

Wiskunde voor risico- en milieu-effect berekeningen

R. M. Cooke

Faculteit Technische Wiskunde en Informatica, T.U. Delft

Inleiding

Bij risico- en milieu-effect berekeningen worden wiskundige modellen gebruikt om het transport van schadelijke stoffen door de lucht en onder de grond te voorspellen. Figuur 1 geeft de voorspelde spreiding weer van een pluim radio-actief materiaal na een hypothetisch ongeluk met een kerncentrale onder stabiele weersomstandigheden in Noord Europa. Alle voorspellingen hebben betrekking op een ontsnapping van een bron op 50 m hoogte in een weiland. De pluim beweegt zich in de richting van de wind en dijt uit in verticale richting en in horizontale richting loodrecht op de wind. De wind wordt constant verondersteld. Het plaatje geeft de horizontale spreiding dwars op de windrichting weer, alsof de pluim van een continue uitstoot gefotografeerd werd vanuit de lucht nadat die zich tot 30 km uitstrekte (de centrale zou dan van bovenaf gezien worden).

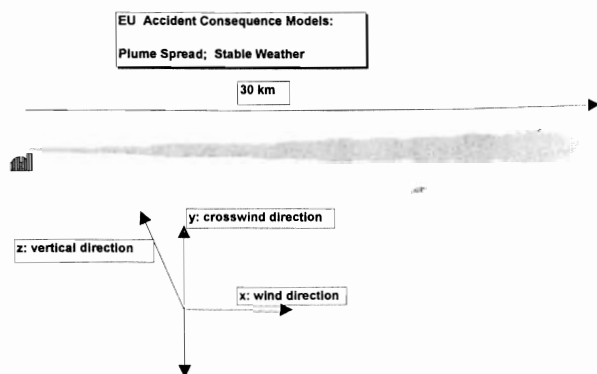


fig. 1 Pluimspreiding bij stabiele weersomstandigheden

De ongeluksmodellen waarin deze voorspellingen verwerkt zijn, zijn het resultaat van de inspanning van grote laboratoria zoals het Kernforschungszentrum Karlsruhe en de National Radiological Protection Board¹. Zulke voorspellingen worden gebruikt bij vestigingsbeslissingen, alsmede bij het maken van rampenplannen voor nucleaire en chemische installaties.

Dit artikel gaat in op enkele nieuwe methoden voor het

analyseren van de voorspelling van zulke ongeluksmodellen. Deze methoden zijn onlangs toegepast in een gemeenschappelijk onderzoek met de Europese Unie en de Verenigde Staten. De rol van onzekerheid staat hierbij centraal.

Onzekerheid

Onder ideale omstandigheden, waarvan men weet dat ze hoogstens bij benadering opgaan, kunnen verspreidingswetten worden afgeleid uit fundamentele natuurkundige wetten. In de praktijk gebruikt men empirische betrekkingen voor deze voorspellingen die op experimenten berusten. Hierbij worden test-pluimen losgelaten. Vooraf opgestelde rijen van collectoren meten de concentraties dwars op de windrichting op verschillende neerwindse posities. De metingen kunnen worden gedaan tot een afstand van circa vijf kilometer van de bron. De modellen worden echter gebruikt om concentraties te voorspellen tot vijftig kilometer van de bron. De bovenstaande pluim is berekend met de eenvoudige 'machtswet':

$$\sigma_y(x) = px^q$$

waarbij x de afstand is in de windrichting, $\sigma_y(x)$ de standaarddeviatie van de concentratieverdeling langs de y -richting, horizontaal en dwars op de wind op afstand x , en p en q zijn constanten die bepaald zijn door experimenten, voor verschillende weersomstandigheden, verschillende hoogtes en verschillende oppervlaktes.

Vanwege de grote complexiteit van de fysische processen in de lagere atmosfeer, is de herhaalbaarheid van de experimenten slecht. Meetomstandigheden kunnen niet echt worden gereproduceerd en twee experimenten uitgevoerd onder 'vergelijkbare weersomstandigheden' kunnen best tot heel andere resultaten leiden. Als vuistregel geldt dat 10-20% van dit soort experimenten wordt afgebroken omdat de testpluim van gedachten verandert en de vooraf opgestelde collectoren geheel vermijdt.

Onder druk van grote en vaak tegengestelde belangen willen de gebruikers van deze ongeluksmodellen een indruk krijgen van de onzekerheid die aan deze voorspel-

lingen kleeft. In de tachtiger jaren hebben deze laboratoria verschillende 'onzekerheidsanalyses' van allerlei ongeluksmodellen uitgevoerd.

De onzekerheid in de invoerparameters (bijvoorbeeld p en q in bovenstaande machtswet) werd gekwantificeerd, veelal op informele wijze en vervolgens door de modellen gepropageerd. De resulterende onzekerheid in de modelvoorspellingen kan worden samengevat in 90% onzekerheidsbanden. Dit zijn banden waarin de voorspelde grootheden met 90% kans moeten liggen. Wanneer we deze 90% onzekerheidsbanden in pluimen vertalen, ontstaat het volgende plaatje. De dikkere en de dunnere pluimen vertegenwoordigen de 90% onzekerheidsbanden voor dwarswindse pluimspreiding bij stabiele weersomstandigheden.

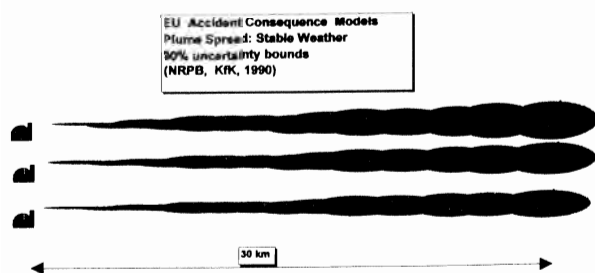


fig. 2 90% onzekerheidsbanden voor pluimspreiding bij stabiele weersomstandigheden

Het zal u opvallen dat deze onzekerheidsbanden nogal nauw zijn, hetgeen wil zeggen dat de wetenschappers erg zeker zijn van de mate waarin ze de spreiding kunnen voorspellen. Maar is deze zekerheid terecht?

Onzekerheid als wetenschappelijke grootheid

Sinds 1990 loopt er een gemeenschappelijk onderzoek van de Europese Unie en de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission (USNRC) om te komen tot een gezamenlijke herijking van de 'state of the art' voor wat betreft de onzekerheidsanalyse van grootschalige ongeluksmodellen². In het kader daarvan worden onzekerheden bepaald voor de invoer en uitvoer van de Europese en Amerikaanse modellen. Aan Europese zijde werken een aantal grote laboratoria mee, waarvan de coördinatie ligt bij de vakgroep Veiligheidskunde van de TU Delft, met wiskundige ondersteuning van de TU Delft.

Aan het analyseren van de onzekerheid van grote risicomodellen kleven veel interessante wiskundige vraagstukken en wiskundigen spelen een belangrijke rol bij het ontwerpen en uitvoeren van grote onzekerheidsanalyses. Eén aspect leent zich hier goed als illustratie. Ter inleiding laat ik onze resultaten zien voor de dwarswindse pluimspreiding onder stabiele weersomstandigheden³.

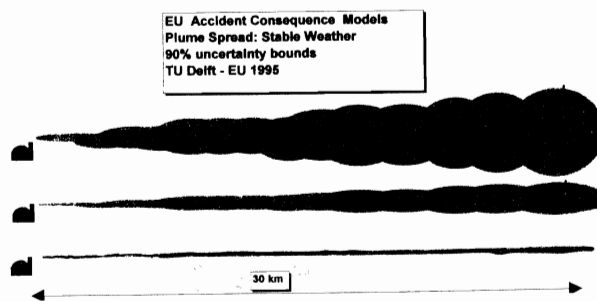


fig. 3 90% onzekerheidsbanden voor pluimspreiding bij stabiele weersomstandigheden; TU Delft methode

Vergeleken met het vorige plaatje is het duidelijk dat er een ander beeld van de onzekerheid bij deze modellen is ontstaan. Als u ook bedenkt dat de ernst van een ongeluk voor een belangrijk deel wordt bepaald door de mate waarin de pluim zich niet uitbreidt, dan kunt u zich voorstellen dat het nieuwe beeld van onzekerheid niet zonder gevolgen kan blijven voor de rampenplannen.

Hoe is dit nieuwe beeld nu tot stand gekomen? Allereerst moest duidelijk worden gemaakt wat de ongeluksmodellen precies dienen te voorspellen. Al snel merkten we dat bij de modelbouwers zelf daar geen eensluidende mening over bestond. Voorspellen de modellen de gevolgen van een ongeluk of de gevolgen van een 'gemiddeld' of 'typisch' ongeluk? Als dat onduidelijk is, zal de onzekerheid in de modelvoorspelling nooit duidelijk worden. Ter illustratie: neem een eerlijke munt en schrijf '1' op de kopzijde en '0' op de muntzijde. De 'gemiddelde uitkomst' van honderd worpen met een eerlijke munt is het aantal koppen gedeeld door 100, en ligt met hoge kans tussen 0,4 en 0,6. De uitkomst van één worp is echter '0' of '1'.

Waarom waren de modelbouwers onduidelijk over wat hun modellen voorspelden? Simpelweg omdat deze vraag nooit duidelijk gesteld is. Voor de onzekerheidsanalyst lijkt dit onbegrijpelijk, maar ik durf te beweren dat bij de meeste toegepaste mathematische modellen de vraag 'wat voorspelt dit model nu eigenlijk?' niet gesteld is. Dit mag een argument zijn voor een veel grotere inzet van onzekerheidsanalyses bij toegepaste wiskundige modellen.

Een van onze eerste taken was dan ook een duidelijke uitspraak te verkrijgen van de verantwoordelijken in Brussel over wat de ongeluksmodellen voorspelden, een ongeluk of een gemiddeld ongeluk. Daarbij vroegen we ook: 'Als een gemiddeld ongeluk wordt voorspeld, dan gemiddeld waarover?' Het antwoord was: 'Een ongeluk, niet een gemiddeld ongeluk'.

Toen dat duidelijk was, kon figuur 4 worden gemaakt. U ziet hier de modelvoorspellingen (aangegeven met '#') voor de laterale en verticale pluimspreiding onder verschillende weersomstandigheden. Ook zijn de 90% onzekerheidsbanden aangegeven (als '[—]') bij deze voor-

spellingen. Onder elke voorspelling is een 'realisatie' aangegeven; dit zijn resultaten van gemeten pluimspreidingen bij experimenten, uitgevoerd onder de betreffende weersomstandigheden. Bij deze exercitie zijn er zesendertig probabilistische voorspellingen waarvoor realisaties aanwezig waren; twintig van de zesendertig realisaties vallen buiten de betreffende 90% onzekerheidsbanden. (In alle figuren die volgen is omwille van de ruimte slechts een beperkt aantal realisaties afgedrukt. De conclusies in het onderzoek zijn uiteraard gebaseerd op de complete datasets.)

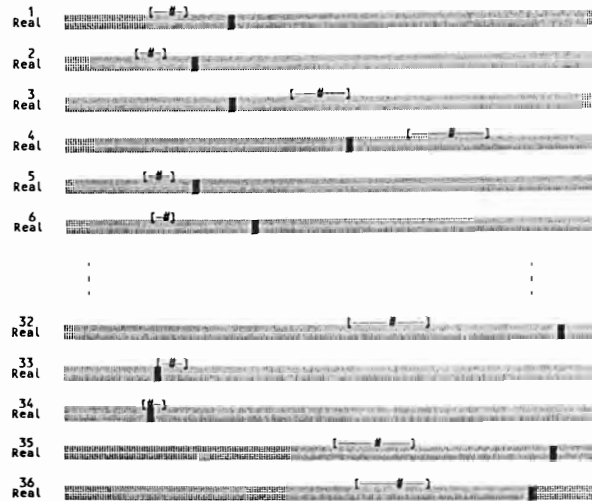


fig. 4 Voorspellingen met onzekerheid van pluimspreiding en realisaties

We zijn te werk gegaan volgens de in Delft ontwikkelde methode van 'performance-based' combinatie van expertmeningen⁴. Kenmerk van deze methode is dat onzekerheid, in dit geval de onzekerheid van experts, gezien wordt als een wetenschappelijk meetbare grootheid. Verschillende experts wordt gevraagd om hun onzekerheid met betrekking tot de resultaten van mogelijke fysische metingen te kwantificeren. Essentieel is dat de vragen zó gekozen worden, dat sommige van de metingen ook daadwerkelijk uitgevoerd zijn. Dit stelt ons in staat om de performance van de experts als probabilistische voorspellers te meten en vervolgens hun meningen te combineren zodat de performance van de gecombineerde expert, de beslisser, optimaal is. Aan deze optimalisatie kleven interessante wiskundige aspecten, die ik hier uiterst summier zal aanstippen.

De meting van performance moet

1. de statistische nauwkeurigheid van de experts belonen
2. het informatiegehalte van de experts belonen
3. de experts niet belonen voor oneerlijke antwoorden.

Statistische nauwkeurigheid houdt in dat de probabilistische uitspraken van een expert, zoals dat 90% van de realisaties binnen de 90% onzekerheidsbanden vallen, goed met de realiteit overeenkomen. Het informatiegehalte

komt overeen met de informatie in de onzekerheidsverdelingen van de expert. Ruwweg, hoe kleiner de onzekerheidsbanden zijn, hoe groter het informatiegehalte is.

Voor het laatste punt is aardig. Hoog gemeten performance betekent grote invloed op de 'optimale beslisser', wat neerkomt op een vorm van macht. Het laatste criterium zegt dat een expert zijn verwachte performance alleen kan maximaliseren door te zeggen wat hij/zij echt denkt. Wie macht nastreeft, moet eerlijk zijn.

Ter illustratie laat figuur 5 de resultaten zien van twee probabilistische voorspellingen van laterale en verticale pluimspreiding. Acht internationale experts namen deel aan dit onderzoek en hun mediaanschattingen met 90% onzekerheidsbanden worden weergegeven, samen met die van de optimale beslisser.

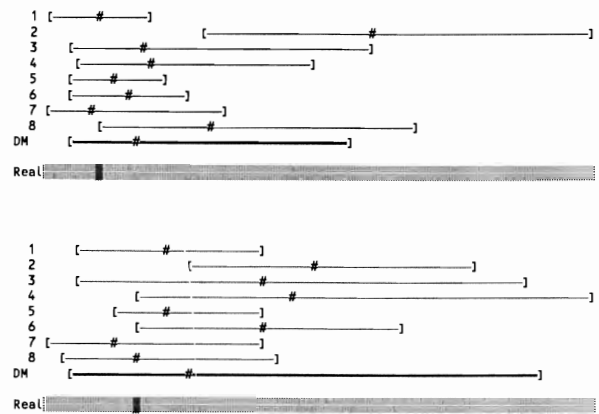


fig. 5 Acht experts en performance-based beslisser voor pluimspreiding, van EU-TU Delft study

Het is ook interessant om de geoptimaliseerde beslisser te vergelijken met de 'equal weight beslisser', dat wil zeggen, met de resultaten van domweg middelen van een aantal expertverdelingen. Figuur 6 toont de probabilistische voorspellingen voor deze twee beslissers voor vijf variabelen (van de drieëntwintig) waarvoor een realisatie aanwezig was.

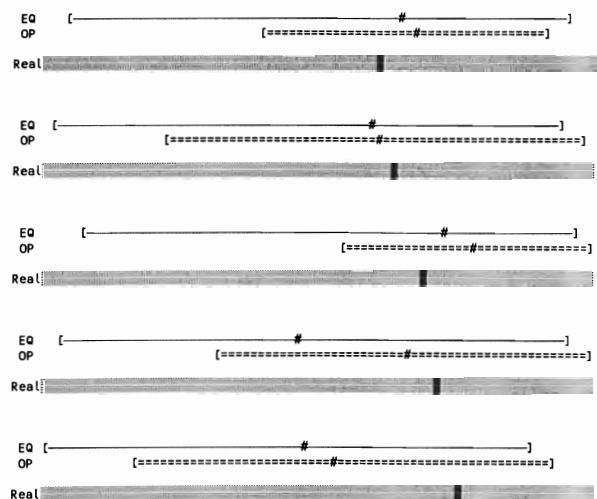


fig. 6 Dispersievoorspellingen van de optimale en de equal weight beslissers

Bestudering van de complete serie leert dat de optimale beslisser informatiever is en ook een grotere statistische nauwkeurigheid heeft dan de equal weight beslisser. (Dit laatste is niet te zien met het blote oog, maar het blijkt wel uit berekeningen.) Het is natuurlijk zo dat één dataset op zichzelf weinig zegt. Vertrouwen in het nut van deze aanpak komt pas als het zich in heel veel verschillende problemen heeft bewezen. Tot op heden is het toegepast op veel problemen in de risicoanalyse, optimaal onderhoud en environmentale modellering. Het nut van performance-meting en optimalisatie heeft zich in elk geval bewezen; soms is de verbetering ten opzichte van de equal weight beslisser marginaal, maar soms ook dramatisch.

Een voorbeeld van zo'n dramatische verbetering ten opzichte van de equal weight beslisser deed zich voor in dit onderzoek met de USNRC bij het bepalen van de onzekerheid over droge depositiesnelheden van aerosolen. Het betreft de snelheden waarmee deeltjes, verontreinigd met radio-actief materiaal, uit de lucht neerslaan op verschillende oppervlaktes. In dit geval 'besloot' de performance-based beslisser met maar één van de acht internationale experts in zee te gaan. Dat wil zeggen dat in de optimale combinatie van de expertmeningen één expert gewicht 1 kreeg en alle andere experts genegeerd werden en dus gewicht 0 kregen. Het verschil in performance tussen deze ene expert (OP) en de equal weight beslisser (EQ) staat in figuur 7 afgebeeld. Bij alle voorspellingen van de equal weight beslisser ligt de mediaanvoorspelling beneden de realisatie. Dit zou leiden tot aanzienlijk optimistischer voorspellingen van de gevolgen van een eventueel ongeluk.

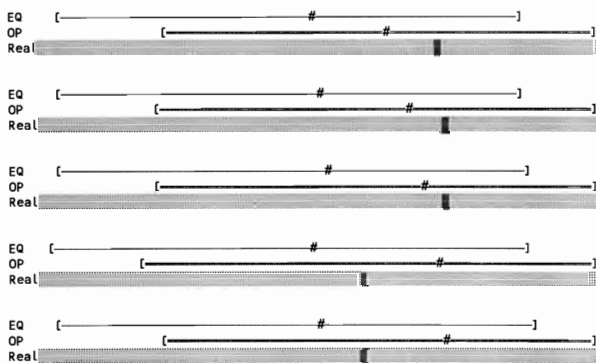


fig. 7 Droge depositie voorspellingen van de optimale en de equal weight beslissers

Conclusie

Ik overdrijf niet wanneer ik zeg dat onze Amerikaanse vrienden wat moeite hadden met deze uitkomsten. Mede hierom hadden zij ook moeite met het verschijnsel per-

formance-based weging. Onze Europese sponsors hielden echter de rug recht en gaven ons opdracht om door te gaan om performance-based weging toe te passen in deze onzekerheidsanalyses. Zij hebben besloten ons te vragen een Europese 'procedures guide' voor het uitvoeren van onzekerheidsanalyses bij ongeluksgevolgmodellen met expertmeningen op te stellen. Aan dit project wordt nog hard gewerkt. Onze Amerikaanse vrienden zijn inmiddels wat bekomen van de schrik en doen weer volwaardig mee.

Bij wijze van conclusie wil ik een opmerking plaatsen over het gebruik van performance-based weging. Collega's, vooral collega's uit de sociale wetenschappen, vragen mij vaak waar wij het lef vandaan halen om experts van hoog aanzien te scoren op prestaties alsof zij nog in de schoolbank zitten.

Mensen zonder een achtergrond in de empirische wetenschappen zijn dan ook verrast te horen dat de experts dit juist leuk vinden. Gegeven dat onzekerheid een fact of life is in de risicoanalyse, laat het dan ook maar een wetenschappelijk fact of life zijn.

Voordracht gehouden op de Nationale Wiskunde Dagen 1995, tekst deels ontleend aan R. Cooke's inauguratiere-de, gehouden op 8-11-1995.

Noten

- [1] Fischer, F., J. Ehrhardt & I. Hasemann (1990). *Uncertainty and sensitivity analyses of the complete program system UFOMOD and of selected submodels*. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Report 4627.
Crick, J.J., E. Hofer, J.A. Jones & S.M. Haywood (1988). *Uncertainty analysis of the foodchain and atmospheric dispersion modules of MARC*. National Radiological Protection Board, Report 184.
- [2] Cooke, R.M., L.H.J. Goossens & B.C.P. Kraan (1995). *Methods for CES/USNRC accident consequence uncertainty analysis of dispersion and deposition. Final report, June 1994*. European Commission, EUR 15856 EN.
Harper, F.T. a.o. (1995). *Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis. Dispersion and Deposition Uncertainty Assessment. Main Report*. NUREG/CR-6244, EUR 15855EN.
- [3] Cooke, R.M. (1994). 'Uncertainty in dispersion and deposition in accident consequence modelling assessed with performance-based expert judgment', *Reliability Engineering and System Safety*, 45, pp. 35-46.
- [4] Cooke, R.M. (1991). *Experts in Uncertainty*. Oxford University Press.