

**De methoden die tot nu toe worden gebruikt om te berekenen hoeveel opschuimende verven bijdragen aan de brandwerendheid van staalconstructies, zijn niet voldoende nauwkeurig. Daarom ontwikkelde Hans van de Weijgert een nieuwe methode, de 3D Interpolatiemethode genaamd. Deze werkt met de tijdens brandproeven exacte gemeten tijden en temperaturen, zonder statistische bewerkingen of correcties. Ook legt deze berekeningsmethode het toepassingsgebied van opschuimende verf eenduidig vast. Dit alles maakt dat met deze methode aanzienlijk betrouwbaarder resultaten te behalen zijn.**

In de afgelopen jaren zijn er vele discussies geweest over de wijze waarop de bijdrage\* van bij verhitting opschuimende verven aan de brandwerendheid van staalconstructies het best kan worden berekend. Deze discussies hebben geresulteerd in verschillende beoordelingsmethoden, waaronder grafische methoden, methoden gebaseerd op differentiaalvergelijkingen en lineaire regressiemethoden. Laatstgenoemde methode komt erop neer dat door een puntenwolk een lijn wordt getrokken, zodanig dat de trend van de punten het best wordt gerepresenteerd. Het algemene gevoel heerst dat elk van deze methoden een voorspelling kan geven van de te verwachten brandwerendheid, maar dat geen enkele in staat is dit met grote precisie te doen.

meen aanvaard om te worden opgenomen in ISO 834 deel 11. De methode is eveneens voorgesteld om te worden opgenomen in ENV 13381-4, de Europese norm voor de bepaling van de brandwerendheid van staalconstructies.

De 3D Interpolatiemethode is gebaseerd op tijdens brandproeven gemeten brandwerendheidstijden. Deze tijden worden geïnterpolated in een driedimensionale ruimte: elk proefstuk met zijn tijd voor het bereiken van een bepaalde staaltemperatuur wordt gerepresenteerd door een punt in de driedimensionale ruimte (x,y,z). Drie punten spannen samen een vlak op en de wiskundige vergelijking van het vlak maakt het mogelijk om de brandwerendheidstijd z voor een

# Effect van opschuimende verf nu exact te berekenen

**ir J.C.A. van de Weijgert MSc MIFireE MBEng Eur Ing**  
Hans van de Weijgert is sinds 2000 ingenieur bij International Fire Consultants Ltd (IFC) te Princes Risborough, Buckinghamshire, Engeland. Hij studeerde bouwfysica aan de TU Eindhoven en begon zijn carrière in brandproeven en brandveiligheidsadvies in 1987 bij TNO in Rijswijk.

In een poging om de onnauwkeurigheid bij de voorspelling van brandwerendheidstijden in toom te houden, geven verschillende huidige normen en richtlijnen voorwaarden voor de acceptatie van een beoordeling. Om daaraan te voldoen, moet volgens de huidige methoden het berekeningsresultaat met inschattingen worden bijgesteld. Dit introduceert een verschil tussen de gemeten tijden en de berekende tijden, wat feitelijk onjuist is. Daarom is er behoefte aan een methode die een exacte voorspelling van de brandwerendheidstijden mogelijk maakt en is gebaseerd op feiten, niet op inschattingen.

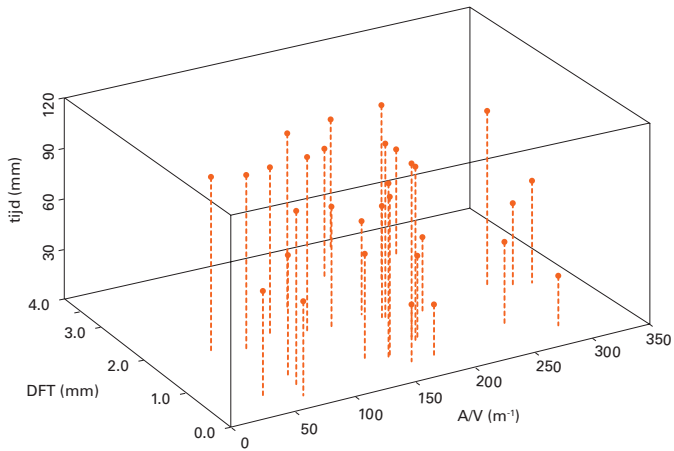
## De 3D Interpolatiemethode

De 3D Interpolatiemethode is een beoordelingsmethode om de bijdrage van bij verhitting opschuimende verven aan de brandwerendheid van staalconstructies te berekenen. Tijdens de ISO-Conferentie in Kyoto in Japan in november 2006 is de methode alge-

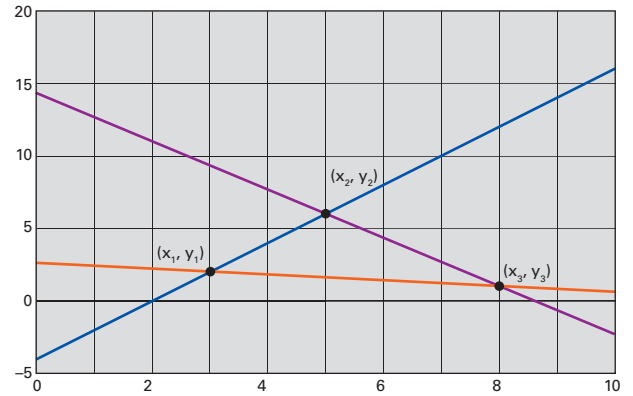
willekeurige combinatie van x en y binnen de grenzen van dat vlak te voorspellen. De grenzen worden gevormd door de driehoek met deze punten als hoekpunten, waarbinnen het gedrag lineair is te interpoleren. Daarbij wordt het gedrag binnen de driehoek fysisch lineair verondersteld, wat kan indien de punten niet al te ver uit elkaar liggen. Bij een groot aantal brandproeven ontstaat zo een groot aantal elkaar snijdende vlakken, die samen een driedimensionaal heuvelandschap vormen. Daarmee kan de bijdrage aan de brandwerendheid van elke willekeurige bij verhitting opschuimende verf met grotere precisie worden gekwantificeerd.

De 3D Interpolatiemethode onderscheidt zich van andere methoden doordat de tijden die bij brandproeven zijn gemeten, onveranderd in het berekeningsresultaat terugkomen. Ook vindt geen statistische verwerking van de meetgegevens plaats, bovendien blijven bij toevoeging van resultaten van aanvullende

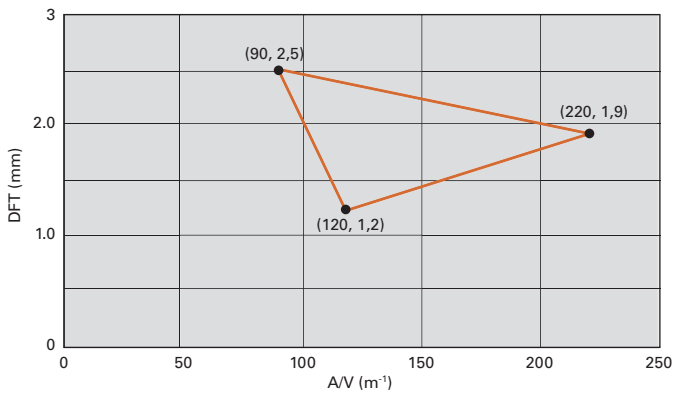
\* De opschuimende coating levert een bijdrage aan de brandwerendheid, maar in een proef wordt de totale prestatie van de staalconstructie samen met de opschuimende coating gemeten (in minuten brandwerendheid). Het is dus géén kwestie van optellen! Het resultaat van de berekening met de 3D Interpolatiemethode is de prestatie in zijn geheel, dus van de staalconstructie samen met de opschuimende coating.



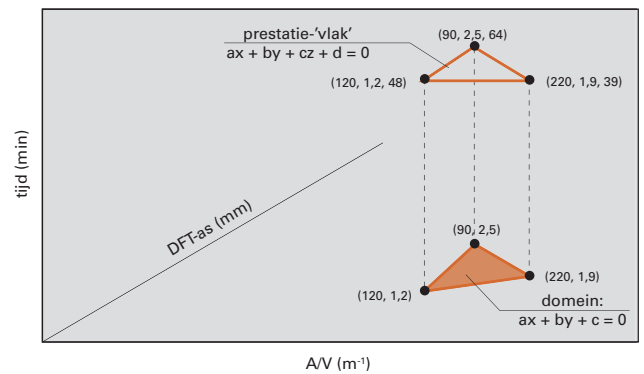
1. Driedimensionale weergave van de brandwerendheid van een aantal proefstukken bij een ontwerp-staaltemperatuur van 550°C. DFT is droge laagdikte, A/V is de profielfactor en t is de tijd (brandwerendheid) in minuten. Uitgegaan is van de standaard brandkromme.



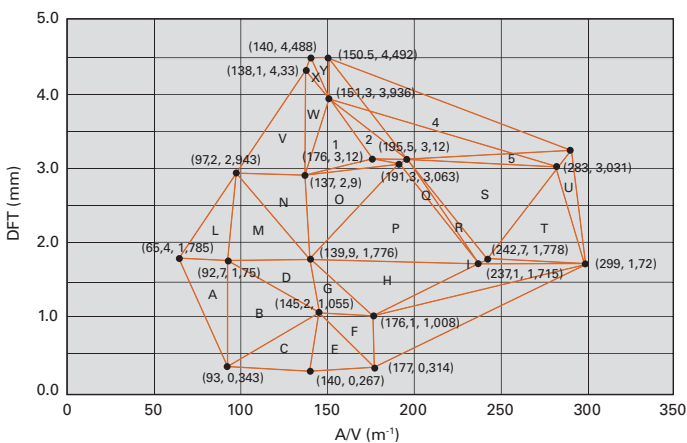
2. Driehoek waarvan de hoekpunten worden bepaald door drie proefstukken.



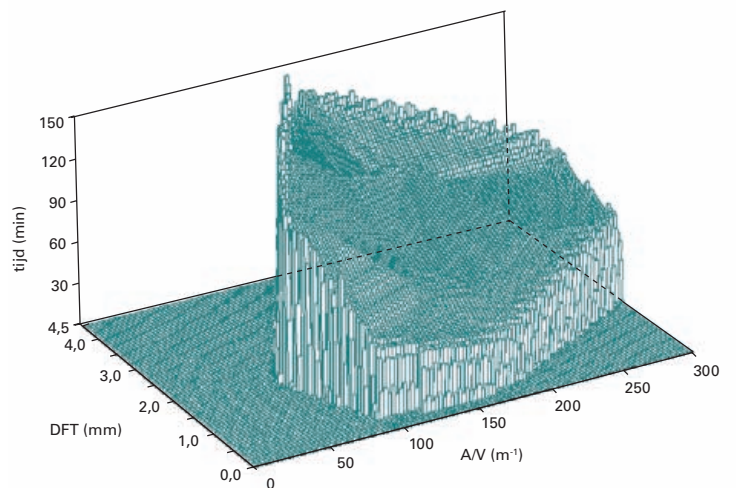
3. De waarden van de droge laagdikte (DFT) en profielfactor A/V voor drie proefstukken.



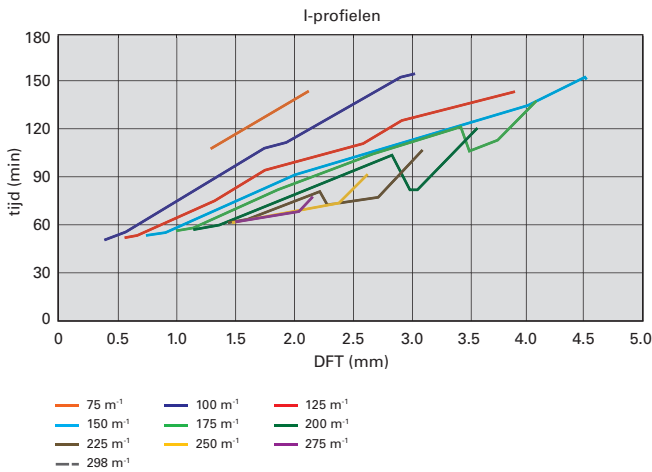
4. De gemeten brandwerendheidstijden voor elk proefstuk, geprojecteerd in de driedimensionale ruimte, spannen samen een vlak op.



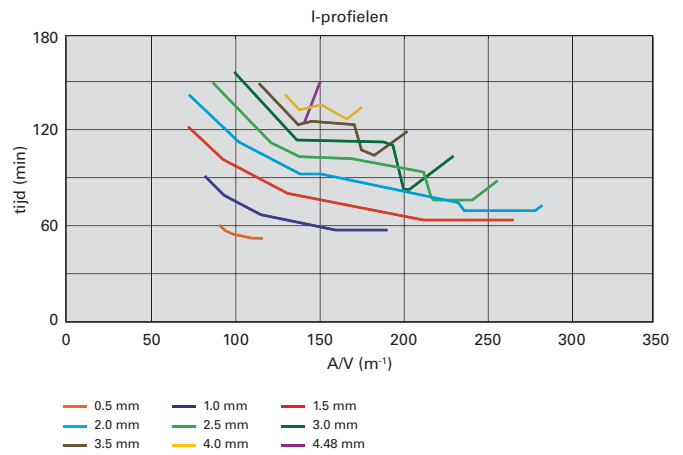
5. Driehoeken, domeinen genaamd, voor een data-set met een groot aantal proefstukken.



6. Voorbeeld van een data-set met brandwerendheidstijden voor een ontwerp staaltemperatuur van 550°C.



7a. Brandwerendheid als functie van droge laagdikte DFT, voor verschillende waarden van profielfactor A/V bij opwarming tot 620 °C.



7b. Brandwerendheid als functie van profielfactor A/V, voor verschillende waarden van DFT bij opwarming tot 620 °C.

proeven de reeds bestaande beoordelingsresultaten onveranderd. Dit laatste lijkt een open deur, maar bij alle bestaande methoden veranderen de reeds bestaande beoordelingsresultaten indien proefresultaten van nieuwe brandproeven aan de beoordeling worden toegevoegd. De 3D Interpolatiemethode onderscheidt zich verder doordat het toepassingsgebied van de bij verhitting opschuimende verf éénduidig door het berekeningsresultaat wordt vastgelegd.

### Vierdimensionaal probleem

De reden waarom het zo lang geduurd heeft om het gedrag van bij verhitting opschuimende verven te beschrijven met een robuuste, wiskundige en op feiten gebaseerde methode, is gelegen in de complexiteit van het onderwerp. Het is eigenlijk een vierdimensionaal probleem, met de volgende vier dimensies: de profielfactor (A/V), de droge laagdikte (DFT), de brandwerendheidstijd (t) en de ontwerp-staaltemperatuur (T). De profielfactor is een parameter die de invloed van de geometrie van het staalprofiel op de ontwikkeling van de staaltemperatuur in rekening brengt.

Om het gedrag beter te kunnen begrijpen, kan het probleem worden teruggebracht tot drie dimensies, waarbij de x-as de profielfactor weergeeft, de y-as de droge laagdikte en de z-as de brandwerendheidstijd. Er is geen plaats voor de w-as, die de temperatuur in

de vierdimensionale ruimte zou weergeven. Maar deze vierde dimensie kan worden verbeeld door de driedimensionale ruimte vele malen achtereenvolgens te visualiseren, iedere keer apart voor elke staaltemperatuur. Het is dus mogelijk om een driedimensionale ruimte te construeren voor een staaltemperatuur van 350°C, een volgende voor 400°C enzovoort, tot 750°C, of voor elke willekeurige temperatuur daartussen.

In dit driedimensionale model wordt een proefstuk gerepresenteerd door een combinatie van profielfactor A/V en droge laagdikte DFT. Bijvoorbeeld een staalprofiel met een profielfactor A/V van 230 m<sup>-1</sup> en een droge laagdikte DFT van 1,23 mm wordt aangegeven als (x,y) = (230, 1,23). Als A/V op de x-as is en DFT op de y-as, dan representeert elk punt (x,y) een proefstuk in het orthogonale x,y-assenstelsel.

Als het proefstuk wordt beproefd volgens de standaardbrandkromme, dan neemt het enige tijd in beslag voordat een ontwerpstaaltemperatuur van bijvoorbeeld 550°C is bereikt. Deze tijdsduur is de zogenaamde brandwerendheidstijd *t* bij een kritieke staaltemperatuur van 550 °C. Door deze brandwerendheidstijd *t* op de z-as te zetten, ontstaat een driedimensionale ruimte waarin elke combinatie van A/V, DFT en tijd *t* wordt voorgesteld als een punt (x,y,z), in de ruimte opgespannen door de x-as, de y-as en de z-as. Deze voorstelling is slechts voor

één bepaalde staaltemperatuur en geeft voor elk proefstuk de brandwerendheidstijd weer, zoals aangegeven in *afbeelding 1*. De positie van de punten bevat alle feitelijke informatie die nodig is als input voor een beoordeling.

### Driehoeken vormen

Om de 3D Interpolatiemethode toe te lichten, zijn er drie proefstukken. Het is nu mogelijk om een driehoek te vormen met de hoekpunten (x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>), (x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>) en (x<sub>3</sub>,y<sub>3</sub>), die elk een proefstuk (x<sub>i</sub>,y<sub>i</sub>) weergeven. Om redenen van eenvoud zijn deze drie punten in het x,y-assenstelsel getekend (z = 0) (*afb.2 en 3*).

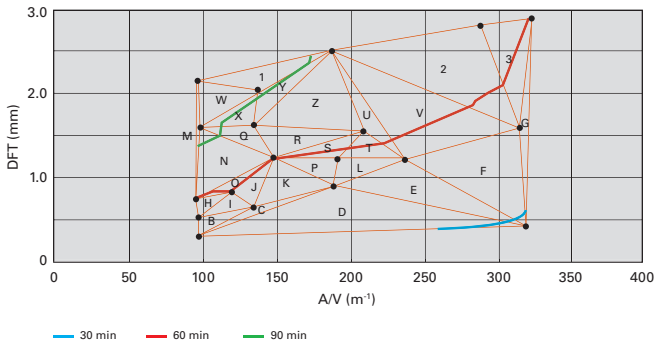
Het is ook mogelijk om de punten met rechte lijnen te verbinden.

De lijnen snijden elkaar in de hoekpunten van de driehoek. De vergelijkingen van de lijnen hebben de vorm:  $y = ax + b$ .

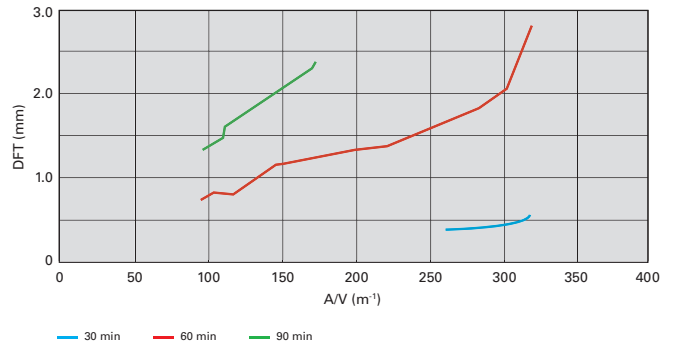
De lijnen omsluiten in het x,y-assenstelsel een gebied dat 'domein' wordt genoemd.

In de driedimensionale ruimte liggen de drie punten (x<sub>1</sub>,y<sub>1</sub>,z<sub>1</sub>), (x<sub>2</sub>,y<sub>2</sub>,z<sub>2</sub>) en (x<sub>3</sub>,y<sub>3</sub>,z<sub>3</sub>) in een vlak, waarvan de vergelijking de vorm  $ax + by + cz + d = 0$  heeft (*afb. 4*). Het domein vormt een gebied met punten (x<sub>i</sub>,y<sub>i</sub>) waarvoor de vergelijking van het vlak van toepassing is.

Door een waarde in te vullen voor x en voor y (x = A/V, y = DFT) in de vergelijking van het vlak, kan de waarde van z (ofwel de brandwerendheid t) worden verkregen. Met andere woorden, voor alle punten binnen de



8a. De droge laagdikte DFT als functie van A/V voor verschillende brandwerendheden (30 min, 60 min en 90 min) bij opwarming tot 550 °C, ingetekend in de driehoekige domeinen.



8b. De droge laagdikte DFT als functie van A/V voor verschillende brandwerendheden (30 min, 60 min en 90 min) bij opwarming tot 550 °C, zonder de driehoekige domeinen.

driehoek in het x,y-vlak (domein) kan de z worden berekend met de vergelijking van het vlak. Dit betekent dat de brandwerendheidstijd  $t$  nu kan worden berekend voor alle combinaties van  $(x_1, y_1)$ , dat wil zeggen voor alle combinaties van A/V en DFT die binnen de driehoek met hoekpunten  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  en  $(x_3, y_3)$  liggen, zoals aangegeven in *afb. 2*. De vergelijking van het vlak is eenvoudiger voor te stellen met de vorm:  $a \cdot A/V + b \cdot DFT + c \cdot \text{tijd} + d = 0$ .

### Proefresultaten

In de meeste gevallen heeft een producent van bij verhitting opschuimende verven veel meer dan slechts drie proefstukken. Daarmee kan het driehoek-principe worden uitgebreid om meer driehoeken in het (x,y)-vlak te construeren, dat wil zeggen in het (A/V,DFT)-vlak. In het bovenstaande werd aangegeven dat drie punten een driehoek vormen, enzo verder: vier punten vormen twee driehoeken, vijf punten vormen ten minste vier driehoeken, zes punten vormen ten minste vijf driehoeken, enzovoort. Een voorbeeld van een data-set met een groot aantal proefstukken is gegeven in *afbeelding 5*.

Elk van de driehoeken vormt het domein waarbinnen de z-waarde is te berekenen uit de  $(x_i, y_i)$ -punten door gebruik te maken van de vlakvergelijking. Met andere woorden, elk van de driehoeken in het (A/V,DFT)-vlak vormt het domein, waarin een combi-

natie van A/V en DFT een brandwerendheidstijd  $t$  oplevert door gebruik te maken van de vlakvergelijking. De vlakken snijden elkaar bij de lijnen die de gemeten brandwerendheidstijden in de driedimensionale ruimte met elkaar verbinden. Een voorbeeld van een data-set met de gemeten brandwerendheidstijden tot een staaltemperatuur van 550°C is gegeven in *afbeelding 6*. Deze afbeelding laat zien dat indien alle vlakken met elkaar worden gecombineerd, zij een driedimensionaal heuvelschap vormen.

### Output

Voor beoordeling van de bijdrage van bij verhitting opschuimende verven aan de brandwerendheid van een staalconstructie kunnen de gegevens met de 3D Interpolatiemethode op verschillende manieren worden gepresenteerd.

1. De brandwerendheid als functie van de droge laagdikte DFT (grafische weergave voor verschillende waarden van A/V) bij één waarde van de temperatuur.

Dit is niets anders dan een verticale doorsnede door het 'heuvelschap'. Een verticaal snijvlak voor een constante A/V levert de doorsnede op en kan voor elke willekeurige waarde van A/V worden gemaakt. Deze doorsnijding laat niet alleen de brandwerendheid als functie van DFT zien, maar maakt ook duidelijk waar proefresultaten beschikbaar zijn en waar niet. *Afbeelding 7a*

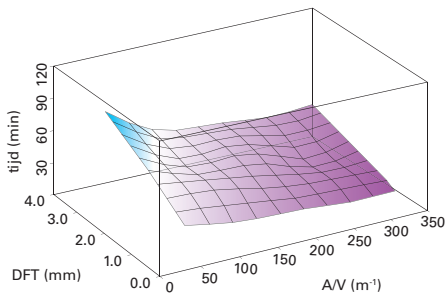
laat zien waar de boven- en ondergrens ligt van de droge laagdikte DFT. De brandwerendheid is op nul gesteld als er geen proefresultaten beschikbaar zijn.

2. De brandwerendheid als functie van A/V (grafische weergave voor verschillende waarden van DFT) bij één waarde van de temperatuur.

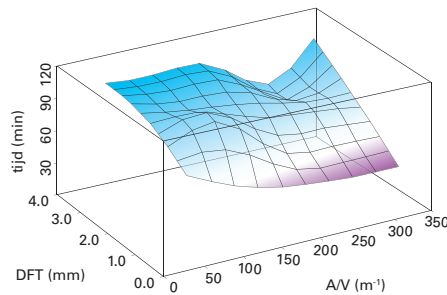
Ook dit is een verticale doorsnede door het 'heuvelschap'. Deze doorsnede is een verticaal snijvlak voor een constante DFT en kan voor elke willekeurige waarde van DFT worden gemaakt. *Afbeelding 7b* maakt duidelijk waar proefresultaten beschikbaar zijn en waar niet. De grafiek laat direct zien waar de boven- en ondergrens ligt van de profiel-factor A/V voor een bepaalde droge laagdikte.

3. Droge laagdikte DFT als functie van A/V (grafische weergave voor verschillende brandwerendheden, bijvoorbeeld 30 min, 60 min, 90 min en 120 min) bij één waarde van de temperatuur.

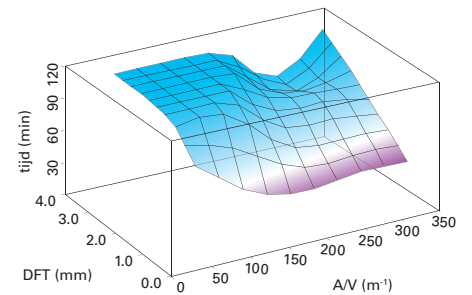
Indien men weten wil hoe dik de droge laagdikte moet zijn om een bepaalde brandwerendheid (bijvoorbeeld 60 minuten) te kunnen bereiken, wordt een horizontale doorsnede gemaakt door het heuvelschap. De hoogte van het horizontale snijvlak is de z-waarde, de brandwerendheid van 60 minuten in dit voorbeeld. Deze doorsnijding levert de laagdiktetabellen op die



9. Driedimensionale grafische weergave van de brandwerendheidstijden voor het bereik van een staaltemperatuur van 350°C.



10. Driedimensionale grafische weergave van de brandwerendheidstijden voor het bereik van een staaltemperatuur van 650°C.



11. Driedimensionale grafische weergave van de brandwerendheidstijden voor het bereik van een staaltemperatuur van 750°C.

fabrikanten in hun brochures vermelden. Een voorbeeld van deze presentatievorm is gegeven in *afbeelding 8a+b*.

Deze verschillende manieren van presentatie maken de vroeger ontoegankelijke informatie over het gedrag van bij verhitte opschuimende verven nu inzichtelijk.

Het is opmerkelijk dat, indien de 3D Interpolatiemethode wordt gebruikt om de brandwerendheid als functie van de profiel-factor te berekenen, dit in sommige gevallen laat zien dat een dikkere droge laagdikte niet altijd een hogere brandwerendheid tot gevolg heeft. Dit wordt geïllustreerd door plaatselijke diepten in het heuvel-landschap. Onverwacht kunnen er plaatselijk een of meerdere dalen zichtbaar worden. Dit kan verschillende oorzaken hebben, bijvoorbeeld:

- de receptuur van de bij verhitte opschuimende verf;
- een ongunstige positie van het proefstuk in de oven;
- turbulentie van ovengassen;
- afbrokkelen van brossen opgeschuimde verf;
- uitzakken van geactiveerde opschuimverf;
- grote spreiding in de diktemetingen van de verflaag;
- onnauwkeurige vaststelling (meting) van de droge laagdikte.

Indien verschillende doorsneden in één grafiek worden gecombineerd, wordt het duidelijk dat lijnen voor verschillende DFT's

elkaar soms snijden. In *afbeelding 7a en 7b* bijvoorbeeld blijken de lijnen voor DFT = 2,5 mm en 3,0 mm elkaar te snijden. Dit gedrag is niet zoals verwacht: voor een bepaalde groep A/V-waarden geeft een 3,0 mm dikke droge laagdikte een lagere brandwerendheid dan de 2,5 mm dikke droge laagdikte. Deze methode maakt inzichtelijk in welke gebieden van profiel-factor A/V en droge laagdikte DFT verbetering mogelijk is voor de receptuur van de verf. Dit is een zeer nuttig gereedschap voor chemisch ingenieurs die zulke verven ontwikkelen.

### Precies in de roos

Correctietechnieken om te voldoen aan acceptatiecriteria voor de beoordeling, zoals bij andere methoden nodig zijn, zijn bij de 3D Interpolatiemethode overbodig. Omdat de methode gebaseerd is op feiten wordt namelijk automatisch voldaan aan de acceptatiecriteria voor de beoordeling. Voorspelde waarden volgen direct uit een interpolatie van gemeten waarden, waardoor het verschil tussen de gemeten brandwerendheid en de voorspelde brandwerendheid gelijk aan nul zal zijn. Ofwel, de verhouding tussen de berekende tijden en gemeten tijden gelijk aan 1. De methode is alleen geschikt voor interpolatie, niet voor extrapolatie. Dat betekent dat voorspellingen die de gemeten brandwerendheid te boven gaan niet bestaan. Hetzelfde geldt voor voorspellingen die lager zijn dan de gemeten brandwerendheid. Opgemerkt moet worden dat de methode

een gloeiend landschap weergeeft als een verzameling van vlakken, zoals een geodesisch landschap. De proefstukken dienen zorgvuldig te worden gekozen, omdat zij de positie van de drie punten bepalen. Indien de afmetingen van de driehoeken te groot zijn, met andere woorden indien het aantal proefstukken te gering is en op grote afstand van elkaar zijn gelegen, dan neemt de nauwkeurigheid van de voorspelling voor data punten binnen de driehoek, het domein, af. De methode levert een nauwkeurigheid van 100% bij de meetwaarden zelf; voorwaarde is wel dat de proefresultaten betrouwbaar zijn en de waarheid weergeven.

De 3D Interpolatiemethode kan de bijdrage van bij verhitte opschuimende verven aan de brandwerendheid van stalen bouwdeelen inzichtelijk maken als een functie van profiel-factor A/V, droge laagdikte DFT, tijd en temperatuur. *Afbeeldingen 9, 10 en 11* laten driedimensionale grafieken zien van een bij verhitte opschuimende verf tijdens het verhitingsproces in verschillende stadia: bij een staaltemperatuur van 350°C, 650°C en 750°C. •