

Foto ANP



AUTEURS



Stephan Rikkert en Matthijs Kok

FAALKANSEN VAN BOEZEMKADEN VANUIT EEN STATISTISCH PERSPECTIEF

Boezemkaden in IPO-klasse I, II en III voldoen aan de veiligheidsnorm, mits ze goed onderhouden worden. De uitdaging ligt dus niet meer in het toetsen van deze keringen, maar vooral in het beheer en onderhoud.

Een uitgebreid netwerk van waterkeringen beschermt Nederland tegen overstromingen. Regionale keringen liggen langs boezems, kanalen en regionale rivieren. *Figuur 1* laat een overzicht zien van de genormeerde regionale keringen (ongeveer 11.500 km) in Nederland. Het merendeel hiervan bestaat uit boezemkaden, gelegen langs boezemwateren in het noorden en westen van Nederland. Deze kaden zorgen ervoor dat het boezemwater niet de polders instroomt en dat polders hun wateroverschot af kunnen voeren. In dit artikel zijn we vooral geïnteresseerd in de boezemkaden, en we gaan er vanuit dat zo'n 8.000 km van de regionale keringen in Nederland bestaat uit boezemkaden.

Regionale keringen worden periodiek getoetst aan de veiligheidsnorm. Bij zo'n toetsing wordt beoordeeld of een kering voldoende weerstand kan bieden tegen de verschillende faalmechanismen. Keringen die worden afgekeurd, moeten een kostbare versterking ondergaan, en jaarlijks worden miljoenen euro's besteed aan het versterken van boezemkaden. De vraag is echter of de berekende faalkansen niet een te hoge schatting zijn. Immers, keringen die al tientallen tot honderden jaren functioneren, en zo hun sterkte als het ware hebben bewezen, zijn volgens berekeningen in de toetsing niet sterk genoeg. De vraag is nu: kunnen we de faalkansen als gevolg van het falen van een regionale kering statistisch afleiden op basis van opgetreden faalgebeurtenissen in het verleden? En als dit zou kunnen, hoe groot is dan deze kans?



Figuur 1. 'Kaart van Nederland met de genormeerde regionale keringen in blauw' (LOLA Landscape Architects, 2014)

Delfland de boezemwaterstand zo hoog op, dat water over verschillende kades het achterland instroomde. Eind juli 2014 gebeurde dit ook vanuit een boezem bij Alphen aan den Rijn. In deze gevallen vond er geen dijkdoorbraak plaats, en was de overlast relatief beperkt.

Bij de Tussenklappenpolder in Groningen werd juist een boezemkade met behulp van een graafmachine tot falen gebracht. Dit was een bewuste keuze om mogelijke schade elders te voorkomen. Ook zijn er situaties waar keringen tijdens (versterkings)werkzaamheden faalden. Deze keringen zijn buiten beschouwing gelaten in onze analyse, omdat hier door menselijk toedoen de sterkte van de kering (tijdelijk) is aangetast.

Faalkansen
boezemkaden
in kaart

4

Overstromingen door falen van boezemkaden

We kijken allereerst naar het aantal doorbraken in de afgelopen 60 jaar. Deze periode is lang genoeg om statistische uitspraken te doen, en kort genoeg om zoveel als mogelijk een homogene reeks te zijn. In deze periode vinden we 2 faalgebeurtenissen die hebben geleid tot een overstroming: de dijkdoorbraken bij Tuindorp Oostzaan in 1960 en Wilnis in 2003 (zie Figuur 2).

Zo'n overstroming heeft grote gevolgen voor de omgeving. Nadat Tuindorp Oostzaan in januari 1960 getroffen werd door een overstroming, doordat vroeg in de ochtend een kering was doorgebroken, moesten meer dan 11.000 mensen het gebied verlaten. In Wilnis brak in de zomer van 2003 een kering na aanhoudende droogte, waardoor de achterliggende polder onder water kwam te staan. Ongeveer 1.500 bewoners moesten worden geëvacueerd, de totale schade bedroeg zo'n €16 miljoen. Het merendeel van de schade – circa 90% – was overigens in de infrastructuur, namelijk de riolering en de boezemkade (Kok, 2006). De schade is in 2003 beperkt gebleven, doordat een aannemer kort na de doorbraak een damwand in de boezem heeft geslagen.

Naast deze faalgebeurtenissen hebben er zich wel op meerdere momenten kritieke situaties voorgedaan. Zo liep in 1998 bij het Hoogheemraadschap van

Schatting van de jaarlijkse faalkans

Om op basis van empirische gegevens een faalkans te kunnen schatten, hebben we eerst een goede definitie nodig voor falen. We kiezen daarom een definitie die aansluit bij de gebeurtenissen in Tuindorp Oostzaan en Wilnis. Een faalgebeurtenis definiëren we als het doorbreken van een kering, met een overstroming als gevolg. Andere gebeurtenissen, zoals het tijdelijk overlopen van een kade of lokale verzakkingen worden dus niet als faalgebeurtenis beschouwd. Voor het bepalen van de jaarlijkse faalkans maken we, zoals gangbaar in het schatten van kans in 'experimenten', gebruik van de Poisson-verdeling. Deze verdeling mag worden gebruikt, omdat de volgende eigenschappen van een van toepassing zijn (zie bijvoorbeeld McClave, Benson en Sincich, 2014):

1. Het experiment bestaat uit het tellen van het aantal faalgebeurtenissen per totaalaantal boezemkadevakken of per totaalaantal boezemsystemen in 60 jaar.
2. De gemiddelde faalkans van een willekeurig boezemkadevak blijft gelijk, mits de sterkte van de kades en de belasting ongeveer gelijk blijven.
3. Het aantal faalgebeurtenissen in een boezemkadevak of boezemsysteem is onafhankelijk van het aantal dat in andere, onafhankelijke eenheden voorkomt, mits geen grote veranderingen in of aan het boezemsysteem plaatsvinden die faalkansen beïnvloeden.

Figuur 2. Boven: overstroming bij Tuindorp Oostzaan 1960 (Historisch Archief Tuindorp Oostzaan, z.d.) en onder: overstroming bij Wilnis in 2003 (NOS, z.d.)



Volgens de Poisson-verdeling kan de kans op een bepaald aantal faalgebeurtenissen als volgt worden berekend:

$$P(X=x) = (e^{-\lambda} \lambda^x) / X!$$

Waarin het verwachte aantal gebeurtenissen in elke eenheid is aangegeven met de Griekse letter lambda, λ en het aantal faalgebeurtenissen met de letter x . Om de faalkans te bepalen, moeten we eerst weten hoeveel onafhankelijke boezemkades aanwezig zijn. We volgen hiervoor twee verschillende benaderingen, die een ondergrens en een bovengrens geven. De ondergrens (kleinste faalkans) wordt bepaald door het aantal onafhankelijke boezemkaden. De bovengrens (grootste faalkans) wordt bepaald door het aantal onafhankelijke boezemwatersystemen.

Ondergrens (alle boezemkaden onafhankelijk)

In Nederland hebben we ongeveer 8.000 km boezemkaden, verdeeld over zo'n 20 boezemsystemen. Dat is gemiddeld 400 km boezemkade per boezemsysteem. Verder nemen we aan dat 'onafhankelijke' dijkvakken gemiddeld 2 km zijn. In totaal zijn er dus 4.000 dijkvakken, gemiddeld 200 per boezemsysteem.

Om de ondergrens te bepalen, nemen we het feit dat van deze 4.000 dijkvakken er enkel 2 zijn gefaald in 60 jaar tijd, $\lambda=2/4.000$ per 60 jaar. De kans dat er een willekeurig dijkvak in 60 jaar tijd niet faalt ($x=0$) is dan ongeveer 0,9995. Per jaar is de gemiddelde faalkans van een kering dan: $1-(0,9995^{1/60}) \approx 1/120.000$. Dit is dus de faalkans indien de keringen volledig onafhankelijk van elkaar zijn, of met andere woorden: de ondergrens (kleinste faalkans).

Bovengrens (perfecte correlatie binnen boezemwatersystemen)

Tegelijkertijd treedt falen vooral op bij extreme belastingen, zoals een hoge boezemwaterstand al dan niet in combinatie met harde wind en veel

neerslag. Die hoge belasting treedt in het hele systeem (in meer of mindere mate) op. Dat duidt ook een bepaalde mate van afhankelijkheid aan. Ook in de sterkte-eigenschappen van de kering is sprake van een bepaalde mate van afhankelijkheid. Boezemkaden hebben over het algemeen een vergelijkbare geometrie en zijn vaak opgebouwd uit lokaal beschikbare materialen. Tevens loopt een weg die op een dijkvak ligt in veel gevallen door op aangrenzende dijkvakken.

Daarom bepalen we ook de gemiddelde faalkans, gegeven dat keringen binnen hetzelfde boezemsysteem volledig afhankelijk zijn. Dit doen we op een vergelijkbare manier als bij een onafhankelijke dijkvakken, alleen nu met $\lambda=2/20$, omdat er in 60 jaar tijd 2 keer een faalgebeurtenis heeft plaatsgevonden in 20 boezemsystemen. De kans dat er een willekeurig systeem in 60 jaar tijd niet faalt ($x=0$) is dan 0,905. De kans op falen van 1 of meer systemen per jaar is dan: $(1-0,905^{1/60}) \approx 1/600$.

In een volledig afhankelijk seriesysteem is de faalkans van het systeem gelijk aan de faalkans van het element in het systeem met de grootste faalkans:

$$P_{f; \text{systeem}} = \max(P_{f;i})$$

Waarin i de index is van de dijkvakken in het systeem. Dat betekent dat de gemiddelde faalkans per dijkvak per jaar in het systeem niet groter is dan $1/600$.

We gaan er hier van uit dat de belastingen in een systeem volledig afhankelijk zijn. Echter, binnen hetzelfde systeem kan de belasting sterk verschillen, bijvoorbeeld doordat neerslag op de kade zorgt dat de ene kade meer is verzadigd dan de andere, of doordat wind zorgt voor scheefstand in het boezemwaterpeil. De afhankelijkheid binnen een boezemsysteem wordt hierdoor kleiner. Daarmee neemt de faalkans van een dijkvak ook af, waardoor de bovengrens dichterbij de ondergrens komt te liggen.

Tabel 1. IPO-normering met bijbehorende overschrijdingskansennormen. Volgens de IPO-richtlijn mag de faalkans 20% van de overschrijdingskans bedragen. In blauw zijn de IPO-classes weergegeven die volgens onze benadering aan de norm voldoen

Aanbevelingen voor de praktijk

In dit artikel schatten we de boven- en ondergrens van de faalkans van een boezemkade op basis van eerdere faalgebeurtenissen. Uit onze afleiding blijkt dat de gemiddelde faalkans van boezemkaden in ieder geval niet groter is dan 1/600 per jaar, en waarschijnlijk kan dit nog verder worden verkleind. We hebben het hier echter over faalkansen, terwijl de IPO-normen zijn uitgedrukt in overschrijdingskansen. De IPO-richtlijnen stellen dat de faalkans 20% van de overschrijdingskans mag zijn (zie Tabel 1). Keringen in IPO-klasse I, II en III hebben gedurende de afgelopen 60 jaar aangetoond aan deze faalkanseis te voldoen, vooral ook omdat de faalkans van deze keringen waarschijnlijk veel kleiner is dan de door ons berekende bovengrens. Deze zijn in Tabel 1 in groen weergegeven. Keringen in IPO-klasse IV en V voldoen niet direct aan de faalkanseis. Voor deze keringen bevelen we aan om op basis van informatie over overleefde belastingen de faalkans verder te verkleinen. Dit wordt aangeduid als 'bewezen sterkte'. Zo kan voorkomen worden dat keringen onnodig worden versterkt.

Een belangrijke voorwaarde voor onze benadering is dat de faalkans van boezemkades in de tijd gelijk blijft. Hoewel de bodemopbouw en grondkarakteristieken van keringen in de tijd niet of nauwelijks veranderen, kunnen verschillende 'verouderingsprocessen', zoals inklinking van de kade of het scheuren van de deklaag, wel bijdragen aan het verzwakken van een kade. Maar door goed beheer en onderhoud kunnen deze verouderingsprocessen vroegtijdig worden gesignaleerd en aangepakt. Kortom, mits goed onderhouden voldoen keringen in IPO-klasse I, II en III aan de veiligheidsnorm. De uitdaging ligt dan niet meer in het toetsen van deze keringen, maar in het beheer en onderhoud.

Stephan Rikkert en Matthijs Kok
(Technische Universiteit Delft)

IPO-klasse	Jaarlijkse overschrijdingskans	Jaarlijkse faalkans
I	1/10	1/50
II	1/30	1/150
III	1/100	1/500
IV	1/300	1/1.500
V	1/1.000	1/5.000

Faalkansen
boezemkaden
in kaart

Dankwoord

Graag willen we de STOWA bedanken die met hun financiële steun dit onderzoek mogelijk hebben gemaakt.

Referenties

Historisch Archief Tuindorp Oostzaan, z.d. Watersnood 1960. Geraadpleegd van: <http://www.historischarchief-toz.nl/350-2/>

Kok, M. (2006). Schade na een overstroming. Taak van overheid of eigen verantwoordelijkheid? *Externe Veiligheid*, 4, 15-17.

McClave, J. T., Benson, P. G., Sincich, T., & Sincich, T. (2014). *Statistics for business and economics*. Essex: Pearson.

NOS, z.d. 100 jaar strijd tegen het water. Geraadpleegd van: <https://app.nos.nl/evenementen/droge-voeten/>

LOLA Landscape Architects (2014). *Dijken van Nederland*.

SAMENVATTING

Nederland kent een uitgebreid stelsel van regionale waterkeringen, waarvan een groot deel bestaat uit boezemkaden, zo'n 8000 km. In de afgelopen 60 jaar, zijn er slechts 2 gefaald met een overstroming tot gevolg. Op basis van deze informatie is vanuit een statistisch perspectief de gemiddelde faalkans van een boezemkade bepaald. Deze blijkt aanzienlijk lager dan de norm die we stellen aan keringen met IPO-klasse I, II en III. Deze keringen voldoen dus aan de norm, mits zij goed worden onderhouden.