

Enkele bouwkundige toepassingen van elektrische weerstandsmodellen

N. VAN SANTEN

TECHNISCH PHYSISCHE DIENST TNO-TH

Samenvatting

Elektrische weerstandsmodellen zijn een belangrijk hulpmiddel bij het onderzoek naar o.a. de indringing van vorst in constructies, temperatuurspanningen in constructies en oppervlaktecondensatie. In dit artikel worden twee recente toepassingen ervan besproken, terwijl in het kort het principe van de methode wordt uiteengezet.

Summary

Conducting sheet analogies are of great importance for studying the penetration of frost in constructions, thermal stresses in constructions, surface-condensation etc. In this paper two recent applications are discussed.

Inleiding

De toepassing van elektrische weerstandsmodellen als hulpmiddel bij de bestudering van temperatuurverdelingen in constructies is niet nieuw. Reeds uit 1913 dateert een publikatie van Langmuir over het gebruik van een ondiepe elektrolyt-tank bij een onderzoek over ovenwandconstructies. Het principe van de methode is sindsdien weinig veranderd, maar het gebruik ervan is sterk vereenvoudigd door de ontwikkeling van nieuwe weerstandsmaterialen zoals geleidend papier en verschillende soorten metaalfoliën. De opbouw van een model en de metingen hieraan vergen thans betrekkelijk weinig tijd. In de techniek wordt daarom steeds meer van deze methode gebruik gemaakt, onder andere bij het onderzoek naar temperatuurspanningen, indringing van vorst in constructies en oppervlaktecondensatie, verder bij de dimensionering van werktuigbouwkundige constructies zoals ovenwanden, turbineschoepen, walsrollen enz. Van deze toepassingen zullen twee voorbeelden worden besproken: de randbalkconstructie van een zeker gebouw en de sluisdeuren in het Haringvliet. De eerste constructie moest voldoen aan bepaalde eisen betreffende optredende temperaturen en temperatuurgradiënten in verband met toelaatbare mechanische spanningen. Bij de tweede constructie vormde de indringing van vorst het criterium bij het onderzoek.

In nauwe samenwerking met de opdrachtgevers werden door onze Dienst een aantal varianten van genoemde constructies onderzocht, waarbij werd gestreefd naar een oplossing die aan de gestelde eisen voldeed. Voorafgaande aan de bespreking hiervan volgt in het kort het principe van de methode.

Elektrisch weerstandsanalogon

Het principe van de overeenkomst tussen thermische geleiding en elektrische geleiding is in het artikel van Ir. P. Euser reeds besproken. Bij het

stationaire elektrische weerstandsanalogon wordt dit principe twee-dimensionaal toegepast, hetgeen in de praktijk op het volgende neerkomt.

Van de constructie-doorsnede waarin men de temperatuurverdeling wil leren kennen, wordt op schaal een model gemaakt uit elektrisch weerstandsmateriaal. De weerstand wordt zodanig gewijzigd, dat de verhouding van de warmtegeleidingscoëfficiënten van de in de constructie voorkomende materialen zich daarin manifesteert. Overgangsweerstanden kunnen door uitbreiding van het model, aan de rand worden voorgesteld. Via elektroden, die zich op overeenkomstige plaatsen bevinden, daar waar de constructie aan temperatuursinvloeden blootstaat, wordt een spanning aan het model toegevoerd. De gevormde potentiaalverdeling in het model is analoog met de temperatuurverdeling die in de beschouwde doorsnede van de constructie zou ontstaan.

De potentiaalverdeling wordt gemeten met de in fig. 1 weergegeven meetopstelling. Deze bestaat uit een brug van Wheatstone, waarin zijn opgenomen onder andere een precisie-potentiometer voor nauwkeurige instelling van de te meten equipotentialen en een galvanometer voor de nul-instelling van de brug. De keuze van de weerstandsmaterialen bij de opbouw van een model, wordt bepaald door het probleem dat men onder handen heeft. Bij voorkeur wordt geleidend papier toegepast dat goedkoop is en gemakkelijk hanteerbaar. De toepassing van geleidend papier is echter beperkt tot die gevallen, waarbij de thermische eigenschappen van de materialen in de constructie geen al te grote spreiding vertonen. De enige wijze waarop namelijk de weerstand van het papier kan worden gewijzigd, is door perforatie van het papier, hetgeen in verband met de structuur van het papier slechts tot een zekere grens kan gaan. Een andere beperking van het papier is zijn inhomogeniteit in de weerstand (10-20%).

Metaalfolie heeft een veel breder toepassingsge-

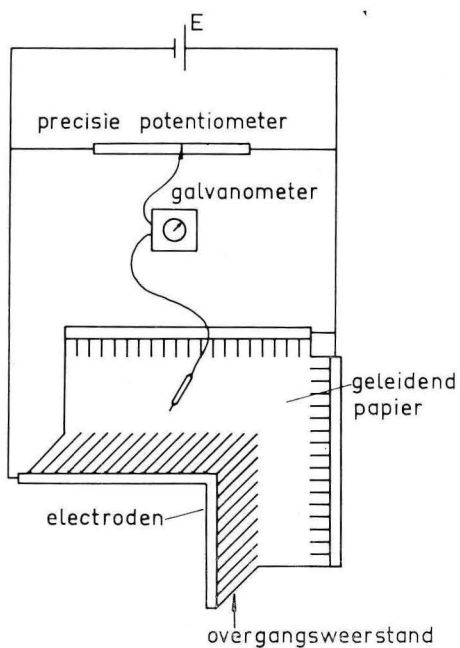


Fig. 1 Meetopstelling.

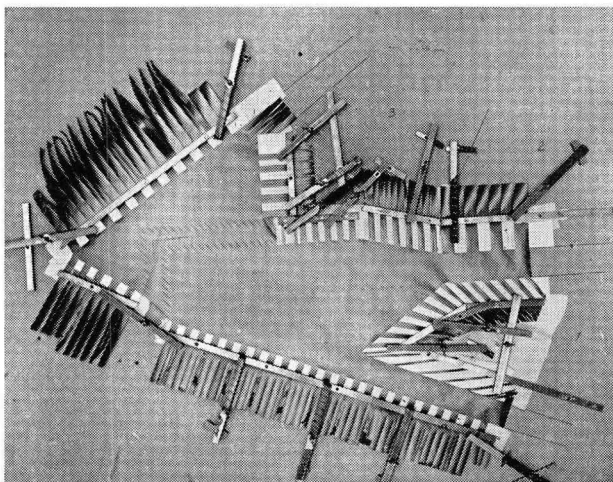


Fig. 3 Elektrisch weerstandsmodel van de constructie volgens fig. 2.

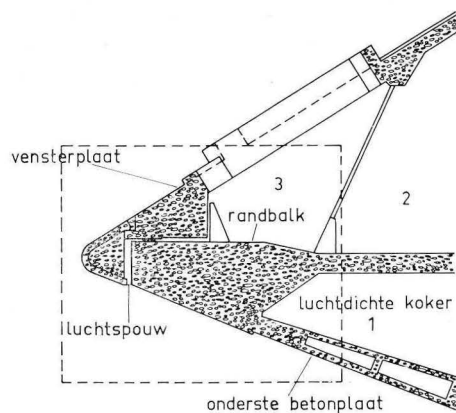


Fig. 2 Randbalkconstructie van een gebouw.

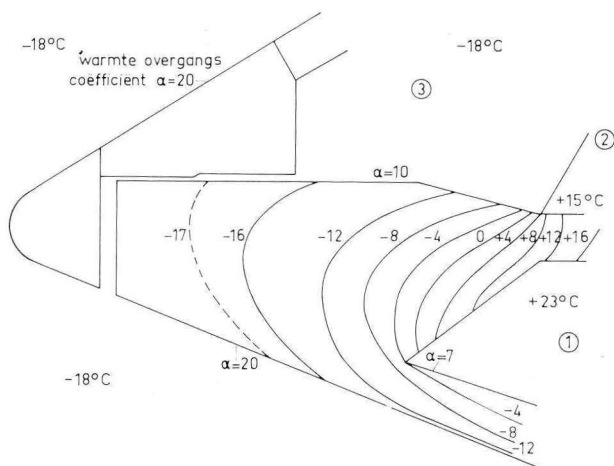


Fig. 4 Temperatuurverdeling in de onbeschermd constructie.

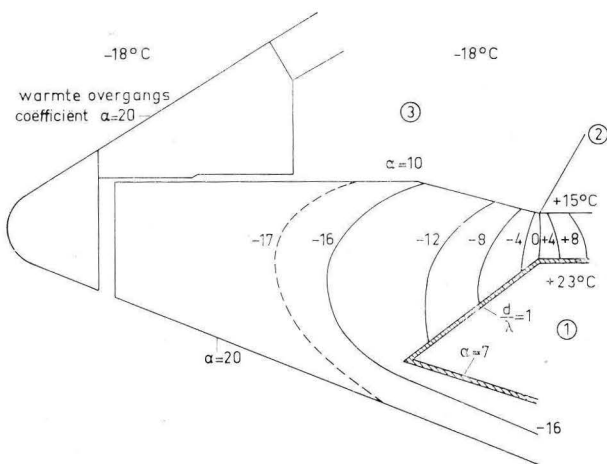


Fig. 5 Temperatuurverdeling in de randbalkconstructie met warmte-isolatie aan de binnenzijde.

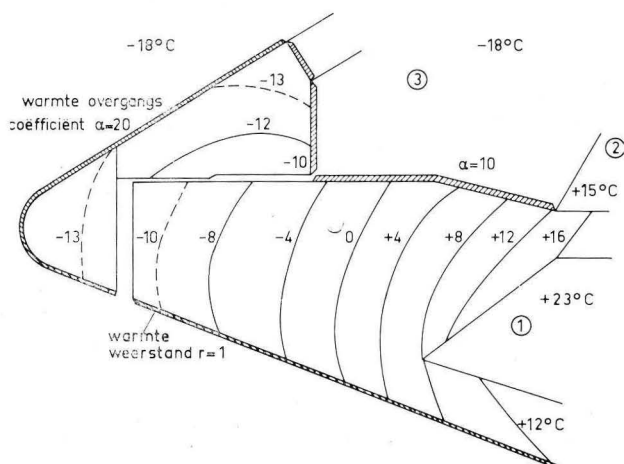


Fig. 6 Als fig. 5 met warmte-isolatie $r = 1 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$ aan de buitenzijde.

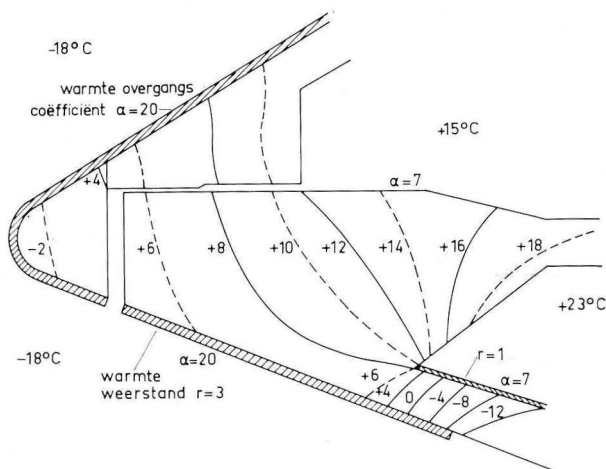


Fig. 7 Als fig. 5 en 6 met warmte-isolatie $r = 3 \text{ m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$ aan de buitenzijde.

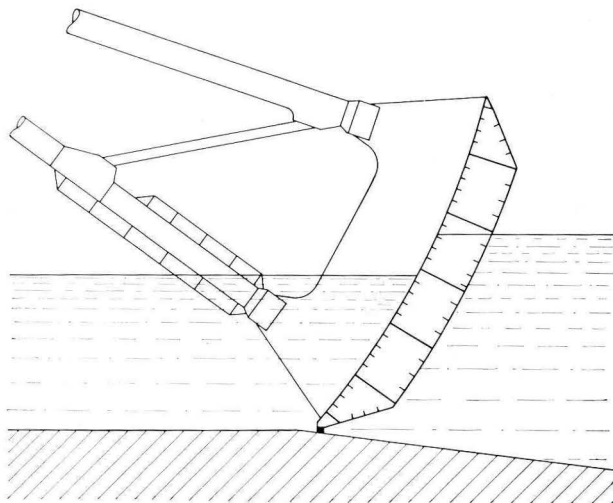


Fig. 8 Doorsnede van een sluisdeur in het Haringvliet.

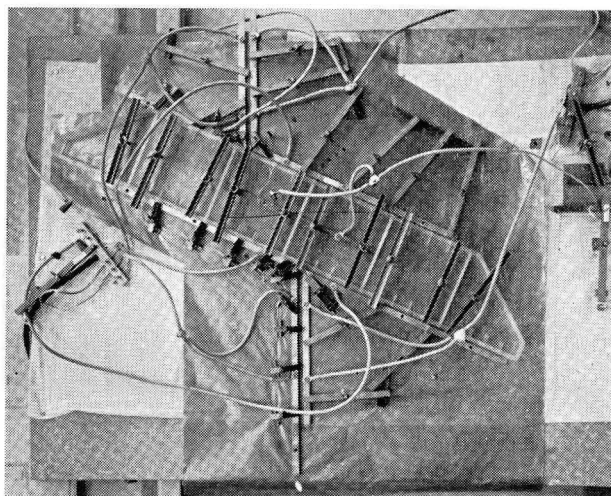


Fig. 9 Elektrisch weerstandsmodel van de sluisdeur.

bied door de mogelijkheid een model uit verschillende folies samen te stellen met uiteenlopende eigenschappen. Verder wordt het metaalfolie gekenmerkt door grotere homogeniteit. Bij de hierna te bespreken voorbeelden is o.a. geleidend papier toegepast, waarbij de inhomogeniteit kon worden gebruikt voor het in rekening brengen van de bewapening in het beton.

Betonnen randbalkconstructie

Indien een constructie onderhevig is aan temperatuursinvloeden, ontstaan temperatuurspanningen die de constructie extra belasten. Ze kunnen zijn ontstaan door bijvoorbeeld zonbelasting of door lage buitentemperaturen in de winter.

Bij de zgn. randbalkconstructie van figuur 2 zijn het vooral lage buitentemperaturen, gekoppeld aan een vrij hoge temperatuur in ruimte 1, die in de constructie aanzienlijke temperatuurgradiënten kunnen veroorzaken, terwijl door het relatief grote buitenoppervlak de vorst ver in de constructie kan doordringen.

Een systematisch modelonderzoek werd opgezet om na te gaan hoeveel en op welke wijze, warmte-isolatie moest worden aangebracht om het gevaar van te grote temperatuurspanningen te verkleinen. Bij dit onderzoek werd uitgegaan van bepaalde extreme buitenluchttemperaturen (-18°C) en voorts van normale warmte-overgangs-coëfficiënten ($\alpha = 20$ resp. $7 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ buiten en binnen).

In het elektrische weerstandsmodel van de randconstructie (fig. 3) werd de betonmassa voorgesteld door geleidend papier, en de warmte-overgangs-, spouw-, en isolatie-weerstanden door extra papier aan de buitenzijde, op speciale manier ingesneden. Aan de randen van het model kon de warmte-weerstand op elke gewenste waarde worden ingesteld. Aan de hand van enkele figuren worden hierna verschillende stadia uit het onderzoek in het kort besproken.

Onbeschermde constructie (fig. 4)

In dit eerste stadium van het onderzoek werd nergens aan de rand warmte-isolatie aangebracht. De koude kon zeer ver in de constructie doordringen, terwijl van rechts opwarming plaatsvond. Dit gaf aanleiding tot grote temperatuurgradiënten, hetgeen zich manifesteerde in het dicht op elkaar lopen van de isothermen. Behalve voor te grote temperatuurspanningen was er nog gevaar voor stukvriezen van de „neus” en voor oppervlaktecondensatie in ruimte 1.

Uit verschillend oogpunt bleek deze toestand dus ongewenst. In een volgend stadium werd de binnenzijde van ruimte 1 voorzien van een warmte-isolerende laag.

Constructie aan de binnenzijde geïsoleerd (fig. 5)

In dit geval was aanbrengen van isolatie aan de binnenzijde in principe verkeerd. De randbalkconstructie werd kouder en het temperatuurverschil over de constructie nam toe. De oplossing moest dus worden gezocht in het aanbrengen van isolatie aan de koude zijde.

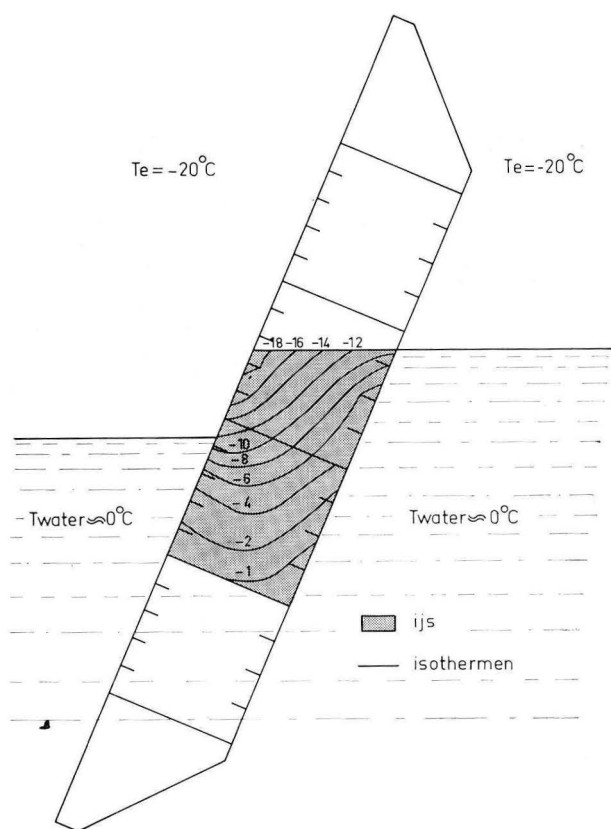


Fig. 10 Temperatuurverdeling in de sluisdeur zonder extra voorzieningen.

Constructie aan de buitenzijde geïsoleerd (fig. 6 en 7)

In figuren 6 en 7 zijn de temperatuurverdelingen gegeven voor het geval de randbalkconstructie is voorzien van buitenisolatie met resp. warmteweerstand $r = 1$ en $r = 3 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$. Bovendien is in figuur 7 de zogenaamde vensterplaat afgesloten. Direct valt de gelijkmatige temperatuurverdeling op, hetgeen uit een oogpunt van temperatuurspanningen gunstig is.

Bij fig. 7 is bovendien de 0°C -lijn geheel uit de „neus” verdrongen.

Deze laatste constructie bleek aan de gestelde eisen te voldoen.

Sluisdeuren in het Haringvliet

De spuisluizen in het Haringvliet hebben een systeem van verticaal bewegende deuren, draaiende om scharnierpunten bij de pijlers. De deuren (fig. 8) zijn opgebouwd uit staalplaat. Het inwendige van de deur is in compartimenten verdeeld die in verbinding staan met het buitenwater. Tijdens het heffen van de deur kan het water uit het inwendige wegstromen. Dit zou gedurende de winter gestagneerd kunnen worden door ijsvorming, waardoor de deuren extra worden verzwaard en de heffing ervan wordt bemoeilijkt.

In nauw overleg met de opdrachtgever (Rijkswaterstaat) is de ijsvorming in de deur onderzocht met behulp van een elektrisch weerstandsanalogon waar-

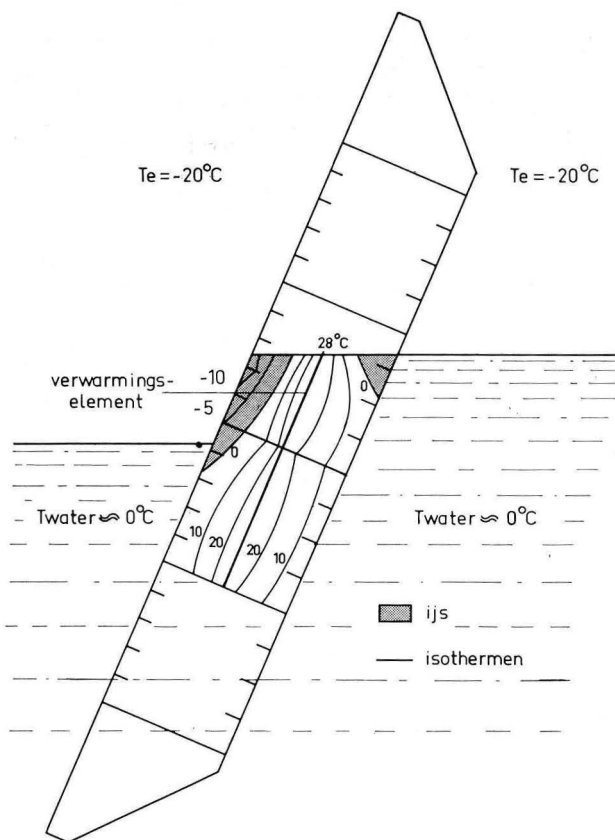


Fig. 11 Temperatuurverdeling in de sluisdeur met verwarmingselementen.

van in figuur 9 een foto is gegeven. Als weerstandsmateriaal werd in dit geval geperforeerd metaalfolie toegepast waarmee het water in en om de sluisdeur werd uitgebeeld. De relatief zeer goed geleidende stalen wanden van de sluisdeur werden in het model door smalle zilverstrips voorgesteld, die met behulp van een perspexframe met de vorm van de schuif, op het folie werden gedrukt. Met elektroden werden spanningen aan het model toegevoerd, overeenkomstig de temperaturen die onder extreme winterse condities zijn te verwachten (buitenluchttemperatuur -20°C , temperatuur buitenwater c.a. 0°C).

Om inzicht te verkrijgen in de wijze waarop de vorst in de constructie doordringt werden eerst metingen verricht waarbij in de sluisdeur geen extra voorzieningen waren aangebracht.

In een later stadium van het onderzoek werden verwarmingselementen aangebracht in de sluisdeur.

Enkele resultaten van dit onderzoek worden hierna besproken.

Resultaten van de modelmetingen aan de sluisdeur

In figuur 10 is de temperatuurverdeling in de sluisdeur gegeven, zoals die te verwachten is indien geen maatregelen tegen de vorst worden genomen.

De watertemperatuur buiten de sluisdeur is daar-

bij, vanwege de goede menging van het water, 0°C ondersteld. Het stilstaande water in de deur blijkt zeer sterk af te koelen door het koude stalen frame dat aan de buitenlucht blootstaat, waardoor een groot gedeelte van het water in de deur kan bevriezen.

Bij de volgende modelmeting werd uitgegaan van verticale verwarmingselementen in het midden van de sluisdeur. Deze toestand was in het twee dimensionale model niet direct realiseerbaar, maar kon worden benaderd door de verwarmingselementen te vervangen door een verticale verwarmingsplaat.

In figuur 11 is voor een bepaald verwarmingsvermogen de globale temperatuurverdeling gegeven. Bij de interpretatie van deze figuur moest de

interne convectie van het water nog in rekening worden gebracht. Het vermogen bleek voldoende te zijn om de sluisdeur praktisch te vrijwaren van ijsvorming, zodat de heffing van de deuren onder deze omstandigheden niet zou worden bemoeilijkt.

De besproken voorbeelden illustreren het nut dat een elektrisch modelonderzoek kan hebben bij het oplossen van bouwfysische problemen, zoals temperatuurspanningen en de indringing van vorst. Behalve een direkt antwoord op allerlei praktische vragen zoals de invloed van de isolatiedikte op de temperatuur, verschaft het modelonderzoek vooral inzicht in het probleem, zodat aan de hand daarvan een ontwerp in gunstige zin kan worden gewijzigd.