1 är nära 0. Jämviktstemperaturen är $T = T_1$ definierad av

$$H_1' (T_1' - T_1) F_1 - \sigma T_1^4 = 0 \quad (7)$$

där H_1' är den konvektiva värmeövergångskoefficienten, F_1 är omedelbart strålningsflöde samt σ är Stefan-Boltzmanns konstant. Om man nu expanderar nätflödet i fig. 2 som en Taylor serie med T som $T = T_1$ samt behåller termer av första ordningen för att få ekv. (3) där

$$H_1 = H_1' + 4\sigma T_1^3 \quad (8)$$

Den kalla sidan av väggen bör vara i termisk jämvikt med den kalla gasen ($T = T_2'$) när $\frac{k\partial T}{\partial z} \rightarrow 0$ vid $z = 0$. Ekvation (4) bevarar detta förhållande om $T_2 = T_2'$.



Figur 3 Temperatur konturer i väggen.

Koefficienten H_2' väljs så att $H_2(T - T_2)$ blir lika med det fulla värmeflödet i fig. 3 vid hålets utlopp. Detta ger

$$H_2 = H_2' + \sigma(T_e + T_2')(T_e^2 + T_2'^2) \quad (9)$$

där H_2' är den konvektiva värmeövergångskoefficienten och T_e är utflödestemperaturen vid hålets öppning i väggen. För att få reda på T_e måste man först gissa ett värde i ekv. (9) och sedan lösa ekv. (1) – (6) för T som Hunter beräknar vid $r = a$ samt $z = l$ som sedan ger ett värde för T_e .

Metoden att lösa ekv. (1) – (6) beskrivs i [1].

2.2 Parametervärden

De förhållanden som studerats kretsar kring fallet som visas i tabell 1. Då råder att inkommande gashastighet är 1,0 m/s, Reynoldstalet är $Re = 130$ och termisk jämviktstemperatur på den varma sidan är 904 K.

Tabell 1

Värden för de styrande parametrarna

$$a = 0.01 \text{ m}$$

$$C_g = 1.2 \times 10^3 \text{ J/kgK}$$

$$F_l = 2.2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

$$\begin{aligned}
H_1' &= 40 \text{ W/m}^2\text{K} \\
H_2' &= 4.0 \text{ W/m}^2\text{K} \\
k &= 0.40 \text{ W/mK} \\
l &= 0.15 \text{ m} \\
\dot{m}_g &= 1.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \\
T_1' &= 1300 \text{ K} \\
T_2' &= 300 \text{ K} \\
\mu_g &= 49 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2
\end{aligned}$$

För att uppskatta värmeövergångskoefficienten H_g i hålskanalen, använder Hunter resultatet i [3]. För detta sätts

$$\frac{z}{2a\text{RePr}} = 0.0412 \quad (10)$$

under nominella förhållanden används Prandtl talet $\text{Pr} = 0,7$ samt $z = l/2$ för väggens mittpunkt i hålet. Enligt referens ovan går det att approximera medel Nusselt-talet till

$$\text{Nu} = 5,6 \quad (11)$$

för förhållanden som gäller enl. tabell 1. Det sista resultatet definierar H_g enl. nedan

$$H_g = \frac{4.0\mu_g C_g}{a} \quad (12)$$

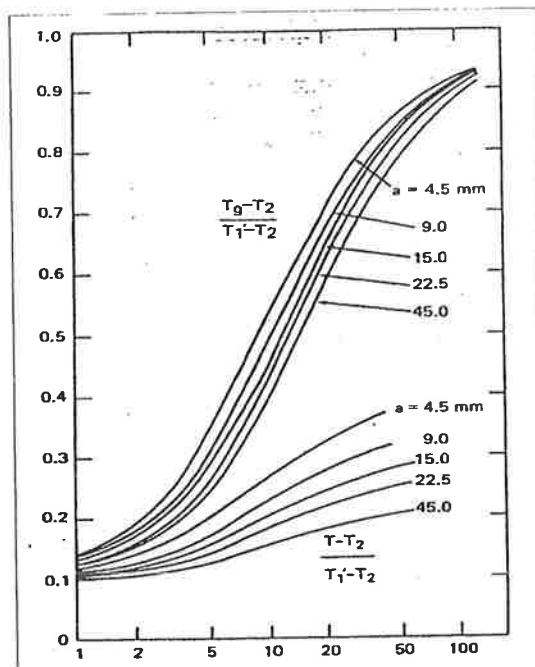
2.3 Numeriska resultat

Figur 3 visar temperaturkonturkurvorna i väggen under förhållanden enl. tabell 1. Väggen är varmast nära öppningen till hålet där $T = 950 \text{ K}$, jämfört med 904 K vid stort r . Den högsta temperaturen inne i väggen är 1020 K inträffar just på insidan av hålet. Den kalla sidan av väggen blir varmest vid hålets utflöde där $z = l$, $T = T_e = 547 \text{ K}$ jämfört med 363 K för stort r .

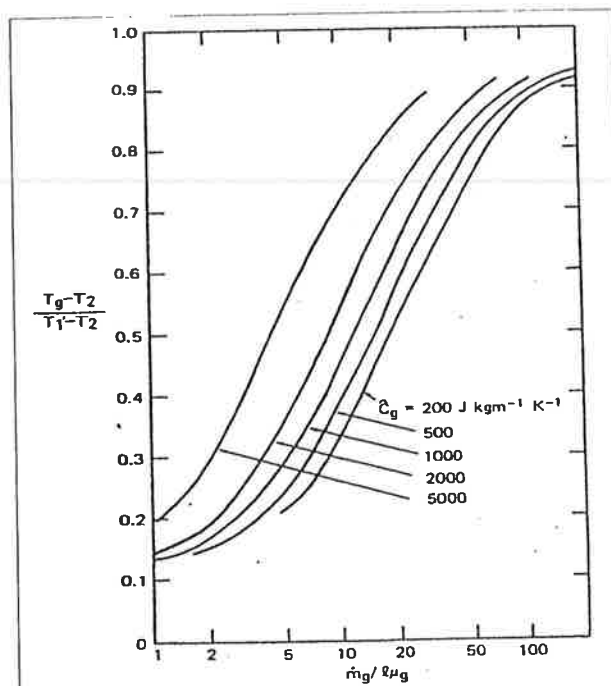
Generellt gäller att värmeflödet transporterat av den genomströmmande gasen vid den kalla sidan av väggen bestäms av gas temperaturen:

$$\dot{q} = \dot{m} C_g (T_g - T_2) \quad (13)$$

I fig. 3 är gastemperaturen vid utflödet $T_g = 870 \text{ K}$, samt värmeflödet 68 W .



Figur 4



Figur 5

Figur 4 visar inverkan av $\dot{m}_g$ och a på gasens utflödestemperatur (övre kurvan) samt på väggen (undre kurvan). De övriga parametrarna har värden enl. tabell 1. Både gasen och väggens temperatur vid utflödet ökar i och med att $\dot{m}_g$

ökas. Vid lågt $\dot{m}_g$ tycks vägg samt gastemperaturen bli den samma vid utflödet. Då har hålet en relativt liten inverkan på den kalla väggens tillstånd. Vid högt $\dot{m}_g$ blir den utströmmande gasen nästan lika het som den inströmmande gasen och den kalla sidan av väggen blir påtagligt uppvärmd. Vid en medelmåttig strömingshastighet uppstår en omslagszon centrerat kring

$$\frac{T_g - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{1}{2} \quad (14)$$

Hålets radie är viktig endast i det avseende att det påverkar $\dot{m}_g$. Figur 4 visar att om a ökar, minskar utflödestemperaturen mycket lite för ett givet $\dot{m}_g$. Brandgasens specifika värme C_g och väggens värmeledningsförmåga k har även dessa mindre effektpåverkan.

I fig. 5, ändras C_g och $\dot{m}_g$. När C_g ökar, stiger även utflödes temperaturen.

I fig. 6 varierar $\dot{m}_g$ och k . När k ökar minskar utf

Väggens tjocklek l har en stor effekt på temperaturen. Då l minskar ökas

utflödestemperaturen kraftigt. I fig. 7

är både $\dot{m}_g$ och l varierade. Det visar sig att den största effekten av l beror

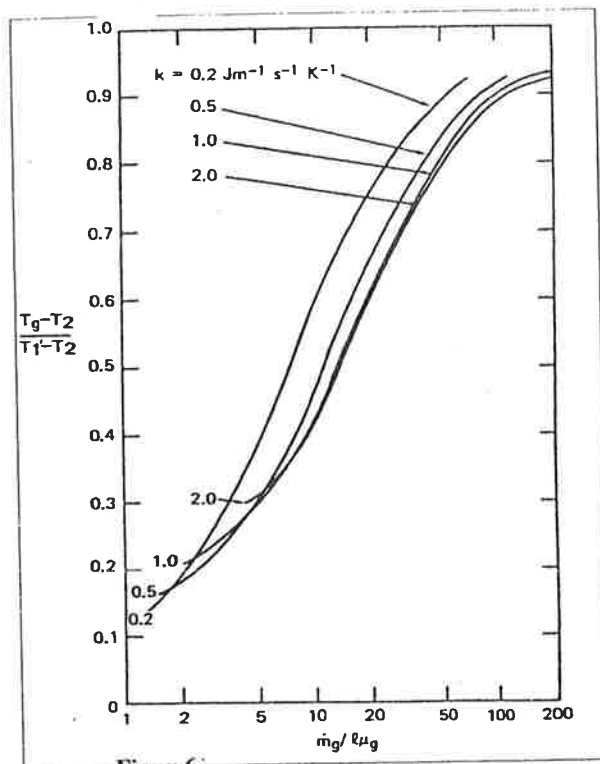
på $\frac{\dot{m}_g}{l\mu_g}$.

Om man jämför brandgastemperaturen i fig. 3 – 6 visar det sig att alla liknar varandra i formen samt är centrerade kring samma ställe, nära

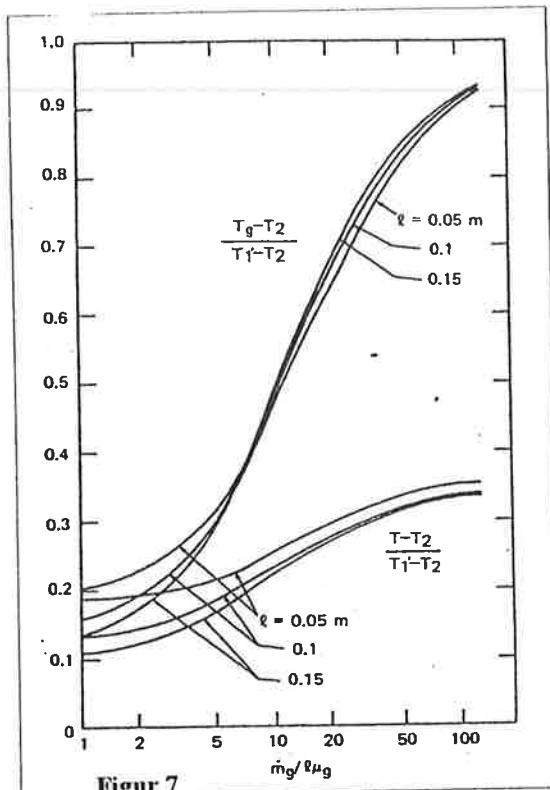
$$\frac{\dot{m}_g}{l\mu_g} \approx 13 \quad (15)$$

Denna ekvation markerar omslagspunkten för hålets termiska motstånd i en vägg.

Omslagsregeln, ekv. (15), demonstreras för de förhållanden som gäller i tabell 1. Denna gäller även för andra värden än dessa.



Figur 6



Figur 7

Följande föreslår Hunter en approximativ lösning på de styrande ekvationerna. Det förutsätts att väggens inre temperatur ej påverkas av hålet:

$$\frac{T - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{1 - z^* + (H_2^*)^{-1}}{1 + (H_1^*)^{-1} + (H_2^*)^{-1}} \quad (16)$$

där

$$z^* = z/l, \quad H_1^* = H_1 l/k, \quad H_2^* = H_2 l/k \quad (17)$$

Strålningen från den heta sidan är $F_1 = \sigma(T_1')^4$, där $T_1 = T_1'$. H_1^* och H_2^* är i regel stora. Då kan ekvation (16) reduceras till

$$\frac{T - T_2}{T_1' - T_2} \approx 1 - z^* \quad (18)$$

Detta innebär att gastemperaturen vid utflödet är

$$\frac{T_g - T_2}{T_1' - T_2} = \omega^{-1}(1 - \exp(-\omega)) \quad (19)$$

där

$$\omega = 8\pi l \mu_g / \dot{m}_g \quad (20)$$

Ekvation (14), (19) och (20) placerar omslagspunkten där $\dot{m}_g / l \mu_g = 15,8$, vilket överensstämmer med resultatet vid den fullständiga beräkningen, ekv. (15).

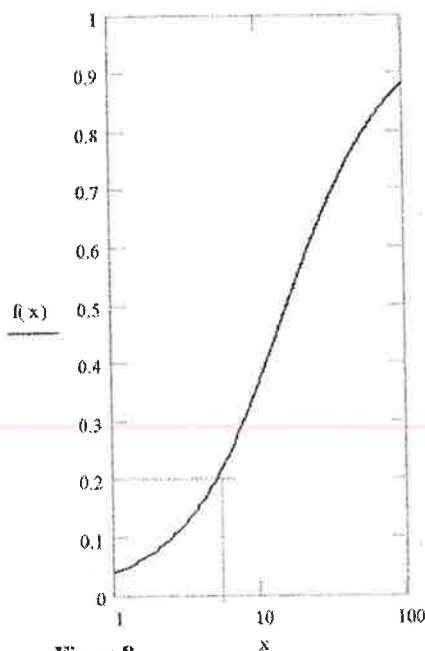
Utifrån Hunters resultat ovan kan ett förenklat samband för brandgastemperaturen vid utflödet härmed beskrivas enligt:

$$f(x) = \frac{x}{8\pi} \left(1 - \exp\left(-\frac{8\pi}{x}\right) \right) \quad \text{där} \quad f(x) = \frac{T_g - T_2}{T_1' - T_2} \quad \text{och} \quad x = \frac{\dot{m}_g}{l\mu_g}$$

För att uppfylla tidigare nämnda krav för en EI 60 vägg undersöker jag följande temperaturer:

$$T_g = 200^\circ\text{C}, T_2 = 20^\circ\text{C} \quad \text{och} \quad T_1' = 945^\circ\text{C}$$

Detta ger att $f(x) \leq 0,2$ bör gälla för att temperaturkravet skall uppfyllas.



Figur 8

Parametrarna tilldelas följande värden:

Vid insättning av värdet 0,2 i funktionen $f(x)$ ger detta att x bör vara mindre än eller lika med 5. För att gå vidare och undersöka en maximal håldiameter vid ett givet tryck använder jag följande samband:

$$\dot{m}_g = C \cdot v \cdot \rho \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad \text{där}$$

C är flödeskonstanten

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad \text{är flödes hastigheten}$$

ρ är brandgasens densitet

d är hålets diameter

$$C = 0,6$$

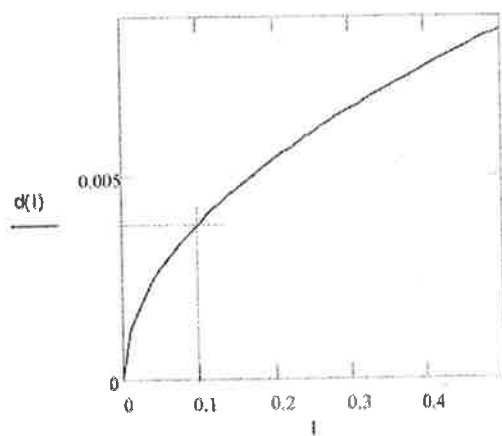
$$\rho = 0,3 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta p = 20 \text{ Pa ger } v = 11,5 \text{ m/s}$$

$$\mu_g = 49 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2\text{s}$$

Det går sedan att åskådliggöra håldiametern som en funktion av väggens tjocklek för ovan angivna parametervärden enligt följande samband

$$d(l) = 2 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot \mu_g \cdot l}{C \cdot v \cdot \rho \cdot \pi}}$$



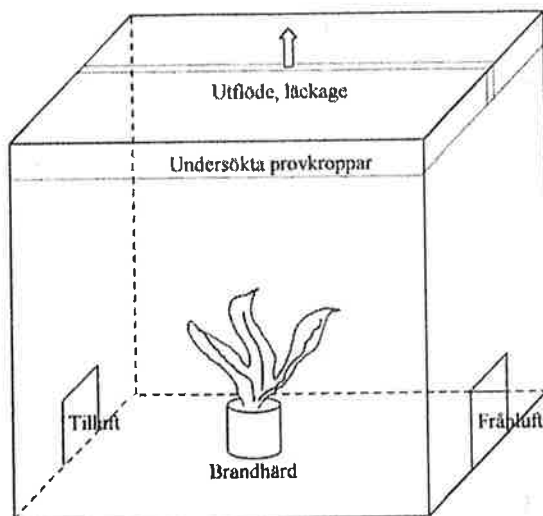
Figur 9

Kurvan visar att om ovan gällande temperaturkrav skall uppfyllas där ett tryckfall på 20 Pa råder, bör hålets diameter ej överskrida $d(l)$ -värdet vid gällande vägg tjocklek l .

Som illustrerande exempel kan visas att håldiametern bör ej överskrida 4 mm i en vägg med tjockleken 100 mm då tryckfallet över väggen är 20 Pa, temperaturen i brandrummet är 945 °C, temperaturen i det kalla intilliggande rummet är 20 °C och temperaturen vid hålets utflöde är 200 °C.

3. Experimentell undersökning

För att undersöka brandgasernas temperaturförändring då dessa sprids via ett läckage utnyttjades en mindre ugn enligt fig. 10 nedan.



Figur 10. Principmodell över brandugn

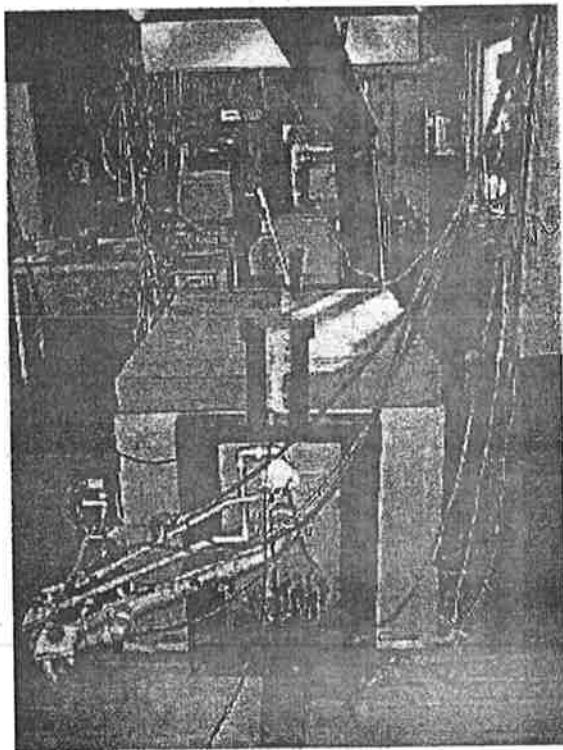
Experimenten utfördes i Träteks laboratoricugn avsedd för brandprovning i liten skala. I försöken placerades provelementen som ett lock ovanför på ugnen. Sprickans bredd gick enkelt att justera in då provelementet bestod av två separata delar där sprickan skapades genom en inmätt springa mellan dessa. I kapitel 3 beskrivs försöksanordningen närmare.

I undersökningen bör temperaturstegringen i ugnen följa den standardbrandkurva som tidigare beskrevs enl. SIS 02 48 20. Ugnstrycket regleras med ett spjäll i rökkanalen så att ungefärliga värden på tryckskillnaden vid taknivå relativt omgivningstrycket efterliknas för en fullt utvecklad rumsbrand. Ett övertryck relativt omgivningen på 15-20 Pa eftersträvas.

4. Experimentanordning och mätningar

4.1 Ugn

Brandproven utfördes med en gaseldad ugn med innermått (bredd x längd x djup) 600 mm x 1000 mm x 600 mm, se fig. 11 nedan.



Figur 11. Träteks laboratorieugn för brandprov

Ugnen används för horisontellt placerade provkroppar samt är från insidan uppbyggd av följande material:

- 50 mm (2x25) keramisk fiber, Durablanket (D128-25) med lägsta densitet 128 kg/m³.
- 100 mm stenull med ståltrådsnät, densitet 100 kg/m³ (Rockwool nätmatta).
- 3 mm stålplåt.

Ugnen är på ena kortsidan ansluten till en röckanal med diametern 200 mm. I röckkanalen finns ett spjäll med vilket trycket i ugnen kan regleras.

Temperaturen i ugnen mäts med termoelement utformade enligt SIS 02 48 20.

4.2 Kalibrering

Kalibrering av provutrustningen sker enligt Träteks register över laborieutrustningen.



Figur 12. Provkroppar i betong

1.1 Provkroppar

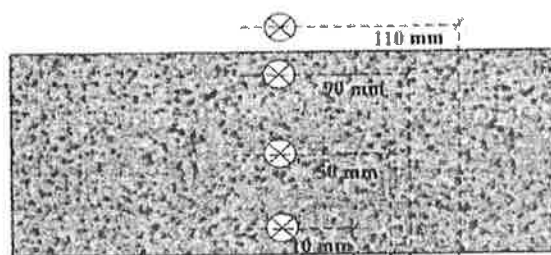
Provkropparna för första försöket bestod av armerad betong med måtten (bredd x längd x tjocklek) 450mm x 1300mm x 100mm. Betongens densitet var 2400 kg/m^3 samt värmekonduktiviteten uppskattades till $1,7 \text{ W/mK}$.

Vid det andra försöket var materialet lättbetong av fabrikatet YTONG kvalitetsgrupp 500. Provkropparna monterades ihop av block som fogades med cementmassa samt gängade armeringsjärn som borrats igenom hela provelementet och dragits åt med brickor och skruv. Lättbetongens densitet var 500 kg/m^3 samt värmekonduktiviteten angavs till $0,14 \text{ W/mK}$. Dock påverkas värmekonduktiviteten av temperaturen. För kvalitetsgrupp 500, som vid rumstemperatur har ett λ -värde på ca. $0,14 \text{ W/mK}$, ökar värdet med högre temperatur och blir vid 500°C ca. $0,21 \text{ W/mK}$.

De två provelementen placerades ovanpå ugnen med ett avstånd på 3mm mellan varandra, se fig. 12.

För att upprätthålla ett högt övertrycktryck inne i ugnen så tätades springan ut mot kanterna och endast en mindre öppning på 300 mm där termoelementen placerats, släppte igenom brandgaser.

I springan mellan provkropparna fästes termoelementen för att registrera temperaturen på brandgaserna som flödar ut genom läckaget, se fig. 13 nedan.



Figur 13.

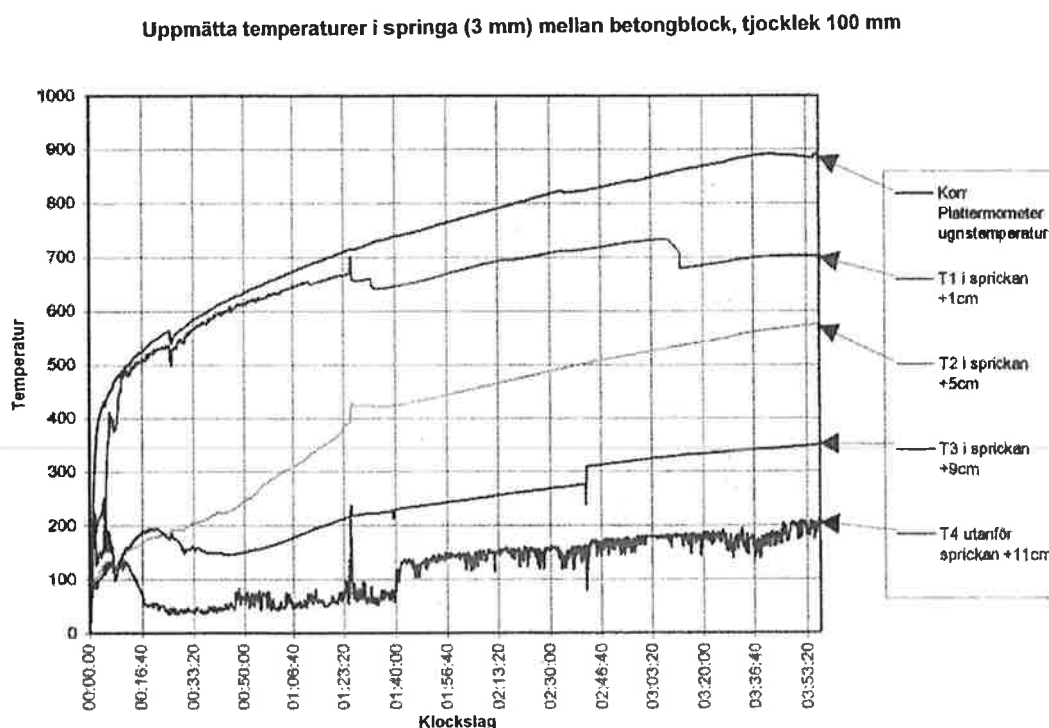
Brandutsatta sidan

Provelementets tjocklek var i det här fallet 100 mm. Ringarna markerar var i springan termoelementen placerades.

5. Mätresultat

5.1 Provkroppar i betong

Brandförsöket var tänkt att fortlöpa under 60 minuter men framförallt att temperaturen i ugnen överskred 900 °C vilket är fallet för brandprov efter 60 minuter enligt standardbrandkurvan. Detta visade sig vara svårt att uppnå vid det första provet då ugnen inte klarade av att följa standardbrandkurvan tidsmässigt. Anledningen var troligen betongelementens avkylande effekt samt att otätheter uppenbarades under försökets gång. Även tillgången på syre då förbränning vid ett högre tryck kan ha bromsat upp uppvärmningsförloppet. Försöket fortlöpte under 4 timmar och ugnstemperaturen uppgick då maximalt till 891 °C, se fig. 14 nedan.



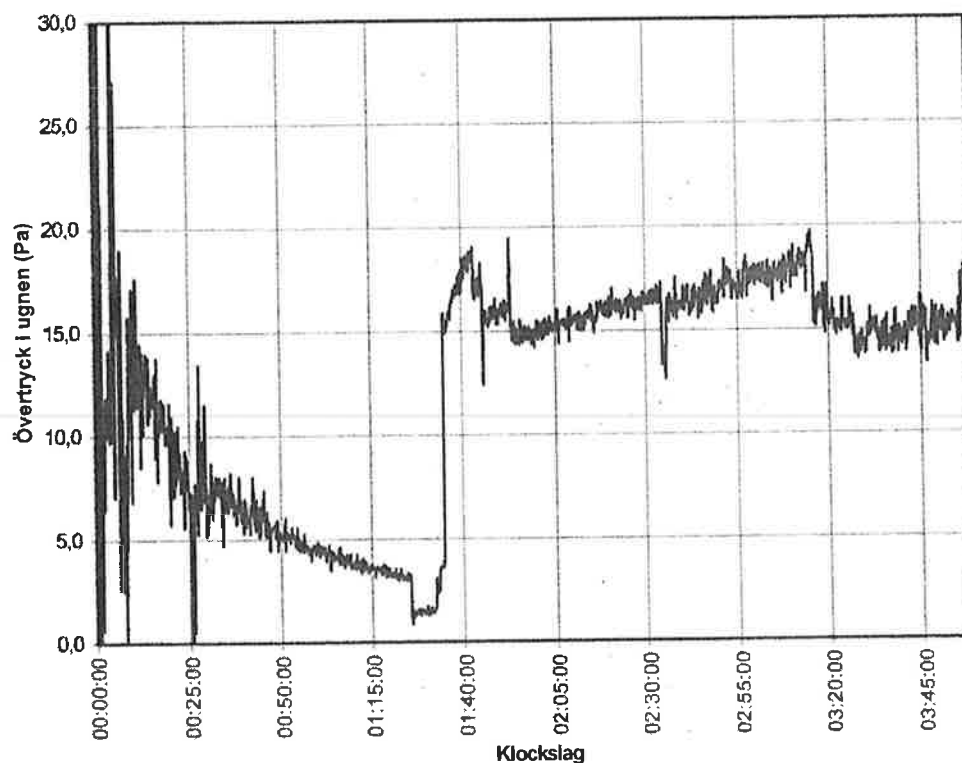
Figur 14 Resultat från prov på betongelement.

Att vissa kraftigare temperaturförändringar inträffar i sprickan beror på att övertrycket inne i ugnen reglerades manuellt för att ligga på en önskad nivå.

För att efterlikna miljön i ett rum utsatt för fullt utvecklad brand var övertrycket inne i ugnen av intresse att kontrollera samt registrera under brandförloppet.

Inledningsvis varierade trycket väldigt kraftigt inne i ugnen, för att så småningom plana ut mot ett lågt övertryck på under 5 Pa, trots att rök-gasspjället från ugnen ströps så mycket som det gick. Vid det här laget hade betongelementen i viss mån ändrat form så att läckage inträffat mellan ugnsråmen och provkropparna, därefter problemet med att upprätthålla ett högt övertryck. För att tätå läckagen monterades långa "tvingar" som pressade ner provkropparna mot ugnsråmen och trycket steg därmed till en nivå mellan 15 och 20 Pa, se fig.15 nedan. Därefter kunde övertrycket upprätthållas på denna nivå.

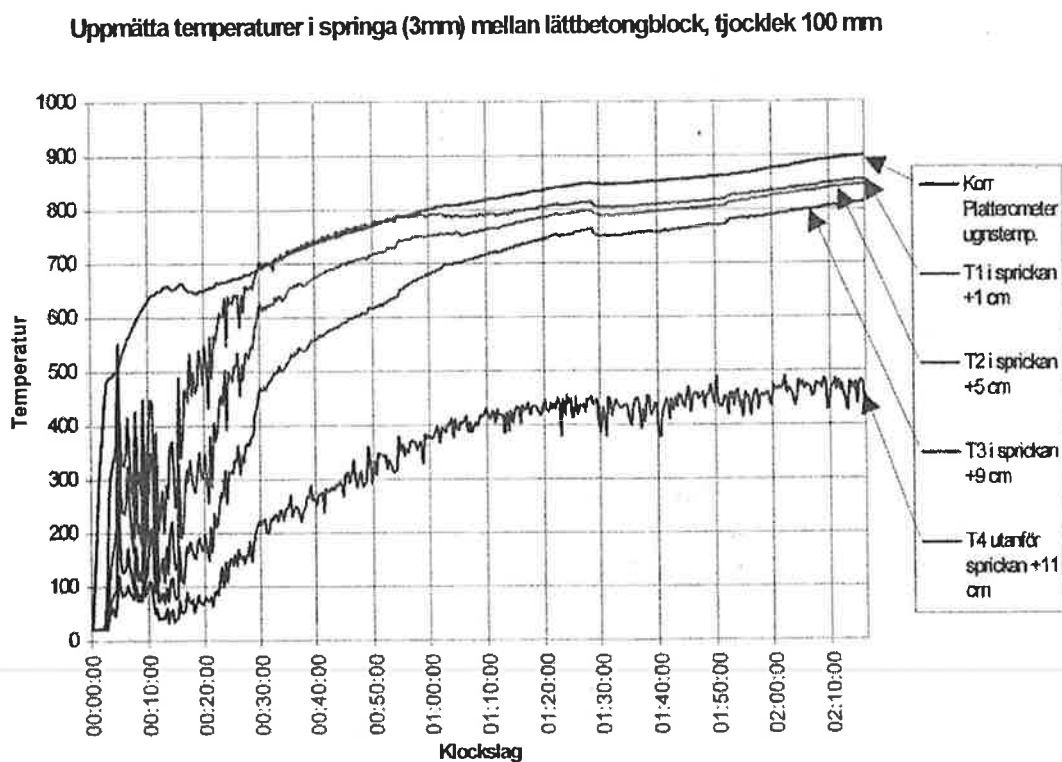
Övertryck i ugnen i Pa



Figur 15. Resultat från prov på betongelement

5.2 Provkroppar av lättbetong

Vid det andra försöket användes provkroppar av lättbetong men med samma mått och likadan försöksupställning som vid försöket med betongelement. I det här fallet blev temperaturskillnaden mellan de olika mätpunkterna betydligt mindre än i fallet med betongplattorna, se fig. 16.

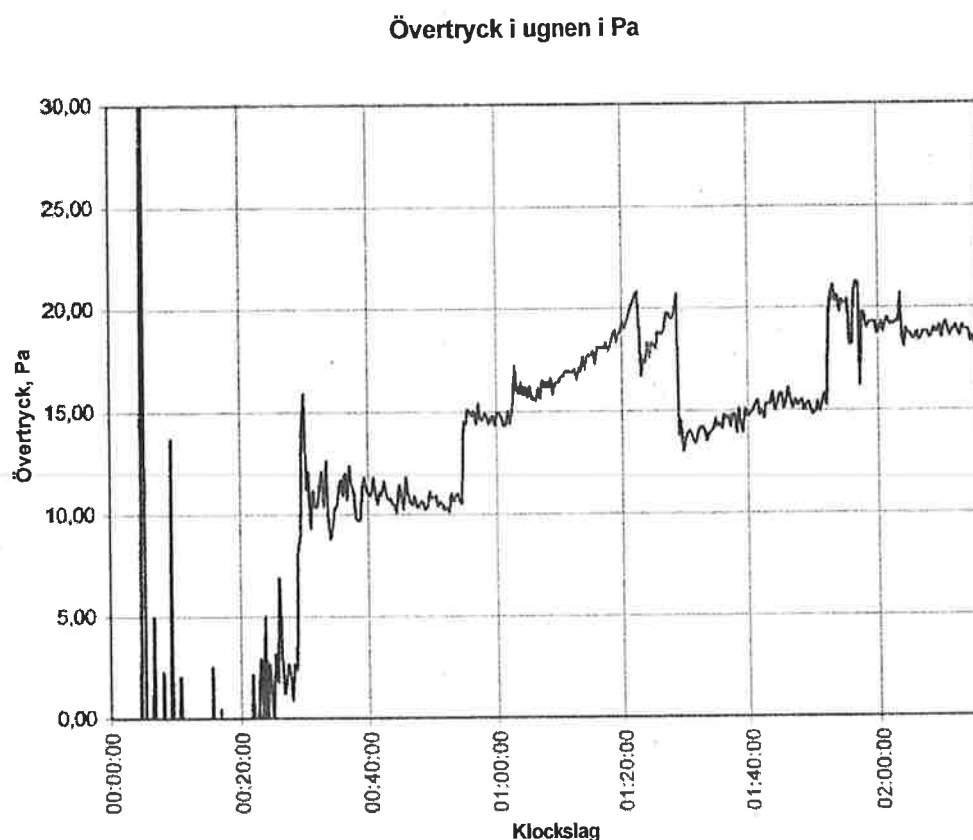


Figur 16. Resultat från prov på lättbetong

Inledningsvis varierade ugnstrycket väldigt kraftigt vilket innebar att det tog nästan 30 minuter innan temperaturkurvorna började stabilisera sig. Vad som är tydligt av diagrammet är att brandgastemperaturens avkylning då den läcker ut genom springan är betydligt mindre än fallet med betongelementet.

Tidsförloppet för försöket med lättbetong pågick i 2 timmar och 16 minuter och avbröts då ugnstemperaturen nådde 900 °C.

Ugnstrycket försöktes regleras så att nivån låg på mellan 15 och 20 Pa som fallet även var vid försöket med betongelementet, se fig. 17.



Figur 17. Resultat från prov på lättbetong

6. Utvärdering och slutsatser utifrån mätresultaten

Brandspridning från ett rum till ett annat genom en väggspricka bedöms i denna undersökning främst bero på temperaturen hos de brandgaser som sprids via ett läckage till ett angränsande utrymme. Om det finns antändligt material nära läckaget kan detta antändas om temperaturen hos brandgaserna är tillräckligt hög.

För olika tunna cellulosamaterial som papper och bomullstyg m.m. varierar antändningstemperaturen erfarenhetsmässigt mellan 300°C och 600°C. Av betydelse är främst materialets fuktighet och föreuppvärmning. Likartade material, främst plaster i lös och fast inredning, bedöms ha antändningstemperatur i samma intervall som angivits ovan.

Den utförda undersökningen omfattade inte gränserna för antändning av möjliga material, utan studier av brandgasernas temperatur. För att vara på den säkra sidan föreslogs att ett läckage kan betraktas som ofarligt i brandspridningshänseende om temperaturkravet för isolerande förmåga uppfylls (enl. BBR) för brandavskiljande byggnadsdel under 60 min.

Av försöket där provelementet bestod av en 100 mm tjock betongplatta samt läckaget av en 3 mm bred springa, måste risken för brandspridning via de läckande brandgaserna klassas som mindre trolig. Temperaturen i punkt T4, 10 mm utanför sprickan, uppnår 200 °C efter ca. 4 timmars uppvärmning och då registreras en ugnstemperatur på nära 900 °C. Övertrycket i ugnen varierade mellan ca. 15 – 20 Pa, vilket motsvarar ett naturligt maximalt brandtryck i ett rum med en takhöjd på 3 m som är utsatt för en fullt utvecklad brand.

I fallet med provkroppar av lättbetong är förhållandena helt andra. Här låg temperaturen på ca. 450 °C i punkt T4, 10 mm utanför springan då ugnstemperaturen närmar sig 900 °C. I detta fall måste temperaturen på brandgasen klassas som brandfarlig om antändligt material förekommer i anslutning till läckaget.

Det går tydligen inte att generalisera hur pass brandfarligt ett läckage ter sig oberoende av vad det är för material i brandväggen där öppningen förekommer. Den styrande faktorn i det här fallet är av allt att döma materialens värmekonduktivitet där $\lambda_{betong} = 1,7$ W/mK och $\lambda_{lätbetong} = 0,1$ W/mK.

En jämförelse med teorin enligt Hunter som grundas på cirkulära hål, visar på en viss korrelation med resultatet för betongprovet trots att försöket gjordes på en springa.

7. Referenser

- [1] *Hunter, L.W and Kuttler, J.R and Favin, S:* Steady temperatures in a wall penetrated by a hole and exposed to fire on one side. Fire safety Journal 6, (1983).
- [2] *Hunter, L.W and Favin, S.:* Fire Resistance of Penetrated Walls, Fire Technology 17 (1981) 285.
- [3] *Giedt, W.H.* Principles of Engineering Heat Transfer, Van Nostrand, Princeton, N NJ, (1957), p. 154.
- [4] *Drysdale, Dougal:* An introduction to fire dynamics. John Wiley & Sons, 2nd ed. (1998).
- [5] Boverkets BBR Byggregler BFS 1993:57 med ändringar t o m 1998:38. Boverket (1998).

Handbok för akustiskt läcksökning

LOKALISERING OCH VÄRDERING AV BRANDSPRIDNINGSVÄGAR I BYGGNADER

HANDBOK FÖR AKUSTISK LÄCKSÖKNING

Inledning

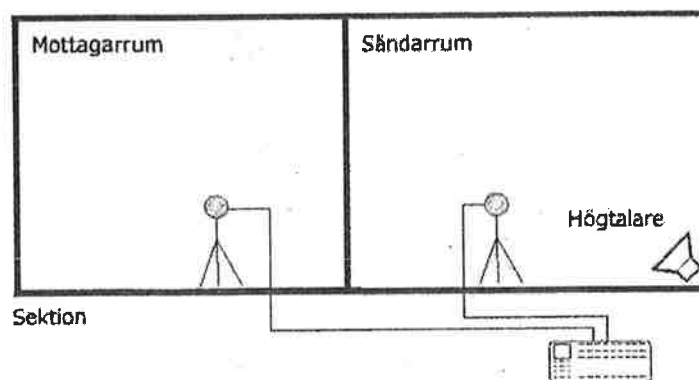
Vid analys av brandförloppet vid två förödande bränder i Stockholm (John Wall Järnaffär, 1990, och Strandvägen 57, 1994) har det visat sig att lättantändligt material stått i förbindelse med brandhärden via sprickor och genomföringar. Branden spreds via utrymmen som inte var besiktningsbara eller ens möjliga att upptäcka. Förmodligen finns liknande risker i en stor del av det äldre fastighetsbeståndet i Sverige, däribland huvuddelen av de kulturhistoriskt intressanta byggnaderna.

En metod för att finna dolda brandspridningsvägar har därför utvecklats i samarbete mellan Avdelningen för Byggnadsteknik vid KTH och Statens Fastighetsverk. Metoden uppfyller ställda krav på att vara fältnässig, icke förstörande och ringa störande för övrig verksamhet. Den bygger på att läckage och slutna hålrum försämrar en skiljekonstruktions ljudisolering och att det är möjligt att lokalisera dessa potentiella problem med lyssningstester. De hittills använda metoderna med t.ex. spårgas går bara att använda vid öppna läckor, medan den akustiska även är användbar vid dolda sådana, t.ex. förbyggda öppningar.

I projektet har också utvecklats riktlinjer för bedömning av risken för brandspridning via läckor. De väsentliga parametrarna här är läckans storlek, skiljekonstruktionens tjocklek och materialets värmeledningsförmåga.

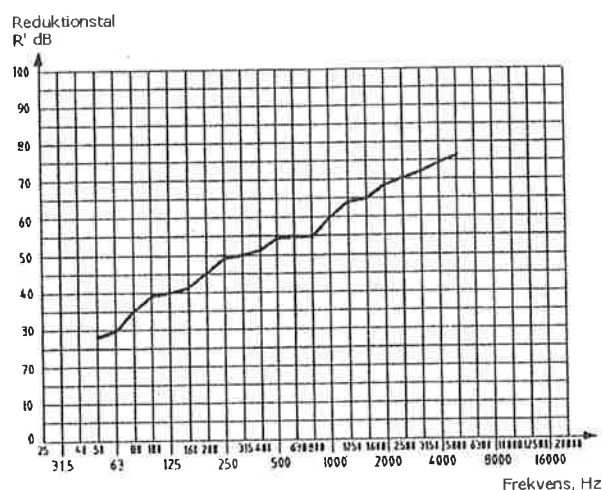
Ljudisolering

Då någon t.ex. spelar musik på hög ljudnivå hörs detta in till grannarna. Hur bra det hörs beror på ljudisoleringen mellan lägenheterna.



Figur 1. Uppställning för mätning av ljudisolering.

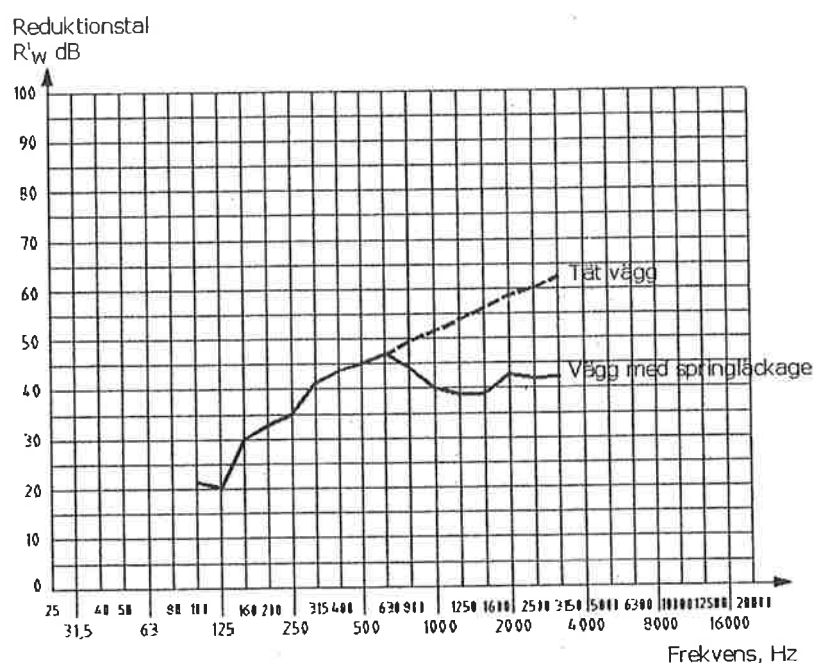
I figuren ovan visas en uppställning för mätning av ljudisoleringen mellan två rum. Högtalaren sänder ut ett jämnt brus inom frekvensområdet 50-3150 Hz, från djup bas till nedre diskant, och ljudnivån mäts. Mikrofonen flyttas sedan till det andra rummet och ljudnivån mäts där. Ljudnivåskillnaden, med kompensation för rummets storlek och möblering, kallas reduktionstalet. Mätningen sker i ett antal frekvenser och resultatet visas i ett diagram som det nedan.



Figur 2. Typisk reduktionstalskurva för skiljekonstruktion utan läckor.

Reduktionstalskurvor har normalt detta utseende för byggnadskonstruktioner, där alltså ljudisoleringen ökar med frekvensen utan större avvikelser från en rät linje. Om ljudnivån i sändarrummet är lika vid alla frekvenser blir nivån i mottagarrummet omvänt proportionellt mot ljudisoleringen. Vid de frekvenser där isoleringen är sämst blir nivån högst och vice versa. Hörselintrycket i mottagarrummet blir av ett lågfrekvent brus.

Skulle det finnas en läcka i väggen kommer detta att ge utslag i kurvans utseende. Uttrycket läcka används i rapporten i akustisk mening om en svaghet i skiljekonstruktionen där det "läcker ljud". Det kan exempelvis vara ett hål i en tegelvägg som byggts för med tunna paneler med låg ljudisolering. Genom denna del av väggen hörs mera ljud än resten, men det finns ingen öppen läcka där gas kan strömma genom.



Figur 3. Reduktionstalsdiagram som visar skillnaden mellan kurvorna för en tät vägg och för motsvarande vägg med en springa.

Diagrammet ovan visar hur reduktionstalskurvan ändras då det finns en springa i skiljeväggen. Skillnaden mot den täta väggen är att högre frekvenser passerar nästan obehindrat genom springan. Vid lyssning visar det sig som en tydligt högfrekvent karaktär på ljudet. Det är vanligen också ganska lätt att lokalisera läckan genom att gå fram till väggen och lyssna efter varifrån ljudet kommer.

Storleken på läckan påverkar inom vilket frekvensområde den hörs, ju större hål eller springa desto lägre frekvens. Ett specialfall är ventilations- och rökgaskanaler där man ofta får ett karakteristiskt orgelpipsljud, närmast som en ton.

Läckor behöver inte vara genomgående utan kan vara hålrum i konstruktionen, t.ex. en igensatt dörröppning. Om väggen är en tjock tegelvägg, med god ljudisolering, och dörröppningen är igensatt med t.ex. tunna träpaneler hörs det tydligt att det mesta ljudet

kommer från detta område. I detta fall är det huvudsakligen lägre frekvenser som går igenom, jämfört med referensväggen.

Då akustiker gör ljudisoleringsmätningar används tekniken med lyssning för att finna felaktigheterna i byggnadskonstruktionen. Det är då inte bara fråga om läckor och fel i skiljekonstruktionen, utan det kan också finnas andra bygg- och konstruktionsfel som försämrar ljudisoleringen. Lyssningstester är alltså en beprövad metod som här har anpassats till de krav som gäller för att finna potentiella brandspridningsvägar.

Utrustning för akustisk läcksökning

Den utrustning som behövs är en signalkälla, en förstärkare och en högtalare.

Signalkällan kan vara en brusgenerator, en dator med program för generering av lämpliga signaler eller en CD-spelare med en skiva med inspelade signaler. En sådan skiva medföljer rapporten och enklast är att använda en bärbar CD-spelare för att spela av den.

På den bifogade CD-skivan finns följande signaler:

- **Skärt brus** låter neutralt utan någon betoning i något frekvensområde.
- **Vitt brus** ger ett mera högfrekvent intryck.
- **Oktavbandsbrus** i oktaverna 125, 250, 500, 1000, 2000 och 4000 Hz.
- **Pulsat brus** är vitt brus som slås av och på med 0,5 Hz taktfrekvens, d.v.s. 1 s brus och 1 s tystnad.

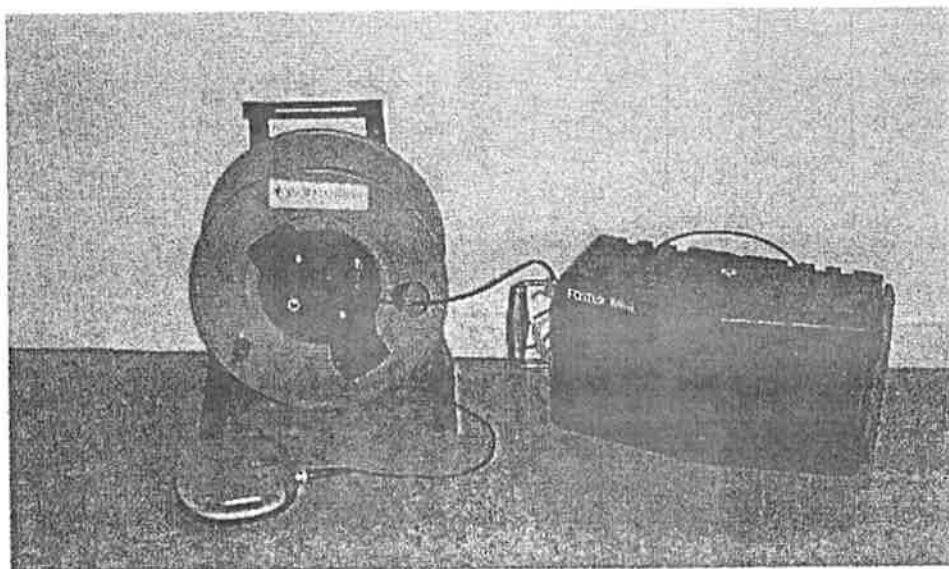
CD-spelaren kopplas till en förstärkare som driver högtalaren. Det finns högtalare för ljudförstärkningsändamål (torgmöten, föredrag etc.) som har inbyggd förstärkare, vilket är praktiskt. Ett exempel på en sådan högtalare är Fostex SPA11, som är lätt att bära och har en mikrofoningång som passar till CD-spelarens utspänning. Bärbara CD-spelare klarar normalt inte av att ge tillräcklig utspänning till förstärkare och högtalare med enbart linjeingång, som har lägre känslighet.

Lämpliga krav på kombinationen förstärkare och högtalare är

- frekvensomfång 100 – 10 000 Hz
- ljudtryck minst 110 dB på 1 m avstånd
- mikrofoningång

Eftersom basområdet inte används vid lyssningstester behöver högtalaren inte klara lägre frekvenser än 100 Hz. Denna utrustning ger tillräckligt hög ljudnivå för de flesta fall. I slottssalar och liknande större lokaler kan emellertid större högtalare behövas och vid

sådana tillfällen är det enklast att hyra utrustning från en lokal firma för diskoteksutrustning. Även här gäller att högtalarna inte behöver gå längre ner än 100 Hz, vilket är fördelaktigt eftersom högtalare med mycket bas är större, tyngre och dyrare.



Figur 4. Utrustning för akustisk läcksökning: bärbar CD-spelare, kabelvinda och en högtalare (Fostex SPA11) med inbyggd förstärkare.

CD-spelarens hörlursutgång kopplas till mikrofoningången med en 50-100 m lång kabel. Att det behövs så lång kabel beror på att det inte alltid är möjligt att dra kabeln direkt mellan två rum, utan den måste dras t.ex. ner och upp i ett trapphus. Lämplig kabel är koaxialkabel RG 174 på en vinda. Alternativt kan CD-spelaren kopplas direkt till högtalaren med en kort kabel och sedan kan lyssningstesten genomföras med ett kontinuerligt brus. Det har dock visat sig att det är fördelaktigt att kunna styra CD-spelaren, och därmed brussignalerna, från mottagarrummet.

Olika brussignaler och deras användning

De olika brussignalerna används på följande sätt.

Skärt brus täcker hela frekvensområdet och låter neutralt, utan någon betoning inom något område.

Vitt brus ger ett mera högfrekvent intryck än skärt och kan därför ge en bättre indikation på springor och hål av mindre dimensioner.

Oktavbandsbrus är skärt brus som filtrerats så att det bara innehåller ett mindre frekvensområde. Filtrens egenskaper är sådana att de olika banden (125, 250 etc.) tillsammans täcker hela frekvensområdet. Eftersom läckans dimensioner avgör inom vilket frekvensområde det mesta ljudet passerar kan det vara lättare att finna läckan genom att använda motsvarande oktavband. Maskeringen från andra frekvenser försvinner då.

Pulsat brus är vitt brus som slås av och på. Riktningshörandet beror till stor del på att hörseln kan avgöra varifrån den första ljudvågen kommer, genom att det oftast blir en liten tidsskillnad mellan ljudets ankomst till de två öronen. Hörseln är alltså mycket känslig för början av en ljudpuls och detta kan utnyttjas för att lättare lokalisera läckor. Det är naturligtvis också möjligt att anpassa pulsfrekvensen genom att använda bandspelarens pausknapp, liksom det i vissa fall kan vara fördelaktig att slå oktavbandsbrus på och av.

Erfarenhetsmässigt kan olika typer av brussignaler vara att föredra i olika situationer och det kan också vara en fråga om individuella preferenser, varför den lämpligaste signalen ibland måste provas fram.

Placering av högtalare

Högtalaren placeras normalt i ett hörn, riktad längs rummets rymddiagonal, detta för att ljudnivån i rummet skall bli så lika som möjligt i alla punkter. Den bör inte placeras intill den skiljekonstruktion som skall undersökas, eftersom ljudnivån blir högst intill högtalaren och detta kan upplevas i mottagarrummet som om det finns en svaghet i konstruktionen vid den punkt där högtalaren står. Denna effekt går naturligtvis också att utnyttja genom att högtalaren placeras där det förmodas vara en läcka. Ljudnivån i motsvarande område i mottagarrummet blir då högre och det kan vara lättare att exakt lokalisera läckans läge.

I stora salar kan det vara problem med att få tillräckligt hög ljudnivå. Då kan högtalaren placeras nära skiljekonstruktionen, i ett antal positioner längs med den, med lyssning i mottagarrummet för varje position. På så sätt kan konstruktionen "svepas av" med en högre ljudnivå än som annars vore möjligt.

Utbildning

Läcksökning med lyssningstest är en enkel och praktisk metod, men förutsätter en viss erfarenhet. För att visa hur några typiska läckor låter finns ett antal avsnitt med ljud från mottagarrum inspelade på CD-skivan. I avsnitten finns exempel på hur det låter i mottagarrummet med olika typer av läckor, däribland referensfallet utan läcka. Följande avsnitt finns

1. Tegelvägg utan läckor
2. Med en springa
3. Med ett hål genom väggen
4. Förbindelse mellan sändare- och mottagarrum genom ventilationskanal

Här går det alltså att få en uppfattning om hur olika typer av läckor låter.

För att skaffa sig erfarenhet av läcksökning bör man öva, vilket är möjligt i de flesta hus, eftersom det nästan alltid finns läckor. Högtalaren ställs då i ett rum och lyssning sker i utrymmen intill. I ett kontorshus kan ofta följande läckor höras:

- dörrar, lyssna på skillnaden mellan de ofta öppna läckorna i dörrspringorna och hur det låter mitt på dörrbladet, som normalt har betydligt sämre isolering än väggen
- glaspartier har vanligen sämre isolering än väggen
- överluftsöppningar eller –don mellan rum och korridor kan vara svaga punkter. Då de befinner sig ovanför undertaket syns de inte, men hörs ofta tydligt
- genomföringar för elkanalisation
- ventilationsdon, överhörning mellan rum
- lyssna också på hur det låter genom olika tjocka skiljekonstruktioner, t.ex. genom en vägg mellan två kontorsrum och genom en betongvägg

Prova i de olika fallen dessutom skillnaden mellan att använda de brussignaler som finns på CD-skivan och hör vilken som ger tydligast utslag i varje fall. På detta vis går det att

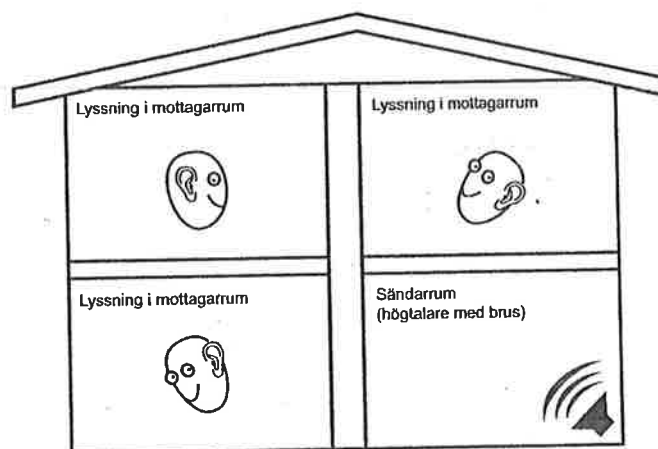
relativt snabbt skaffa sig tillräckliga kunskaper för att utföra läcksökning i ett verkligt objekt.

Kontakt kan också tas med en akustikkonsult, se Ingenjörer – Akustik på Gula Sidorna, som kan erbjuda utbildning individuellt anpassad till behovet.

Metod för läcksökning

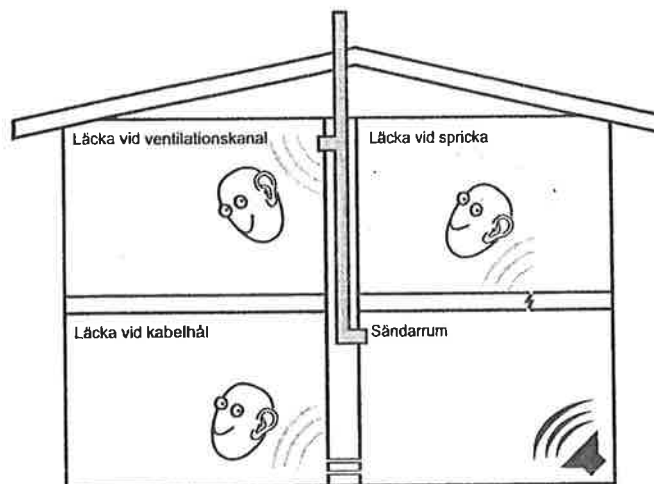
Avsikten är att finna läckor mellan olika utrymmen i en byggnad. Med läcka avses här dels öppna läckor och dels dolda sådana, där sprickor, hål och öppningar döljs bakom ytskikt av olika slag. Metoden lämpar sig inte bara för att finna läckor mellan rum som ligger intill varandra, utan fungerar också för ventilations- och rökgaskanaler som kan förbinda rum långt från varandra. Läcksökningen sker i följande steg

1. Först studeras de ritningar som eventuellt existerar för att finna svagheter i konstruktionen och potentiella brandspridningsvägar.
2. Byggnaden besiktigas och de intressanta partier som upptäckts på ritningarna undersöks.
3. Högtalaren placeras i ett rum, sändarrummet.
4. Lyssning sker i de rum i byggnaden som kan vara intressanta. Eftersom metoden är så snabb är det ofta praktiskt möjligt att lyssna i alla de övriga rummen.

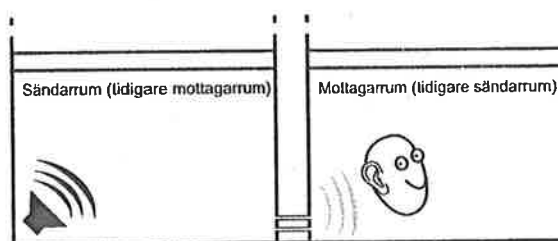


5. Slå på vitt brus och lyssna mitt i mottagarrummet efter om det låter som om det kunde finnas en läcka.
6. Om det förefaller finnas en läcka hörs det ofta varifrån ljudet kommer. Gå då ditåt och lyssna närmare tills läckan är funnen. Om det däremot är oklart var läckan finns, söks rummet av genom lyssning längs rumsytorna. Ibland kan en stege vara nödvändig för att det skall gå att lyssna tillräckligt högt upp.

Om det fortfarande inte är möjligt att lokalisera läckan så prova skärt brus, pulsat brus respektive oktavbandsbrus (lyssna i respektive frekvensband). Lyssna längs rummets ytor på samma sätt som med skärt brus.



7. Läckan noteras. När sedan samtliga mottagarum är undersökta flyttas högtalaren till de rum där läckor konstaterats och lyssning utförs i det tidigare sändarrummet, varvid andra ändan av läckan kan lokaliseras. För att kartlägga samtliga potentiella brandspridningsvägar fordras alltså lyssningstest åt båda hållen för samtliga rumspar.



I de fall det finns mera än en läcka mellan två rum är det vanligen så att bara den som ger mest ljud uppfattas. Genom att förflytta sig längs rumsytorna är det ibland möjligt att upptäcka en svagare läcka genom att skillnaden i lyssningsavstånd kompenserar skillnaden i ljudstyrka. I detta fall kan det vara fördelaktigt med pulsat brus eftersom hörseln lokaliserar ljudet till den närmaste läckan, om inte ljudnivåskillnaden är för stor. Om läckorna har olika karaktär ljudmässigt, t.ex. en öppen springa och en förbyggd dörröppning, märks de mest vid olika oktavband, springan förmodligen vid 2000 Hz och dörröppningen vid 250 Hz.

Trots allt är det möjligt att missa mindre läckage och erfarenhetsmässigt framträder dessa ibland först då den större läckan tätats.

Det finns vissa fall som kan vara bra att känna till där det låter som en läcka, men inte är det.

- parkettgolv på betongbjälklag har en resonans i oktavbandet 500 Hz.
- lättbetongväggar har ofta låg ljudisolering i oktavbandet 500 Hz.
- tjocka, putsade tegelväggar kan ge mycket ljud i oktavbandet 2000 Hz genom spruckna fogar i tegelmuren. Sprickorna är förmodligen så tunna att de inte utgör någon risk för brandspridning. Ofta låter det då lika över hela väggen.
- en gipsskiva som går förbi en skiljekonstruktion, t.ex. en gipsskiva på fasadväggen som går obruten förbi mellanväggen, ger en kraftig flanktransmission vid 2000-4000 Hz. Detta låter som en läcka i hörnet, men kan avslöjas genom att lyssna vid gipsskivan längre ut från hörnet, där det tydligt hörs att det är samma ljud som i hörnet.

Läcksökning med skärmad mikrofon

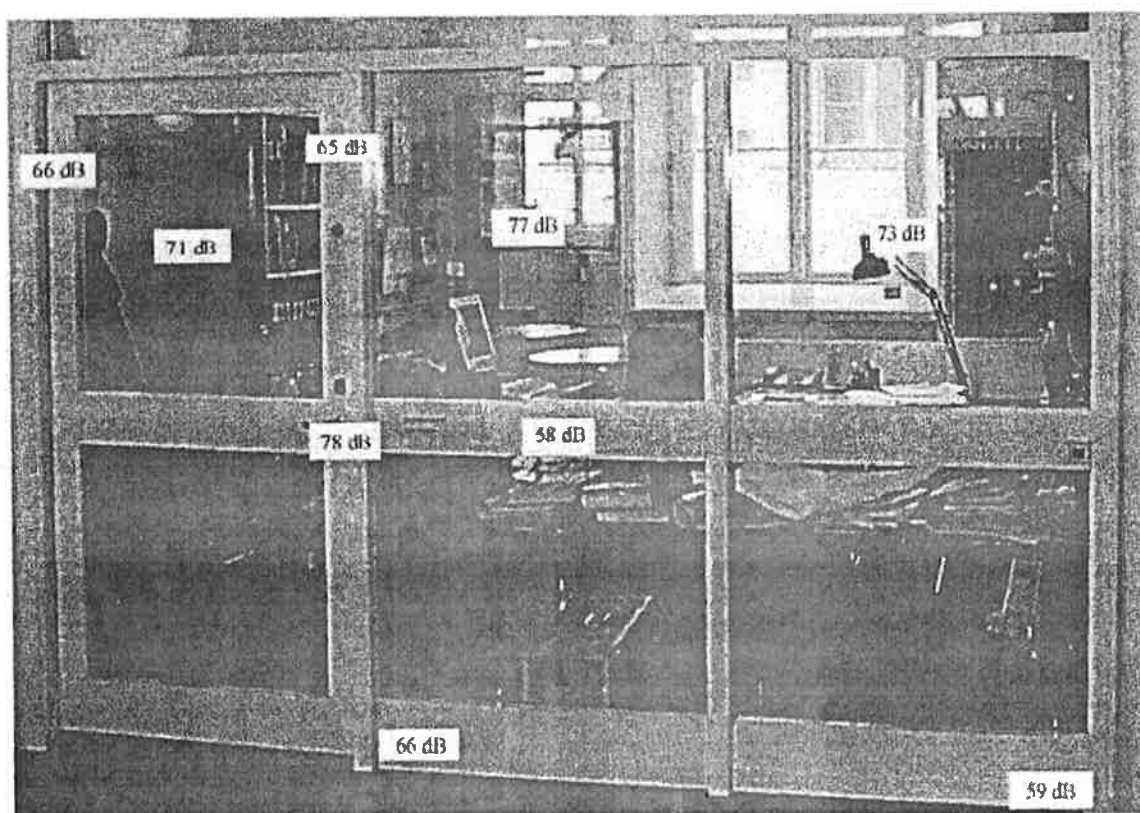
Försök har gjorts med att föra en mikrofon längs rumsytorna och notera utslaget på bullermätaren, för att på så vis få en indikation på var det finns läckor. Problemet med detta är att mikrofonen inte bara tar upp ljud från väggen utan även från rummet och resultatet blir ofta oklart. I projektet har därför utvecklats en metod för läcksökning med skärmad mikrofon, som kan användas i svårare fall då lyssningstester har visat sig vara otillräckliga.



Figur 5. Läcksökning med skärmad mikrofon. Kåpan med mikrofonen trycks mot väggen och ljudnivån avläses på bullermätaren.

Mikrofonen monteras i en kåpa med en mjuk tättningsring, som tätar mot den vägg e.dyl. som skall undersökas. Det är nämligen viktigt att kåpan sluter tätt mot underlaget. På så vis tar mikrofonen endast upp ljud direkt från väggen och det blir stor skillnad mellan olika punkter om dessa har olika ljudisoleringsegenskaper.

För att använda läcksökaren behövs en bullermätare med en löstagbar mikrofon, som kopplas till mätaren med en kabel. Mikrofonen sätts fast i hållaren på kåpan, kabeln fästs på skaftet och bullermätaren ställs på A-vägt, alltså dB(A). Kåpan hålls mot den vägg e. dyl. som skall undersökas och värdet noteras. Genom att söka av väggen kan de svaga punkterna upptäckas och det är fullt möjligt att t.ex. direkt se storleken på en igensatt dörröppning, liksom det är möjligt att kartlägga hela väggen och därmed lokalisera alla läckor, även svaga sådana. I figuren nedan visas en vägg med glaspartier och det är markant hur stora ljudnivåskillnader som kan erhållas för punkter som ligger nära varandra.



Figur 6. Ljudnivåer mätta med skärmad mikrofon på rumssidan av en korridorvägg. 55 dB(A) är mätt på mellanväggen till nästa rum. Skillnaden mellan högsta och lägsta värde är 23 dB(A), vilket visar att metoden ger mycket tydliga differenser mellan delar med olika ljudisolering.

Läcksökningen sker på i princip samma sätt som med lyssningstest:

- Högtalaren placeras i ett rum, sändarrummet.
- Sökning sker i de rum i byggnaden som kan vara intressanta.
- Slå på vitt brus och lyssna mitt i mottagarrummet efter om det låter som om det kunde finnas en läcka.
- Om det förefaller finnas en läcka hörs det ofta varifrån ljudet kommer. Gå då ditåt och sök tills läckan funnits och dess storlek bestämts. Om läckans position är obestämd söks rumsytorna av systematiskt, vilket också ger information om eventuella mindre läckor.
- Läckan noteras. När sedan samtliga mottagarrum är undersökta flyttas högtalaren till de rum där läckor konstaterats och sökning utförs i det tidigare sändarrummet där andra ändan av läckan lokaliseras.

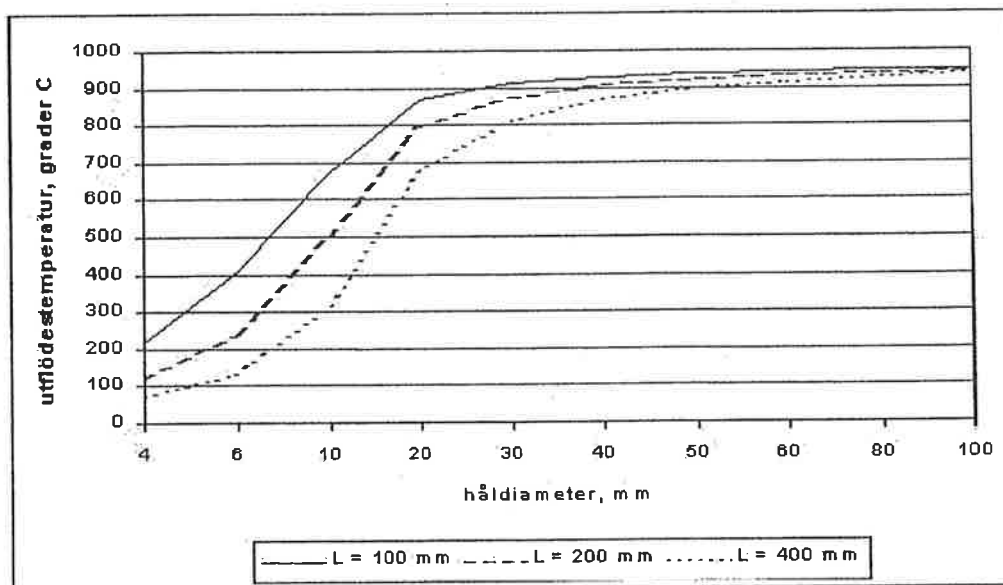
Värdering av risk för brandspridning

De funna läckorna undersöks. Öppna läckor kan enkelt värderas eftersom egenskaperna framgår tydligt. Dolda läckor måste först öppnas för att undersöka med vilket material hålet är förbyggt, hålets dimensioner, eventuellt isoleringsmaterial i hålet etc. Dessa faktorer har naturligtvis stor betydelse för den dolda läckans möjlighet att sprida brand.

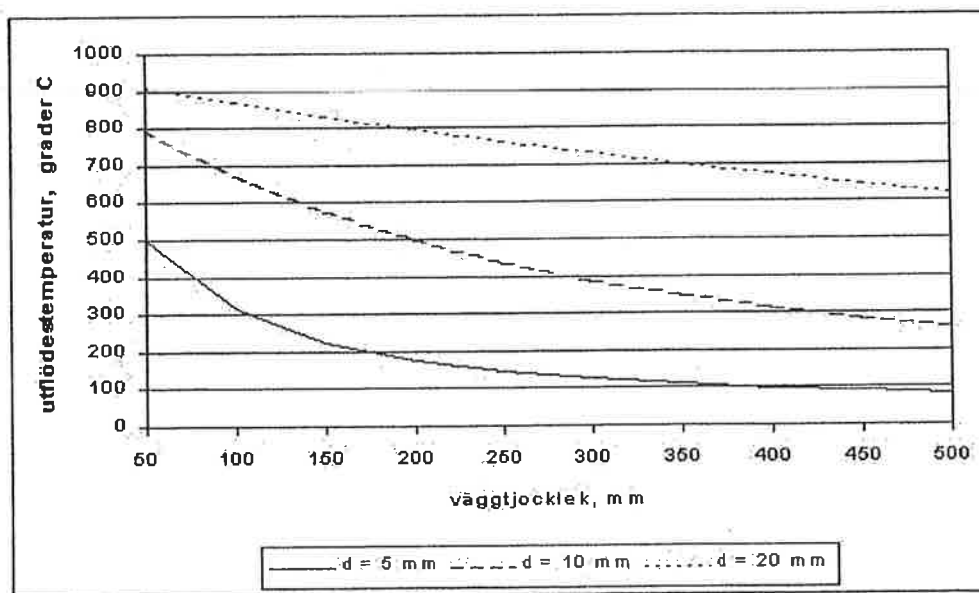
För öppna läckor har i projektet gjorts brandförsök och teoretiska beräkningar för att utröna risken för brandspridning genom strömning av heta brandgaser. Avgörande för denna risk är utströmningstemperaturen på brandgasen. De faktorer som huvudsakligen påverkar denna är

- öppningens dimensioner, ju bredare springa eller större hål desto mindre kyla gasen då den passerar genom läckan
- väggens tjocklek, ju tjockare vägg desto lägre gastemperatur
- väggens värmekonduktivitet, ju högre sådan desto mera värme tas från gasen vid passagen och desto lägre utströmningstemperatur

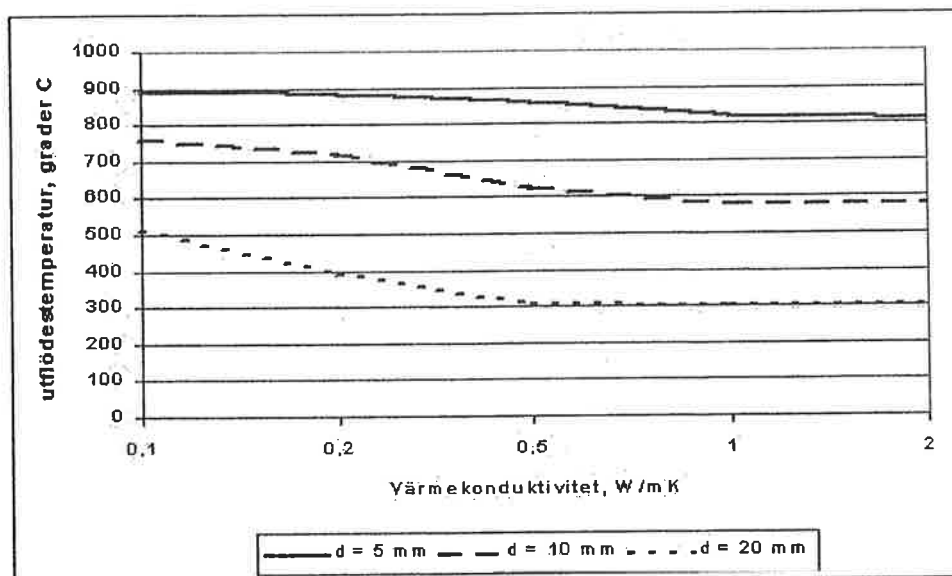
Beräkningar har gjorts på normala fall med fullt utvecklad brand, 900° C i brandrummet, och ett övertryck där på 20 Pa. Beräkningsresultaten redovisas i tre diagram nedan där utflödestemperaturen beroende av hålstorleken, vägg tjockleken och väggmaterialets värmekonduktivitet redovisas.



Figur 7. Brandgasens utflödestemperatur som funktion av håldiametern, för tre olika vägg tjocklekar.



Figur 8. Utflödestemperaturen som funktion av vägg tjockleken, för tre olika håldiametrar.



Figur 9. Utflödestemperaturen som funktion av värmekonduktiviteten för väggmaterialet, för tre olika håldiametrar.

Risken för antändning av lättantändliga material vid läckans utlopp beror på utströmningstemperaturen på följande sätt

< 300° C	antänds ej
300-400° C	möjlig antändning
400-500° C	trolig antändning
> 500° C	antänds

Beräkningarna visar på en brytgräns vid c:a 10 mm håldiameter. För hål större än 10 mm är antändningsrisken stor, d.v.s. utflödestemperaturen ligger över 500° C oavsett vägg tjocklek och –material. Av diagrammen kan man också se att 300° C (möjlig antändning) kan uppnås vid utflöde från ett 6 mm hål i en 150 mm tjock betong- eller tegelvägg.

Beräkningar har enbart gjorts för runda hål, men man kan dra slutsatsen att springor med 6 mm bredd, eller något mindre, också innebär risk för brandspridning.

Om läckan är dold genom att den är täckt av något (tapet, panel etc.) på brandrumssidan, måste först detta brinna genom för att gas skall kunna strömma genom läckan. Brandförsök har visat att genombrinningstiden för byggmaterial (trä, spånskiva, gipsskiva etc.) är ungefär 1 mm/min. Om läckan är täckt på båda sidor måste naturligtvis båda lagren brinna genom. Hur väggbeklädnaden i rummet intill brinner genom beror på läckans geometri. I ett litet hål sker värmetransporten mycket långsamt genom ledning. Den heta brandgasen kan däremot strömma i en vertikal springa och betydligt snabbare hetta upp skivan på andra sidan. Även här gäller att temperaturen beror på väggmaterial, tjocklek och springans bredd.

För större, dolda läckor som igensatta dörröppningar gäller samma bedömning som för andra avskiljande konstruktioner.