

Efectis Nederland-rapport

2011-Efectis-R0396

Vluchtcondities bij toepassing van brandwerende binnenwanden met brandbare isolatiematerialen

Efectis Nederland BV
Centrum voor Brandveiligheid
Lange Kleiweg 5
Postbus 1090
2280 CB Rijswijk

www.efectis.nl

T 088 fire safety (088 3473 723)

F 088 3473 724

E nederland@efectis.com

Datum	mei 2011
Auteur(s)	Ir. R.J.M. van Mierlo Ir. A.D. Lemaire Ir. V.J.A. Meeussen Ing. P.B. Reijman
Aantal pagina's	68 (inclusief bijlagen)
Aantal bijlagen	8 (A t/m G)
Opdrachtgever	Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties Directoraat-Generaal Wonen, Wijken en Integratie Directie Stad en Bouw, Rijnstraat Postbus 30941 2500 EZ DEN HAAG
Projectnaam	BZK Isolatiematerialen fase2
Projectnummer	2010396

Indien dit rapport in opdracht werd uitgevoerd, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoekopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het Efectis-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2011 Efectis Nederland BV: een TNO bedrijf

Voor u ligt een rapport van Efectis Nederland BV (voorheen TNO Centrum voor Brandveiligheid). Efectis Nederland BV en het zusterbedrijf Efectis Frankrijk, zijn sinds 1 januari 2008 volle dochters van de Efectis Holding SAS, waarin TNO en het Franse CTICM, participeren. De activiteiten van het TNO Centrum voor Brandveiligheid zijn sinds 1 juli 2006 ondergebracht in Efectis Nederland BV. Dit is ingegeven door de internationale marktontwikkelingen en klantvragen. Om de klantvragen nog beter te kunnen beantwoorden, en een breder pakket aan diensten en faciliteiten van een hoge kwaliteit aan te kunnen bieden, is de internationale samenwerking verder uitgebreid. Dit is gedaan met ervaren, en in de brandveiligheidssector bekende, partners in Noorwegen (Sintef-NBL), Spanje (Afiti-Licof), Duitsland (IFT), de Verenigde Staten (South West Research Institute) en China (TFRI). Nadere informatie hierover is te vinden op onze website.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	5
2	Aanpak en rapportage van het onderzoek	7
2.1	Achtergrond bij de vraagstelling	7
2.2	Begrenzing van het onderzoek	8
2.3	Aanpak van het onderzoek	11
2.4	Voorbeeld-configuraties	12
2.5	Rapportage	14
3	Rookproductie vanuit brandwerende constructies	15
3.1	Relevante parameters	15
3.2	Historische waarnemingen	17
3.3	Proevenserie	18
3.4	Theoretische maximum-waarden	19
3.5	Bespreking van de resultaten.....	19
4	Rooktransport door brand- en rookwerende scheidingen.....	22
4.1	Relevante parameters	22
4.2	Bespreking van de rekenresultaten	24
5	Vluchtcondities in de direct bedreigde ruimten.....	26
5.1	Rookverspreiding-scenario's	26
5.2	Vluchtcriteria.....	27
5.3	Rekenresultaten voor de vluchtcondities	28
5.4	Bespreking van de resultaten.....	32
6	Opties voor eisen.....	35
7	Conclusies en aanbevelingen	37
	Bijlagen	

Samenvatting

Naar aanleiding van een brief van Rockwool Benelux d.d. 5 maart 2009 aan de Vaste Tweede Kamer Commissie voor WWI heeft het ministerie van VROM-WWI in 2009 aan Efectis Nederland gevraagd onderzoek te doen naar de brandveiligheid van toepassingen van brandbare isolatiematerialen in de bouw. Dit onderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd in februari 2010 onder rapportnummer 2009-Efectis-R0824[rev.1].

De hoofdconclusie van het onderzoek luidde als volgt:

“Naar de mening van Efectis is het brandveiligheidsniveau van de huidige¹ EPS/PUR-isolatietoepassingen niet significant onveiliger dan het algemene brandveiligheidsniveau; voor toekomstige wijzigingen in het gebruik van deze isolatiematerialen (bijvoorbeeld grootschalige toepassing in gebouwen met een slaapfunctie en/of minder-zelfredzamen) kan dit oordeel mogelijk anders uitvallen.”

Aangezien diverse conclusies in het rapport slechts geldig waren voor de huidige bouwpraktijk, waarbij brandbare isolatiematerialen bijna alleen worden toegepast in uitwendige scheidingsconstructies zoals gevels en daken, was in het rapport aangegeven: *“Bij het op grote schaal gebruiken van brandbare isolatiematerialen in andere toepassingen, bijvoorbeeld in inwendige scheidingsconstructies, en in aanwezigheid van veel minder-zelfredzamen, is het naar de mening van Efectis belangrijk om de geldigheid van de conclusies nader te onderzoeken.”*

Met betrekking tot het toepassen van brandbare isolatiematerialen in inwendige scheidingsconstructies is in het rapport geconcludeerd *“Ontledingsgassen kunnen vanuit sommige constructies vrij komen buiten het compartiment waar de brand heerst en hierdoor het vluchten hinderen; dit kan vooral gevaarlijk zijn bij aanwezigheid van minder-zelfredzamen. Dit kan voor de beschouwde isolatiematerialen met name spelen bij toepassing in inwendige scheidingsconstructies”*.

In aansluiting op deze conclusies heeft dezelfde opdrachtgever (nu onderdeel van het ministerie van BZK), mede op advies van het OPB (Overlegplatform Bouwreggeving) besloten om vervolgonderzoek in te stellen met de volgende vraagstelling:

- Tot welke vluchtcondities aan de niet-brandzijde kan de toepassing van brandbare isolatiematerialen in inwendige brand- en rookwerende scheidingen leiden?
- Op welke plaatsen, in welke mate en op welk tijdstip ontstaan die condities?
- Welke opties bestaan om eisen te stellen die het ongewenste risico beperken?

Hiertoe heeft BZK-WWI opdracht gegeven aan Efectis.

Op basis van het onderzoek komt Efectis Nederland tot de volgende conclusies:

- De invloed van brandbare isolatiematerialen in inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies op de vluchtcondities in de eerste 30 minuten na ontstaan van brand, is over het algemeen niet dominant ten opzichte van de condities die door wettelijk² geaccepteerde rooklekkage in brand- en rookwerende constructies wordt veroorzaakt, maar de invloed kan wel significant zijn in de verslechtering van de vluchtcondities.

¹ Onderstreping van “huidige” en “toekomstige” niet in oorspronkelijk rapport.

² De huidige wettelijke eisen voor zowel brand- als rookwerendheid zijn vastgelegd in de vorm van brandwerendheidseisen volgens NEN 6069, die vanuit het Bouwbesluit via NEN 6068 en voor rookwerendheid via NEN 6075, wordt aangewezen.

- De rookdichtheid en toxiciteit van de rookstromen vanuit de onderzochte scheidingsconstructies en vanuit een brandruimte door de scheidingsconstructies kan, ruim binnen de beschouwde tijdsduur van 30 minuten na vlamoverslag, leiden tot levensbedreigende condities in de direct bedreigde ruimten³ indien deze ruimten niet groot zijn, met als voorbeeld een kleine verblijfsruimte en een gang.
- De bijdrage van de rook vanuit de scheidingsconstructie heeft een zeer belangrijke en in de kamerconfiguratie voor thermisch lichte constructies zelfs een dominante invloed op de verslechtering van de verblijfs- en vluchtcondities.
- De vluchtmogelijkheden in de direct bedreigde ruimten zullen waarschijnlijk al vaak onacceptabel zijn voordat de rookstroom uit de scheidingsconstructie van belang wordt.
- Bij invoering in het Bouwbesluit van een S_m -rookwerende eis voor scheidingsconstructies op basis van EN 1634-3 wordt het relatieve belang van de rookstroom vanuit de constructie belangrijk groter.
- De “fire protection ability” (K-waarde voor brandwerendheid volgens EN 13501-2 en EN 14135) van de toplaag en de lekdichtheid van de constructie (op basis van EN 13501-2 en EN 1634-3), zijn bruikbare eisen ter beperking van de invloed van rookstroom uit de constructie op de vluchtcondities.

Op basis van deze conclusies adviseert Efectis Nederland als volgt:

- Het is, uitgaande van de huidige eisen, aan te bevelen aanvullende eisen te stellen aan inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies met brandbare isolatiematerialen, indien toegepast in gebouwen met een gebruiksfunctie mede gericht op minder-zelfredzamen.
- Bij wettelijke invoering van een rookwerendheid voor deuren volgens EN 13501-2 en EN 1634-3, met name daar waar het S_m -criterium wordt gehanteerd, is het sterk aan te bevelen om aanvullende eisen te stellen aan brand- en rookwerende scheidingsconstructies in gebouwen met een functie mede gericht op minder-zelfredzamen.
- Indien wordt besloten wettelijke eisen te stellen aan inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies, wordt geadviseerd deze te stellen in de vorm van een “fire protection ability” (K-waarde voor brandwerendheid volgens EN 13501-2 en EN 14135) van de toplaag of in de vorm van een lekdichtheids-eis met gebruikmaking van EN 1634-3. Daarbij is aandacht nodig voor het ongewenst treffen met restricties van veilige toepassingen.

³ De direct bedreigde ruimte: de ruimte die direct grenst aan de niet-brandzijde van de onderzochte brand- en rookwerende scheidingsconstructie.

1 Inleiding

Naar aanleiding van een brief van Rockwool Benelux d.d. 5 maart 2009 aan de Vaste Tweede Kamer Commissie voor WWI heeft het ministerie van VROM-WWI in 2009 aan Efectis Nederland gevraagd onderzoek te doen naar de brandveiligheid van toepassingen van brandbare isolatiematerialen in de bouw. Dit onderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd in februari 2010 onder rapportnummer 2009-Efectis-R0824[rev.1].

De hoofdconclusie van het 2010-onderzoek luidde als volgt:

“Naar de mening van Efectis is het brandveiligheidsniveau van de huidige EPS/PUR-isolatietoepassingen niet significant onveiliger dan het algemene brandveiligheidsniveau; voor toekomstige wijzigingen in het gebruik van deze isolatiematerialen (bijvoorbeeld grootschalige toepassing in gebouwen met een slaapfunctie en/of minder-zelfredzamen) kan dit oordeel mogelijk anders uitvallen.”

Aangezien diverse conclusies in het rapport slechts geldig waren voor de huidige bouwpraktijk, waarbij brandbare isolatiematerialen bijna alleen worden toegepast in uitwendige scheidingsconstructies zoals gevels en daken, was in het rapport aangegeven: *“Bij het op grote schaal gebruiken van brandbare isolatiematerialen in andere toepassingen, bijvoorbeeld in inwendige scheidingsconstructies, en in aanwezigheid van veel minder-zelfredzamen, is het naar de mening van Efectis belangrijk om de geldigheid van de conclusies nader te onderzoeken.”*

Met betrekking tot het toepassen van brandbare isolatiematerialen in inwendige scheidingsconstructies is in het rapport geconcludeerd *“Ontledingsgassen kunnen vanuit sommige constructies vrij komen buiten het compartiment waar de brand heerst en hierdoor het vluchten hinderen; dit kan vooral gevaarlijk zijn bij aanwezigheid van minder-zelfredzamen. Dit kan voor de beschouwde isolatiematerialen met name spelen bij toepassing in inwendige scheidingsconstructies”*.

In aansluiting op deze conclusies heeft dezelfde opdrachtgever (nu onderdeel van het ministerie van BZK), mede op advies van het OPB (Overlegplatform Bouwregulering) besloten om vervolgonderzoek in te stellen met de volgende vraagstelling:

- Tot welke vluchtcondities aan de niet-brandzijde kan de toepassing van brandbare isolatiematerialen in inwendige brand- en rookwerende scheidingen leiden?
- Op welke plaatsen, in welke mate en op welk tijdstip ontstaan die condities?
- Welke opties bestaan om eisen te stellen die het ongewenste risico beperken?

Hiertoe heeft BZK-WWI opdracht gegeven aan Efectis.

De vraagstelling is beperkt tot de *niet-brandzijde* of “koude zijde” van de scheidingsconstructies, omdat het vrijkomen van rook uit de constructie aan de brandzijde pas optreedt bij temperaturen waarbij overleven aan die zijde niet meer mogelijk is.

De vraagstelling concentreert zich op *inwendige* scheidingsconstructies, omdat bij externe scheidingsconstructies de rook aan de niet-brandzijde uit de constructie in de buitenlucht komt en daar veel minder invloed heeft op de vluchtcondities.

De vraagstelling is beperkt tot de *brand-/rook-werende* scheidingsconstructies, omdat zonder deze brand-/rook-werendheid de vluchtroutes in relatief open verbinding kunnen staan met plaats van de brand. De eventuele bijdrage van brandbare materialen in constructies is in die gevallen meestal beperkt tot zeer beperkt t.o.v. de inventaris.

Een complicerende factor voor het onderzoek is het feit dat inwendige brand- en rookwerende scheidingen met brandbare isolatie (nog) weinig worden toegepast in de

huidige bouwpraktijk en het onderzoek dus is gericht op constructies die (nog) nauwelijks op de markt als product voor de onderzochte toepassing verkrijgbaar zijn.

In de vraagstelling van het ministerie zijn de volgende aspecten niet meegenomen:

- De snelheid van brandontwikkeling, voor zover die van invloed is op schade;
- De condities bij ingrijpen door de brandweer;
- De bestrijdbaarheid van brand binnen het gebouw door de brandweer.

De vraagstelling van het ministerie is namelijk ontstaan naar aanleiding van de hierboven aangehaalde opmerkingen uit het eerste rapport, refererend aan de combinatie brandbare isolatiematerialen, inwendige scheidingsconstructies en minder-zelfredzamen in de periode dat deze scheidingsconstructies hun brand- en rookwerende functie vervullen.

Dit onderzoek richt zich op de eerste 30 minuten na aanvang van een brand, de periode waarin de brandweer nog geen (belangrijke) rol speelt bij het ontruimen van het gebouw. Voor gebouwen die binnen 10 à 15 minuten zijn ontruimd is dit onderzoek nauwelijks relevant. Het onderwerp van onderzoek zijn de brand- en rookwerende scheidingsconstructies in gebouwen met minder-zelfredzamen die vanwege de langere ontvluchtingstijd of begeleide ontruiming ook na die periode van 10 à 15 minuten nog veilig moeten kunnen vluchten.

2 Aanpak en rapportage van het onderzoek

2.1 Achtergrond bij de vraagstelling

Het vluchten in gebouwen kan worden gehinderd of verhinderd door de effecten van een brand. Het gaat daarbij zowel om de directe invloed van de vlammen als om de invloed van rook. Gebouwen worden daarom meestal in brandcompartimenten verdeeld die het verspreidingsgebied van brand moeten beperken. Brandcompartimenten worden meestal verder in rookcompartimenten verdeeld om het verspreidingsgebied van rook te beperken. De rookwerende eigenschap van rookscheidingen is nog⁴ gedefinieerd in de vorm van brandwerendheid, met de aanname dat de rookwerendheid in tijd 1,5 maal de brandwerendheid van de scheiding bedraagt. Een rookwerende scheiding zal altijd een bepaalde hoeveelheid rook kunnen doorlaten, bij gebruik van de brandwerendheid als maat voor de rookwerendheid kan deze hoeveelheid rook substantieel zijn.

Alle brandbare materialen kunnen bij brand rook met ontledings- en verbrandingsproducten produceren en invloed hebben op de vluchtcondities, indien ze niet (afdoende) van de vluchtroutes zijn gescheiden. De vraag tot welke vluchtcondities aan de niet-brandzijde van inwendige brand- en rookwerende scheidingen de toepassing van brandbare isolatiematerialen in die scheidingen kan leiden, moet worden beoordeeld in combinatie met de andere bronnen van ontledings- en verbrandingsproducten. Dan zijn de veiligheidsbaten van het stellen van extra wettelijke eisen, bij mogelijk toekomstige toepassing van brandbare isolatiematerialen in inwendige brandwerende binnenwanden in de toekomst, af te wegen tegen de kosten.

Rookstromen en rookdichtheid

Binnen de onderzoeks-vraagstelling is relevant waar de rook vandaan komt die de vluchtcondities voor minder-zelfredzamen beïnvloedt.

Rook zal van de brandruimte⁵ door openingen naar de direct bedreigde ruimte⁶ lekken daar waar de druk in de brandruimte hoger is. Deze openingen kunnen gaten en kieren zijn tussen constructiedelen, zoals aansluitingen tussen vloeren en wanden of wanden onderling en aansluitingen van deuren, ramen, luiken en doorvoeringen⁷ in de scheidingswanden. Over het algemeen zijn vooral de openingen bovenin de scheiding belangrijk aangezien de hoge brandtemperaturen vooral boven in de brandruimte leiden tot overdruk t.o.v. de aangrenzende ruimten.

Een andere rookstroom kan worden veroorzaakt door brandbare (isolatie)materialen in de constructie zelf. Deze ontleden (d.w.z. de moleculen vallen chemisch uiteen in lichtere moleculen) boven een bepaalde temperatuur geheel of gedeeltelijk in brandbare

⁴ Sinds enkele jaren bestaat voor deuren de optie om een “echte” rookwerendheid (d.w.z. lekdichtheid) te bepalen met de Europese beproevingsmethode EN 1634-3. Deze methode is nog niet aangewezen vanuit de prestatie-eisen van het Bouwbesluit, maar staat gepland om te worden aangewezen vanuit het nieuwe Bouwbesluit (via NEN 6075).

⁵ In dit rapport wordt de term “brandruimte” gebruikt voor de ruimte waarin de brand wordt verondersteld.

⁶ In dit rapport wordt de term “bedreigde ruimte” gebruikt voor de ruimte waarin de (vlucht)condities worden beoordeeld.

⁷ Denk hierbij vooral aan ventilatiekanalen en aan kabels en leidingen al dan niet verzameld in goten en kokers, die door een (brandwerende) scheiding gaan.

gassen. Isolatiematerialen in brandwerende scheidingen zijn enigszins beschermd tegen opwarming, maar na lange blootstelling van die scheidingen aan hoge brandtemperaturen kunnen ook de materialen in de scheiding voldoende worden opgewarmd om te ontleden en te verbranden. Of en wanneer dit optreedt, hangt af van de brandtemperatuur, de tijdsduur en de opbouw van de scheiding.

De isolatie in brandwerende scheidingen kan op diverse wijzen zijn aangebracht, maar zal in deze scheidingen zijn afgeschermd van verblijfsruimten en verkeersruimten (gangen). Die afscherming is echter nooit volledig. Gasvormige ontledingsproducten in de constructie nemen meer ruimte in dan de oorspronkelijke vaste stof, zodat deze gassen onder druk uit de constructie worden geperst. Een deel hiervan zal naar de brandruimte gaan en een deel naar de direct bedreigde ruimte, afhankelijk van de openingen in het oppervlak die permanent aanwezig zijn of die zijn ontstaan door de brand. In de meeste constructies veroorzaakt een brand vooral gaten aan de brandzijde, bijvoorbeeld door doorbranden van het oppervlak, maar dat hoeft niet: door deformeren van de constructie kunnen soms de openingen vooral aan de niet-brandzijde ontstaan.

Binnen de onderzoeksvraagstelling wordt het relatieve belang van de invloed van de brandbare isolatiematerialen in de brandwerende scheiding op de vluchtcondities bepaald door de (rook)gassen afkomstig van die isolatiematerialen ten opzichte van de (rook)gassen die door de constructie vanuit de brandruimte komen.

In dit onderzoek is ervoor gekozen allereerst de optische rookdichtheid (en dus de zichtlengte) te bekijken als belangrijke parameter voor de vluchtcondities. Het gaat dan om de verhouding “rookproductie vanuit de constructie” / “rooktransport door de constructie”. Hiervoor worden beide hoeveelheden rookgassen bepaald, uitgedrukt in rookdebiet maal rookdichtheid (eenheid $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^{-1} = \text{m}^2/\text{s}$), die de bedreigde ruimten instromen. Beide hoeveelheden rookgassen zullen overigens variëren in de tijd.

Vervolgens zijn andere eigenschappen van rook (andere dan rookdichtheid) beoordeeld, waarvan de invloed op de vluchtcondities niet op basis van alleen de rookdichtheid goed zijn in te schatten, zoals toxiciteit en concentraties onverbrande gassen.

2.2 Begrenzing van het onderzoek

Begrenzing qua inhoud

Zoals aangegeven in de inleiding vallen een aantal aspecten niet binnen de vraagstelling van de opdrachtgever. Het betreft:

- De snelheid van brandontwikkeling, voor zover dit van invloed is op schade;
- De condities bij ingrijpen door de brandweer;
- De bestrijdbaarheid van brand binnen het gebouw door de brandweer.

Op basis van deze beperkingen is het onderzoek qua inhoud te begrenzen. De periode van onderzoek is bijvoorbeeld beperkt tot de eerste 30 minuten van brand. In de periode daarna zal de inzet van de brandweer plaats vinden en is meer ondersteuning en kennis aanwezig voor het ontruimen van een gebouw ondanks mogelijk slechte vluchtcondities. In de periode daarna zullen verder de subbrandscheidingen en sommige hoofdbrand-scheidingen hun brand- en rookwerende functie verliezen of verloren hebben⁸, zodat de onderzoeksvraagstelling voor die scheidingsconstructies niet meer relevant is.

⁸ Voor deze scheidingen is (uitgezonderd in de woonfunctie) een brandwerendheid vereist van 30 minuten voor nieuwbouw, en 20 tot 30 minuten voor bestaande bouw. Voor de hoofdcompartimentering (niet-subcompartimentering) is dit 60 of soms 30 minuten voor nieuwbouw en 20 tot 60 of soms 30 minuten voor bestaande bouw.

Verder heeft een aantal factoren in de praktijk invloed op de onderzochte vluchtcondities, maar wordt in dit onderzoek niet meegewogen. De genoemde factoren werken gedeeltelijk in tegengestelde richtingen, d.w.z. het belang van brandbare isolatiematerialen in brandwerende constructies wordt er soms mee vergroot, en soms verkleind.

Brand in de constructie

Rookproductie vanuit een brandwerende constructie vindt plaats bij verhitting van de constructie. Deze verhitting kan worden veroorzaakt door een brand in de aangrenzende ruimte of door een brand ontstaan in de constructie zelf, dit laatste bijvoorbeeld als gevolg van werkzaamheden aan de constructie. De vergelijking tussen rookproductie vanuit de constructie en rooktransport door de constructie is dus niet alleen een vergelijking van gevolgen bij dezelfde oorzaak (brand in aangrenzende ruimte), maar ook een (statistische) vergelijking van locaties van de brand.

Binnen het kader van dit onderzoek is geen statistisch onderzoek naar het optreden van beide primaire brandlocaties uitgevoerd. Als werkhypothese is genomen dat een brand ontstaan in de constructie minder waarschijnlijk is dan een brand ontstaan daarbuiten. Daarnaast is het waarschijnlijk dat tijdens werkzaamheden in die ruimten of direct aangrenzende ruimten de gewoonlijk aanwezige minder-validen niet meer aanwezig zullen zijn, of in ieder geval zeer snel gewaarschuwd zullen zijn. De netto bijdrage van branden ontstaan in de constructie aan de hier beoogde vergelijking is dus aanwezig, maar zal waarschijnlijk beperkt zijn.

Andere brandbare materialen in de constructie

Brandwerende constructies kunnen zijn samengesteld uit brandbare en onbrandbare materialen, want ook met brandbare materialen is een goede brandwerendheid te behalen, zoals houten constructies aantonen (en onbrandbaar zijn hoeft niet te betekenen dat de constructie brandwerend is; zie ongeïsoleerde stalen constructies). De brandbare componenten produceren, als de brand maar heet en langdurig genoeg is, ontleding- of verbrandingsgassen. Dat geldt voor de brandbare isolatiematerialen, maar ook voor andere brandbare materialen in de constructie zoals een houten raamwerk of houten of anderszins brandbare beplating.

Binnen het kader van dit onderzoek is geen onderzoek uitgevoerd naar de bijdrage van andere brandbare materialen in inwendige brandwerende constructies dan de isolatiematerialen.

Als werkhypothese is genomen dat de rookproductie door de isolatiematerialen PUR, PIR en EPS groter is dan die van de andere nu gangbare materialen.

Rooklekkage in de beginfase van brand

Veel lekopeningen in inwendige brandwerende scheidingen zijn niet permanent zo dicht als voor de beoogde brandwerendheid nodig is. De openingen worden dan bijvoorbeeld afgedicht door materialen die bij verhitting opschuimen; dit geldt bijvoorbeeld voor deurkieren en luchtroosters. Dat opschuimen wordt geactiveerd wanneer het langsstromende gas een temperatuur heeft van ten minste ca. 200 °C. In de beginfase van brand is het rooktransport dus vaak groter dan met de hiervoor aangegeven opzet bepaald. Bij invoering van de rookwerendheid conform EN 1634-3 (zie hierboven) zal dit effect (grotendeels) afwezig zijn. Dit aspect wordt hier verder niet meegewogen.

Brandwerende scheiding voldoet niet aan wettelijke eisen

Bij beoordeling van de vluchtcondities in gebouwen moet worden gewezen op het feit dat veel gebouwen in Nederland niet volledig voldoen aan de wettelijke eisen. En dit niet als uitzondering, maar als regel. Bijvoorbeeld door onjuiste/gebrekkige uitvoering van de scheidingsconstructies.

De vraag is daarom wat de invloed is van brandwerende scheidingen die toch niet zo brandwerend zijn op de vraagstelling van dit onderzoek.

Bij beperkte afwijkingen, d.w.z. beperkte extra openingen in de constructie, de aansluitingen en de doorvoeringen kan de rookstroom vanuit de constructie beduidend meer toenemen dan het rooktransport vanuit de aangrenzende brandruimte, maar dat hoeft niet.

Ook grote afwijkingen in brandwerende scheidingen komen vaak voor, bijvoorbeeld als alleen het direct zichtbare deel van de constructie is aangebracht en niet de overige (normaal niet zichtbare) delen⁹. Bij deze grote afwijkingen in de brandwerende scheidingen is de invloed geheel anders: de rook vanuit de brandruimte verspreidt zich vrijwel onbelemmerd (er is feitelijk geen compartimentering) en de materialen in de brandwerende constructie spelen dan meestal een bijna verwaarloosbare rol.

In dit onderzoek is verder het uitgangspunt dat wordt voldaan aan de wettelijke eisen, zodat de rookstroom door brandwerende constructies te bepalen is op basis van de lekkage die mogelijk is binnen die wettelijke eisen.

Begrenzing qua werkwijze

De complexiteit en de moeilijke kwantificering van de belangrijkste parameters zorgen ervoor dat dit onderzoek alleen indicatieve en waarschijnlijke waarden kan geven, waar mogelijk met een indicatie van de mogelijke spreiding.

De werkwijze is gebaseerd op een vergelijking van de mogelijke belemmering van het vluchten indien de brandwerende scheidingen voldoen aan de wettelijke vereisten en ze geen brandbare isolatiematerialen bevatten, met de mogelijke belemmering indien brandwerende scheidingen wel brandbare isolatiematerialen bevatten.

Hier wordt overigens geen uitspraak gedaan over de juistheid of wenselijkheid van de wettelijk geaccepteerde condities waarmee de vergelijking plaats vindt.

Berekeningen

Gebouwen kunnen op veel wijzen worden ingedeeld. De rookverspreiding kan daardoor op veel wijzen plaats vinden. Om inzicht te krijgen in de vluchtcondities in het gebouw worden de condities in de direct bedreigde ruimten kwantitatief ingeschat en de condities naar overige ruimten in het gebouw kwalitatief. Een berekening van rookverspreiding anders dan in de direct bedreigde ruimten heeft dus niet plaats gevonden.

Rookverspreiding in gebouwen is afhankelijk van een groot aantal factoren. Van de drijvende krachten van rookverspreiding zijn hier de thermische branddruk door de hoge brandtemperaturen, de winddruk en het schoorsteeneffect meegewogen.

Ter vereenvoudiging van de berekeningen is het drukverschil door winddruk en schoorsteeneffect verondersteld aanwezig te zijn gedurende de gehele branduur; in de fase vóór het wegvallen van de gevelbeglazing (als de winddruk met gesloten ramen nog beperkt is) kan deze term als zeer grove representatie van het expansie-effect

⁹ Een veel voorkomend voorbeeld: brandwerende scheidingen die tot het (niet-brandwerend) verlaagd plafond zijn opgetrokken en daarboven volledig afwezig zijn. Het kan dan gaan om "gaten" van meerdere m² i.p.v. enkele cm².

gezien worden. Bij wegvallen van de gevelbeglazing is het expansie-effect namelijk niet meer relevant, het windeffect wordt dan juist relevant.

De ventilatiesystemen worden niet meegewogen omdat de drukverschillen opgebouwd door deze systemen relatief beperkt zijn t.o.v. de andere factoren als de brand eenmaal tot ontwikkeling is gekomen¹⁰. en omdat de invloed van deze systemen sterk ontwerp-afhankelijk is.

Het onderzoek is verkennend van karakter. Het gebruikt daarom een relatief eenvoudig brand-en rookmodel. Nauwkeurige berekeningen zijn hier niet zinvol wegens de grote spreiding in o.a. brandgrootte, groeisnelheid, soort vuurlast, luchttoevoer, drukverschillen, constructielekkage, gebouwindelingen en, erg belangrijk, de rookproductie die optreedt bij werkelijke branden.

Proeven

De proevenserie in het onderzoek is gericht op brandwerende scheidingen die nog niet op de markt als product voor die toepassing verkrijgbaar zijn, maar die met huidige componenten *zouden kunnen worden* opgebouwd. De proefstukken zijn realistisch mogelijke toekomstige producten, maar niet noodzakelijkerwijs de beste of slechtste¹¹ uitvoeringen die binnen de huidige wettelijke eisen kunnen worden gerealiseerd. De schaal van de proefstukken en het aantal proefstukken is een compromis tussen kosten van de proeven en de hoeveelheid verkregen informatie.

2.3 Aanpak van het onderzoek

Om het effect van de rookproductie vanuit de constructie en het rooktransport door de constructie op de vluchtcondities goed te kunnen inschatten is op hoofdlijnen de volgende aanpak gehanteerd:

- a. Inschatten van de verbrandingssnelheid in BC/RC¹²-scheidingen op basis van literatuur, test-ervaring bij Efectis en een beperkte testserie.
- b. Inschatten van de vrijkomende rook aan de niet-brandzijde vanuit BC/RC-scheidingen op basis van literatuur, test-ervaring van Efectis en een beperkte testserie.
- c. Inschatten van het rooktransport door BC/RC-scheidingen (van de brandruimte naar de direct bedreigde ruimte) op basis van literatuur, testervaring van Efectis en enkele stromingsberekeningen.
- d. Vergelijken van de rookproductie vanuit BC/RC-scheidingen met rooktransport door de scheidingen; beide rookstromen zowel in hoeveelheid als samenstelling.
- e. Berekenen van het tijdsafhankelijke verloop van de rookconcentraties aan de niet-brandzijde van de scheidingen in relatie tot de vluchtduur en de optredende concentraties in wettelijk toegestane situaties.
- f. Opstellen van eisen-opties vanuit technisch en regelgevings-perspectief voor het geval de wetgever eisen gewenst acht.

Deze aanpak is als volgt ingevuld:

Literatuurstudie

De onder a, b en c opgenomen korte literatuurstudie is zowel gericht op gerapporteerde proeven als op een meer theoretische inschatting van het smelt-/inbrand-/ verbrandings-

¹⁰ Dit is een gelukkige omstandigheid, omdat de invloed van deze systemen sterk ontwerp-afhankelijk is, en dus veel extra te onderzoeken varianten zou introduceren.

¹¹ “Beste of slechtste” in de zin van rookproductie aan de niet-brandzijde.

¹² De afkortingen BC en RC worden gebruikt voor de termen brandcompartiment en rookcompartiment.

proces leidend tot vrijkomen van ontledings- en/of verbrandingsgassen aan de niet-brandzijde.

Inventarisatie test-ervaring

Hierbij gaat het met name om inventarisatie van de relevante kennis en ervaring binnen Efectis over het gedrag van de constructies tijdens de vele brandwerendheids-proeven die in het laboratorium jaarlijks worden uitgevoerd en met de zichtbare verbrandingspatronen in de constructieresten na de proeven.

Proeven-serie op middelgrote schaal

Deze proeven zijn uitgevoerd op de zogenaamde “oriënterende oven” van Efectis. Deze oven heeft binnenafmetingen van $1,2 \times 1,2 \times 1,2 \text{ m}^3$ zodat proefstukken over een oppervlak van $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$ aan verhitting kunnen worden bloot gesteld. Als temperatuurverloop is de standaardbrand-kromme gebruikt, de genormeerde temperatuur-tijd curve voor het testen van brandwerende scheidingen in gebouwen met gewone inventaris.

De proeven op deze schaal geven een aanvullend inzicht in het verbrandings- en inbrand-proces in de constructies. Daarnaast zijn op deze schaal aan de niet-brandzijde vrijkomende gassen goed te verzamelen en te meten. Het mechanisch deformatieproces van de relevante constructies komt op deze schaal niet geheel overeen met de praktijk. Dit schaaffect is zover mogelijk meegewogen (zie ook 3.3).

Proefstukken

De proeven zijn uitgevoerd op acht wandconstructies. Om de proevenserie klein te houden is gekozen voor een selectie met de meest gangbare brandbare isolatiematerialen EPS, PUR en PIR en een proefstuk met steenwol.

Stromingsberekeningen

De stromingsberekeningen zijn uitgevoerd om een inschatting te maken van het rooktransport door BC/RC-scheidingen. De lekkageopeningen zijn gekozen als gemiddelde en gangbaar hoge lekkage van BC/RC-scheidingen die aan de huidige wettelijke brandwerendheidscriteria voldoen. Het effect van de lekkage die voldoet aan de nieuwe S_a - en S_m -waarden voor rookdoorlatendheid (gepland om in het nieuwe Bouwbesluit te worden opgenomen) wordt ingeschat op basis van de relatieve grootte in openingsoppervlakte t.o.v. de BC/RC-scheidingen.

Voor enkele ruimte-configuraties is de mogelijke toename van de rookconcentratie in de direct bedreigde ruimten bepaald in de tijd.

Opstellen eisen-opties

Het is aan de bevoegde autoriteit om mede op basis van dit onderzoek te bepalen of aanpassing van de regelgeving gewenst is. Daarbij is het gewenst een beeld te hebben bij de opties die in principe mogelijk zijn. In dit onderzoek zijn hiervoor enkele suggesties gedaan die afzonderlijk of in combinatie kunnen worden toegepast.

Deze opties worden hier gegeven los van de vraag of deze noodzakelijk zijn.

2.4 Voorbeeld-configuraties

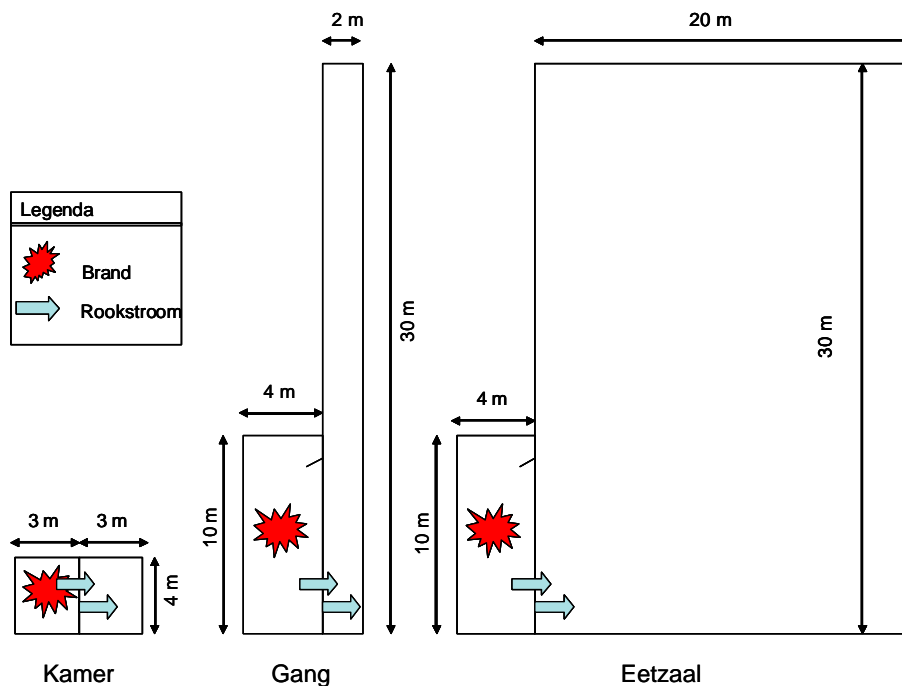
Binnen de onderzoeks-vraagstelling is relevant waar de rook vandaan komt die de vluchtcondities voor minder-zelfredzamen beïnvloedt en in welke ruimte deze rook terecht komt. Het aantal gebouwindelingen is echter bijna oneindig. In dit onderzoek worden daarom de vlucht- en verblijfscondities bepaald in drie standaard-configuraties

waarmee een goede indruk verkregen wordt van de condities in direct bedreigde ruimten in alle indelingen:

1. Kamer-configuratie: Een kleine verblijfsruimte (3m x 4m) die brandwerend is gescheiden van een andere verblijfsruimte met dezelfde afmetingen, bijvoorbeeld twee slaapkamers, waarbij brand ontstaat in een van beide kamers. De scheiding tussen beide ruimten is van één type, bevat geen deur en heeft een lengte van 4m.
2. Gang-configuratie: Een gang van 2m x 30m die brandwerend is gescheiden van een aangrenzende verblijfsruimte met afmetingen 10m x 4m, bijvoorbeeld een huiskamer, waarbij brand ontstaat in de huiskamer. De scheiding tussen gang en huiskamer is van één type, bevat één deur en heeft een lengte van 10m.
3. Eetzaal-configuratie: Een grote verblijfsruimte (20m x 30m), bijvoorbeeld een eetzaal, die brandwerend is gescheiden van een verblijfsruimte met afmetingen 10m x 4m, bijvoorbeeld een vergaderzaal, waarbij brand ontstaat in de vergaderzaal. De scheiding tussen beide ruimten is van één type, bevat één deur en heeft een lengte van 10m.

De verdiepingshoogte wordt verondersteld 3m te zijn.

Rookverspreiding gaat verder dan de direct aan de brandruimte grenzende (hier: “direct bedreigde”) ruimten. De condities in ruimten verderop in het gebouw zijn net zo relevant voor een veilig verblijf of veilig vluchten. Gebouwen kunnen echter op veel wijzen worden ingedeeld. Om inzicht te krijgen in de vluchtcondities in het gehele gebouw worden de condities in de direct bedreigde ruimten kwantitatief ingeschat en de condities in overige ruimten kwalitatief.



Figuur 1: Overzicht (plattegrond) van de onderzochte configuraties.

2.5 Rapportage

Na de inleiding bevat hoofdstuk 2 een beschrijving van de aanpak en begrenzingen van het onderzoek. In de hoofdstukken 3 en 4 zijn de twee bronnen van rook besproken die in dit onderzoek kwantitatief worden vergeleken. De vluchtcondities als gevolg van de rookverspreiding en de analyse van de vergelijking tussen beide bronnen vindt plaats in hoofdstuk 5.

Indien aanpassing van wetgeving door de bevoegde autoriteit nodig wordt geacht, is de aard van de aanpassing nog niet vanzelfsprekend; hoofdstuk 6 bevat daarom opties voor dergelijke aanpassingen.

Conclusies en aanbevelingen vormen daarna het afsluitende hoofdstuk.

In de bijlagen is een belangrijk deel van de technische onderbouwing van de werkwijze en de resultaten van het onderzoek uitgewerkt.

3 Rookproductie vanuit brandwerende constructies

3.1 Relevante parameters

In dit hoofdstuk worden de eigenschappen van de rookstroom¹³ geschat die vanuit een brandwerende constructie een aangrenzende ruimte (de “direct bedreigde ruimte”) binnen stroomt. Hiervoor zijn de volgende vragen van belang: welke hoeveelheid rook, welke rookdichtheid, en welke samenstelling en temperatuur van de rook?

De volgende parameters zijn van belang om deze vragen te beantwoorden, en worden daarom kort beschreven.

Conditie in de brandwerende constructie

Een brandwerende scheiding wordt gedurende een brand eenzijdig verhit. De constructie neemt daarbij in temperatuur toe: snel aan de brandzijde, langzaam aan de koude zijde. Isolatie in de scheiding beperkt de snelheid van opwarming van de koude zijde, maar wordt daarbij aan de warme zijde zelf wel sterk verhit. Deze verhitting kan bij brandbare isolatiematerialen na enige tijd leiden tot ontleding, en (soms) tot verbranding van de ontledingssamenstellingen.

Wanneer het buitenblad van de constructie aan de brandzijde na enige brandtijd grote openingen vertoont, zal een groot deel van de ontledingssamenstellingen uit de constructie naar de brandruimte ontwijken en daar verbranden. De rookcondities in de constructie-kern en de brandruimte komen dan sterk overeen; de constructie-kern heeft dan bij benadering dezelfde invloed op de rookcondities als wanneer de kern-materialen in de brandruimte aanwezig zouden zijn.

Anderzijds kunnen openingen aan de koude zijde door thermisch deformeren van de constructie al in een vroeg brandstadium in omvang toenemen zonder grotere openingen aan de brandzijde. De rookcondities in de constructie worden dan vooral bepaald door het ontledings- en verbrandingsproces in de constructie en de lekkage naar de koude zijde.

Rookdebiet (in m³/s):

Het rookdebiet vanuit de constructie naar de direct bedreigde ruimte wordt bepaald door:

- de productie van ontledings- en verbrandings-gassen in de constructie,
- de grootte en de vorm van de openingen in het buitenblad van de constructie aan de koude zijde, en
- het drukverschil tussen de kern van de constructie en de direct bedreigde ruimte.

Een deel van de ontledingssamenstellingen zal naar de brandzijde ontwijken en een ander deel naar de koude zijde. Hoe de verhouding tussen beide is, hangt af van de grootte en vorm van openingen in het buitenblad van de constructie aan beide zijden, en het drukverschil tussen de brandruimte, de kern van de constructie en de direct bedreigde ruimte. Zoals

¹³ De rookstroom (in m²/s) uit een opening is per definitie gelijk aan het rookdebiet (in m³/s) uit die opening vermenigvuldigd met de optische rookdichtheid (in m⁻¹) in de opening.

De rookstroom (in m²/s) die de brand produceert is te berekenen uit de verbrandingssnelheid, en is gelijk aan het rookpotentieel (in m²/kg) vermenigvuldigd met de verbrandingssnelheid (kg/s)

hiervoor reeds aangegeven: als het buitenblad van de constructie aan de hete zijde door de brand is aangetast, ontwijken de ontledingsgassen vooral aan de brandkant.

De openingen die rook vanuit de brandruimte naar de direct bedreigde ruimte doorlaten kunnen ook de transportroute zijn voor rook vanuit de constructie. Dit geldt met name bij doorvoeringen (kozijnen sluiten gewoonlijk de constructiekern beter af dan doorvoeringen).

Het rookdebiet vanuit brandwerende scheidingen is in te schatten op basis van het gedrag van die constructies tijdens tests. Een rekenkundige benadering is in principe mogelijk, maar moeilijk om met enige nauwkeurigheid uit te voeren.

De jarenlange ervaring van Efectis in het uitvoeren van brandwerendheidsproeven is gebruikt om schattingen te doen van uitstroming van rook gedurende proeven. De branders in de ovens produceren namelijk vrijwel geen rook, zodat alle waargenomen rook uit de geteste constructie moet komen. Deze schattingen zijn beschreven in paragraaf 3.2.

In aanvulling op de beschikbare kennis en testervaring van Efectis is een serie proeven op schaal uitgevoerd om de vrijkomende rookgassen aan de koude zijde te meten en inzicht te krijgen in het verbrandings- en het inbrand-proces in de beoogde constructies. Het resultaat van de proeven is beschreven in paragraaf 3.3.

Rookdichtheid (in m^{-1}):

De rookproductie vanuit een constructie kan bestaan uit ontledings- en verbrandingsproducten.

Voor de verbrandingsproducten is een redelijke schatting van de rookdichtheid¹⁴ te maken. Het mechanisme is hetzelfde als bij verbranding in de brandruimte: voor de verbranding is zuurstof nodig en dus een luchtstroom; in deze luchtstroom komen de verbrandingsproducten terecht. Bij bekend zijn van de fractie van verbrandingsproducten die als zichtblokkerende rook worden geproduceerd is hiermee een schatting van de rookdichtheid beschikbaar.

Voor de ontledingsproducten is de rookdichtheid moeilijker te schatten. De mogelijk ontlede massa kan worden geschat, maar het is onbekend in welk volume dit terecht komt; wel is de massa die vrij komt per tijdseenheid enigszins te schatten.

Het alternatief is niet de rookdichtheid zelf, maar het product van rookdebiet en rookdichtheid te schatten (zoals in dit onderzoek op basis van proeven is gedaan).

Rooksamenstelling:

De samenstelling van de rook vanuit constructies is op hoofdlijnen redelijk in te schatten indien de materialen bekend zijn. Het gaat om ontledings- en verbrandingsproducten van de brandbare materialen in de constructies. Naast de objecten van dit onderzoek, de brandbare isolatiematerialen, kan ook brandbaar (bijvoorbeeld houten) regelwerk aanwezig zijn of beplating die gedeeltelijk bestaat uit brandbaar materiaal, want ook daarmee is een brandwerende scheidingsconstructie te maken.

¹⁴ Met rookdichtheid wordt in dit rapport bedoeld de optische rookdichtheid per m, betrokken op de 10 log. De rookdichtheid is een maat voor de verzwakking van de intensiteit van een lichtbundel die zich door rook voort plant. De rookdichtheid (in m^{-1}) is bij benadering evenredig met de hoeveelheid verbrande brandstof (in kg). De evenredigheidsfactor voor een ruimte van $1 m^3$ is gelijk aan het rookpotentieel (in m^2/kg).

De ontledings- en verbrandingsproducten van gangbare isolatiematerialen als EPS, PUR en PIR zijn redelijk bekend:

- EPS:

De belangrijkste rookgassen zijn CO, CO₂, en in de verbrandingsgassen van brandvertragend behandelde EPS-kwaliteiten enkele halogenen (vooral HF en HBr); bij onvolledige verbranding ook styreen, toluen en benzeen (ontledingsproducten). De halogenen komen gewoonlijk niet in concentraties voor die belangrijk zijn (t.o.v. bijvoorbeeld CO).

- Harde PUR/PIR:

De belangrijkste verbrandingsgassen zijn CO₂, CO, HCN en isocyanaten; en vanwege de aanwezige stikstof in de molecuulstructuur ook (in mindere mate) NO_x en NH₃. De belangrijkste ontledingsgassen zijn CO₂, CO, koolwaterstoffen en aromaten.

Rooktemperatuur:

De rooktemperatuur in de constructie is moeilijk te bepalen. Als maximum temperatuur is de temperatuur in de brandruimte aan te houden. De kans dat de verbranding in de constructie de temperatuur boven de temperatuur in de brandruimte brengt, mag als minimaal worden beschouwd.

De temperatuur in de constructie zal de brandtemperatuur volgen met een snelheid die sterk afhankelijk is van de warmteweerstand van het buitenblad. In de meeste gevallen is de temperatuur veel lager dan in de brandruimte totdat grote openingen ontstaan in het buitenblad van de constructie aan de brandzijde; uitzondering hierop zijn constructies met een buitenblad met kleine thermische weerstand, zoals een staalplaat.

3.2 Historische waarnemingen

Gedurende standaard brandwerendheidproeven wordt een constructie bloot gesteld aan de hete gassen van een ovenruimte die wordt verwarmd met een serie gasbranders. De temperatuur in de oven neemt daarbij toe volgens een genormaliseerd tijdsverloop, de "standaard brandkromme". De gasbranders verbranden een voorgemengd mengsel van aardgas en lucht, met lichte overmaat lucht, waarbij geen of een verwaarloosbare hoeveelheid rook wordt geproduceerd.

Bij de bovenste 2/3-de van het proefstuk heerst een relatieve overdruk in de oven, zodat gassen uit de oven naar buiten kunnen stromen indien daar openingen aanwezig zijn. Deze gassen bevatten tijdens proeven vaak zichtbare rook. Deze rook kan, gezien het rookvrij stoken van de oven, alleen afkomstig zijn van de constructie, d.w.z. zowel uit de kern van de constructie als van de oppervlakken van de openingen waardoor de hete gassen stromen.

Efectis Nederland heeft jarenlange ervaring in het uitvoeren van brandwerendheidsproeven, waaronder zeker enkele honderden proeven met brandbare isolatiekern. Deze proeven worden bijna altijd uitgevoerd in opdracht van industriële partijen, en zijn zelden openbaar. De ervaring met deze proeven is gebruikt om schattingen te doen van het rookdebiet en de rookdichtheid die verwacht kan worden uit constructies met een brandwerendheid van ten minste 30 minuten.

De schattingen zijn zowel gebaseerd op visuele waarneming, als op beeldmateriaal van brandwerendheidsproeven. Als waarneming voor de schattingen zijn de stijgsnelheid van de vrijkomende rook, het doorsnede-oppervlak van de rookkolom en de zichtlengte door de rook gebruikt. Gezien de aard van de waarnemingen zijn de resultaten slechts ruwe indicaties.

De waarnemingen zijn gedaan in de periode tot enkele minuten voor het beëindigen van de brandwerendheid. Vlak voor het beëindigen van de brandwerendheid (indicatie: een minuut) kunnen grotere hoeveelheden rook ontsnappen; deze zijn in de waarnemingen genegeerd.

Rookhoeveelheden met als extreme waarde ca. 2000 m² in de eerste 10 minuten zijn mogelijk; bij de extreme waarden gaat het om constructies met een staalsandwich en een PIR-kern; voor de rest van de 30 minuten periode tot vlak voor het einde van de brandwerendheid nemen deze extreme waarden niet veel verder toe. Voor de meeste constructies zal het om veel kleinere rookhoeveelheden gaan (minder dan een paar honderd m²)¹⁵; de rook komt bij constructies met een thermisch zwaar¹⁶ buitenblad vooral in de 2^e helft van de brandwerendheidsperiode vrij.

Deze resultaten gelden voor constructies met afmetingen van ca. 3m x 4 m, conform de maximum omvang van proefstukken in standaard brandwerendheidsproeven.

3.3 Proevenserie

In aanvulling op de beschikbare kennis en testervaring van Efectis is een serie proeven op middel-grote schaal uitgevoerd om de vrijkomende rookgassen aan de koude zijde van een brandwerende constructie te meten en aanvullend inzicht te krijgen in het verbrandings- en het inbrand-proces in de beoogde constructies.

Zoals in de vorige paragraaf is toegelicht zijn de gemeten rookgassen afkomstig van de constructie aangezien de ovenbranders niet meer dan een verwaarloosbare hoeveelheid rook produceren.

De hoeveelheid rook die vrijkomt aan de koude zijde is afhankelijk van het drukverschil over de constructie. Deze wordt in de proevenserie geregeld op een niveau van gemiddeld 20 Pa overdruk in de oven over het gehele oppervlak, overeenkomend met de maximum thermische branddruk tijdens de standaard brandwerendheidsproefing.

De proefopstelling, de proefstukken en de resultaten zijn beschreven in bijlage D.

Het mechanisch deformatieproces van de constructies komt op deze schaal niet geheel overeen met de praktijk.

Op basis van ervaring bij Efectis, en deze ervaring wordt bevestigd door de uitgevoerde proeven, is deze deformatie voor veel constructies niet maatgevend voor het ontstaan van openingen en vrijkomende rook. Het gaat dan om constructies met relatief zware beplating, in de uitgevoerde proeven bestaand uit gipsplaten; voor die constructies is het doorbranden door het oppervlak bijna altijd maatgevend. Voor constructies met een dunne staalbeplating is deformatie wel van belang en moet het resultaat van proeven op middelgrote schaal worden “vertaald” naar een grotere schaal. Deze vertaling is voor de maximale rookdoorlaat redelijk goed uit te voeren vanwege de randvoorwaarde dat de constructie brandwerendheid moet blijven (wat de maximale deformatie beperkt).

Voor de geteste constructies geldt dat een verdere deformatie binnen de grenzen van de brandwerendheidscriteria een toename van de rookproductie aan de koude zijde zou betekenen, maar een toename die relatief slechts beperkt is t.o.v. de rookproductie uit de randen. Deze randen zijn in de praktijk aansluitingen op andere constructiedelen (wand, vloer, plafond) en zijn veel minder onderhevig aan grotere deformatie op grotere schaal.

¹⁵ Eenheid m² ontstaat uit debiet in m³/s maal rookdichtheid in m⁻¹ maal tijd.

¹⁶ Onder een thermisch zwaar buitenblad wordt hier een buitenblad met grote warmteweerstand verstaan.

Het in de proeven gemeten rookdebiet vanuit het oppervlak van de constructie aan de koude zijde bedraagt (ruim) minder dan 50 m². De grootste rookhoeveelheden kwamen op zodanige plaatsen vrij vanuit de omranding dat deze rook in een praktijktoepassing grotendeels in de brandruimte zou vrijkomen.

Het totaal van vrijkomende rook bedroeg bij geen enkele constructie meer dan 100 m². Deze resultaten gelden voor constructies met een blootgesteld oppervlak van ruim 1,4 m², een naad in het oppervlak van 1,2 m, en ca. 5 m rand/aansluitnaad.

De rook kwam bij de constructies met een thermisch zwaar buitenblad (hier gipsbeplating) vooral de 2^e helft van de brandwerendheids-periode vrij, bij een thermisch licht buitenblad gemiddeld eerder.

3.4 Theoretische maximum-waarden

Met een korte berekening kan worden aangegeven wat de maximale hoeveelheid rook is die uit een constructie afkomstig kan zijn als alle ontledings- en verbrandingsproducten aan de koude kant van de constructie zouden vrij komen. Deze situatie zal nooit optreden bij een brandwerende scheiding, maar geeft een absoluut plafond aan voor de vrijkomende rook van brandbare materialen.

Het rookpotentieel van polystyreen- en polyurethaanschuim bedraagt bij een slecht geventileerde brand respectievelijk maximaal ca. 1500 en ca. 800 m²/kg (zie bijlage B). Voor ontledingsproducten ligt dit voor beide stoffen zeer indicatief maximaal op ca. 1500 m²/kg. Uitgaande van maximaal 5 kg brandbare isolatie per m² constructieoppervlak levert de constructie dan een maximale rookhoeveelheid¹⁷ van 5 kg x 1500 m²/kg = 7.500 m² per m² constructieoppervlak.

Gezien het feit dat de beschouwde brandwerende constructies aan het eind van hun brandwerendheidsduur een groot deel van de isolatie kwijt zijn, komt deze isolatie als ontledings- of verbrandingsproduct ergens vrij. Het hangt van de opbouw van de constructie af welk deel daarvan aan de warme/brand-zijde en welk deel aan de koude zijde vrij komt.

3.5 Bespreking van de resultaten

Proeven

Afhankelijk van de kritische factor in de rookproductie is een omrekening van de resultaten op kleine proefstukken naar grotere wandsecties evenredig met de naadlengte of met het oppervlak het meest reëel. De omrekening is uitgevoerd met een middeling tussen de verhouding in naadlengte en in oppervlakte, en uitgaande van verticale naden om de ca. 60 cm, leidend tot een vermenigvuldigingsfactor 7 respectievelijk 17 naar de 4-meter en 10-meter wandsectie.

Voor de wandsectie van 4 m lengte leidt dit tot een totale hoeveelheid rook van maximaal ca. 700 m², waarvan ruim minder dan de helft vanuit het oppervlak. De constructies met een thermisch zwaar buitenblad zitten hier nog ruim onder.

Voor de wandsectie van 10 m lengte liggen deze waarden een factor 2,4 hoger (maximaal 1700 m²).

¹⁷ De rookhoeveelheid (in m²) is gelijk aan de rookstroom (in m²/s) gesommeerd over een tijdsinterval (in s).

Historische waarnemingen

De historische waarnemingen van Efectis gedurende jaren van brandwerendheidsproeven leveren meestal rookhoeveelheden op van maximaal een paar honderd m² tot enkele minuten voor beëindiging van de brandwerendheid, met extreme waarden tot 2000 m² in de eerste 10 minuten. In dit laatste geval neemt deze waarde daarna niet veel meer toe tot vlak voor beëindiging van de brandwerendheid.

Deze waarnemingen betreffen wandsecties van 3 x 4 m² zonder andere constructieonderdelen of ten hoogste een deur/kozijn-constructie erin. Voor de wandsectie van 10 m lengte liggen deze waarden een factor 2,5 hoger (verhouding in naadlengte én oppervlakte).

Theoretisch maximum

Het theoretisch maximum voor de hoeveelheid rook vanuit de constructie is circa een factor 100 groter dan de maximum-waarde van 100 m² voor 1,4 m², gemeten in de proeven, en een factor 45 groter dan de maximum-waarde van 2000 m² voor 12 m², in het verleden waargenomen in Efectis-proeven. Hiermee wordt duidelijk dat bij een brandwerendheidsproef veruit het grootste deel van de rook aan de warme/brandzijde vrijkomt, of anders gezegd dat minder dan 2% naar de koude zijde lekt. Bij een drukverschil van 50 Pa in plaats van 20 Pa (50 Pa bijvoorbeeld mede door wind en schoorsteeneffect) is dit maximaal het dubbele.

Het theoretisch maximum is gezien de ervaring tijdens proeven van weinig praktisch nut, maar geeft een absoluut plafond aan. Voor slecht lekdichte constructies kan het percentage dat naar de koude zijde weg lekt groter zijn dan de genoemde 2%. Deze hoeveelheid wordt echter beperkt door de brandwerendheidscriteria.

Uitgangspunten voor de vluchtconditie-berekeningen

Op basis van voorgaande resultaten zijn gemiddelde en “zeer hoge” (ruwe indicatie 5% overschrijdingskans) waarden voor de berekeningen gekozen overeenkomstig de werkwijze in bijlage B. Daarbij is een onderscheid gemaakt tussen constructies met een thermisch lichte en met een thermisch zware buitenbeplating. De gekozen waarden zijn onafhankelijk van de aanwezigheid van een deur in de wand, omdat de extra naadlengte daarvan relatief beperkt is.

In de drie gebruikte configuraties komen twee wandsecties voor: een 4 meter wand zonder deur (in de kamer-configuratie (1)) en een 10 meter wand met een deur (in de gang- en eetzaal-configuraties (2+3)).

Voor de 4m-wandsectie is op basis van bovenstaande resultaten een gemiddelde rookproductie gedurende 30 minuten brandwerendheidsduur ingeschat van 200 m² voor constructies met thermisch zware beplating en 500 m² voor thermisch lichte beplating; als zeer hoge waarden worden hiervoor 400 m² en 1000 m² gekozen.

Voor de 10m-wandsectie zijn de waarden een factor 2,5 hoger: gemiddelde waarden 500 m² en 1250 m², zeer hoge waarden 1000 m² en 2500 m².

Totale rookproductie voor 4 meter wandsectie zonder deur			
		Wandbeplating:	
		thermisch zwaar	thermisch licht
Rookstroom:	gemiddeld	200 m ²	500 m ²
	zeer hoog	400 m ²	1000 m ²

Totale rookproductie voor 10 meter wandsectie met deur			
		Wandbeplating:	
		thermisch zwaar	thermisch licht
Rookstroom:	gemiddeld	500 m ²	1250 m ²
	zeer hoog	1000 m ²	2500 m ²

Tabel 1: Totale rookproductie (in m²) vanuit 4m-wandsectie zonder deur en vanuit 10m-wandsectie met deur, bij gemiddelde en zeer hoge rookstromen vanuit de wand, voor wanden met thermisch zware en lichte buitenbeplating.

Naast de totale hoeveelheid rook gedurende de beschouwde 30 minuten periode is ook het moment van productie van belang. De rook vanuit een constructie met thermisch zwaar buitenblad (gips-beplating bijvoorbeeld) wordt in de 2^e helft van de brandwerendheids-periode en toenemend in de tijd geproduceerd. Voor een constructie met thermisch licht buitenblad komt in aanvulling daarop een korte rookstroom in een relatief vroeg stadium vrij (indicatief: vanaf ca. 6 à 10 minuten) met een rookhoeveelheid van dezelfde ordegrrootte als de hoeveelheid in de rest van de brandwerendheidsduur.

4 Rooktransport door brand- en rookwerende scheidingsen

4.1 Relevante parameters

In dit hoofdstuk worden de eigenschappen van de rookstroom¹⁸ geschat die vanuit een brandruimte door een brandwerende constructie een aangrenzende ruimte (de “direct bedreigde ruimte”) binnen stroomt. Hiervoor zijn de volgende vragen van belang: welke hoeveelheid rook, welke rookdichtheid, en welke samenstelling en temperatuur van de rook?

De volgende parameters zijn van belang om deze vragen te beantwoorden, en worden daarom kort beschreven.

Rookdebiet (in m³/s):

Het rookdebiet door openingen, d.w.z. de volumestroom aan rookgassen, is afhankelijk van de grootte, en enigszins van de vorm, van de openingen en het drukverschil erover.

Brandwerende en rookwerende scheidingsen die voldoen aan de wettelijke eisen zijn niet rookdicht. De criteria voor brandwerendheid stellen weliswaar beperkingen aan de openingen die in een brandwerende scheiding aanwezig mogen zijn onder de genormeerde testcondities, maar een deur met drempelkier van bijvoorbeeld 1m bij 20 mm en overige openingen van 10⁻² m² kan nog goed binnen die beperkingen vallen.

De openingen rond doorvoeringen zijn gelimiteerd per doorvoering. Bij een gangbaar aantal doorvoeringen is in een wandsectie van enkele meters lang (en standaard verdiepingshoogte) een gezamenlijk oppervlak van 10⁻² m² van die openingen goed mogelijk terwijl de brandwerendheid van de scheiding behouden blijft.

Van rookwerende scheidingsen zou kunnen worden verwacht dat ze weinig rook doorlaten, dat is echter (nog) niet zo. De rookwerende eigenschap van rookscheidingsen is nog gedefinieerd in de vorm van brandwerendheid, waarbij de rookwerendheid in tijd 1,5 maal de brandwerendheid van de scheiding bedraagt. Het bovenstaande voorbeeld van geaccepteerde openingen in brandwerende scheidingsen geldt daarom ook (nog) voor rookwerende scheidingsen.

Sinds enkele jaren bestaat voor deuren de optie om een “echte” rookwerendheid (d.w.z. lektheid) te bepalen met de Europese beproevingsmethode EN 1634-3. Deze methode is nog niet aangewezen vanuit de prestatie-eisen van het Bouwbesluit, maar staat gepland om te worden aangewezen vanuit het nieuwe Bouwbesluit (via NEN 6075).

Gezien het voorafgaande wordt in dit onderzoek de schatting van het rooktransport door brand- en rookwerende scheidingsen uitgevoerd aan de hand van de lekopeningsen die mogelijk zijn in een brandwerende scheiding zonder dat de brandwerendheid teniet wordt gedaan. Vooruitlopend op de nieuwe wettelijke eisen die gebruik maken van de “echte” rookwerendheid is de schatting van het rooktransport in dit onderzoek ook rekening gehouden met lekopeningsen die aan (mogelijke) nieuwe wettelijke criteria voldoen.

¹⁸ De rookstroom (in m²/s) uit een opening is per definitie gelijk aan het rookdebiet (in m³/s) uit die opening vermenigvuldigd met de optische rookdichtheid (in m⁻¹) in de opening.

De rookstroom (in m²/s) die de brand produceert is te berekenen uit de verbrandingssnelheid, en is gelijk aan het rookpotentieel (in m²/kg) vermenigvuldigd met de verbrandingssnelheid (kg/s)

Overigens zijn veel lekopeningen in brandwerende scheidingen niet permanent zo dicht als voor de beoogde brandwerendheid nodig is. Er wordt dan bijvoorbeeld gebruik gemaakt van materialen die bij verhitting opschuimen en zo openingen afdichten; dit geldt bijvoorbeeld voor deurkieren en luchtroosters. Dat opschuimen wordt geactiveerd wanneer het langstromende gas een temperatuur heeft van ten minste ca. 200 °C. In de beginfase van brand is het rooktransport dus vaak groter dan met de hiervoor aangegeven opzet bepaald. Bij invoering van de “echte” rookwerendheid zal dit aspect grotendeels afwezig zijn. Dit aspect wordt hier verder niet meegewogen.

Bij brand is de relatieve druk aan de hete zijde het grootst bovenin de ruimte. De rook komt hierdoor vooral of alleen door openingen bovenin de brandruimte naar buiten. Indien de brandruimte gemiddeld dezelfde druk heeft als de aangrenzende ruimte(n), dan zal door de kier onder een deur geen rook komen, maar juist verse lucht de brandruimte in stromen. Pas bij gemiddelde overdruk in de brandruimte kan de onderkier rook doorlaten. In bijlage B is een schatting van realistische rookdebieten uitgewerkt.

Het drukverschil over de openingen is, naast de grootte van de openingen, de belangrijkste factor voor het debiet erdoor. Dit drukverschil wordt in gebouwen veroorzaakt door winddruk op de gevels, temperatuurverschillen (lokale verschillen en schoorsteeneffect), expansie door opwarming bij de brand en door ventilatiesystemen. De drukken¹⁹ veroorzaakt door ventilatiesystemen kunnen in het beginstadium van een brand een belangrijke invloed hebben op de rookverspreiding, maar zijn over een langere brandduur gerekend van ondergeschikt belang. Expansie door opwarming kan grote drukverschillen veroorzaken, maar het verschijnsel is van korte duur (gedurende de groeifase van de brand). Het drukverschil door het schoorsteeneffect is vooral afhankelijk van de indeling van het gebouw en de plaats van de scheiding daarin. De lokale temperatuurverschillen en de winddruk zijn over de gehele brand genomen meestal de dominante factoren, waarbij de wind de meest onvoorspelbare is.

Rookdichtheid (in m^{-1}):

De rookdichtheid²⁰ van de rook die door een opening in een constructie vanuit de brandruimte komt, is (ongeveer) gelijk aan de rookdichtheid in de brandruimte nabij de opening (als we een bijdrage van de constructie zelf hier uitsluiten). Deze rookdichtheid is sterk afhankelijk van het verloop van de brand. Van belang zijn bijvoorbeeld de aanwezige brandbare materialen, de ventilatiecondities en de lokale temperaturen waarbij de verbranding plaats vindt.

De gegeven dichtheid is relevant tot het moment van uitstroming uit de opening; direct daarna wordt omgevingslucht ingemengd, waardoor de rookdichtheid en de rooktemperatuur afnemen, en het debiet toeneemt.

¹⁹ Ventilatiesystemen kunnen (naast de opgewekte drukken) belangrijk zijn voor rookverspreiding als rook zich via het kanalenstelsel kan verspreiden. Dit hangt vooral af van het drukniveau in de kanalen en het moment van sluiten van mogelijk aanwezige brandkleppen.

²⁰ Met rookdichtheid wordt in dit rapport bedoeld de optische rookdichtheid per m, betrokken op de 10 log. De rookdichtheid is een maat voor de verzwakking van de intensiteit van een lichtbundel die zich door rook voort plant. De rookdichtheid (in m^{-1}) is bij benadering evenredig met de hoeveelheid verbrande brandstof (in kg). De evenredigheidsfactor voor een ruimte van $1 m^3$ is gelijk aan het rookpotentieel (in m^2/kg).

Rooksamenstelling:

De samenstelling van de geproduceerde rook van compartiments-branden (branden in gebouwen) hangt zowel af van de verbrande materialen als de wijze van verbranding. In compartiments-branden met onvolledige verbranding door een tekort aan zuurstof zijn de toxische effecten van koolmonoxide meestal dominant ten opzichte van de toxische effecten van andere stoffen. Volledig ontwikkelde compartiments-branden hebben meestal een tekort aan zuurstof (zijn “ventilatiebeheerst”). Bij aanwezigheid van grote hoeveelheden van dezelfde materialen (bijvoorbeeld in opslag-magazijnen) kan het toxische effect van de ontledings- en verbrandingsproducten van deze materialen zeker wel dominant zijn; dit gebouwtype valt echter niet binnen het kader van dit onderzoek. Zie voor een nadere bespreking van de rooksamenstelling en de toxische eigenschappen van rook bijlage C.

De wetgeving stelt alleen prestatie-eisen aan de optische dichtheid en de temperatuur van rook, niet aan de samenstelling of de toxiciteit daarvan. In de bouwregelgeving is namelijk het uitgangspunt dat beperking van rookverspreiding en goede en voldoende vluchtroutes de benodigde veiligheid bieden; de verblijfstijd in de rook wordt daarbij verondersteld zo kort te zijn dat de toxiciteit nog geen belangrijk effect heeft. Deze aanname is vaak reëel, maar niet altijd, bijvoorbeeld niet als de persoon in kwestie niet zelfstandig kan vluchten en niet tijdig wordt geholpen.

Rooktemperatuur:

De temperatuur van de rook die door een opening vanuit de brandruimte komt, is gelijk of iets lager dan de temperatuur in de brandruimte nabij de opening; de rook kan gedeeltelijk afkoelen aan de opening. Als veilige aanname is de lokale temperatuur in de brandruimte te gebruiken.

De temperatuur in de brandruimte is sterk afhankelijk van het verloop van de brand. Van belang zijn bijvoorbeeld de aanwezige brandbare materialen en de verdeling ervan in de brandruimte, de aard en de plaats van de ontstekingsbron, de ventilatiecondities en de rookvrije onderlaag in de brandruimte, en de warmte-eigenschappen van de wanden.

4.2 Bespreking van de rekenresultaten

In bijlage B zijn berekeningen gepresenteerd van rookdebieten en rookdichtheden die realistisch zijn voor brandwerende scheidingen die voldoen aan de wettelijke eisen.

De spreiding in de rookdichtheid in brandruimten is groot, maar zal²¹ bij een volledig ontwikkelde brand als indicatie tussen 10 en 50 m⁻¹ liggen in brandruimten van standaard verdiepingshoogte²², met extreme waarden tot ca. 100 m⁻¹.

De rookdebieten bedragen voor brandwerende scheidingen, na activeren van eventuele opschuimende afdichtingsmaterialen en bij een gangbaar hoge druk door wind- en schoorsteeneffect van 20 Pa, gemiddeld ca. 0,08 m³/s, met een gangbaar hoge waarde van 0,16 m³/s. Daarbij is uitgegaan van een wandsectie van 10 meter lengte en verdiepingshoogte, met daarin een deur en enkele doorvoeringen. Voor een wandsectie van 4 meter zonder deur en met enkele doorvoeringen zijn deze waarden respectievelijk 0,005 m³/s en 0,01 m³/s.

²¹ Gedurende een deel van de brand kan (lokaal) een rookvrije onderlaag aanwezig zijn. De genoemde rookdichtheid is dan die van de rooklaag.

²² Bij grotere hoogten bestaat meer kans op (enige mate van) stratificatie en verdunning van rook.

Het rooktransport door de constructie ligt hierdoor op waarden van gemiddeld 1,6 m²/s, met een gangbaar hoge waarde van ca. 8 m²/s voor de 10m-wandsectie en op gemiddeld 0,1 m²/s, met een gangbaar hoge waarde van ca. 0,5 m²/s voor de 4m-wandsectie.

De berekende waarden voor het rooktransport door de constructie bedragen op basis van het voorafgaande over een periode van 30 minuten brandwerendheidsduur respectievelijk krap 3.000 m² en 15.000 m² als gemiddelde en zeer hoge waarde voor de 10m-wandsectie met deur; en respectievelijk krap 200 m² en 1000 m² als gemiddelde en zeer hoge waarde voor de 4m-wandsectie.

Naast de totale hoeveelheid rook gedurende de beschouwde 30 minuten periode is ook het moment van vrijkomen van belang.

De rookverspreiding door de constructie start al in een vroeg stadium, in principe vanaf het moment dat rook wordt geproduceerd in de brandruimte. Voor de groeifase is als grove schatting aangenomen dat de rookdichtheid kwadratisch in de tijd toeneemt totdat bij flash-over de maximum waarde wordt bereikt²³.

De rookdichtheid zal tijdens de volledig ontwikkelde brand, zolang het merendeel van de brandstof nog niet verbrand is, niet veel variëren. De aanname dat deze constant is lijkt hier verantwoord.

We kunnen de bovenstaande debietwaarden in deze paragraaf vergelijken met de nieuwe wettelijke rookwerendheids-criteria voor deuren die waarschijnlijk zullen worden opgenomen in het eerstvolgende Bouwbesluit. Deze zullen waarschijnlijk worden uitgedrukt in eenheden S_m en S_a van rooklekkage conform EN 13501-2 en EN 1634-3.

Het gaat bij de S_m-waarde om een lekdebiet van 20 m³/h (ca. 6•10⁻³ m³/s) bij 50 Pa drukverschil over een enkele deur. Dit is, rekening houdend met het drukverschil, ongeveer een factor 20 minder dan op basis van een brandwerende scheiding (met geactiveerde afdichting) te verwachten is. Dit criterium geldt voor lage rooktemperaturen (de metingen in de proeven voor S_m vinden plaats bij 200°C), bij hoge temperaturen kan de lekkage weer toenemen tot die van traditioneel brandwerende scheidingen. Overigens geeft het 200 °C-criterium niet alleen informatie over de beginfase van de brand. Voor deuren op afstand van de brand kan deze temperatuur representatief zijn voor de thermische belasting gedurende de gehele brandduur.

Het criterium voor de S_a-waarde is veel minder streng: voor een enkele deur en bij 25 Pa drukverschil en omgevingstemperatuur gaat het om ca. 16 m³/h (ca. 4•10⁻³ m³/s) door de boven- en zijkieren van de deur, maar de kier onder de deur wordt niet meegeteld. Een maximale onderkier van 25 mm veroorzaakt overigens bij dat drukverschil ca. 200 m³/h lekverlies, een lekdebiet dat niet veel afwijkt van dat van een gewone brandwerende deur²⁴.

De S_m- en S_a-criteria geven geen direct beeld van de invloed van de rook op de vluchtcondities. Daarvoor is ook informatie over de rookdichtheid nodig, een eigenschap die hoofdzakelijk afhangt van de inventaris van een gebouw en niet van de bouwmaterialen (en waaraan via de bouwregels dus geen eisen zijn te stellen, hoogstens via de gebruiksregels).

²³ De schatting is niet erg kritisch in de uiteindelijke resultaten, een sterke vereenvoudiging is hier dus verantwoord.

²⁴ De S_a-eis aan een deur is echter wel nuttig in aanvulling op de brandwerendheidseis, omdat ook rook die slechts weinig warmer is dan de omgeving vaak dichters is aan het plafond dan aan de grond van een ruimte. De S_a-eis stelt aan de hoger gelegen kieren (alle kieren uitgezonderd die aan de grond) zwaardere eisen dan de brandwerendheid gemiddeld doet.

5 Vluchtcondities in de direct bedreigde ruimten

5.1 Rookverspreiding-scenario's

De vluchtcondities in een vluchtroute of verblijfsruimte aan de niet-brandzijde van een inwendige brand- of rookwerende scheiding kunnen worden bedreigd door rook die uit openingen in de scheiding deze direct bedreigde ruimten binnen stroomt. Deze rook kan afkomstig zijn vanuit de achterliggende brandruimte en vanuit de constructie zelf. Beide rookstromen zijn besproken in de voorafgaande hoofdstukken.

In dit hoofdstuk wordt de invloed geschat van die rook op de vluchtcondities in de direct bedreigde ruimte.

Bij uitstroming van de rook uit de openingen van de scheiding mengt deze stroming omgevingslucht in waardoor het debiet toeneemt en de rookdichtheid, de concentraties van rookgassen en de temperatuur omgekeerd evenredig afnemen. De vluchtcondities in de direct bedreigde ruimte hangen naast de eerder geschatte rookstromen dus ook af van de mate van inmenging van omgevingslucht bij verspreiding in de bedreigde ruimte.

De uitersten hierin zijn a) volledige opmenging van de rook en b) beperkte opmenging door beperkt opstijgen naar het plafond en langzame horizontale verspreiding, leidend tot een rooklaag aan het plafond.

In de praktijk zullen binnen de direct bedreigde ruimte verschillen in dichtheid van de rook optreden. Dit zijn zowel verschillen in de hoogte als, in ruimten van enige omvang, verschillen in posities in het horizontale vlak.

Bij permanent vrijkomende rook vanuit de brandwerende constructie in de direct bedreigde ruimte zal lokaal een relatief grote rookdichtheid optreden. Deze mengt zich langzaam op en verspreidt zich op die manier over de ruimte. In een kleine ruimte zal dat snel tot relatief homogene opmenging kunnen leiden; in grote ruimten kunnen grote rookdichtheidsverschillen lang bestaan.

De berekeningen gepresenteerd in dit hoofdstuk gaan uit van volledige opmenging. In de praktijk kunnen de rookconcentraties dus lokaal groter zijn en elders in de ruimte kleiner dan het hier berekende gemiddelde. Dit geldt met name voor een rooklaag aan het plafond. De meest ongunstige situatie treedt op als de rookvrije onderlaag net niet hoog genoeg is om er veilig door te vluchten. De concentraties in de rooklaag kunnen dan een factor drie groter zijn dan in de volledig gemengde situatie; de zichtlengte is dan een factor drie kleiner. Overigens maakt dit weinig uit voor de beoordeling van het relatieve belang van beide besproken rookstromen.

In de praktijk gaat het binnen de hier beschreven tijdsduur zeker niet alleen om rookverspreiding naar de aangrenzende ruimte, de direct bedreigde ruimte, maar ook om rookverspreiding naar verder gelegen ruimten, die via de aangrenzende ruimte en via andere verbindingen vanuit de brandruimte kunnen worden bereikt. Vluchtcondities kunnen in de direct bedreigde ruimte al snel onhoudbaar zijn, d.w.z. dat vluchten erdoor (of verblijven erin) niet meer mogelijk is. In dit onderzoek wordt de concentratie in de direct bedreigde ruimte echter ook als maat gebruikt om de bedreiging van verder gelegen ruimten inzichtelijk te maken. Een vergelijk tussen op zich voor vluchten onacceptabele rookdichtheden blijft daarom relevant.

5.2 Vluchtcriteria

De nota van toelichting bij het Bouwbesluit 2003 verwijst in de afdeling over grote brandcompartimenten naar rapporten waarin criteria voor veilig vluchten zijn opgenomen. In het betreffende TNO-rapport 96-CVB-R0330(3) is als criterium vermeld:

- de onderzijde van de rooklaag boven de 2,5 m en een rooklaagtemperatuur niet meer dan 200 °C, of
- een rooklaag onder 2,5 m, en een zichtlengte ≥ 30 m voor lichtgevende voorwerpen²⁵.

Gezien het onderwerp van dit onderzoek, rooklekkage door en uit kleine openingen in (inwendige brandwerende) scheidingswanden, is de kans groot dat de rook ten minste enigszins gemengd is over de volle hoogte van de ruimte. We bekijken daarom de tweede optie (rooklaag onder de 2,5 m). Bij deze criteria is zonder veel hinder te vluchten, maar het zichtcriterium is hierin relatief zwaar. In de praktijk wordt de benodigde zichtlengte namelijk vooral bepaald door de mogelijkheid van oriëntatie in een ruimte en, als echte ondergrens, door de mogelijkheid om de vloer voor de voeten te kunnen zien zodat nog enige loopsnelheid is te handhaven. Oriëntatie is mogelijk als een en liefst meerdere begrenzingen van de ruimte zichtbaar zijn. Dit leidt voor gangen, opgedeeld in 30 meter lengte-secties, tot het criterium van 30 meter zicht of, vanwege de beperkte breedte, tot een criterium van enkele meters. In grote verblijfsruimten is het criterium dan vaak ten minste de helft van de grootste dimensie. Het criterium “de vloer voor de voeten kunnen zien” leidt tot een criterium van 2 meter zicht, van echt veilig vluchten is dan overigens geen sprake, maar de consequenties zullen dan vaak nog beperkt zijn.

Zoals eerder besproken stelt de wetgeving wat betreft de rook alleen prestatie-eisen aan de optische dichtheid en de temperatuur van rook, niet aan de samenstelling of de toxiciteit ervan. In de bouwregelgeving is namelijk het uitgangspunt dat beperking van rookverspreiding en goede en voldoende vluchtroutes de benodigde veiligheid bieden; de verblijfstijd in de rook wordt daarbij verondersteld zo kort te zijn dat de toxiciteit nog geen belangrijk effect heeft. Als de criteria voor veilig vluchten sterk overschreden worden is deze aanname niet meer reëel. Vluchtenden kunnen zich dan niet meer oriënteren. En deze aanname is in ieder geval niet reëel als de persoon in kwestie niet zelfstandig kan vluchten en niet tijdig wordt geholpen.

Indien door slechte vluchtcondities de verblijfsduur in de rook toch langer wordt dan verondersteld in de regelgeving, kan de toxiciteit relevant worden.

De toxiciteitsgrens is voor verstikkende gassen als CO en HCN niet goed uit te drukken in alleen een concentratie, omdat bij deze ook de blootstellingduur van belang is. Bij CO wordt gewoonlijk het product van concentratie en blootstellingduur gebruikt, waarden rond 30.000 ppm•min, dus bijvoorbeeld 1000 ppm gedurende 30 minuten, zijn gangbaar.

Voor HCN is dit product echter geen goede maat. De grenswaarde heeft bijvoorbeeld een omslagpunt tussen de ca. 80 ppm en 300 ppm waarin de toegestane tijdsduur met ten minste een factor 10 wordt gereduceerd. Waarden tot ca. 80 ppm worden daarom wel gebruikt als maximum waarde voor de vluchtvaardigheid van mensen. Gezien de benodigde veiligheidsmarge ligt de norm voor vluchtcondities meestal wat lager.

²⁵ Deze criteria zijn overigens minder streng dan de criteria genoemd in de nota van toelichting bij artikel 2.169, omdat de criteria van art. 2.169 bedoeld zijn voor een veel langere tijdsduur.

De temperatuur van de rooklaag is in dit onderzoek geen maatgevende vluchtcriterium. Door de relatief langzame opbouw van de rookdichtheid is de afkoeling aan de wanden groot; de zichtlengte en mogelijk de toxiciteit zijn hierdoor eerder bepalend.

5.3 Rekenresultaten voor de vluchtcondities

Optische rookdichtheid

De rookstromen door en vanuit de brandwerende constructie leiden in de bedreigde ruimte tot een toename van de rookdichtheid.

Indien de rookstroom vanuit beide bronnen tegelijk zou optreden en constant was in de tijd, dan waren de relatieve bijdragen van beide rookstromen duidelijk: bij een rookstroom door de constructie die een factor 4 groter is dan de rookstroom vanuit de constructie, neemt de concentratie in de bedreigde ruimten door de bijdrage vanuit de constructie met 25% toe, en wordt de concentratie die bereikt zou worden zonder deze bijdrage, in 80% van de tijd behaald²⁶.

De beide rookstromen treden echter niet gelijktijdig op en zijn niet constant in de tijd.

De rookstroom door de constructie is afhankelijk van de rookdichtheid in de brandruimte, een grootheid die toeneemt in de eerste fase van brand om na vlamoverslag geruime tijd grofweg constant te blijven.

De rookstroom vanuit de constructie kan bij thermisch lichte constructie-oppervlakken waarschijnlijk 6 tot 10 minuten na flash-over op gang komen, dan vaak korte tijd aanhouden, afnemen, en op een veel lager niveau doorgaan²⁷. Bij thermisch zware oppervlakken zal die rookstroom meestal pas na een belangrijk deel van de brandwerendheidsduur op gang komen.

De rookdichtheid is niet alleen afhankelijk van de rookstromen door en uit de constructie, maar ook van de normale dagventilatie in de bedreigde ruimte, vooral vanwege de lange beschouwde tijdsduur. In alle configuraties is een ventilatievoud van 2x per uur verondersteld.

In de voorgaande hoofdstukken is voor beide rookstromen een schatting gegeven. Deze resultaten worden in dit hoofdstuk gebruikt om een schatting te doen omtrent de rookdichtheden in de bedreigde ruimten in de drie eerder gepresenteerde kamer-, gang- en eetzaal-configuraties. De resultaten van deze berekeningen moeten vooral worden gezien als een illustratie van de condities die kunnen optreden in de bedreigde ruimten, en met name van de verhouding in bijdragen aan de condities veroorzaakt door de twee beschouwde rookstromen door en uit de constructie.

Aangenomen is dat na 300 s flash-over optreedt²⁸, en dat de rookstroom vanuit de scheidingswand voor thermisch zware constructie-oppervlakken vanaf 10 minuten na flash-over lineair in de tijd toeneemt. Voor thermisch lichte constructies wordt dit verloop ook aangehouden, maar daar bovenop komt een korte en relatief grote rookstroom vrij rond de 10 minuten (van 8 tot 12 minuten na flash-over). Voor de thermisch lichte constructies worden beide rookhoeveelheden (de hoeveelheid

²⁶ Dit geldt overigens alleen zolang de dagventilatie in de bedreigde ruimte nog weinig rook heeft afgevoerd.

²⁷ Met thermisch licht wordt hier bedoeld dat de warmteweerstand tussen de ruimte en de constructiekern klein is, wat tot gevolg heeft dat de kern snel opwarmt.

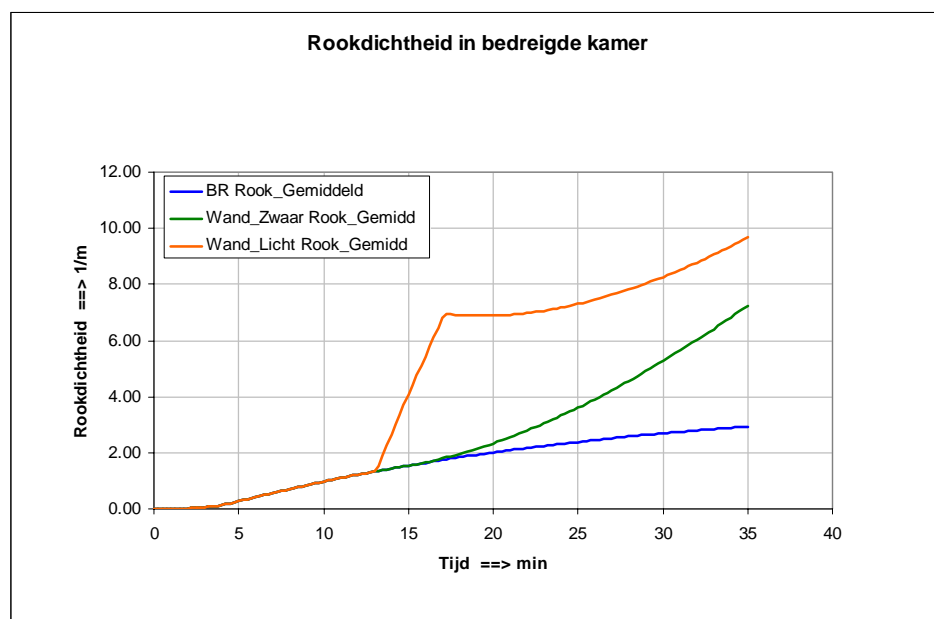
²⁸ Deze tijdsduur is niet erg kritisch, maar omdat vooral de snel tot volledige ontwikkeling komende branden in dit onderzoek van belang zijn, wordt een relatief korte, maar nog zeer reële tijdsduur gekozen.

vrijkomend rond 10 minuten en de totale hoeveelheid gedurende de lineaire toename) gelijk gesteld; dit is een grove aanname²⁹.

Dit verloop zal niet altijd overeenkomen met de praktijk, maar naar de ervaring van Efectis is het een zeer veel voorkomend verloop en een voor het onderzochte probleem redelijk maatgevend verloop. De berekeningen zijn uitgevoerd tot 30 minuten na flash-over, dus in totaal over een periode van 35 minuten. Voor verdere informatie over de berekeningsuitgangspunten, zie bijlage B.

Het verloop van de optische rookdichtheid in de tijd in de direct bedreigde ruimte wordt in figuur 2 getoond voor de gemiddeld verwachte rookstroom. De blauwe lijnen geven de rookdichtheid veroorzaakt door de rook uit de brandruimte (BR). De groene en rode lijnen geven de totale rookdichtheid indien de rook uit de constructie bij de blauwe lijn wordt opgeteld; de groene lijn voor constructies met thermisch lichte constructieoppervlakken, de rode lijn voor die met zware oppervlakken.

In bijlage E zijn ook de grafieken voor de zeer hoge rookstroom-waarden (ruwe indicatie: 5% overschrijdingskans) gegeven. Deze komen in grote lijnen qua verloop overeen met die voor de gemiddelde rookstroom-waarden, echter met rookdichtheidswaarden die een factor 3 tot 5 maal zo groot zijn.



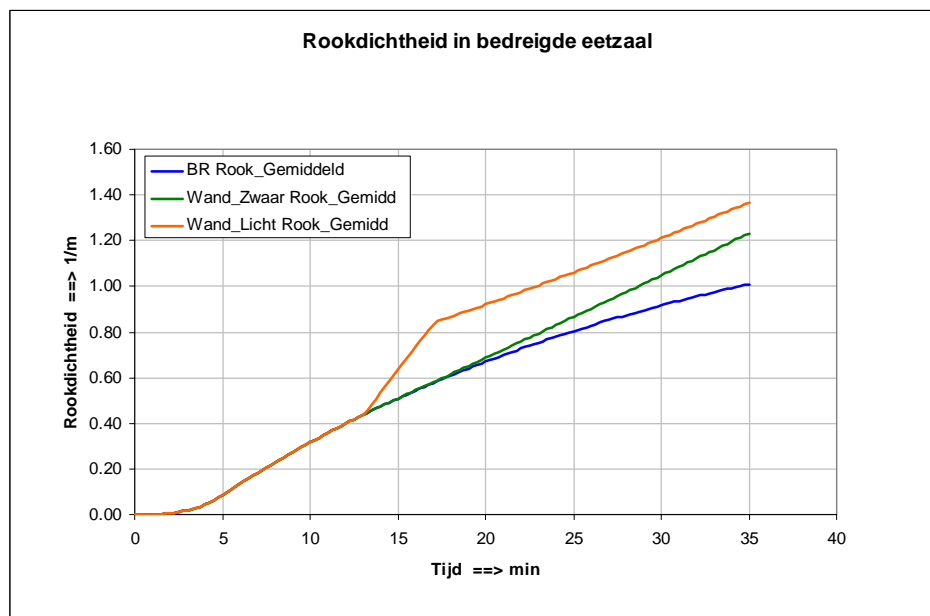
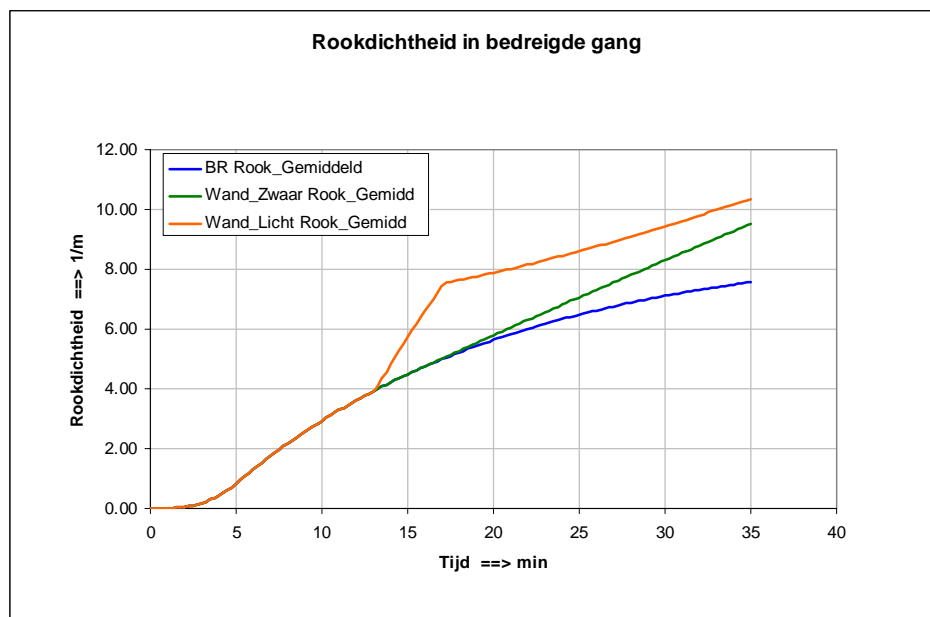
Figuur 2a: Rookdichtheden in de direct bedreigde ruimten voor de kamer (configuratie 1), bij gemiddelde waarden voor de rookstromen vanuit de wand (voor thermisch lichte en zware beplating) en de brandruimte (BR).

De zichtlengte voor verlichte, ofwel niet-lichtgevende voorwerpen in rook is gemiddeld³⁰ en bij benadering gelijk aan de reciproke waarde van de rookdichtheid (1/rookdichtheid). Dat wil zeggen dat de gemiddelde zichtlengte voor niet-lichtgevende voorwerpen bij een rookdichtheid van 0,1 m⁻¹ ongeveer 10 meter is. De eerder genoemde criteria van 30 m en 2 m zichtlengte komen dus overeen met 0,03 m⁻¹ en 0,5

²⁹ Deze aanname is gebaseerd op de proeven en met name de historische waarnemingen door Efectis.

³⁰ Het gaat om een "gemiddelde" zichtlengte, want deze hangt ook af van andere factoren dan de rookdichtheid, zoals de contrast van het voorwerp t.o.v. de achtergrond, de kleur rook en het zichtvermogen van de observerende persoon.

m^{-1} . Bedenk dat in een grote ruimte een grotere zichtlengte nodig is voor goede oriëntatie dan in een kleine ruimte.



Figuur 2b+c: Rookdichtheden in de direct bedreigde ruimten voor de gang en de eetzaal (configuratie 2+3), bij gemiddelde waarden voor de rookstromen vanuit de wand (voor thermisch lichte en zware beplating) en de brandruimte (BR).

Toxiciteit

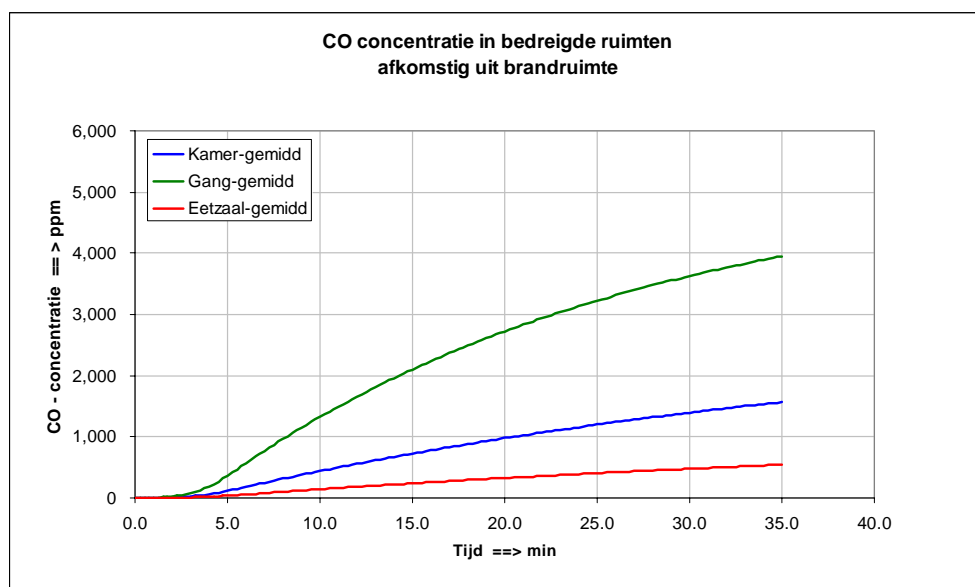
De productie van toxische gassen (in kg/s) is bij benadering evenredig met de verbrandingssnelheid (in kg/s) onder bepaalde ventilatiecondities. De evenredigheidsfactor wordt ook wel met opbrengst of 'yield' aangeduid. Dit betekent

dat de concentratie van een toxisch gas (in kg/m³) in een ruimte ook evenredig is met de hoeveelheid verbrande brandstof (in kg) in die ruimte.

Aangezien de rookdichtheid ook evenredig is met de hoeveelheid verbrande brandstof zijn de concentraties toxische gassen ook evenredig met de rookdichtheid onder bepaalde ventilatiecondities. Dit betekent dat kan worden volstaan met een berekening van het verloop van de rookdichtheid in de bedreigde ruimte en dat de concentraties van de toxische gassen direct uit dit berekende verloop kunnen worden afgeleid indien de ventilatiecondities constant worden verondersteld.

Onder de condities van gemiddelde rookdichtheid in de brandruimte volgt de evenredigheidsfactor³¹ tussen rookdichtheid en CO-concentratie uit de verhouding 20 m⁻¹ en 10 g/m³; onder de condities van gangbaar hoge rookdichtheid is die verhouding 50 m⁻¹ en 50 g/m³.

Het verloop van de CO-concentraties in de tijd in de drie direct bedreigde ruimten wordt in figuur 3 getoond voor de verwachte gemiddelde rookstroom-waarden. In bijlage E zijn ook de grafieken voor de zeer hoge rookstroom-waarden gegeven. Deze komen in grote lijnen qua verloop overeen met die voor de gemiddelde rookstroom-waarden, echter met concentratiewaarden die een factor 7 tot 10 maal groter zijn.



Figuur 3: CO-concentraties in de bedreigde ruimten, afkomstig uit de brandruimte, bij gemiddelde waarden en zeer hoge waarden voor de rookstromen vanuit de wand.

De HCN-concentratie in de bedreigde ruimten, afkomstig vanuit de constructie is moeilijker te kwantificeren; dit komt o.a. door de temperatuur-afhankelijkheid van de HCN-productie. Deze waarden zijn daarom niet grafisch uitgezet, maar grof kwalitatief ingeschat. De rookstroom vanuit de constructie zal in de eerste 10 minuten nog relatief weinig HCN bevatten (de HCN-opbrengst is bij een temperatuur tot ca. 700 °C relatief gering); in een latere fase kan de HCN-opbrengst tot 1 à 2% toenemen. De evenredigheidsfactor tussen rookdichtheid van de PUR-rookgassen en de HCN-

³¹ De evenredigheidsfactoren zijn verschillend vanwege het verschil in ventilatiecondities.

concentratie kan voor deze latere periode indicatief worden gesteld op 5 to 20 ppm HCN bij een rookdichtheid van 1 m^{-1} . Gezien de 10 tot 40 maal zo lage (strengere) criterium voor HCN t.o.v. CO, kan de toxische potentie van HCN uit de constructie belangrijker worden dan die van CO uit de brandruimte aan het eind van de beschouwde (35 minuten) periode. Daarvoor moet de rookstroom uit de constructie ten minste half zo groot zijn als die uit de brandruimte; dit is alleen het geval voor de kamer-configuratie.

Het duurt na de beschouwde periode waarschijnlijk nog geruime tijd totdat de HCN-concentratie in de kamer-configuratie qua toxiciteit de CO-toxiciteit overtreft; in geval van 30 minuten brandwerendheid van de constructie is deze beschouwing dan niet meer relevant.

Voor de polystyreen-rookgassen is geen overeenkomstige berekening of beschouwing gemaakt. De toxiciteit van de EPS-rookgassen is een factor 4 tot 10 geringer dan die van PUR-rookgassen, en vanuit de historische waarnemingen bestaat geen aanwijzing dat de hoeveelheid rookgassen vanuit constructies met EPS-isolatie belangrijk groter is dan vanuit constructies met PUR/PIR-isolatie.

5.4 Bespreking van de resultaten

In de voorafgaande twee hoofdstukken zijn schattingen gedaan van de rookstromen vanuit een brandwerende constructie en vanuit de brandruimte. Vervolgens is aan de hand van acht voorbeelden in elke configuratie³² getracht een inzicht te geven van de condities die zullen optreden in de direct bedreigde ruimten en de ruimten die verder van de brandruimte zijn gelegen.

Op basis van de schattingen van de totale rookstromen³³ (in m^2 ofwel $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) over de gehele tijdsduur) en de periode waarin deze rookstromen ongeveer vrij komen, zijn de volgende conclusies te trekken:

- De verhouding tussen de rookstromen (door de constructie)/(uit de constructie) is voor de 10m-wand met deur een factor 3 tot 6 voor de thermisch lichte constructies en een factor 6 tot 15 voor de thermisch zware constructies; voor de 4m-wand zonder deur is deze verhouding een factor $\frac{1}{2}$ tot 1 voor de thermisch lichte constructies en een factor 1 tot 2,5 voor de thermisch zware constructies. Deze verhoudingen moeten als indicatief worden gezien;
- De eerste 10 à 15 minuten na ontstaan van brand is de rookproductie in de constructie nog niet gestart. De dichtheid van de brandwerende constructie is dan nog volledig maatgevend.
- In de gang-configuratie verslechteren de condities het snelst door aanwezigheid van een deur tussen gang en brandruimte en het beperkte volume van de gang.

De acht voorbeelden geven nog verder inzicht in mogelijke vluchtcondities, maar het is belangrijker om bij deze verdere kwantificering de spreiding in de invoergegevens, zoals toegelicht in voorgaande hoofdstukken en bijlage B, in het oog te houden.

³² Voor elke configuratie zijn voorbeeld-berekeningen gedaan bij 2 waarden voor de rookstroom uit de brandruimte en vier waarden (twee voor thermisch lichte, 2 voor thermisch zware constructie-oppervlakken) voor de rookstroom uit de constructie.

³³ Totaal rooktransport door de constructie voor 10m-wand met deur gemiddeld 3.000 m^2 , zeer hoog 15.000 m^2 ; voor 4m-wand zonder deur gemiddeld 200 m^2 , zeer hoog 1000 m^2 .

Totale rookstroom vanuit de constructie voor 10m-wand en lichte/zware constructie-oppervlakken gemiddeld $1000/500 \text{ m}^2$, zeer hoog $2500/1000 \text{ m}^2$; voor 4m-wand gemiddeld $400/200 \text{ m}^2$, zeer hoog $1000/400 \text{ m}^2$.

Het opvallendste resultaat in de voorbeeldberekeningen is dat voor alle scenario's de condities in de bedreigde ruimte al binnen 15 minuten na start van de brand onacceptabel worden, zelfs indien het 2 meter zicht criterium wordt gebruikt. In de gangconfiguratie treedt deze situatie zelfs al op vóór flash-over. Bedenk hierbij dat deze resultaten zijn gebaseerd op een hoge, maar gangbare overdruk in de brandruimte, veroorzaakt door wind en het schoorsteeneffect. Deze conditie is dus niet representatief voor de gemiddelde situatie, maar voor een gangbare ongunstige situatie. Binnen de gebruikte aannamen worden de vluchtcondities minder slecht in (als ruwe indicatie) 80% van de gevallen en slechter in de overige gevallen.

Voorgaande conclusies gelden met, maar ook al zonder, de bijdrage vanuit de constructie. De bijdrage vanuit de constructie begint namelijk pas rond de 15 minuten een rol te spelen.

Duidelijk is dat de bijdrage vanuit de constructie een zeer belangrijke en in de kamerconfiguratie voor thermisch lichte constructies qua zicht zelfs dominante invloed heeft op de verslechtering van de verblijfs- en vluchtcondities. Het belang daarvan in juist deze configuratie wordt veroorzaakt door het geringe volume van deze bedreigde kamer en het ontbreken van een deur tussen de brandruimte en deze ruimte, waardoor de rookstroom vanuit de brandruimte relatief gering is t.o.v. de rookstroom uit de constructie.

In beide andere configuraties is de rookstroom vanuit de brandruimte (sterk) dominant als de gemiddelde rookstromen met elkaar worden vergeleken. Natuurlijk kan de situatie met zeer hoge rookstromen uit de constructie en gemiddelde (of minder dan gemiddelde) rookstromen uit de brandruimte ook optreden. In die gevallen zijn de beide rookstromen ongeveer van gelijke grootte (of is de rookstroom uit de constructie dominant).

Voor een verdere vergelijking van gemiddelde met extreme rookstromen, zie de figuren; let daarbij op de verschillende schalen op de rookdichtheid-as.

Zoals eerder aangegeven gaat het in de praktijk binnen de hier beschreven tijdsduur zeker niet alleen om rookverspreiding naar de aangrenzende ruimte, de direct bedreigde ruimte, maar ook om rookverspreiding naar verder gelegen ruimten. Een vergelijk tussen op zich voor vluchten onacceptabele rookdichtheden binnen de direct bedreigde ruimten blijft daarom relevant als maat van bedreiging van de overige ruimten.

Indien de vergelijking wordt gemaakt op basis van de verwachte nieuwe rookwerendheidscriteria is de vergelijking moeilijker. Het gaat dan feitelijk om het inschatten van de rookwerendheid van deze scheidingen bij hoge brandtemperaturen, terwijl de rookwerende eigenschap slechts bepaald is bij maximaal 200 °C.

Enigszins naar analogie met de brandwerende binnenwand-producten geldt dat deze producten moeilijk te beoordelen zijn, omdat ze nog niet (veel) bestaan. De Europese markt moet zich namelijk nog aanpassen aan de nieuwe rookwerendheidseisen. Kijkend naar de eerste ontwikkelingen is de verwachting van Efectis dat voor de zij- en bovenkieren van de deuren vooral extra afdichtingen gebruikt worden die bij veel hogere temperaturen veel minder effect meer hebben. Mogelijk geldt dit in mindere mate voor de afdichtingen van de spleet onder de deuren.

Op basis hiervan is de verwachting³⁴ dat het lekdebiet door brandwerende constructies met een rookwering conform de verwachte nieuwe rookwerendheidscriteria na enige

³⁴ Voor de duidelijkheid: Bij lage temperaturen tot 200 °C en waarschijnlijk nog wat hoger, is het effect van de extra rookwering wel significant. Dit is echter niet het temperatuurbereik waarbij het hier onderzochte effect van brandbare isolatiematerialen een rol speelt.

tijd blootstelling aan hoge temperaturen wel wat, maar niet significant minder zal zijn dan van traditionele brandwerende scheidingsen.

Bij invoering van de verwachte nieuwe rookwerendheidscriteria wordt de rookproductie vanuit de brandbare materialen in brandwerende scheidingsen dus relatief belangrijker in de totale rookstroom naar de bedreigde ruimte. Bij gebruik van het S_m -criterium is deze verschuiving in de beginfase van de brand van groot belang.

Zoals eerder aangegeven is de rooksamenstelling niet van groot belang zolang de vluchtcondities nog redelijk zijn, de zichtlengte is dan maatgevend. De toxiciteit kan van belang worden indien de verblijfsduur in de bedreigde ruimte veel langer is dan normaal voor vluchten nodig is, bijvoorbeeld bij een slapende of niet-zelfredzame persoon. De berekende CO-concentratie-maal-blootstellingsduur bereikt na 20 tot 25 minuten in de gang een waarde (hier gekozen grenswaarde 30.000 ppm•min) die de vluchtvaardigheid belangrijk beïnvloedt (eng.: incapacitation); de gang is overigens een ruimte waar zo'n langdurig verblijf niet gangbaar is. Hetzelfde geldt in de kamerconfiguratie na circa 35 minuten. In beide gevallen wordt binnen de beschouwde periode geen gebruikelijke³⁵ letale waarden bereikt.

Bij gelijke samenstelling van de rook zou het vergelijken van de rookstromen in de tijd een afdoende antwoord geven over het belang van beide rookbronnen voor de vluchtcondities. De samenstelling is echter niet gelijk. In de tweede helft van de beschouwde periode zal in het geval van PUR/PIR-isolatie vooral de HCN-concentratie van belang kunnen worden; dominant wordt de toxiciteit van HCN echter niet in de beschouwde periode, en bij 30 minuten brandwerendheid van de constructie is de vergelijking snel daarna niet meer relevant.

Onverbrande ontledingsgassen kunnen tot explosieve verbranding leiden indien de concentratie in (een deel van) een ruimte binnen de ontstekingsgrenzen ligt. Voor de meeste brandbare gassen ligt de onderste ontstekingsgrens (LFL, lower flammability limit) tussen 0,5% en 5%, voor sommige wat hoger. De grens ligt voor styreen, een belangrijk ontledingsproduct van EPS, binnen deze grenzen: op 1,1%. De waarde voor HCN en zeker CO ligt daarbuiten: 5,6% en 12,5%.

De bepaling van de ontstekingsgrenzen voor de mix van ontledings- en verbrandingsproducten die van brandbare materialen vrij komen, is een stuk complexer. Deze producten bestaan uit een mix van heel veel gassen en zeker bij de verbrandingsproducten zal slechts een beperkt deel daarvan nog verder kunnen verbranden.

Op basis van bovenstaande concentraties is het niet waarschijnlijk, maar ook niet onmogelijk, dat in de beschouwde periode voldoende gassen zich naar de bedreigde ruimte in de kamer- en gang-configuratie verspreiden om tot een ontsteekbaar mengsel te komen. De kans van ontsteking bestaat bij de hier als zeer hoog aangegeven rookstroom-waarden, zeker indien rekening houdend met een niet-homogene concentratie-verdeling. De bron van deze gassen ligt zowel in de rookstroom vanuit de brandruimte als de rookstroom uit de constructie; de verhouding hierin is moeilijk nauwkeurig te bepalen.

³⁵ Ook bij lagere concentraties dan zo'n gebruikelijke grenswaarde voor lethaliteit is het niet onmogelijk dat er een dodelijk slachtoffer valt, bijvoorbeeld bij slechte lichamelijke conditie van de betreffende persoon.

6 Opties voor eisen

Dit onderzoek is bedoeld als onderbouwing ter beantwoording van de hoofdvraag: “Tot welke vluchtcondities aan de niet-brandzijde kan de toepassing van brandbare isolatiematerialen in inwendige brand- en rookwerende scheidingen leiden?”.

Mede op basis van het antwoord op deze vraag zal de bevoegde autoriteit bepalen of aanpassing van de regelgeving nodig is. Daarbij is het gewenst een beeld te hebben bij de opties voor die aanpassing.

Deze opties worden hier gegeven los van de vraag of deze noodzakelijk zijn.

In de rapportage 2009-Efectis-R0824[rev.1] van het voorafgaande onderzoek (zie inleiding) zijn een aantal opties voor eisen gepresenteerd:

- Beter borging van de juiste toepassing van bouwproducten;
- Alternatieve testmethoden voor het beoordelen van brandgedrag van materialen³⁶. Het is onder de Richtlijn Bouwproducten onduidelijk of Nederland de vrijheid heeft binnen EU-wetgeving om deze methoden op te leggen.
- Eisen aan “kale” materialen als aanvulling op eisen aan de product-toepassing in een bouwwerk. Deze aanpak komt niet overeen met de filosofie van het Bouwbesluit.

Daarnaast zijn de volgende constructie-eisen bruikbare opties:

Het vereisen van een Fire Protection Ability

Dit betreft een eis aan het constructiegedrag. In het hiervoor genoemde Efectis-rapport werd al verwezen naar Frankrijk en Denemarken als landen die eisen stellen aan de brandbaarheid van isolatiematerialen tenzij deze materialen voldoende zijn afgeschermd. Het is deze afscherming die kan worden vereist in de vorm van de “fire protection ability”, de K-waarde in de brandwerendheid volgens EN 13501-2 en bepaald volgens EN 14135. Deze “fire protection ability” is het vermogen van een wand- of plafondbekleding om de materialen achter de bekleding gedurende een bepaalde tijd te beschermen tegen ontsteking, verkolen en andere beschadiging.

Een eis aan de afscherming van de brandbare materialen in de constructie heeft tot gevolg dat de ontleding en verbranding van die materialen wordt uitgesteld³⁷. Uitgaande van scheidingen met een gelijke brandwerendheid (in de zin van de traditionele brandwerendheids-parameters R, E en I) betekent dit dat scheidingen met een relatief zware en thermisch isolerende oppervlakken nodig zijn.

Evenals in de genoemde landen hoeft de fire protection ability alleen te worden toegepast bij een zekere brandbaarheid van de te beschermen materialen. Een eis aan deze brandbaarheid heeft, denkend in prestaties en niet in materialen, echter niet alleen consequenties voor brandbare isolatiematerialen, maar ook voor andere brandbare materialen in constructies. Hierdoor kan het gebruik van de fire protection ability, kijkend naar nu gangbare bouwproducten, bijvoorbeeld een complicatie leveren voor veel deuren (brandbare kern van bijvoorbeeld houtvezel) en beglazing (folies tussen de glaslagen).

Deze complicatie kan mogelijk worden vermeden door gebruik te maken van het gelijkwaardigheidsprincipe. Een andere mogelijkheid is om de in het buitenland wel eens gehanteerde begrenzing van een eis tot producten met beperkte dichtheid (“alleen

³⁶ Dit betreft het verbrandingsgedrag van materialen (eng.: reaction to fire), in tegenstelling tot het gedrag van constructies bij brand, de brandwerendheid (eng.: resistance to fire).

³⁷ Het betreft dus feitelijk een thermische weerstand.

voor materialen met een dichtheid van (bijvoorbeeld) $< 300 \text{ kg/m}^3$ toe te passen. Hiermee worden nu wellicht de gewenste materialen “getroffen”, maar het betreft een eis aan een eigenschap van het materiaal (de dichtheid) die niet rechtstreeks gekoppeld is aan de gewenste prestatie (weinig ontledingssgassen produceren), zodat ook materialen getroffen kunnen worden waarvoor de eis niet nodig is, of materialen niet getroffen worden waarvoor het wel nodig is.

Vereisen van een lekdichtheid

Dit betreft een eis aan het constructiegedrag. Zoals in het hiervoor genoemde Efectis-rapport aangegeven, kan een relatief slechte lekdichtheid leiden tot relatief grote rookstromen vanuit de constructie, ook binnen de brandwerendheids-criteria. Het zijn met name de constructies die thermisch licht en slecht lekdicht zijn, die ontledingssgassen in een vroeg stadium aan de koude zijde laten ontsnappen.

Een mogelijke beperking van dit effect is het stellen van een eis aan de lekdichtheid. Deze lekdichtheid zou bijvoorbeeld kunnen worden vereist in de vorm van de rookwerendheid volgens EN 13501-2 en EN 1634-3. Hierbij is overigens de aanname dat deze rookwerendheid nog een redelijke maat is voor de lekdichtheid van de koude kant van de constructie, als de warme kant tot hoge brandtemperaturen verhit is.

Aan een eis aan de lekdichtheid kleeft wel een probleem: het is de vraag of deze eigenschap mag worden opgelegd aan een constructieonderdeel (de wand) waarvoor in het Europese instrumentarium via de geharmoniseerde productnormen een dergelijke eigenschap niet is opgenomen. Zo nee, dan is de vraag of er een praktische weg om deze belemmering heen is.

Een mogelijke praktische weg “hier omheen” is het stellen van een van de eerder genoemde eisen (fire protection ability en/of een materiaalgedrag-eis), of een combinatie daarvan, waarbij de lekdichtheid van de wand naar analogie van EN 1634-3 als gelijkwaardige oplossing mogelijk is.

De eis aan de fire protection ability werkt waarschijnlijk directer op het verschijnsel dat moet worden voorkomen. Dit is vooral van belang omdat de eis een toepassing betreft waarvoor nog niet of nauwelijks producten bestaan, en die producten dus een opbouw en detaillering kunnen hebben die anders is dan nu verwacht.

De eis in de vorm van een lekdichtheid is meer in lijn met wat voor het nieuwe Bouwbesluit al gepland is voor deuren en mogelijk voor enkele andere constructieonderdelen.

7 Conclusies en aanbevelingen

Dit onderzoek betreft de gevolgen van toepassing van brandbare isolatiematerialen in inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies voor de vluchtcondities in de eerste 30 minuten na vlamoverslag. Het betreft de vluchtcondities aan de niet-brandzijde van de scheidingsconstructies. Deze worden bedreigd door twee rookstromen:

- de rook die, ontstaan door ontleding en verbranding van brandbare materialen in de constructie, vanuit de scheidingsconstructie de bedreigde ruimte in stroomt;
- de rook die, ontstaan in de brandruimte, vanuit de brandruimte door de (lekke) scheidingsconstructie de bedreigde ruimte in stroomt, waarbij hier wordt aangenomen dat de lekopeningen vallen binnen de huidige wettelijke³⁸ eisen voor brandwerendheid.

Onderstaand worden conclusies getrokken over de vluchtcondities in direct bedreigde ruimten, d.w.z. ruimten die alleen van de brandruimte gescheiden zijn door de onderzochte inwendige brandwerende constructies. Daarbij worden drie voorbeeld-configuraties gebruikt:

- een kleine kamer, gescheiden van de brandruimte door een 4 meter lange wand zonder deur,
- een gang, gescheiden van de brandruimte door een 10 meter lange wand met deur,
- een eetzaal, gescheiden van de brandruimte door een 10 meter lange wand met deur.

Het gaat het in de praktijk binnen de hier gehanteerde 30 minuten zeker niet alleen om rookverspreiding naar de aangrenzende ruimte, de “direct bedreigde ruimte”, maar ook om rookverspreiding naar verder gelegen ruimten. Een vergelijk tussen op zich voor vluchten onacceptabele rookdichtheden binnen de direct bedreigde ruimten blijft daarom relevant als maat van bedreiging van de overige ruimten.

De deelconclusies volgend uit dit onderzoek zijn als volgt samen te vatten:

- De rookdichtheid en toxiciteit van beide rookstromen (door en uit de constructie) kan, ruim binnen de beschouwde tijdsduur van 30 minuten na vlamoverslag, leiden tot levensbedreigende condities in de direct bedreigde ruimten indien deze ruimten niet groot zijn. In de voorbeeldberekeningen betrof het beide rookstromen naar de kamer en de gang (in configuraties 1 en 2) en de rookstroom vanuit de brandruimte naar de eetzaal (in configuratie 3).
- De rookstroom uit de constructie is ongeveer een factor 3 tot 15 kleiner dan de rookstroom door de constructie vanuit de brandruimte voor een 10m-wandsectie met deur. Voor een 4m-wandsectie zonder deur zijn de rookstroom uit de constructie en de rookstroom vanuit de brandruimte van ongeveer gelijke grootte (factor ½ tot 2,5).
- De rookstroom vanuit een constructie met thermisch lichte oppervlakken is ruw geschat ruim twee maal zo groot als die vanuit een constructie met thermisch zware oppervlakken en de rookstroom komt bij de thermisch lichte variant veel eerder op gang.

³⁸ De huidige wettelijke eisen voor zowel brand- als rookwerendheid zijn vastgelegd in de vorm van brandwerendheidseisen volgens NEN 6069, die vanuit het Bouwbesluit via NEN 6068 en voor rookwerendheid via NEN 6075, wordt aangewezen.

- De rookstroom vanuit de brandruimte neemt toe vanaf aanvang van de brand en bereikt, als eerste schatting, zijn maximum kort na vlamoverslag. De rookstroom vanuit de constructie wordt pas van belang enige tijd na vlamoverslag.
- De bijdrage van de rook vanuit de scheidingsconstructie heeft een zeer belangrijke en in de kamerconfiguratie voor thermisch lichte constructies qua zicht zelfs een dominante invloed op de verslechtering van de verblijfs- en vluchtcondities.
- De vluchtmogelijkheden in de direct bedreigde ruimten zullen, uitgaande van de lekkage van een brandwerende scheidingsconstructie die voldoet aan de wettelijke eisen, waarschijnlijk al vaak onacceptabel zijn voordat de rookstroom uit de constructie van belang wordt.
- De toxiciteit van de rookstroom uit de constructie is bij gebruik van PUR/PIR als isolatiemateriaal aan het einde van de beschouwde 30 min. brandwerendheidsperiode mogelijk van dezelfde orde grootte als de toxiciteit van de rookstroom vanuit de brandruimte. De toxiciteit komend vanuit de brandruimte is in de periode daarvoor belangrijker, en in de eerste helft van de beschouwde periode zelfs veel belangrijker.
- De invoering van een rookwerendheid op basis van EN 1634-3 voor scheidingsconstructies vergroot het relatieve belang van de rookstroom vanuit de constructie, omdat de rookstroom vanuit de brandruimte gedurende de beginfase van brand hierdoor wordt beperkt. Bij gebruik van het S_m -criterium is deze verschuiving vooral in de beginfase van de brand van groot belang.
- De “fire protection ability” (K-waarde voor brandwerendheid volgens EN 13501-2 en EN 14135) van de toplaag en de lekdichtheid van de constructie (op basis van EN 13501-2 en EN 1634-3), zijn eigenschappen waaraan bruikbare eisen kunnen worden gesteld ter beperking van de invloed van de rookstroom uit de constructie op de vluchtcondities.

Daaruit volgt de hoofdconclusie:

- De invloed van brandbare isolatiematerialen in inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies op de vluchtcondities in de eerste 30 minuten na ontstaan van brand, is over het algemeen niet dominant ten opzichte van de condities die door wettelijk³⁹ geaccepteerde rooklekkage in brand- en rookwerende constructies wordt veroorzaakt, maar de invloed kan wel significant zijn in de verslechtering van de vluchtcondities.

Op basis van deze conclusies adviseert Efectis Nederland als volgt:


- Het is, uitgaande van de huidige eisen, aan te bevelen aanvullende eisen te stellen aan inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies met brandbare isolatiematerialen, indien toegepast in gebouwen met een gebruiksfunctie mede gericht op minder-zelfredzamen.
- Bij wettelijke invoering van een rookwerendheid voor deuren volgens EN 13501-2 en EN 1634-3 is het sterk aan te bevelen om, vanwege de toename van de relatieve invloed van de brandbare isolatiematerialen op de vluchtcondities, aanvullende eisen te stellen aan de inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies met deze isolatiematerialen, indien toegepast in gebouwen met een functie mede gericht op minder-zelfredzamen. Dit geldt met name daar waar het S_m -criterium wordt gehanteerd.
- Indien wordt besloten wettelijke eisen te stellen aan inwendige brand- en rookwerende scheidingsconstructies, wordt geadviseerd deze te stellen in de vorm

³⁹ De huidige wettelijke eisen voor zowel brand- als rookwerendheid zijn vastgelegd in de vorm van brandwerendheidseisen volgens NEN 6069, die vanuit het Bouwbesluit via NEN 6068 en voor rookwerendheid via NEN 6075, wordt aangewezen.

van een “fire protection ability” (K-waarde voor brandwerendheid volgens EN 13501-2 en EN 14135) van de toplaag of in de vorm van een lekdichtheids-eis met gebruikmaking van EN 1634-3. Daarbij is aandacht nodig voor het ongewenst treffen met restricties van veilige toepassingen.



Ir. R.J.M. van Mierlo



Ir. A.D. Lemaire

Voor u ligt een rapport van Efectis Nederland BV (voorheen TNO Centrum voor Brandveiligheid). Efectis Nederland BV en het zusterbedrijf Efectis Frankrijk, zijn sinds 1-1-2008 volle dochters van de Efectis Holding, waarin TNO en het Franse CTICM, participeren. De activiteiten van het TNO Centrum voor Brandveiligheid zijn al sinds 1-7-2006 ondergebracht in Efectis Nederland BV. Dit is ingegeven door de internationale marktontwikkelingen en klantvragen. Om de klantvragen nog beter te kunnen beantwoorden, en een breder pakket aan diensten en faciliteiten van een hoge kwaliteit aan te kunnen bieden, is de internationale samenwerking verder uitgebreid. Dit is gedaan met ervaren, en in de brandveiligheidssector bekende, partners in Noorwegen (Sintef-NBL), Spanje (Afiti-Licof), Duitsland (IFT), de Verenigde Staten (South West Research Institute) en China (TFRI). Nadere informatie hierover is te vinden op onze website.

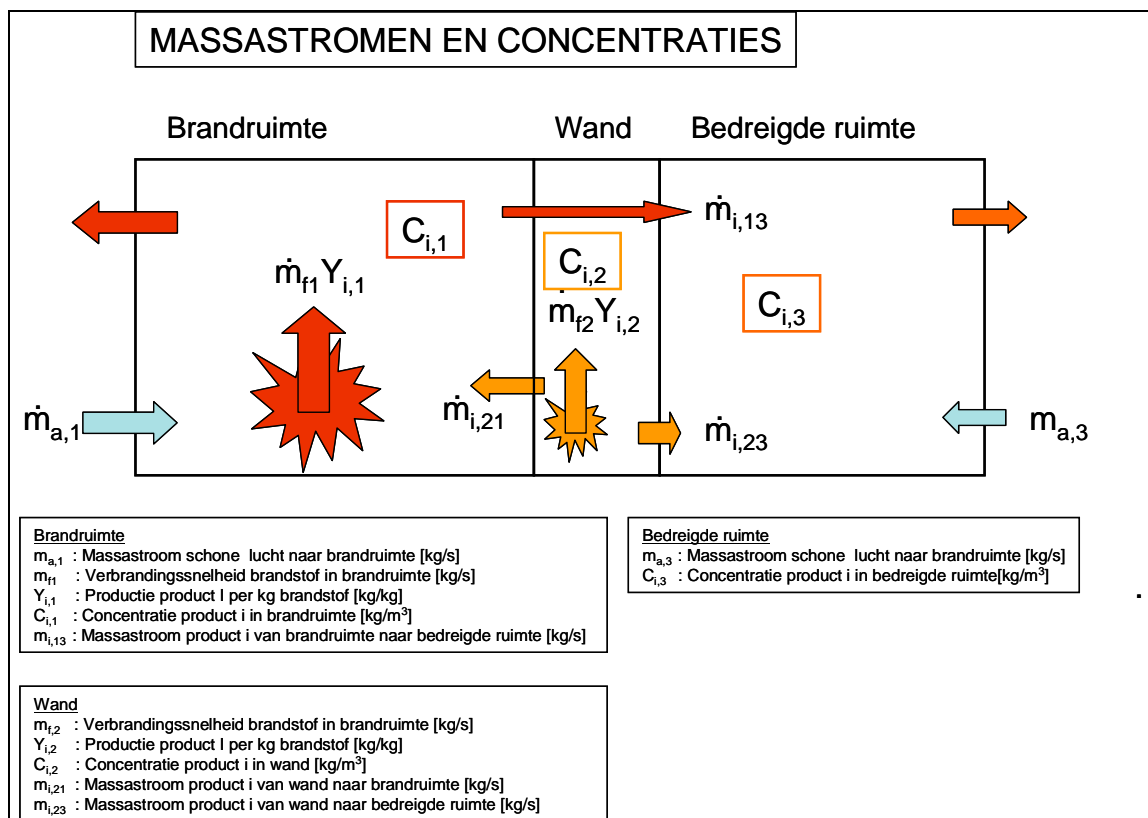
Bijlagen

A Berekeningsmethode rookstromen

A.1 Overzicht massastromen en concentraties

In deze bijlage wordt kort in gegaan op de aanpak van de berekeningen van het verloop van de concentraties verbrandingsproducten in de bedreigde ruimte, welke van belang zijn voor het zicht, de toxiciteit en mogelijk het explosiegevaar⁴⁰ waaraan de bedreigde personen worden blootgesteld.

De aanpak is gebaseerd op de berekening van de in figuur A.1 getoonde massastromen en concentraties.



Figuur A.1: Overzicht van de belangrijkste massastromen en concentraties.

De concentratie C_i van product i in de bedreigde ruimte is afhankelijk van:

- de productie $\dot{m}_{f1} * Y_{i,1}$ van het product in de brandruimte, alsmede de massastroom $\dot{m}_{i,13}$ van product van de brandruimte door de wand naar de bedreigde ruimte;
- de productie $\dot{m}_{f2} * Y_{i,2}$ van het product in de wand (constructie) alsmede de massastroom $\dot{m}_{i,23}$ van product vanuit de wand naar de bedreigde ruimte;

⁴⁰ Het gaat om de explosieve verbranding van onverbrande gassen.

- de massastroom $m_{a,3}$ verse lucht die aan de bedreigde ruimte wordt toegevoerd, d.w.z. de ventilatie van de bedreigde ruimte
- de totale massastroom lucht/rook mengsel die vanuit de brandruimte en vanuit de wand aan de bedreigde ruimte wordt toegevoerd.

De massastromen $m_{i,13}$ en $m_{i,23}$ zijn afhankelijk van de concentraties $C_{i,1}$ resp. $C_{i,2}$ en wel als volgt:

$$m_{i,13} = F_{13} C_{i,1}$$

$$m_{i,23} = F_{23} C_{i,2}$$

met:

m_i = massastroom van product i [kg/s]

C_i = concentratie van product i [kg/m³]

$F_{\alpha\beta}$ = volumestroom rook/lucht mengsel [m³/s]

index α of β = 1: brandruimte, 2: wand, 3: bedreigde ruimte

index $\alpha\beta$ = van volume/ruimte α naar volume/ruimte β

De volumestromen worden bepaald door de drukken in de diverse ruimten en de grote en vorm van de openingen waardoor het rook/luchtmengsel stroomt. In bijlage B en bijlage C wordt hier nader op in gegaan.

De concentraties ten gevolge van de productie in de brandruimte en in de wand worden afzonderlijk berekend. Hiermee kan de extra bijdrage van de isolatie in de wand op de verslechtering van de vluchtomstandigheden worden beoordeeld. De in figuur A.1 getoonde concentratie $C_{i,3}$ is de som van beide bijdragen. Zie ook A.5 voor de condities waaronder de afzonderlijk bepaalde concentratie mogen worden opgeteld.

A.2 Overzicht rookstromen en rookdichtheden

De optische rookdichtheid RD wordt uitgedrukt als verzwakking van een lichtbundel. Als een lichtstraal met begin-intensiteit I_0 door rook wordt gestuurd en na een afstand L nog een intensiteit I heeft, geldt: $RD = \log(I_0 / I) / L$.

De zichtlengte in rook kan geschat worden met:

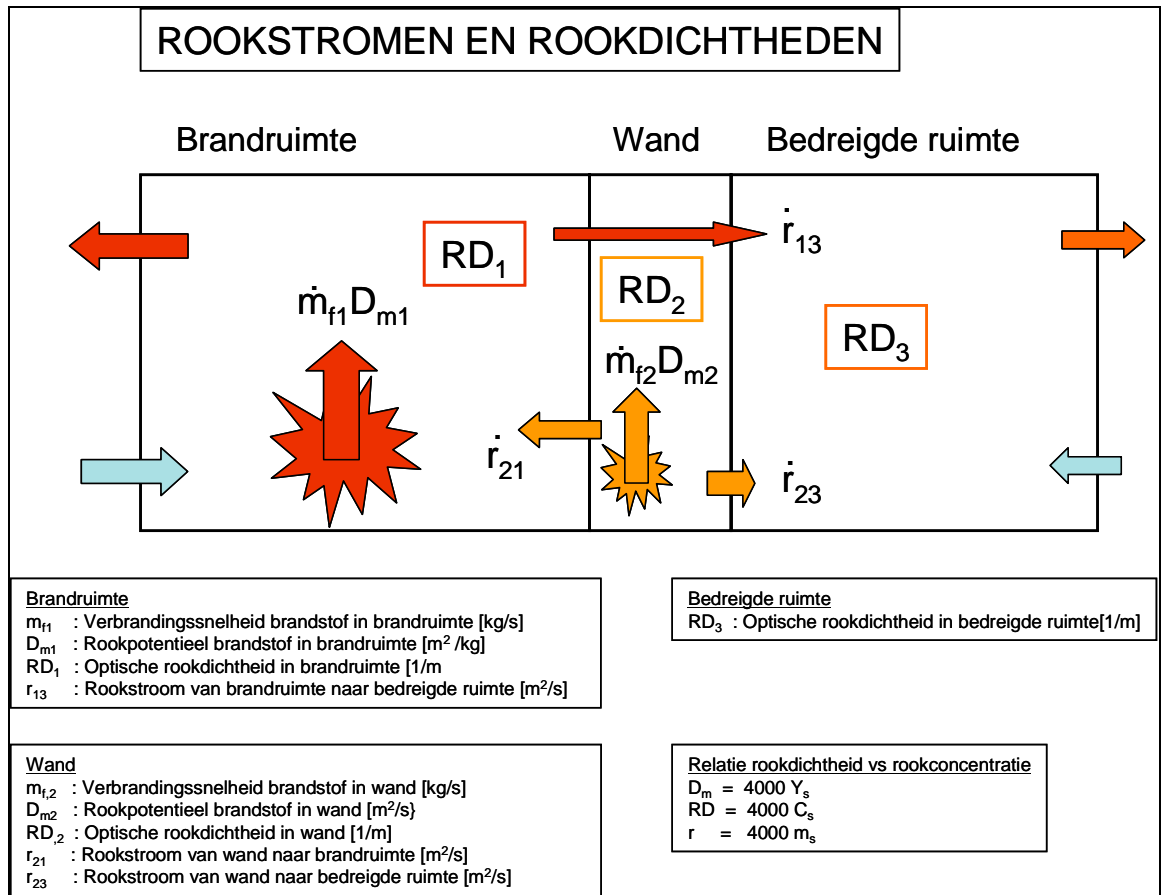
$Z = 1 / RD$ voor verlichte voorwerpen, en

$Z = 3 / RD$ voor lichtgevende voorwerpen

De rookdichtheid die ontstaat bij verbranding wordt berekend met:

$RD = D_m \times M / V$. Daarin is D_m het rookpotentieel van de brandstof, M is de massa van de verbrande brandstof en V is het volume waarin de rook wordt opgevangen.

Op basis van bovenstaande relaties is het mogelijk een direct verband te leggen tussen enerzijds de rookstromen en (optische) rookdichtheden en anderzijds de massastromen rook en rookconcentratie. Dit wordt in figuur A.2 in de legenda rechtsonder getoond. De factor 4000 is gebaseerd op een waarde van 8700 m²/kg voor de extinctiecoëfficiënt van rook per concentratie rook C_s betrokken op de natuurlijke log.



Figuur A.2: Overzicht van de belangrijkste rookstromen en rookdichtheden.

A.3 Productie van verbrandingsproducten

De productie \dot{m}_i van een verbrandingsproduct i [kg/s] is uit te drukken als een fractie Y_i [kg/kg] van de verbrandingssnelheid \dot{m}_f [kg/s]. En voor rook: de rookproductie r [m^2/s] is het product van het rookpotentieel D_m [m^2/kg] met de verbrandingssnelheid \dot{m}_f [kg/s].

De fractie Y_i respectievelijk het rookpotentieel D_m hangen af van de zogenaamde equivalence ratio Φ_{eqv} in de ruimte waar de verbranding plaats vindt. De equivalence ratio is gedefinieerd als:

$$\Phi_{eqv} = \dot{m}_{a,st} / \dot{m}_a$$

met:

$\dot{m}_{a,st}$ = benodigde massastroom verse lucht $\dot{m}_{a,st}$ voor volledige verbranding van de toegevoerde massastroom brandstof \dot{m}_f [kg/s]

\dot{m}_a = werkelijk toegevoerde massastroom verse lucht [kg/s].

Hierbij is $\dot{m}_{a,st}$ te bepalen met:

$$\dot{m}_{a,st} = \dot{m}_f H_{ch} / E_a$$

met:

- m_f = toegevoerde massastroom brandstof [kg/s]
 H_{ch} = verbrandingswarmte bij volledige verbranding van de brandstof [MJ/kg]
 E_a = de hoeveelheid warmte die wordt geproduceerd als alle zuurstof uit de toegevoerde verse lucht reageert met de toegevoerde massastroom brandstof [MJ/kg]

Voor normale brandstoffen is af te leiden dat $E_a = \pm 3,0$ MJ/kg ongeacht de soort brandstof.

Op basis van bovenstaande definities en relaties is ook af te leiden dat de productie m_i [kg/s] van een verbrandingsproduct i in een ruimte te bepalen is met:

$$m_i = m_a Y_i \Phi_{eqv} E_a / H_c$$

en analoog hieraan de rookproductie [m^2/s] met:

$$r = m_a D_m \Phi_{eqv} E_a / H_c$$

Bij een zeer goed geventileerde brand is $\Phi_{eqv} \ll 1$ en bij een slecht tot zeer slecht geventileerde brand kan Φ_{eqv} de waarde 2 tot 3 halen. Naarmate de waarde van Φ_{eqv} toeneemt zal de waarde van de fractie Y_i respectievelijk het rookpotentieel D_m ook toenemen. Tewardson [1] heeft op basis van metingen relaties ontwikkeld voor de toename van Y_i t.o.v. de waarde van Y_i bij $\Phi_{eqv} \ll 1$. Dit voor diverse verbrandingsproducten, waaronder rook en CO en voor een breed scala aan brandstofsoorten waaronder hout en diverse plastics.

A.4 Concentratie verbrandingsproducten in de brandruimte of wand

Op basis van de in A.3 gegeven relaties is af te leiden dat bij volledige menging de concentratie C_i van product i in de brandruimte of wand is te bepalen met:

$$C_i = \rho Y_i / (H_c / (\Phi_{eqv} E_{air}) + 1)$$

met:

$$\rho = \text{de dichtheid van het rooklucht-mengsel in de brandruimte of wand [kg/m}^3\text{]}$$

En bij benadering voor de hoogste waarde :

$$C_i = \rho Y_i \Phi_{eqv} E_{air} / H_c$$

En voor rook analoog hieraan :

$$RD = \rho D_m \Phi_{eqv} E_{air} / H_c$$

A.5 Massastromen en rookstromen naar bedreigde ruimte

Op basis van de in A.1 t/m A.4 gegeven relaties is voor de massastroom van product i van de brandruimte naar de bedreigde ruimte af te leiden dat die is te bepalen met:

$$m_{i,13} = F_{13} \rho_1 Y_{i,1} \Phi_{eqv,1} E_{air} / H_c$$

en analoog voor de rookstroom met:

$$r_{13} = F_{13} \rho_1 D_m \Phi_{\text{eqv},1} E_{\text{air}} / H_c$$

Vervanging van index 1 door index 2 in bovenstaande formules geeft de relaties voor de stromen vanuit de wand naar de bedreigde ruimte.

A.6 Concentraties en rookdichtheid in bedreigde ruimte

Het tijdsafhankelijk verloop van de concentraties en rookdichtheid in de bedreigde ruimte ten gevolge van de brand in de brandruimte volgt uit het oplossen van de volgende differentiaalvergelijking:

$$V_3 dC_{i,3} / dt = m_{i,13} - C_{i,3} (\rho_1 F_{13} + m_{a,3}) / \rho_3$$

met:

$$V_3 = \text{volume van de bedreigde ruimte [m}^3\text{]}$$

En analoog voor de rookdichtheid uit:

$$V_3 dRD_3 / dt = r_{13} - RD_3 (\rho_1 F_{13} + m_{a,3}) / \rho_3$$

Vervanging van index 1 door index 2 in bovenstaande formules geeft de relaties voor de concentraties en rookdichtheid ten gevolge van de stromen vanuit de wand naar de bedreigde ruimte.

De concentraties en rookdichtheid ten gevolge van de productie in de brandruimte en in de wand volgen uit:

$$V_3 dC_{i,3} / dt = m_{i,13} + m_{i,23} - C_{i,3} (\rho_1 F_{13} + \rho_2 F_{23} + m_{a,3}) / \rho_3$$

en

$$V_3 dRD_3 / dt = r_{13} + r_{23} - RD_3 (\rho_1 F_{13} + \rho_2 F_{23} + m_{a,3}) / \rho_3$$

Hieruit blijkt dat zolang de lekstromen vanuit de brandruimte en de wand veel kleiner zijn dan de massastroom verse lucht naar de bedreigde ruimte de concentratie ook kan worden bepaald door de som van de afzonderlijk bepaalde concentratie te nemen. Dit geldt ook zoals de meest rechtse term in bovenstaande vergelijking veel kleiner dan de meest linker term.

Een concentratie in ppm (“parts per million”) volgt voor product i, dat zich gedraagt als ideaal⁴¹ gas, uit concentraties in kg/m³ volgens:

$$C_{\text{ppm}} = V_m / M_i C_{\text{kg/m}^3} 10^6$$

met:

$$C_{\text{ppm}} = \text{Concentratie in ppm volumedelen [-]}$$

$$V_m = T / 273 \cdot 22,4 [\text{m}^3/\text{kmol}], \text{ bij 1 atm en temperatuur T [K]}$$

$$M_i = \text{Molgewicht product i [kg/kmol]}$$

$$C_{\text{kg/m}^3} = \text{Concentratie in massa per volume [kg/m}^3\text{]}$$

⁴¹ Reële gassen wijken hoogstens enkele procenten hiervan af indien niet dicht bij het condensatiepunt.

B Rooktransport door brandwerende scheidingswanden

Vraagstelling:

Welke hoeveelheid rook, zowel zichtbelemmerende deeltjes als schadelijke gassen (hier gerekend met CO) kan door een brandwerende wand ontsnappen vanuit een brandruimte naar een aangrenzende ruimte?

Aanpak:

De massastroom en de rookstroom hangen af van de volgende drie parameters:

1. De grootte en het aantal van de openingen in de wand.
2. Het drukverschil over de wand ter plaatse van elke opening.
3. De dichtheid van de rook en de concentratie van het gas beide in de brandruimte.

Voor elk van de drie parameters worden 2 waarden gebruikt: een gemiddelde waarde en een extreme waarde (ruwe indicatie 5% overschrijdingskans) of, voor het overdrukeffect van wind en schoorsteeneffect, een gangbare hoge waarde (ruwe indicatie 20% overschrijdingskans) en een zeer hoge waarde (ruwe indicatie 5% overschrijdingskans) binnen de bandbreedte die in de praktijk zal optreden. Het product van twee gangbare hoge waarden wordt beschouwd als zeer hoge waarde.

De overschrijdingskansen zijn ter illustratie en zijn een eerste schatting op basis van ervaring; er is geen nader onderzoek naar de spreidingen uitgevoerd.

Ad 1: Openingen in de wand

Het uitgangspunt is een brandwerende scheiding, een binnenwand met deur die voldoet aan de genormeerde brandwerendheids-eisen. Binnen deze eisen is een aantal openingen mogelijk waarmee, onder de gestandaardiseerde testomstandigheden, meestal een brandwerendheid van ten minste 30 minuten wordt behaald.

- a. Geen opening met een diameter > 25 mm. (NB: het aantal openingen wordt door de norm niet beperkt).
- b. Geen naad van 6 mm breed die langer is dan 150 mm.
- c. Geen opening waardoor een vlam uittreedt gedurende > 10 s.
- d. Geen opening waardoor hete gassen uittraden waarmee (gestandaardiseerde) watten kunnen worden aangestoken.

De praktijk leert dat in een test voor brandwerendheid een scheidingswand meestal faalt op punt c of punt d. Verder bepaalt de passing van een deur in het kozijn in sterke mate hoeveel rook er naar de aangrenzende ruimte ontsnapt. Deurconstructies die voldoen aan de eisen van brandwerendheid kunnen toch rooklekken vertonen.

Daarbij kan enerzijds een deur vrijwel hermetisch sluiten, met uitzondering van de spleet tussen de deur en de onderdorpel, die in de praktijk niet smaller is dan enkele millimeters. Anderzijds kan rondom de deur een spleet van 2,5 mm breed zijn met 25 mm ruimte tussen de deur en de onderdorpel zonder dat de brandwerendheid faalt.

Aangenomen is dat doorvoeringen in de scheidingswand van kanalen, kabelgoten en leidingen brandwerend zijn afgedicht, en dat luchtroosters en ventilatie-openingen zo zijn uitgevoerd dat ze zichzelf brandwerend afsluiten in geval van brand.

Waarde-varianten voor een deur:

- Gemiddelde waarde:
 - Één beperkte kier van 6 x 75 mm in de bovenste 2/3 van de deur.
 - Rondom de deur een spleetbreedte van 1 mm; de ruimte tussen de deur en de onderdorpel is 10 mm
- Gangbaar hoge waarde:
 - Één kier van 6 x 150 mm langs de bovendorpel.
 - Rondom de deur een spleetbreedte van 2 mm; de ruimte tussen de deur en de onderdorpel is 20 mm

Waarde-varianten voor een wand:

- Gemiddelde waarde:
 - Kieren met een oppervlakte van $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ per strekkende meter wand.
- Gangbaar hoge waarde:
 - Kieren met een oppervlakte van 10^{-3} m^2 per strekkende meter wand.

Ad 2: Het drukverschil over de wand

Het drukverschil over de wand wordt veroorzaakt door:

- Winddruk en schoorsteeneffect;
- Thermische branddruk door hoge temperatuur in de brandruimte.

Winddruk en schoorsteeneffect

Bij een brand die doorgroeit naar een volledig ontwikkelde brand, bezwijkt de beglazing van de brandruimte meestal in een vroeg stadium. De winddruk op de gevel kan dan van grote invloed worden op de drukverschillen over binnenwanden. Drukverschillen tot 50 Pa zijn daarbij realistisch. Grotere drukverschillen over binnenwanden zijn in principe zeker mogelijk, maar daarvoor moeten zowel windsnelheid, windrichting als temperatuurverschillen en inwendige indeling van het gebouw ongunstig zijn. In deze studie is 50 Pa als maximum aangehouden.

Waarde-varianten:

- Gangbare hoge waarde: Winddruk en schoorsteeneffect veroorzaken een overdruk van +20 Pa in de brandruimte t.o.v. de aangrenzende ruimte.
- Zeer hoge waarde: +50 Pa (zoals hiervoor als maximum aangegeven).

Voor het wind- en schoorsteeneffect is geen gemiddelde overdruk-waarde meegenomen, o.a. omdat het gemiddelde windeffect (over alle windrichtingen) moeilijk is mee te wegen wegens (o.a.) grote variaties in de gebouwindeling.

Thermische branddruk

De hoogte boven de vloer waar de openingen zich in de constructie bevinden, is van belang om de hoeveelheid rook door te constructie te bepalen: het thermische drukverschil in de brandruimte bedraagt bij gangbare brandtemperaturen 5 tot 10 Pa/m. Dit leidt, met het merendeel van de openingen nabij de vloer tot een overdruk van bijvoorbeeld maximaal ca. 16 Pa op een hoogte van 2,3 m (de bovenzijde van de deur) en een onderdruk van ca. 7 Pa op vloerniveau.

In deze berekeningen is een vereenvoudigd drukverloop aangenomen: een overdruk van 10 Pa op de bovenste 2/3 van de totale hoogte, en van een onderdruk van 5 Pa op de onderste 1/3 van de totale hoogte. Er is geen waarde-variantie gehanteerd voor de thermische branddruk.

Ad 3a: De dichtheid van de rook in de brandruimte

De bepaling van de rookdichtheid en CO-concentratie gebeurt met de in bijlage A besproken methode gebruik makend van de formules en tabellen in [2]. Tabel B.1 geeft een overzicht van het rookpotentieel en de rookdichtheid in de brandruimte voor hout en verschillende kunststoffen bij verschillende waarden van de equivalence ratio Φ_{equiv} in de brandruimte bij een dichtheid van het rook/lucht mengsel van 1 kg/m².

Tabel B.1: Rookpotentieel en rookdichtheid in brandruimte. Berekend op basis van [2].⁴²

Brandstof	Dm (m ² /kg)				RD (1/m)			
	<<1	1	2	3	0.2	1	2	3
PS	656	807	1321	1665	15	91	297	560
PP	236	279	385	462	4	22	60	109
PE	240	283	391	469	4	22	62	111
Nylon	300	342	421	481	7	38	94	161
PMMA	88	100	223	228	2	12	56	86
Wood	60	72	111	137	3	18	54	100
PVC	688	709	947	949	73	377	1007	1514

Bij verbranding met beperkte zuurstoftoevoer (hoge waarde voor Φ_{equiv}) kan de rookproductie per kg verbrande brandstof (het rookpotentieel) een factor 2 tot 2,5 hoger zijn. Dit hangt sterk af van de condities in de verbrandingszone. Vooral bij grote rookdichtheden vermindert de rookdichtheid in de tijd door neerslaan en samenklonteren, dit hangt sterk af van de eigenschappen van de rook.

In een relatief “kaal interieur” kan hout/cellulose (katoen) het merendeel van de vuurlast vormen. In een meer gestoffeerde ruimte, of bij andere scenario's waarbij ook kunststoffen verbranden gaat het hogere rookpotentieel van deze stoffen een rol spelen.

Op basis van bovenstaande zijn voor de rookdichtheid RD de volgende waarde-varianten gekozen:

- Gemiddelde waarde: 20 m⁻¹; indicatie: voornamelijk cellulose als vuurlast en redelijk geventileerde brand.
- Gangbaar hoge waarde: 50 m⁻¹; indicatie: grotendeels kunststoffen als vuurlast en redelijk geventileerde brand, of een combinatie van cellulose en kunststoffen en slecht geventileerde brand.

Ad 3b: De CO-concentratie in de brandruimte

Op dezelfde wijze als in ad 3a wordt de CO-fractie Y_{CO} en CO-concentratie vermeld in tabel B.2 bij een dichtheid van het rook/lucht mengsel van 1 kg/m².

⁴² De relatie tussen rookpotentieel en zuurstoftoevoer voor PUR is niet in de tabel opgenomen. Deze bedraagt ca. 400 m²/kg bij $\Phi_{equiv} << 1$ tot (indicatief) ca. 800 m²/kg bij $\Phi_{equiv} = 2$.

Tabel B.2: Fractie (opbrengst) CO en CO concentratie in brandruimte. Berekend op basis van [2].

Brandstof	Y_CO (kg/kg)				C_CO (g/m3)			
	<<1	1	2	3	0.2	1	2	3
PS	0.060	0.070	0.137	0.162	1.35	8	31	55
PP	0.024	0.044	0.192	0.238	0.38	3	30	56
PE	0.024	0.044	0.192	0.238	0.38	3	30	56
Nylon	0.038	0.150	1.039	1.285	0.85	17	232	431
PMMA	0.010	0.045	0.338	0.409	0.25	6	85	154
Wood	0.004	0.018	0.145	0.171	0.20	5	71	125
PVC	0.063	0.099	0.500	0.504	6.70	53	531	803

Op basis van bovenstaande zijn voor de CO-concentratie in de brandruimte de volgende waarde-varianten gekozen:

- Gemiddelde waarde: 10 g/m³; indicatie: voornamelijk cellulose als vuurlast en redelijk geventileerde brand.
- Gangbaar hoge waarde: 50 g/m³; indicatie: grotendeels kunststoffen als vuurlast en redelijk geventileerde brand, of een combinatie van cellulose en kunststoffen en slecht geventileerde brand.

Ad 4a: Rekenresultaten 10m wandsectie met deur

Globaal gezien is het rookdebiet in m²/s dat in de aangrenzende ruimte vrijkomt evenredig met elk van de drie parameters: oppervlak van de openingen, rookdichtheid en het drukverschil tot een macht gelegen tussen 0,5 (grote openingen) en 1 (zeer smalle spleten).

Op basis van de drie parameters en de twee of drie waarden die elk ervan kan aannemen is voor elk van de 12 scenario's de volumestroom en de rookproductie in m²/s (= volumestroom x optische dichtheid RD) berekend. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel B.3: Debiet en rookproductie vanuit de brandruimte door de 10m-scheidingsconstructie met deur.

10m-wand met deur			
Openingen in constructie			
		m2	
Gaten in wand boven nn (m2)		0.004	0.02
Doorbrandgat boven in deur (m2)		0.0005	0.001
Kier rondom gesloten deur (m2)		0.0065	0.013
Gat onder deur (m2)		0.01	0.02
Debieten in m3/s			
Wind+Sst (Pa)		m3/s	
10		0.058	0.148
20		0.082	0.204
50		0.138	0.331
Rookproductie in m2/s			
Wind+Sst (Pa)	OD (m-1)	m2/s	
10	20	1.16	2.96
20	20	1.65	4.08
50	20	2.75	6.62
10	50	2.89	7.39
20	50	4.12	10.21
50	50	6.88	16.55

Op basis van deze resultaten wordt voor de 10-meter wandsectie een gemiddelde waarde voor het debiet rook/lucht mengsel (volume stroom F₁₃) gekozen van 0,08 m³/s

en een gangbaar hoge waarde van $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ (beide bij een gangbaar hoge overdruk van 20 Pa).

In combinatie met de gekozen rookdichtheidswaarden 20 m^{-1} en 50 m^{-1} in de brandruimte volgt een gemiddelde rookstroom van $1,6 \text{ m}^2/\text{s}$ met een zeer hoge waarde van $8 \text{ m}^2/\text{s}$.

De gemiddelde massastroom CO is op basis hiervan $0,8 \text{ g/s}$ met een zeer hoge waarde van 8 g/s .

Ad 4b: Rekenresultaten 4m wandsectie zonder deur

Op basis van een gemiddelde kier van $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ per strekkende meter wand en een zeer hoog kierwaarde van 10^{-3} per meter wand kan een gangbaar debiet rook/lucht mengsel van $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ resp. $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ worden afgeleid. Voor de rookstroom zijn dit: gemiddeld ca. $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ met een zeer hoge waarde van ca. $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$.

De gemiddelde massastroom CO is op basis hiervan $0,05 \text{ g/s}$ met een zeer hoge waarde van $0,5 \text{ g/s}$.

Tabel B.4: Debiet en rookproductie vanuit de brandruimte door de 4m-scheidingsconstructie zonder deur.

4m-wand zonder deur			
Openingen in constructie			
	m2		
Gaten in wand boven nn (m2)	0.0016	0.004	
Doorbrandgat boven in deur (m2)	0	0	
Kier rondom gesloten deur (m2)	0	0	
Gat onder deur (m2)	0	0	
Debieten in m3/s			
Wind+Sst (Pa)	m3/s		
10	0.0043	0.0107	
20	0.0053	0.0131	
50	0.0074	0.0186	
Rookproductie in m2/s			
Wind+Sst (Pa)	OD (m-1)	m2/s	
10	20	0.09	0.21
20	20	0.11	0.26
50	20	0.15	0.37
10	50	0.21	0.54
20	50	0.26	0.66
50	50	0.37	0.93

De gekozen rekenwaarden zijn een gemiddelde waarde (50% overschrijdingskans) en een zeer hoge waarde (ruwe indicatie 5% overschrijdingskans), gegeven de gangbare hoge waarde (ruwe indicatie 20% overschrijdingskans) voor de winddruk en het schoorsteeneffect. Het lijkt wellicht kunstmatig om vier verschillende waarden te onderscheiden en daarvoor ruwe overschrijdingskansen aan te geven, maar bij het vermenigvuldigen van factoren is een dergelijke aanpak nodig, omdat de waarschijnlijkheid van optreden van meerdere kleine onafhankelijke kansen tegelijkertijd heel erg klein is.

C Rooksamenstelling en toxiciteit

Deze bijlage is opgenomen als algemene toelichting bij de aannamen gepresenteerd in de hoofdtekst.

C.1 De invloed van rook

De invloed van rook

Rook, een samenstel van verbrande en onverbrande ontledingssgasen, hindert het vluchten op meerdere wijzen:

- door het verminderen van zicht:
 - o door optische rookdichtheid van de rook,
 - o door irritatie van de ogen,
- door het verminderen van besluitvaardigheid, oriëntatievermogen, motorische vaardigheden en bewustzijn (in oplopende mate van inwerking op de mens):
 - o door warmteoverdracht naar de huid en de luchtwegen,
 - o door irritatie van de luchtwegen
 - o door de verstikkende werking.

Met “toxiciteit” worden gewoonlijk de irriterende werking en de verstikkende werking tezamen bedoeld.

De aard en concentratie van rook is afhankelijk van een groot aantal factoren. Naast de eigenschappen van de ontlede en verbrande materialen zijn dat vooral de warmteproductie (de “omvang”) van de brand, de afmetingen van de ruimte en de wijze van rookverspreiding.

De aard van de ontledingssgasen (samenstelling voorafgaand aan verbranding) is bij eenvoudige stoffen redelijk bekend, alhoewel dit proces afhankelijk is van het temperatuurverloop. Bij complexere stoffen, en stoffen met diverse toeslagmaterialen zoals brandvertragers is dit minder goed bekend, opnieuw wegens de temperatuurafhankelijkheid, maar vooral door de grotere variëteit aan mogelijke ontledingsreacties.

De belangrijkste variabele die uiteindelijk leidt tot verschillen in de samenstelling van rookgasen is het temperatuurverloop van het verbrandingsproces. Dat verloop is in natuurlijke branden sterk plaats- en tijdsafhankelijk. Als gevolg hiervan zijn de concentraties van toxische gasen in natuurlijke branden slechts in ordegröte in te schatten.

Gegeven een bepaalde samenstelling van rookgasen is de invloed op de mens ook slechts grof in te schatten, alhoewel de onzekerheid hierin duidelijk geringer is dan de onzekerheid in de verwachte samenstelling van rook in een gegeven bouwwerk. De invloed op de mens is bijvoorbeeld sterk afhankelijk is van de persoon en van de condities (o.a. lichamelijke en geestelijke inspanning en stress) waaronder wordt gevluht. Daarnaast is de invloed afhankelijk van de wijze waarop de aanwezige gasen elkaar tegen-werken of met elkaar samenwerken: gelijktijdig aanwezige gasen kunnen namelijk op verschillende wijzen ingrijpen op de mens (bijvoorbeeld via belemmering van zuurstofopname en via overhitting van de huid en luchtwegen). Vooral werkend via hetzelfde mechanisme zijn de werkingen “optelbaar” op een of andere wijze.

Het is tegenwoordig gebruikelijk om, als beste praktische benadering, de invloed van een mix van toxische gassen in te schatten op basis van een sommatie van de invloed van een beperkt aantal gassen, waarbij voor elk gas de aanwezige fractie wordt bepaald t.o.v. een grenswaarde en deze fracties worden opgeteld; beter bekend als de “fractional effective dose”-methode (FED). Over de grenswaarden bestaat nog veel wetenschappelijke discussie. Voor vluchten relevante waarden (blootstelling gedurende enkele minuten waarin de personen nog “vluchtvaardig” moeten zijn) worden vaak afgeleid van waarden uit een heel andere context zoals letaliteitswaarden⁴³ of Arbo-waarden⁴⁴. De afleiding vanuit letaliteitswaarden gebeurt grofweg door voor “vluchtvaardigheidswaarden” tussen 1/5 en 1/2 van de letaliteitwaarden te nemen. Op deze vluchtvaardigheidswaarden wordt weer een veiligheidsmarge toegepast van enkele factoren (indicatief: tussen 2 en 10) om “de acceptabele vluchtcondities” te bepalen. Die extra veiligheidsmarge is nodig om bijvoorbeeld de spreiding in ontvankelijkheid binnen een groep mensen en de wetenschappelijke onzekerheid over de effecten af te dekken.

Gezien voorgaande onzekerheden in de samenstelling van rookgassen bij natuurlijke branden en de invloed daarvan op de mens, moeten testresultaten van toxiciteitsbepalingen op materialen met grote voorzichtigheid worden gebruikt om een inzicht te krijgen in het gevaar van de materialen bij brand.

De toxiciteit van rookgassen is in ieder geval niet relevant voor de menselijke overlevingskansen in een ruimte die geheel gevuld is met een volledig ontwikkelde brand; de mens kan daarin nauwelijks enkele seconden overleven. De toxiciteit is verder normaal nog weinig relevant als het zicht door de rook een goede oriëntatie nog toelaat. In het tussengebied zijn het vooral die situaties waarin het vluchten pas in een laat stadium plaats vindt, dat toxiciteit een rol speelt. Bijvoorbeeld wegens beperkte zelfredzaamheid, een beperkt zelfredzame toestand (slapend of “onder invloed”) of beperkt gevoel van noodzaak om te vluchten. Dit kan met name het geval zijn als ontledingssgassen of verbrandingssgassen terecht komen op afstand van een brand waar de directe warmte-effecten van de brand nog niet waarneembaar zijn. Of dit kan en hoe snel dit kan, is afhankelijk van de opbouw van de constructies en met name de kwaliteit van de rookcompartimentering.

Het relevant zijn van de toxiciteit is redelijk te beoordelen op basis van de rookdichtheid en dus de zichtlengten. Als de rook relatief sterk irriterende gassen bevat, dan treedt bij zichtlengten tussen 6 en 3 meter zodanige hinder op dat de loopsnelheid duidelijk vermindert (tot ca. 50%) en stabiliteit en concentratie vermindert; vluchten is dan nog mogelijk, maar wordt dus negatief beïnvloed door de vluchtcondities. Bij weinig irriterende rook liggen deze waarden voor de zichtlengte tussen 4 en 2 meter [ref.8].

Diverse kunststoffen, waaronder isolatieschuimen produceren rookgassen met sterk toxische eigenschappen. Dat geldt echter ook voor veel andere materialen, waaronder natuurlijke materialen als hout. De verschillen tussen die materialen in de bijdrage aan het totaal van toxische gassen van een brand vallen in de meeste branden grotendeels weg ten opzichte van de toxische effecten van koolmonoxide dat in grote hoeveelheden wordt geproduceerd tijdens onvolledige verbranding, een verbrandingswijze die veel voorkomt in natuurlijke branden in gebouwen (onder invloed van zuurstoftekort).

⁴³ De menselijke letaliteitswaarden, meestal de 50%-sterfte binnen een tijdsduur (b.v. 2 weken) na de blootstelling. Deze waarden zijn vaak afgeleid uit dierproeven.

⁴⁴ Bij Arbo-waarden gaat het om zeer langdurige blootstelling, vaak vele uren per week gedurende vele jaren.

C.2 Nederlandse regelgeving

De Nederlandse regelgeving stelt geen eisen aan de samenstelling van de rookgassen die vrij komen bij brand, maar alleen aan de optische dichtheid van rook. Voor gebouwen is in de bouwregelgeving namelijk het uitgangspunt dat beperking van rookverspreiding en goede en voldoende vluchtroutes voldoende veiligheid bieden; de verblijfstijd in de rook wordt daarbij verondersteld zo kort te zijn dat de toxiciteit nog geen belangrijk effect heeft.

Onder bepaalde omstandigheden is dit uitgangspunt niet realistisch, bijvoorbeeld bij speciale bouwwerken als tunnels waarin de vluchtafstanden tot de eerste rookscheiding lang zijn, of algemener, als de ontruiming van een gebouw of bouwwerk (veel) minder voorspoedig verloopt dan in de regelgeving wordt aangenomen en het vluchten (voor sommigen) pas plaats vindt als de vluchtroutes al over grote afstanden met rook gevuld zijn. In die gevallen is inzicht in de toxiciteit van de rook belangrijk.

C.3 Toxiciteit van rookgassen

Bij de toxiciteitsbepaling moeten ontledingsgassen en verbrandingsgassen onderscheiden worden. De toxiciteit van deze gassen afkomstig van diverse soorten isolatie is als volgt samen te vatten:

EPS:

De belangrijkste rookgassen zijn CO, CO₂, en in de verbrandingsgassen van brandvertragend behandelde EPS-kwaliteiten enkele halogenen (vooral HF en HBr); bij onvolledige verbranding ook styreen, toluen en benzeen (ontledingproducten).

De toxiciteit van de EPS-rookgassen is gemiddeld beperkt en bijvoorbeeld lager dan die van veel natuurlijke producten als hout of kurk.

De brandvertragend behandelde EPS produceert wat sterker toxische rookgassen, maar zal door die behandeling minder branden, zodat het netto effect zowel positief als negatief kan zijn. De halogenen komen gewoonlijk niet in concentraties voor die belangrijk zijn (t.o.v. bijvoorbeeld CO). EPS produceert bij vlammende verbranding een optisch zeer dichte rook.

Harde⁴⁵ PUR:

PUR-schuimen kunnen onderling sterk verschillen in samenstelling. Bij de verbranding komt een groot aantal gasvormige producten vrij. Deze producten zijn sterk afhankelijk van de samenstelling van het schuim en de condities waaronder de ontleding en verbranding plaats vindt, maar de belangrijkste verbrandings- en ontledingsgassen en de mate van toxiciteit zijn grotendeels dezelfde.

De belangrijkste verbrandingsgassen zijn CO₂, CO, HCN en isocyanaten; en vanwege de aanwezige stikstof in de molecuulstructuur ook (in mindere mate) NO_x en NH₃. De productie is sterk afhankelijk van de wijze van verbranding: de temperatuur, smeulend of vlammeend verbranden en met overmaat of ondermaat zuurstof. Bij vlammeende verbranding zijn de producten grofweg een factor 2 toxischer dan bij smeulende verbranding; bij ondermaat zuurstof veroorzaken de onverbrande tussenproducten ook een hogere toxiciteit.

De belangrijkste ontledingsgassen zijn CO₂, CO, koolwaterstoffen en aromaten.

⁴⁵ Harde PUR is het type PUR dat als bouwisolatie wordt gebruikt. Zachte PUR wordt meer in inventaris gebruikt, bijvoorbeeld als zachte vulling in (zit)meubilair.

De toxiciteit van de PUR-rookgassen is t.o.v. van veel natuurlijke producten als hout of kurk gelijk tot een factor 4 toxischer. De HCN-concentratie is, afgezien van CO, de belangrijkste gevaarsfactor⁴⁶. De HCN-percentages in de rookgassen neemt sterk toe met de temperatuur, vanaf ca. 800 à 900 °C treden percentages boven de 1% op; vooral in de ontledingssgassen neemt het percentage bij lagere temperaturen snel af.

De toxiciteit van de brandvertragend behandelde PUR wijkt weinig af van de niet-behandelde; door de beperking van de verbranding is het netto-resultaat meestal positief.

PIR:

Polyisocyanuraat isolatieschuimen lijken sterk op polyurethaanschuimen, de grens tussen beide is geen harde grens, maar kunnen op een aantal punten ook duidelijk verschillen. PIR biedt gemiddeld meer weerstand tegen verbranding, wat echter tot gevolg heeft dat bij gangbare brandtemperaturen per massa-eenheid meer gedeeltelijk-onverbrande componenten worden geproduceerd die de rookvorming negatief beïnvloeden.

De belangrijkste gevaarsfactor is ook hier de vorming van HCN. Evenals voor de brandvertragend behandelde PUR geldt door de beperking van de verbranding (t.o.v. PUR) dat het netto-resultaat meestal positief is.

Minerale wollen:

Producten uit minerale wol bestaan niet alleen uit mineraalvezels, maar ook uit een beperkt percentage binder die de vezels bijeen houdt en uit enige olie toegevoegd voor het productieproces. De binder en olie kunnen ontleden en verbranden en produceren verbrandingsgassen waarin zich volgens sommige bronnen ook zeer toxische stoffen bevinden, o.a. isocyanaten. De minerale vezels dragen echter niet bij aan de brand; de inbrandsnelheid is daardoor gering en de totale hoeveelheid verbrandingsgassen vanuit een constructie met minerale wol is daardoor ook (zeer) gering. De totale toxiciteit van deze verbrandingsgassen is daarom ten opzichte van andere bronnen tijdens een brand te verwaarlozen.

Grenswaarden voor toxiciteit

Het is belangrijk de toxiciteit van een mix van rookgassen van producten en die van afzonderlijke gassen te onderscheiden. Producten kunnen een mix van zeer vele verschillende ontledings- en verbrandingsgassen produceren; het effect daarvan kan worden beoordeeld aan de hand van die mix van gassen of aan de hand van de belangrijkste toxische componenten.

PUR- en PIR-rookgassen worden vaak op toxiciteit beoordeeld aan de hand van de belangrijkste toxische component, HCN. De toxiciteit van EPS-rookgassen wordt vooral bepaald op basis van de mix van gassen; CO is hierin meestal de belangrijkste toxische component.

Bekijken we de mix van rookgassen afkomstig van polystyreen-rookgassen dan zijn de gangbare waarden voor vluchtvaardigheid 20 tot 50 g/m³. Deze waarde is grofweg een factor 4 tot 10 minder dan de waarden voor harde PUR [ref. 2 en 9].

Er wordt onderscheid gemaakt tussen verstikkende en irriterende stoffen. De toxiciteitgrens voor verstikkende gassen als CO en HCN is niet goed uit te drukken in alleen een concentratie, omdat bij deze ook de blootstellingduur van belang is. Bij CO wordt gewoonlijk het product van concentratie en blootstellingduur gebruikt, waarden

⁴⁶ Beide werken in op de O₂-opnamecapaciteit (van respectievelijk de lichaamcellen en het bloed).

rond 30.000 ppm•min, dus bijvoorbeeld 1000 ppm gedurende 30 minuten, zijn gangbaar als maximum waarde voor de vluchtvaardigheid (eng.: incapacitation value).

Voor HCN is dit product echter geen goede maat. De grenswaarde heeft een omslagpunt tussen de ca. 80 ppm en 300 ppm waarin de toegestane tijdsduur met ten minste een factor 10 wordt gereduceerd. Waarden tot ca. 80 ppm worden daarom wel gebruikt als maximum waarde voor de vluchtvaardigheid van mensen. Gezien de benodigde veiligheidsmarge ligt de norm voor vluchtcondities meestal enkel factoren lager.

Voor irriterende stoffen ligt de basis voor grenswaarden wat minder duidelijk. De belangrijkste effecten zijn irritatie van de ogen en de luchtwegen met een acute invloed op de vluchtvaardigheid, en aantasting van de longen (vochtophopping en longontsteking) waarvan de gevolgen zich pas uren na de blootstelling openbaard. Voor irriterende stoffen worden meestal concentraties als grenswaarden gebruikt.

Bedenk bij alle kwantificeringen van toxische effecten dat zowel de productie van toxische stoffen als de ontvankelijkheid van de mens voor die toxische effecten slechts in ruwe benadering is te bepalen. Wat betreft de productie blijkt dit al duidelijk uit het bovenstaande, wat betreft de menselijke ontvankelijkheid voor de toxische werking is het nuttig om te weten dat diverse auteurs op dit gebied verschillen in toxiciteit alleen significant vinden als ze ten minste een factor 10 verschillen.

D Proevenserie

De rookhoeveelheid die vanuit brandwerende constructies een aangrenzende ruimte binnen stroomt is in dit onderzoek gemeten in enkele proeven op middelgrote schaal.

D.1 Beproevingsofstelling

De testopstelling bestaat uit de volgende (gestandaardiseerde) componenten:

Brandwerendheidsoven

Deze oven met inwendige afmetingen 1.2 x 1.2 x 1.2 m³ voldoet qua opbouw en thermische eigenschappen aan de ovens als voorgeschreven in EN 1363-1. De afmetingen van de oven voldoen daar echter niet aan.

Thermische condities

De proefstukken zijn blootgesteld aan de standaardbrandkromme om een vergelijking mogelijk te maken met de condities tijdens brandwerendheidsproeven.

De oventemperaturen werden gemeten met drie stuks plaatthermokoppels op 100 mm van het direct verhitte oppervlak van het proefstuk. De tijdsduur van de proeven werd bepaald door de tijdens de proef bepaalde brandwerendheid van het betreffende proefstuk. Op 2/3 hoogte van het proefstuk werd gedurende de brandproef de ovendruk gemeten. Deze werd op een constante waarde van 20 Pa gehouden.

Om het einde van de brandwerendheid te kunnen bepalen is ieder proefstuk voorzien van 7 thermokoppels voor het bepalen van de temperatuur van het wandoppervlak aan de niet-direct verhitte zijde van het proefstuk.

Proefstukken

De proefstukken zijn wandelementen met een breedte en hoogte variërend van 150-170 cm; de wanddikte is afhankelijk van de samenstelling van de wand. Elk proefstuk was voorzien van een verticale naad in het midden van het proefstuk.

De proefstukken werden tijdens de brandproef gefixeerd via vier drukpunten uit vuurvaste stenen. Deze bevonden zich tegen de randstijlen (of randen als er geen sprake was van regelwerk) van de wanden. De drukpunten bevonden zich op 1/3 en 2/3 hoogte van de proefstukken)

Zie voor de keuze van de proefstukken en de nadere specificaties de volgende paragraaf.

Rookmeting

De rookmeting bestaat uit een afzuigkap met afzuigleiding, een rookdichtheids-meetsysteem, een volumedebiet-meetstation en een aanzuigventilator. Voor zover mogelijk is hierbij gebruik gemaakt van gestandaardiseerde componenten van testopstellingen voor de bepaling van het brandgedrag van bouwmaterialen- en constructies.

Afzuigkap

Ten behoeve van de opvang van vrijkomende rook aan de niet-direct verhitte zijde van het proefstuk is een rookkap vervaardigd. De rookkap uit staalplaat bevindt zich tijdens de tests boven het proefstuk waarbij de achterwand van de kap aansluit op de bovenzijde van de oven.

Rook afkomstig vanuit de oven wordt niet door de kap aangezogen. Vrijkomende rook uit de zijkanten en voorzijde van het proefstuk wordt via de afzuigkap door een meetsectie gevoerd. In deze meetsectie bevindt zich een rookdichtheidsmeting en een volumestroommeting met temperatuurmeting.

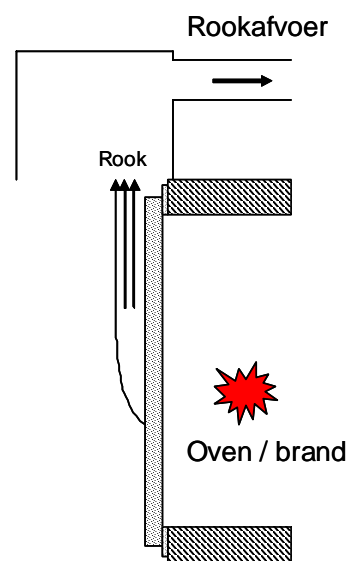
Volumemeetstation

Het volumemeetstation in de meetsectie van het afzuigstelsel is een onderdeel van de bepaling van de brandwerendheid van brandkleppen. Het bestaat feitelijk uit een leidingsysteem met meetflens waarbij drukverschil en temperatuur worden gemeten om de volumestroom van het afgevoerde lucht/rookmengsel te kunnen bepalen. Deze worden bepaald en gecorrigeerd naar m^3/h bij kamertemperatuur (m^3/h).

Het maximaal te meten debiet bedraagt $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. Het afzuigdebiet kan traploos worden ingesteld met een frequentiegestuurde aanzuigventilator. De tijdens de proef opgevangen en gemeten rook wordt via een leidingsysteem afgevoerd naar het centrale rookafzuigstelsel van het laboratorium.

Rookdichtheidsmeting

In de meetsectie van de afzuigkap is rookdichtheids-meetapparatuur opgenomen. Het betreft hier de meetapparatuur als gebruikt bij de bepaling van de rookproductie van bouwmaterialen als beschreven in EN 13823. Dit optische rookmeetsysteem bestaat uit een lichtbron met ontvanger waarbij de lichtbundel door de doorsnede van meetsectie schijnt. In geval er rook door de meetsectie wordt gevoerd, zal de door de ontvanger gemeten lichtsterkte verzwakken waarbij de mate van verzwakking een maat is voor de rookdichtheid.



Figuur D.1

- a. Een van de proefstukken voor aanvang van de test. Zichtbaar is het proefstuk gemonteerd tegen de voorzijde van de oven, met daarboven de afzuigkap op een frame en thermokoppels voor de brandwerendheidsbepaling.*
- b. Principeschets van de opstelling met gestippeld het proefstuk, gearceerd de ovenvloer en -plafond, en de afzuigkap en de rookafvoer boven het proefstuk.*

D.2 Proefstukken

Keuze van de proefstukken

Zoals eerder aangegeven is het onderzoek gericht op typen brandwerende scheidingsconstructies die nog niet op de markt als product voor die toepassing verkrijgbaar zijn en die wellicht bij hoge uitzondering op locatie uit componenten (algemeen verkrijgbare bouwproducten) worden opgebouwd. Aan brancheverenigingen van brandbare isolatiematerialen is daarom gevraagd voorstellen te doen voor brandwerende scheidingsconstructies die met hun product *zouden kunnen worden* opgebouwd. Daarbij is als randvoorwaarde gesteld dat de brandwerendheid ten minste 30 minuten, maar niet meer dan 60 minuten mocht bedragen; dat laatste om al te robuuste uitvoering van de constructies te voorkomen. De proefstukken zijn daarmee realistisch mogelijke toekomstige producten, maar niet noodzakelijkerwijs de beste of slechtste⁴⁷ uitvoeringen die mogelijk zijn binnen de gevraagde brandwerendheden.

Wat betreft de schaal van de proefstukken en het aantal proefstukken: de gekozen schaal is een compromis tussen kosten en hoeveelheid informatie. Proeven op praktijkschaal, met volle verdiepingshoogte en realistische wandlengte, zijn te verkiezen, maar wereldwijd worden proeven op wanddelen van 3m hoog en 4m breed als “voldoende” gezien om inzicht te geven in de praktijk. De onderzochte toepassingen betreffen vooral wandhoogten van één verdieping; industriële toepassingen met grotere overspanningen vallen niet binnen het kader van dit onderzoek.

Het verder terugschalen tot een afmeting van 1,2m x 1,2 m heeft vooral gevolgen voor het deformatiegedrag, met name het uitbuigen van de constructie. Op basis van ervaring bij Efectis, en deze ervaring wordt bevestigd door de uitgevoerde proeven, is deze deformatie voor veel constructies niet maatgevend. Het gaat dan om constructies met relatief zware beplating, in de uitgevoerde proeven bestaand uit gipsplaten; voor die constructies is het doorbranden door het oppervlak bijna altijd maatgevend. Voor constructies met een dunne (staal)beplating is deformatie wel van belang en moet het resultaat van proeven op middelgrote schaal worden “vertaald” naar een grotere schaal. Deze vertaling is voor de maximale rookdoorlaat redelijk goed uit te voeren vanwege de randvoorwaarde dat de constructie brandwerend moet blijven (wat de maximale deformatie ter plaatse van de naden beperkt).

Om de testserie klein te houden is gekozen voor een selectie met de meest gangbare brandbare isolatiematerialen EPS en PIR/PUR en een proefstuk met steenwol als isolatie ter vergelijking.

De proeven zijn uitgevoerd op acht wandconstructies. Na een serie van zeven proeven is de constructie met de hoogste rookproductie uit de randen, met een andere randdetailering opnieuw getest, om de invloed hiervan op het testresultaat te onderzoeken.

De tests op deze schaal geven een inzicht in het verbrandings- en het inbrand-proces in constructies. Daarnaast zijn op deze schaal aan de niet-brandzijde vrijkomende gassen goed te verzamelen en te meten. Het mechanisch deformatieproces van de relevante constructies komt op deze schaal niet geheel overeen met de praktijk.

⁴⁷ “Beste of slechtste” in de zin van rookproductie aan de niet-brandzijde.

Type-beschrijving van de proefstukken:

De samenstelling van de proefstukken is hier beschreven als type en niet op basis van productnamen, omdat de constructies op zich geen bestaand product zijn, of geen bestaand product voor dit doel zijn. De prestaties in dit onderzoek hebben daarom geen directe relatie met de prestatie in hun beoogde functie. De gegeven nummering is willekeurig en heeft geen relatie met volgorde van levering of testuitvoering.

1: Staalsandwich 2x 0,5mm; kern 100 mm PIR; staalcoating 25µm polyester; 1 verticale naad (standaard sandwichpaneelverbinding) met schroeven 250 mm hoh; randen met U-profiel 100mmx80mm.

2: Metalstud U50; regels hoh 600mm; kern 30mm PIR; aan beide zijde 12,5mm standaard gipsplaten; 2 verticale naden in toplaag; naden dicht gezet met glasvezelband en gips-filler; bevestiging met schroeven 250mm hoh.

3: Stalen C profielen 1.5 mm dik, boven en onder ingeklemd tussen stalen U-profielen; steenwol vulling 35 kg/m³ en 50mm dik; aan beide zijden 12,5 mm gipsvezelplaat Fermacell; 1 verticale naad afgewerkt met stalen omega profiel; bevestiging met 25mm schroeven hoh 250 mm.

4: Vurenhouten stijlen van 60x44mm; regels hoh 300mm; kern 60mm EPS 60 SE; aan beide zijden eerst 12mm spaanplaat SB7, dan 12,5 mm standaard gipsplaten op de stijlen; 2 verticale naden in toplaag; randen en naden dicht gezet met gips-filler; bevestiging 10 schroeven in de hoogte, 13 schroeven in de breedte.

5: Staalsandwich 2x 0,5mm; kern 100 mm PIR; staalcoating 25µm polyester; 1 verticale naad (standaard sandwichpaneelverbinding) met schroeven ca. 200 mm hoh; randen met strook minerale vezel en U-profiel 100mmx80mm; randen en naden dicht gekit.

6: Vurenhouten stijlen van 60x44mm; regels hoh 300mm; kern 60mm EPS 60 SE; aan beide zijde 12,5mm standaard gipsplaten, aan brandzijde 2-laags met versprongen naden, aan andere zijde 1-laags; 2 verticale naden in toplaag; randen en naden dicht gezet met gips-filler; bevestiging 10 schroeven in de hoogte, 13 schroeven in de breedte.

7: Vurenhouten stijlen van 60x44mm; regels hoh 600mm; aan beide zijden 60mm PUR/gips-plaat (50mm PUR+9,5 mm gips); 2 verticale naden en één 300mm horizontale naad in toplaag; naden dicht gezet met glasvezelband en gips-filler; bevestiging met schroeven 250mm hoh.

8: Metalstud U50; regels hoh 300mm; kern 60mm EPS 60 SE; aan beide zijde 12,5mm standaard gipsplaten, aan brandzijde 2-laags met versprongen naden, aan andere zijde 1-laags; 2 verticale naden in toplaag; randen en naden dicht gezet met gips-filler; bevestiging met schroeven 150mm hoh in de hoogte, ca. 120 mm hoh in de breedte.

De constructies met EPS waren alle drie voorzien van een dubbele beplating (twee met 2xgips, een met gips-spaanplaat) aan de brandzijde; de drie constructies met PIR waren in één geval voorzien van een enkele gipsplaat en bij de twee andere constructies van een staalcachering aan de brandzijde.

De constructie met steenwol was in tegenstelling tot de andere constructies met thermisch zware beplating voorzien van gipsvezelplaat, i.p.v. gipsplaat.

D.3 Proefresultaten

De brandwerendheid van de beproefde constructies voldeed (bij benadering) aan de vereiste 30 tot 60 minuten; twee constructies vielen net buiten de bandbreedte met een brandwerendheid van 26 en 64 minuten. Voor de constructies met een brandwerendheid van ten minste 30 minuten is de rookproductie in de eerste 30 minuten beschouwd; voor de constructie met 26 minuten brandwerendheid is de rookproductie tot het einde van brandwerendheid beschouwd.

De algemene indruk is dat er in aanvang nagenoeg geen rook vrijkomt uit het wandoppervlak aan de niet-direct verhitte zijde van de proefstukken. Met “in aanvang” wordt met name de eerste 15 minuten van de test bedoeld. Als er rook vrijkomt dan is dat in vrijwel alle gevallen uit de zijkanten van het proefstuk.

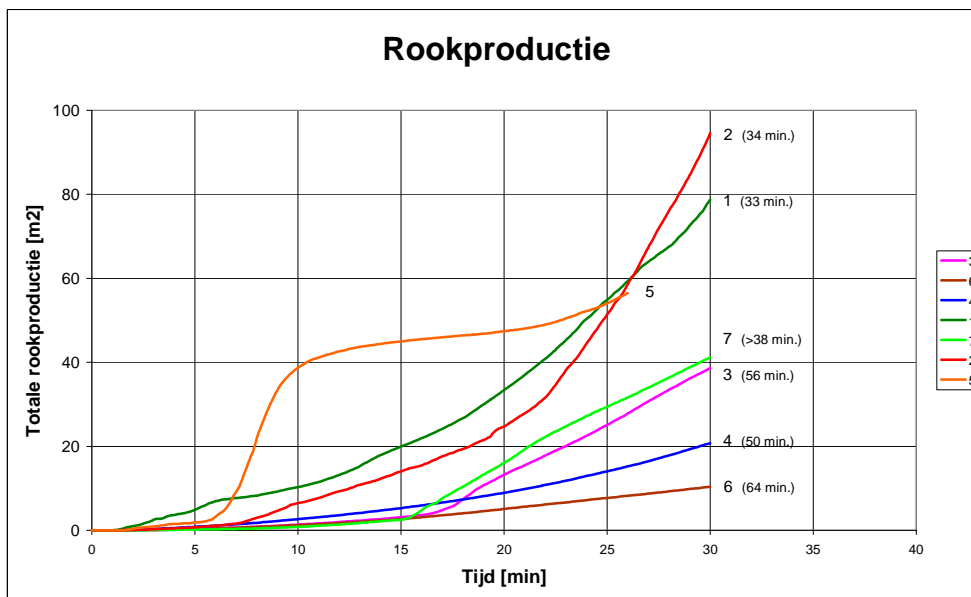
Met uitzondering van de staal-sandwichconstructie bestaan alle constructies aan de zichtzijden uit gipskartonplaat waarvan de naden zijn afgewerkt. Deze naden blijven allemaal tot vlak voor het bereiken van de brandwerendheid intact waardoor via het oppervlak geen rook vrijkomt. In algemene zin bezwijkt na ca. 15 minuten de gipsplaat aan de verhitte zijde, waarna de isolatielaag wordt bereikt. Bij dubbele beplating is dat na ca. 30 minuten. Het bereiken van het einde van de brandwerendheid is bij die constructies het doorbranden door het oppervlak van de gipsbeplating en niet het openen van de naden.

De middennaad in de staal-sandwichconstructies vervormt langzaam, zodat na ca. 20 minuten kleine hoeveelheden rook eruit ontsnappen. Het einde van de brandwerendheid wordt bij die constructies veroorzaakt door het openen van de naad en het daardoor overschrijden van het temperatuur-criterium voor het oppervlak.

Na afloop van de proef is 80-90% van het isolatiemateriaal opgebrand, met de restanten nabij de randen van het proefstuk.

De gemeten rookproductie is afkomstig vanuit het proefstukoppervlak en de omranding. De verhouding tussen twee stromen is indicatief visueel beoordeeld. De eerste stroom zal in de praktijk ook altijd optreden. Het rookstroom vanuit de randen is in de praktijk afhankelijk van de daar gebruikte aansluiting op andere constructieonderdelen (wand, vloer, plafond). Dit is vooral van belang voor de staal-sandwichconstructies aangezien het merendeel van de rook daaruit vooral in een vroeg stadium aan de randen ontsnapt. Tijdens de proeven kwam een belangrijk deel van de rook uit de aansluiting van de rand met de oven, wat erop duidt dat deze rook in een praktijktoepassing grotendeels in de brandruimte zou vrijkomen. Bij proefstuk 5 is tussen 7 en 10 minuten bijvoorbeeld veel rook gemeten (in de vorm van ontledingsgassen) die in een praktijktoepassing waarschijnlijk niet aan de koude zijde zou vrij komen, maar aan de hete zijde zou verbranden.

Tijdens proef 8 weigerde de opslag van het meetsysteem enige tijd; het resultaat kwam in grote lijnen overeen met de curven 1 en 3, en was waarschijnlijk daartussen gelegen; deze curve is niet weergegeven.



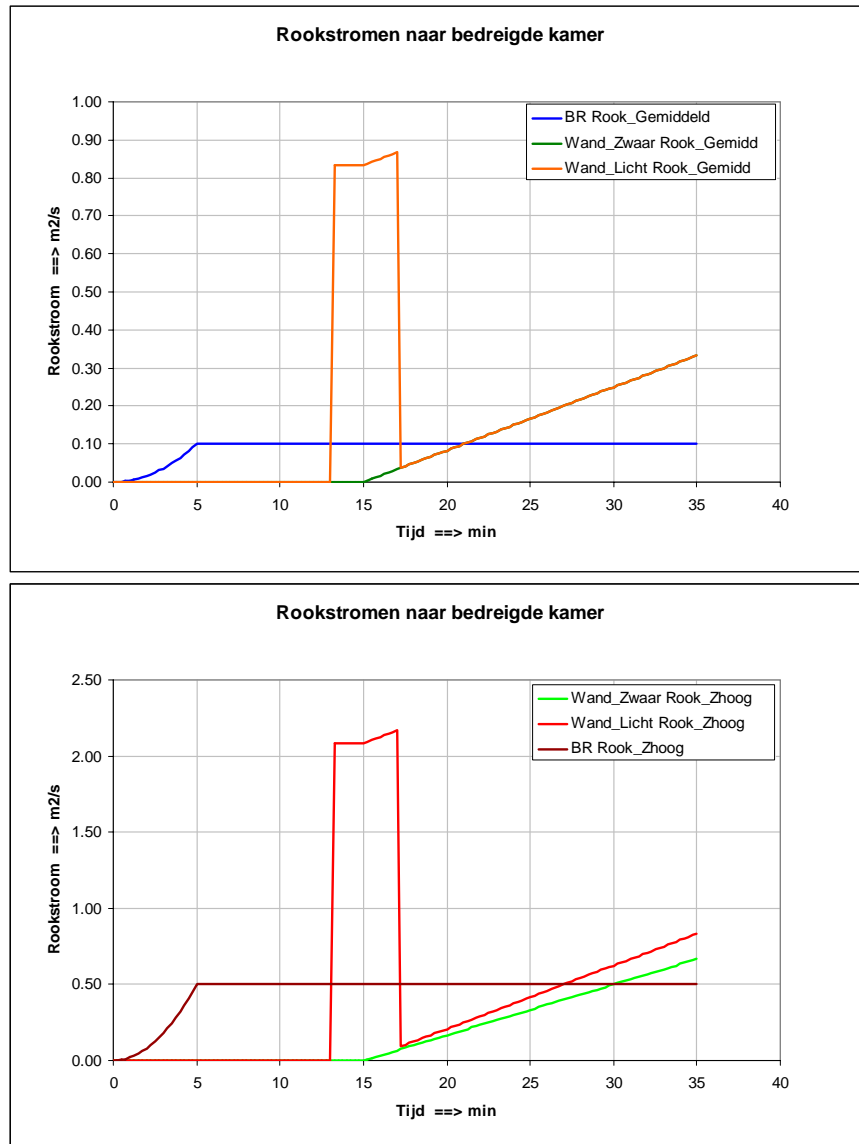
Figuur D.2: Cumulatieve rookproductie van de brandwerende constructies aan de koude zijde en de randen gedurende een thermische belasting volgens de standaard-brandkromme. Aan het eind van elke curve is de brandwerendheidsduur aangegeven. Tijdens proef 8 weigerde de opslag van het meetsysteem enige tijd; het resultaat kwam in grote lijnen overeen met de curven 1 en 7, en was waarschijnlijk daartussen gelegen; deze curve is niet weergegeven.

Vanuit de naadverbinding in het midden van de constructie is in geen van de proeven een belangrijke hoeveelheid rook uitgestroomd, n.l. (ruim) onder de 50 m². De totale uitstroom bedroeg in geen enkel geval meer dan 100 m² in de beschouwde 30 minuten. Zie hiervoor figuur D.2, waarin de cumulatieve rookproducties zijn weergegeven. De rookproducties worden alleen in de eerste 30 minuten vergeleken; in figuur D.2. is aangegeven hoe lang de brandwerendheid in stand bleef.

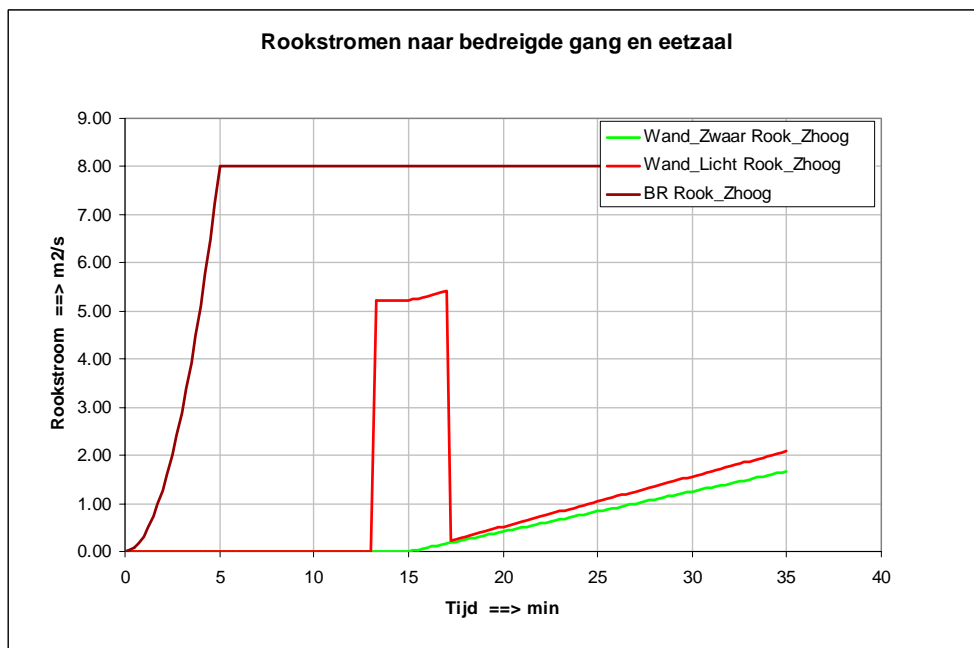
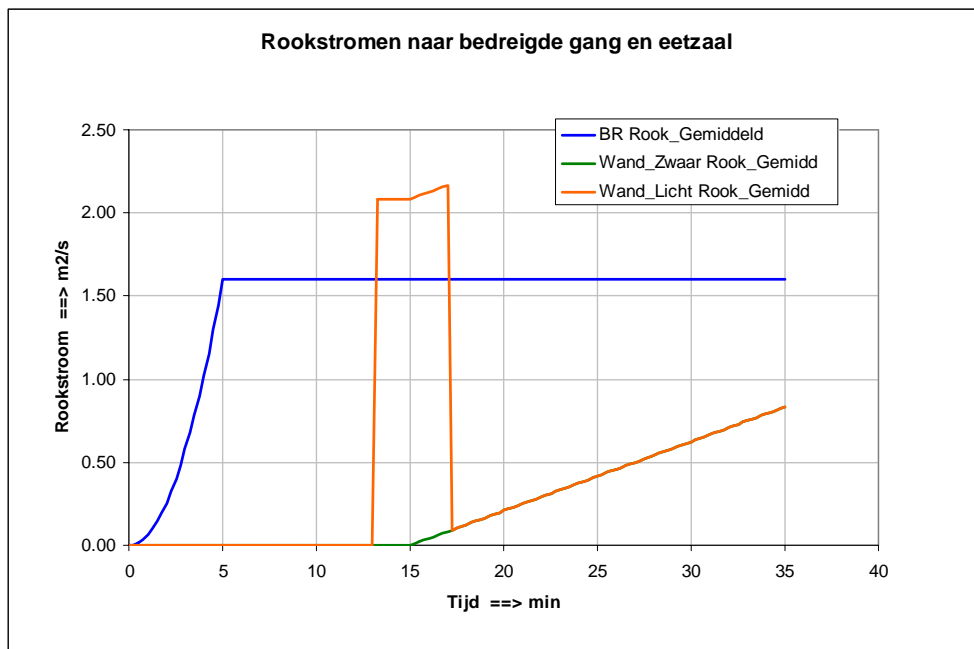
De rookproductie van de constructie met steenwol-isolatie is duidelijk groter dan op basis van de samenstelling verwacht mag worden. De oorzaak daarvan is niet duidelijk. De constructies met een stalen buitenbeplating en met een enkellaags gipsbeplating, alle met een PIR-kern, presteerden slechter dan de overige constructies, zowel in totale hoeveelheid vrijgekomen rook in 30 minuten, als het eerdere moment van vrijkomen. De constructies met EPS-kern waren alle uitgevoerd met dubbele beplating aan de brandzijde, zodat de hoogste brandwerendheden werden bereikt. De resultaten voor de EPS-constructies zijn hierdoor waarschijnlijk wat beter dan behaald zou zijn bij een brandwerendheid gelijk aan de PUR/PIR-constructies.

E Vluchtcondities - Rekenresultaten

Op basis van de berekende, geschatte en gemeten rookstromen vanuit de constructie en vanuit de brandruimte zijn de rookdichtheden in de bedreigde ruimten berekend. De genoemde rookstromen zijn hieronder nog grafisch weergegeven in figuur E1.

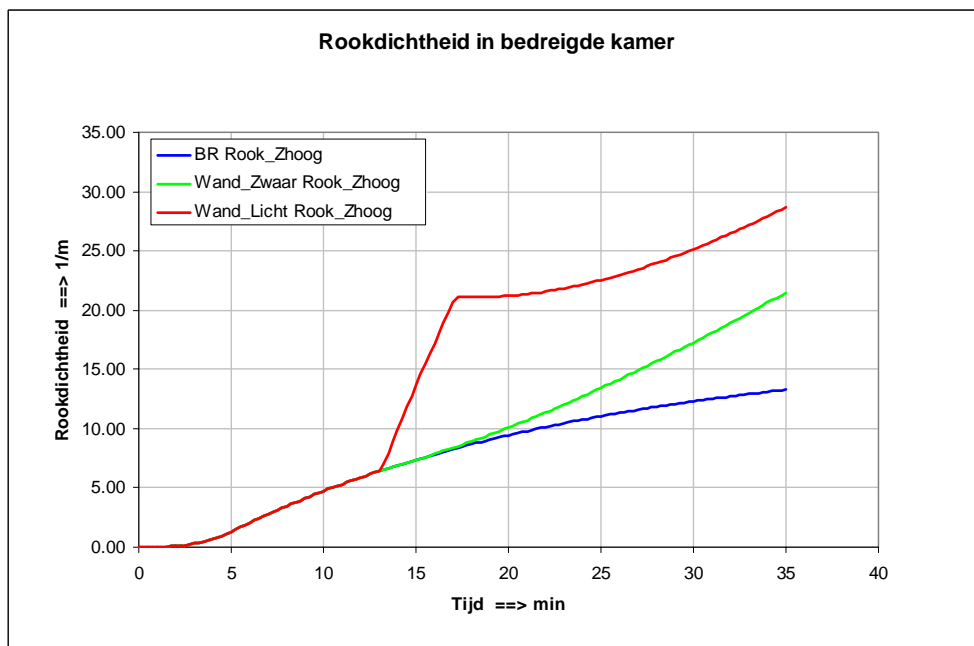
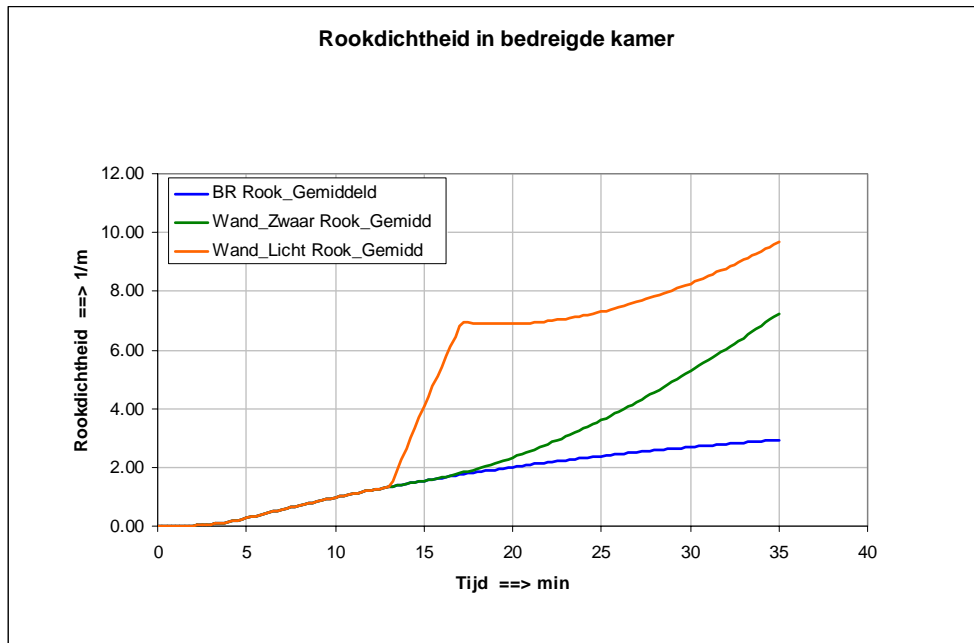


Figuur E.1a+b: Modelling van de gemiddelde waarden (figuur a) en zeer hoge waarden (figuur b) voor de rookstromen naar de bedreigde kamer vanuit de brandruimte (BR) en vanuit de constructie (voor thermisch lichte en zware beplating). Deze rookstromen dienen als invoer voor de berekening van de rookdichtheden in de bedreigde ruimten.

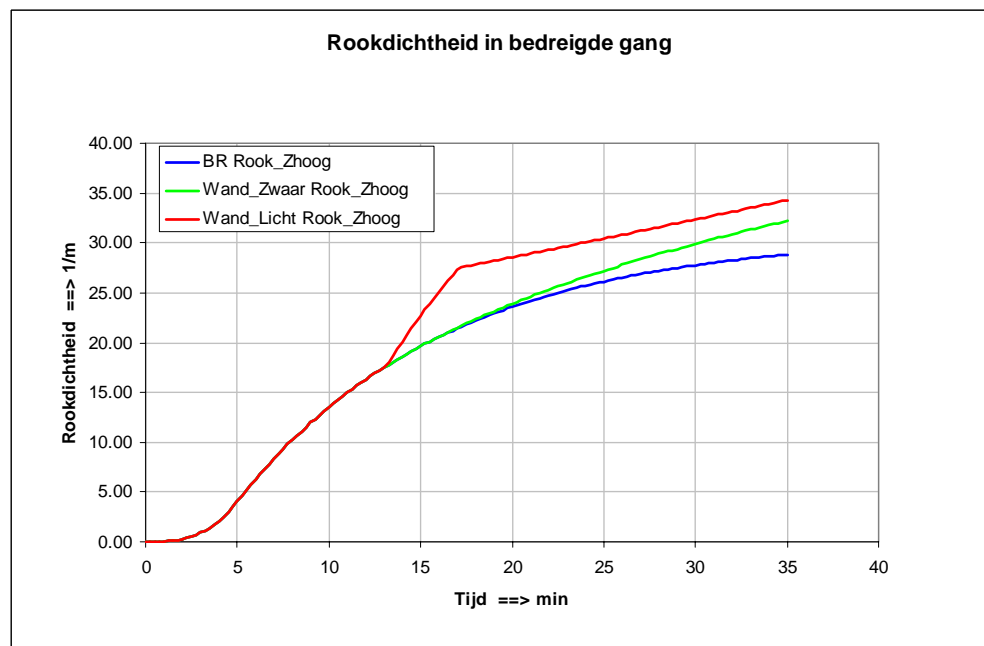
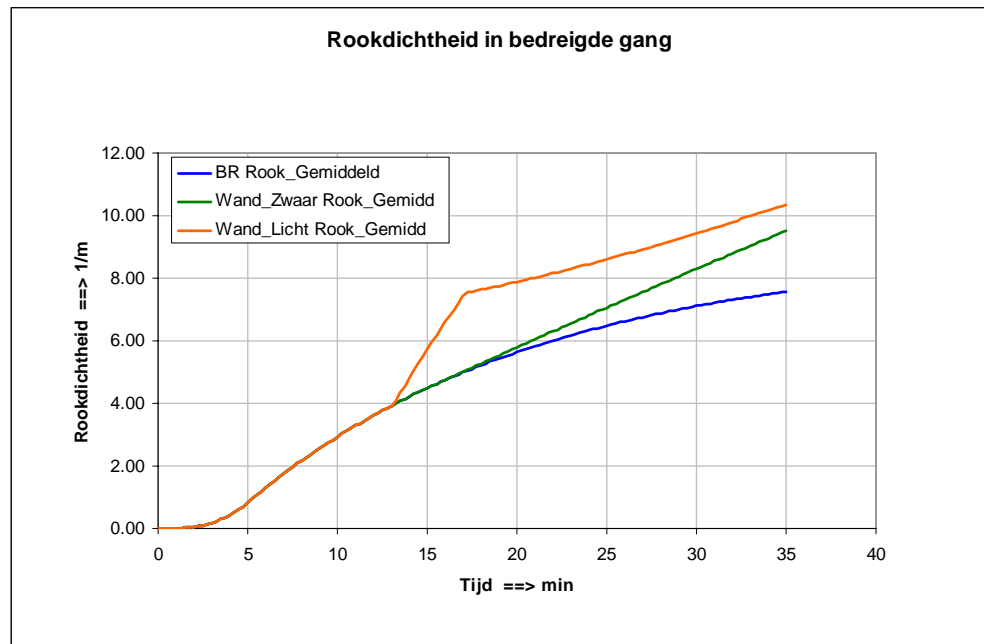


Figuur E.2a+b: Modellering van de gemiddelde waarden (figuur a) en zeer hoge waarden (figuur b) voor de rookstromen naar de bedreigde gang en eetzaal vanuit de brandruimte (BR) en vanuit de constructie (voor thermisch lichte en zware beplating). Deze rookstromen dienen als invoer voor de berekening van de rookdichtheden in de bedreigde ruimten.

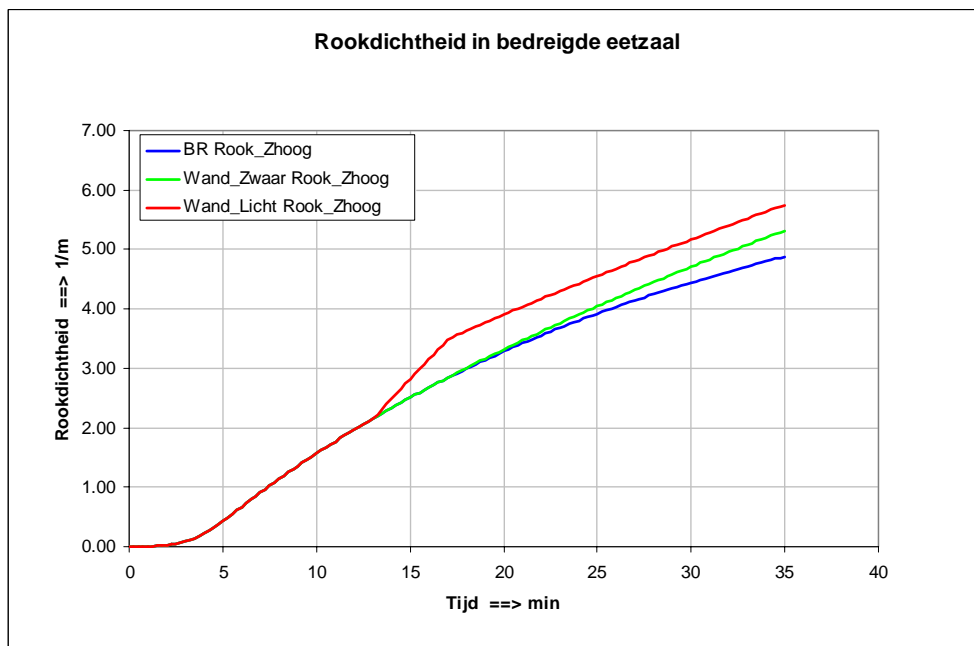
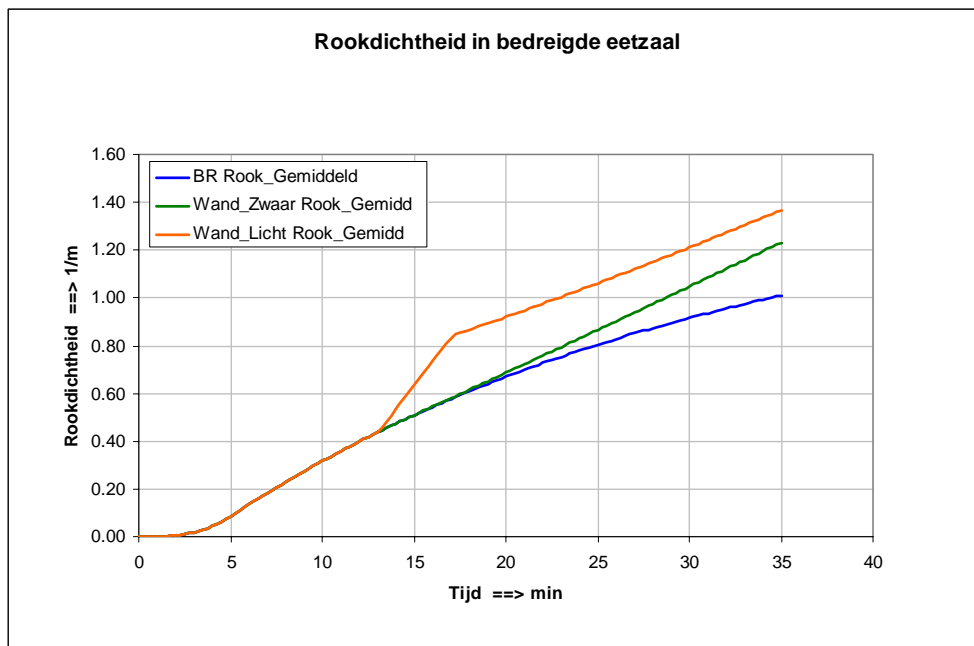
De rekenresultaten in termen van rookdichtheid zijn samengevat in onderstaande figuren E3 t/m E5. Zie voor de berekeningswijze bijlage A, voor de invoergegevens figuren E1 en E2, en bijlage B.



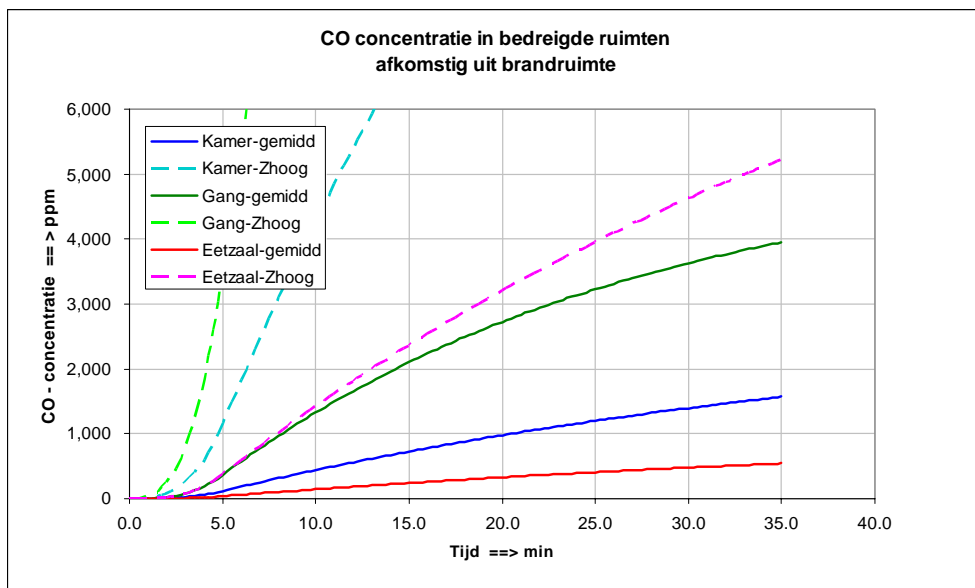
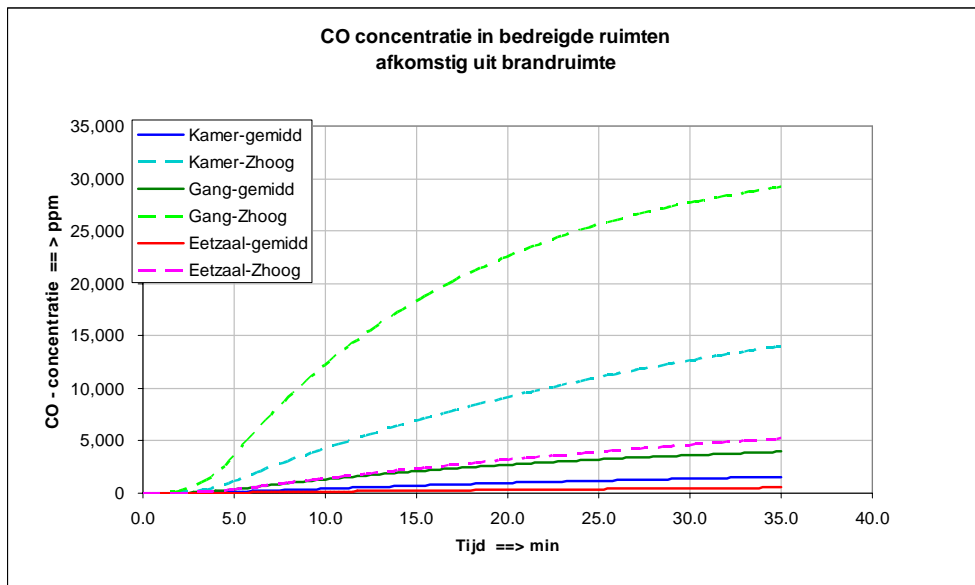
Figuur E.2a+b: Rookdichtheden in de kamer-configuratie, bij gemiddelde waarden (figuur a) en zeer hoge waarden (figuur b) voor de rookstromen vanuit de wand (voor thermisch lichte en zware beplating) en de brandruimte (BR).



Figuur E.3a+b: Rookdichtheden in de gang-configuratie, bij gemiddelde waarden (figuur a) en zeer hoge waarden (figuur b) voor de rookstromen vanuit de wand (voor thermisch lichte en zware beplating) en de brandruimte (BR).



Figuur E.4a+b: Rookdichtheden in de eetzaal-configuratie, bij gemiddelde waarden (figuur a) en zeer hoge waarden (figuur b) voor de rookstromen vanuit de wand (voor thermisch lichte en zware beplating) en de brandruimte (BR).



Figuur E.5a+b: CO-concentraties in de bedreigde ruimten, afkomstig uit de brandruimte, bij gemiddelde waarden en zeer hoge waarden voor de rookstromen vanuit de wand (figuren a. en b. zijn identiek, echter met andere CO-concentratie-schaal).

F Literatuuroverzicht

Naslagwerken

1. “An introduction to fire dynamics”, D. Drysdale; Wiley, UK, 1998
2. “Fire Protection Handbook”, A.E. Cote a.o., NFPA, USA, 2008
3. “Fire retardancy of polymeric materials”, F. Grand, C.A. Wilkie; Marcel Dekker Inc., USA, 2000
4. “Ignition Handbook”, V. Babrauskas; Fire Science Publishers, USA, 2003
5. “Plastics Flammability Handbook – Principles, Regulations, testing and Approval”, J. Troitzsch; Hansler Verlag, Munich 2004
6. “SFPE handbook of fire protection engineering”, P.J. DiNenno, D. Drysdale, C.L. Beyler, W.D. Walton, R.L.P. Custer, J.R. Hall, J.M. Watts; SFPE & NFPA, USA, 2002

Artikelen / rapporten

7. “A Review of the Literature on the Gaseous Products and Toxicity Generated from the Pyrolysis and Combustion of Rigid Polyurethane Foams”, M. Paabo and B.C. Levin; “Fire and materials”, vol. 11, 1-29 (1987)
8. “Compilation of data on the sublethal effects of fire effluents”, E.D. Kuligowski, NIST Technical Note 1644, 2009
9. “International Study of the Sublethal Effects of Fire Smoke on Survivability and Health (SEFS): Phase I Final Report”, R.G. Gann, J.D. Averill, K.M. Butler, W.W. Jones, G.W. Mulholland, J.L. Neviasser, T.J. Ohlemiller, R.D. Peacock, P.A. Reneke, J.R. Hall Jr.
10. “Onderzoek prestatie-eis rookdoorlatendheid scheidingsconstructies”, PRC, concept 13 april 3010
11. “Polystyrenes: A Review of the Literature on the Products of Thermal Decomposition and Toxicity”, J.L. Gurman, L. Baier and B.C. Levin; “Fire and materials”, vol. 11, 109-130 (1987)
12. “Risico’s van brandbare isolatiematerialen”, Adviesburo Nieman b.v., januari 2010
13. “Thermal decomposition of expanded polystyrene”, L. Jacobs, J. Simons, N. Smeets, S. Rovers, N. Benes; Eindhoven University of Technology, 2007

Normen

NEN-EN 13501-2+A1 “Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen - Deel 2: Classificatie op grond van resultaten van brandwerendheidsproeven, behalve voor ventilatiesystemen”, september 2009

NEN-EN 1634-3 “Bepaling van de brandwerendheid van deuren en luiken - Deel 3: Rookwerende deuren en luiken”, oktober 2004

Informatie van belanghebbenden

Productinformatie van leveranciers van proefstukken (meegestuurd of beschikbaar op bedrijfs-website)