

Het bepalen van schadekansen ten gevolge van meerdere zettingsbijdragen

Ir. Jaap L. Bijmagne
Deltares



Ir. H.J. (Dirk) Luger
Deltares



Introductie

In het verleden hebben diverse auteurs criteria opgesteld die verband leggen tussen schade aan gebouwen enerzijds en verschilzettingen, rotatieverschillen en horizontale rek van de fundering anderzijds. Voorbeelden hiervan zijn o.a. Burland & Wroth (1974) en Boscardin & Cording (1989). Deze criteria worden toegepast om het optreden en de mate van schade aan een gebouw ten gevolge van het gedrag van de fundering bij verschillende belastingen te voorspellen. Hierbij wordt in het algemeen een deterministische methode gebruikt: de zettingen en, indien van toepassing, de horizontale rek worden berekend waarna, aan de hand van geaccepteerde criteria, de te verwachten schade wordt bepaald.

Voor analyse van één of enkele gebouwen is dit een passende aanpak. Indien het echter een groter gebied met meerdere gebouwen betreft waarvoor het effect van een regionale maatregel, zoals een waterpeilverlaging, moet worden beoordeeld verdient een probabilistische aanpak de voorkeur. Het is dan immers praktisch ondoenlijk om alle panden die in het betreffende gebied aanwezig zijn apart te onderzoeken en analyseren.

Dit artikel beschrijft een probabilistische aanpak die het mogelijk maakt de bijdrage van verschillende effecten aan de kans op resulterende schade te splitsen.

Het model is ontwikkeld ten behoeve van de gaswinning in Groningen (Slochteren). Ten gevolge van de gaswinning is er sprake van bodemdaling over een groot gebied. Om de bestaande drooglegging te handhaven is het nodig dat waterpeilen in

kanalen en polders in de tijd worden aangepast aan de nieuwe bodemligging. Omdat de bodemdaling een soort schotelvorm bezit is het vaak ook nodig om nieuwe compartimenten aan te leggen en nieuwe deelgebieden te maken. Vooral aan de randen van de deelgebieden zal in een aantal gevallen een geringe verandering in drooglegging moeten worden geaccepteerd. Het probabilistische model dat in dit artikel wordt beschreven is ontwikkeld om het effect te analyseren dat een waterpeilverandering heeft op de kans van optreden van cosmetische of zelfs constructieve schade. Voor het bepalen van de omvang van de eventuele schade is uitgegaan van de criteria van Boscardin & Cording 1989, zoals weergegeven in tabel 1.

Tabel 1 Schadecriteria gerelateerd aan hoekverdraaiingsverschil

| Schadeklasse | Hoekverdraaiingsverschil δ_θ |
|--|--|
| Zeer licht (cosmetische schade) | $1/1000 < \delta_\theta < 1/600$ |
| Licht | $1/600 < \delta_\theta < 1/300$ |
| Matig tot ernstig | $1/300 < \delta_\theta < 1/150$ |
| Zeer ernstig (constructieve schade) | $1/150 < \delta_\theta$ |

Probabilistisch schademodel

In figuur 1 is een schematische weergave gegeven van een staalfundering met 3 puntlasten. De drie belastingen F kunnen worden gekarakteriseerd door hun gemiddelde μ_F en standaardafwijking σ_F . Op vergelijkbare wijze kan de funderingsstijfheid k worden gekarakteriseerd door haar gemiddelde μ_k en standaardafwijking σ_k .

In de literatuur wordt voor de verplaatsing soms Δ

gebruikt en soms δ . In dit artikel wordt Δ gebruikt voor de zakking en δ voor een verschil (afhankelijk van het subscript voor zakking of rotatie).

Voor de zakking ($\Delta_i = F_i/k_i$) is de gemiddelde waarde μ_{Δ_i} :

$$\mu_{\Delta_i} = \mu_{F_i} / \mu_{k_i} \quad (1)$$

Met behulp van de 1st order 2nd moment (FOSM) benadering wordt voor de standaardafwijking van de zetting Δ gevonden:

$$\sigma_{\Delta_i} = \sqrt{\left(\frac{1}{k_i}\right)^2 \sigma_{F_i}^2 + \left(\frac{-F_i}{k_i^2}\right)^2 \sigma_{k_i}^2} \quad (2)$$

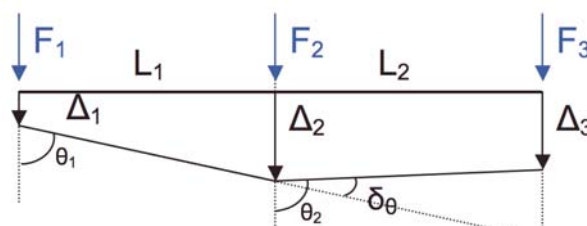
Uit de drie zakkingen Δ van figuur 1 kunnen de rotaties (hoekverdraaiingen) θ_1 en θ_2 worden bepaald volgens: $\theta_1 = (\Delta_2 - \Delta_1)/L_1$ en $\theta_2 = (\Delta_3 - \Delta_2)/L_2$. Hoewel bij gelijke verwachtingswaarden van F_1 , F_2 en F_3 respectievelijk k_1 , k_2 en k_3 de verwachtingswaarde van de rotatie μ_θ gelijk is aan nul is de standaardafwijking van de rotatie σ_θ duidelijk niet gelijk aan nul. In dit artikel wordt schade, zoals algemeen gebruikelijk is – zie ook Boscardin & Cording, 1989 – gerelateerd aan de relatieve rotatie of het hoekverdraaiingsverschil $\delta_\theta (= \theta_1 - \theta_2)$. Bij gelijke lengte van de twee secties van het gebouw, (L_1 en L_2 zijn beiden gelijk aan L), geeft dit een hoekverdraaiingsverschil δ_θ gelijk aan:

$$\delta_\theta = (-\Delta_1 + 2\Delta_2 - \Delta_3) / L \quad (3)$$

De gemiddelde waarde van δ_θ is gelijk aan nul aangezien op voorhand overal dezelfde zetting wordt verwacht. De standaard afwijking is echter niet gelijk aan nul, en de FOSM methode geeft hiervoor (uitgaande van onafhankelijkheid van krachten en veerstijfheden):

$$\sigma_{\delta_\theta} = \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta_1}^2}{L^2} + 4 \frac{\sigma_{\Delta_2}^2}{L^2} + \frac{\sigma_{\Delta_3}^2}{L^2}} \quad (4)$$

Dit is een algemene formule die ook toepasbaar is indien op de drie locaties sprake is van verschillende standaardafwijkingen σ_{Δ} . Voor een statistisch homogene fundering is één waarde van σ_{Δ} voldoende ($\sigma_{\Delta} = \sigma_{\Delta_1} = \sigma_{\Delta_2} = \sigma_{\Delta_3}$). Dit geeft:



Figuur 1 – Een gebouw met twee secties met verschilzakkingen.

$$\sigma_{\delta\theta} = \sqrt{\frac{6}{L^2} \sigma_{\Delta}^2} \quad (5)$$

Combinatie van vergelijkingen 2 en 5 met gebruik van de variatiecoëfficiënt $V = \sigma/\mu$ geeft:

$$\sigma_{\delta\theta} = \sqrt{6} \frac{\mu_{\Delta}}{L} \sqrt{V_F^2 + V_k^2} \quad (6)$$

Een schadecriterium voor δ_{θ} is een gegeven aantal standaardafwijkingen boven en onder het gemiddelde ($\mu_{\delta\theta} = 0$); er is dan sprake van een te bolle of te holle vorm van de fundering. De kans op schade (f_{2L}) in een gebouw, dat bestaat uit twee secties met een lengte L , is dan gedefinieerd door de kans dat de optredende verschilrotatie tussen de twee secties δ_{θ} de lage (negatieve) waarde van het vervormingscriterium (δ_{θ}) onderschrijft, of de hoge (positieve) waarde overschrijft.

Gebouwlengte

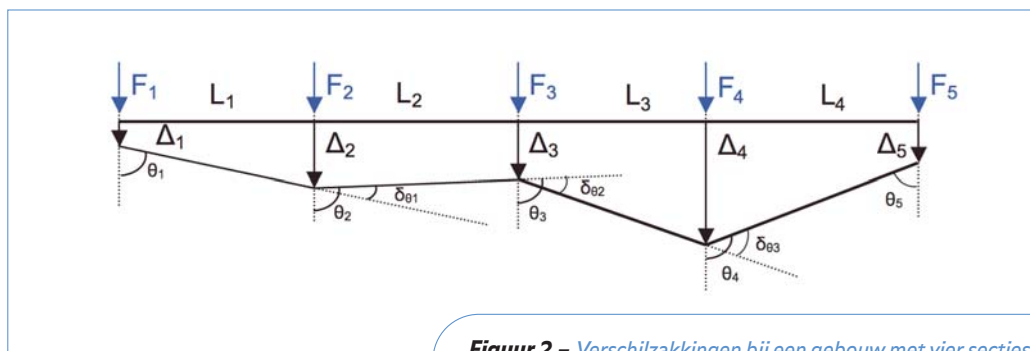
Vergelijking 6 is toepasbaar om de kans op schade te bepalen voor een gebouw dat bestaat uit twee secties die beiden een lengte L hebben. Als het gebouw bestaat uit meer dan twee secties kan een verschilrotatie, en dus schade, zich ontwikkelen op elke overgang tussen secties.

Het aantal secties waarin een gebouw wordt verdeeld is niet arbitrair. Als het gebouw gefundeerd is op 5 discrete funderingspoelen is een verdeling zoals weergegeven in *figuur 2* logisch. Voor een meer continue fundering kan de fundering in veel kleine secties worden verdeeld. Een kleinere waarde voor L en een groter aantal mogelijke schadelocaties lijkt een grotere kans op het optreden van schade. Het hier beschreven statistische model gaat er echter vanuit dat de individuele ondersteuning alle kunnen worden gekarakteriseerd door hetzelfde gemiddelde en dezelfde standaard afwijking, zonder correlatie tussen aangrenzende ondersteuning. Voor twee posities die dicht bij elkaar liggen zorgen de correlatie tussen de stijfheden en de mogelijkheid van het overdragen van belasting van het ene funderingsdeel naar het andere voor een compensatie van dit effect. Een geaccepteerde aanpak [o.a. Boscardin & Cording] is daarom het relateren van de minimum sectielengte L aan de hoogte van het gebouw H . In dit geval is de hoogte van het gebouw, met een minimum lengte van 5 m, gehanteerd als karakteristieke lengte L . Het resultaat is dat er voor een gebouw met een totale lengte gelijk aan L_T zich op $(L_T/H - 1)$ locaties een hoekverdraaiing kan ontwikkelen. Als elk van deze locaties een kans op schade heeft van f_{2L} resulteert dit in een totale kans op schade voor het gehele gebouw gelijk aan:

$$f_{L_T} = 1 - (1 - f_{2L})^{\frac{L_T}{H} - 1} \quad (7)$$

Samenvatting

Met behulp van een eenvoudig probabilistisch model kan de bijdrage van verschillende factoren op de totale kans op schade aan gebouwen worden bepaald. Het model is getoetst aan de praktijk en blijkt goede resultaten te geven.



Figuur 2 – Verschilzakkingen bij een gebouw met vier secties.

Voorbeeld

Beschouw een gebouw dat kan worden geschematiseerd tot vier secties, ieder met lengte $L = 6$ m. Elke oplegging wordt belast met een last F met een gemiddelde waarde $\mu_F = 400$ kN en $V_F = 0.1$ en heeft een stijfheid k met $\mu_k = 20000$ kN/m en $V_k = 0.1$. De gemiddelde zakking Δ is $\mu_{\Delta} = \mu_F / \mu_k = 400/20000 = 0.02$ m. De standaard afwijking van δ_{θ} wordt verkregen met vergelijking 6:

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta\theta} &= \sqrt{6} \frac{\mu_{\Delta}}{L} \sqrt{V_F^2 + V_k^2} = \\ &= \sqrt{6} \frac{0.02}{6} \sqrt{0.1^2 + 0.1^2} = 0.00115 \text{ [rad]} \end{aligned} \quad (8)$$

Een (positieve of negatieve) hoekverdraaiing die groter is dan $\pm 1/300$ (of ± 0.00333) is $0.00333/0.00115 = 2.89$ standaardafwijkingen van het gemiddelde (wat gelijk is aan nul). Als absolute waarden van hoekverdraaiingsverschillen groter dan $1/300$ overeenkomen met serieuze schade volgt uit een standaard normale verdeling dat de kans op zulke schade voor iedere individuele overgang tussen twee secties (f_{2L}) gelijk aan of kleiner is dan 0.39%. Het vierdelige gebouw dat hier wordt beschouwd bevat 3 overgangen en daarom is de kans op schade dat ergens in het gebouw de verschilrotatie groter is dan $1/300$ volgens vergelijking 8 gelijk aan:

$$\begin{aligned} f_{L_T} &= 1 - (1 - f_{2L})^{\frac{L_T}{H} - 1} = \\ &= 1 - (1 - 0.0039)^{\frac{24}{6} - 1} = 1.17\% \end{aligned} \quad (9)$$

Beperkingen van het model

Het hier gepresenteerde model is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Enkele van de belangrijkste vereenvoudigingen zijn:

- Gebouwbelastingen en grondveren zijn gemiddeld als discrete veren terwijl in werkelijkheid de fundering zich vaak zal gedragen als een

door een continuum verend ondersteunde ligger.

- De mogelijkheid van het gebouw om belastingen te herverdelen wordt buiten beschouwing gelaten.
- Belastingen op aangrenzende locaties worden als ongecorrleerd beschouwd.
- Stijfheden van de grond op aangrenzende locaties worden als ongecorrleerd beschouwd. Dit is conservatief omdat er ten minste enige correlatie is, onder meer doordat diepere bodemlagen de belasting van naburige secties voelen.

Het model moet dus worden gezien als een eerste stap in de richting van een systematische probabilistische benadering van schade ten gevolge van zettingen en niet als de ultieme analyse methode. De auteurs zijn van mening dat het model dusdanig eenvoudig van opzet is dat aanpassingen voor specifieke omstandigheden, bijvoorbeeld voor extra vormen van belastingen of bijdragen aan grondverplaatsingen die het gebouw beïnvloeden, op eenvoudige wijze kunnen worden toegevoegd.

Bijdragen aan gebouwzetting

De methode is ontwikkeld als antwoord op vragen omtrent de bijdrage van verschillende mechanismen op de schade aan gebouwen in gebieden in Noord Nederland die aan zakking onderhevig zijn ten gevolge van gaswinning. Hoewel de nadruk ligt op het effect van een verandering in grondwaterpeil, zijn ook andere bijdragen, zowel van nabij als vanuit 'het verre veld' benoemd:

1. Verdeling tussen initiële en in de tijd optredende zetting.
2. Niet gelijkmatig verdeelde belasting en/of kwaliteit van de fundering.
3. Zettingen ten gevolge van nabijgelegen constructies of bovenbelastingen.

4. Oxidatie van veenlagen.
5. Diepe samendrukking van het gas reservoir.

Ad 1 Een interessant aspect betreft het deel van de zettingen dat zich ontwikkelt tijdens de bouw, aangezien die vroege vervormingen tijdens de bouw kunnen worden opgenomen en niet hoeven te leiden tot schade. Om dit in rekening te brengen is een zettingsratio geïntroduceerd. Deze factor is gedefinieerd als het deel van de zettingen dat zich gedurende de bouw ontwikkelt en niet bijdraagt aan het ontstaan van schade, gedeeld door de totale zetting.

Ad 2 De kwaliteit van de fundering is in rekening gebracht door de variatiecoëfficiënt van zowel de belasting als de stijfheid voor goede funderingen te verkleinen en voor slechte te vergroten. Hierop wordt verder in het artikel nader ingegaan.

Ad 3 Dit aspect wordt hier niet nader beschouwd.

Ad 4 Oxidatie van veenlagen heeft een groter effect omdat de variatie in veeneigenschappen lokaal zeer sterk kan zijn. In deze studie betreft de invloed van oxidatie vrijwel altijd alleen de onverzadigde toplagen van de bodem. Deze bevinden zich meestal boven het funderingsniveau en spelen daarom geen rol bij het ontwikkelen van schade.

Ad 5 Aangezien oppervlakte-effecten van compactie van de diepe gasreservoirs in Nederland in ruimte en tijd erg geleidelijk verlopen is dit niet relevant voor schade aan gebouwen. De zettingsverschillen die dit oplevert op gebouwschaal zijn daarvoor te gering.

Voor elk van deze factoren kan de bijdrage aan de totale en de verschilzettingen worden bepaald met de FOSM methode. Voor sommige factoren, zoals de interne herverdeling van belasting, nabijgelegen constructies en ongelijkmatige bijdragen van factoren 'in het verre veld' is het gemiddelde van de extra relatieve rotatie ongelijk aan nul.

Zolang er geen correlatie bestaat tussen de verschillende zettingsbijdragen op een te beschouwen punt van het gebouw kan de verwachten totale zetting eenvoudig worden bepaald door de gemiddelde waarden van de bijdragen op te tellen terwijl voor het kwadraat van de standaard afwijking eveneens opgeteld kan worden:

$$\mu_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \mu_{\Delta_i} \quad \text{en} \quad \sigma_{\Delta}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{\Delta_i}^2 \quad (10, 11)$$

Effect van verandering in waterniveau

Om de bijdrage van een verandering in waterniveau aan de totale kans op schade te bepalen moeten de bovenstaande formules worden aangepast. Een grondwaterniveau-aanpassing veroorzaakt een verandering in de effectieve verticale spanningen in de grond (P).

Aangezien het belastingspatroon anders is (uni-

forme in plaats van lokale belasting) volgt dat de daarbij horende stijfheid K van de grond verschilt van de stijfheid k van de funderingselementen. De zakking ten gevolge van de grondwaterstandverandering ($\Delta_p = P/K$) wordt opgeteld bij de zetting ten gevolge van het eigen gewicht van het gebouw ($\Delta_f = F/k$). Stijvere gebieden in de ondergrond zullen hierbij hogere waarden van k en K opleveren. Om de totale zetting te bepalen wordt opnieuw de FOSM benadering toegepast maar nu wordt rekening gehouden met de correlatie tussen k en K op dezelfde locatie, zie hiervoor bijvoorbeeld (Ang & Tang 1975). De verwachte totale zakking en de bijbehorende standaardafwijking zijn hiervoor:

$$\mu_{\Delta} = \frac{F}{k} + \frac{P}{K} \quad (12)$$

$$\sigma_{\Delta_i} = \sqrt{\Delta_f^2 (V_f^2 + V_k^2) + \Delta_p^2 (V_p^2 + V_K^2) + 2\Delta_f \Delta_p V_f V_K \rho(k_i K_i)} \quad (13)$$

Het laatste deel van vergelijking 13 beschrijft de bijdrage van de correlatie tussen de stijfheid van de fundering voor het gebouwgewicht en de stijfheid van de grond voor veranderingen in grondwaterniveau. De correlatiecoëfficiënt (ρ) kan variëren tussen 1 voor een volledig gecorreleerd geval en 0 (voor een volledig ongecorrleerd geval). De standaardafwijking van het rotatieverschil δ_{θ} volgt uit invullen van vergelijking 13 in vergelijking 5:

$$\sigma_{\delta\theta} = \sqrt{\frac{6}{L^2} \cdot \sqrt{\Delta_f^2 (V_f^2 + V_k^2) + \Delta_p^2 (V_p^2 + V_K^2) + 2\Delta_f \Delta_p V_f V_K \rho(k_i K_i)}} \quad (14)$$

Toetsing in de praktijk

De eerste stap met betrekking tot validatie van de hier gepresenteerde benadering heeft bestaan uit het toepassen van de theorie op een gebied in Noord Nederland in de buurt van een kanaal waar wordt overwogen een waterpeil verandering toe te passen. Het gebied bestaat uit samendrukbare lagen boven zandige afzettingen. Op basis van verschillende schadepatronen en aanwezige bodemopbouw zijn drie huizen geselecteerd die als representatief kunnen worden beschouwd voor het gebied.

Per pand zijn twee funderingsinspecties uitgevoerd en door middel van sonderingen en peilbuizen zijn grond- en grondwaterprofielen opgesteld. Gebaseerd op het gewicht van de woningen zijn eerst op deterministische wijze de funderingszettingen bepaald. Vervolgens is de variatie in de conuswaarden gebruikt voor het bepalen van de funderingsstijfheden k voor de onderzochte locaties. Dat levert dus ook meteen de variatie in de k op. Met behulp van deze gegevens is vervolgens bovenstaande theorie toegepast. Daarbij werd gevonden dat de schadepercentsages zoals gegeven

door de theorie de juiste orde van grootte bezitten in vergelijking met de aanwezige schade. Zo levert een verschilzakking van 100 mm een kans van 80% op voor het optreden van lichte schade terwijl een verschilzakking van 1 mm een te verwaarlozen kans geeft op lichte schade. Hoewel verdere validatie aan te bevelen is voordat de methode algemeen wordt toegepast lijkt de methodiek toepasbaar voor huizen in het onderzochte gebied van Nederland.

Bij de terreininspecties bleek overigens dat er een aanzienlijk verschil bestond tussen de aangenomen staat van de gebouwen en hun funderingen en de feitelijke situatie. Zo was een deel van een muur van een woning op palen gefundeerd terwijl de algemene opinie was dat in het hele dorp geen enkele paalfundering aanwezig zou zijn. Op een andere locatie is een slecht aangelegde staalfundering aangetroffen waar zo weinig cement was toegepast dat stenen vrijwel los op elkaar lagen en lokaal zelfs gaten aanwezig waren. Tevens was ongeveer 0,2 m veen aanwezig direct onder het funderingsniveau. Dergelijke afwijkingen kunnen blijkbaar worden verwacht bij het beoordelen van het gedrag van een grote groep gebouwen. Individuele panden zullen vaak afwijken van het 'ideale gemiddelde' gebouw.

Voor het voorspellen van het gedrag van een grotere hoeveelheid gebouwen moet dus een extra toevalseffect worden toegevoegd om afwijkingen aan de funderingen in rekening te kunnen brengen. Op dit moment is niet aan te geven hoe groot dit effect is. Gezien de ervaringen bij Oude Pekela is dit erg gebiedsafhankelijk. Indien uit inspectie van de algehele staat van panden in een groter gebied blijkt dat er onverwachte variaties in schadebeelden aanwezig zijn kan het uitvoeren van funderingsonderzoek zinnig dan wel noodzakelijk zijn. Dit moet per gebied worden beoordeeld.

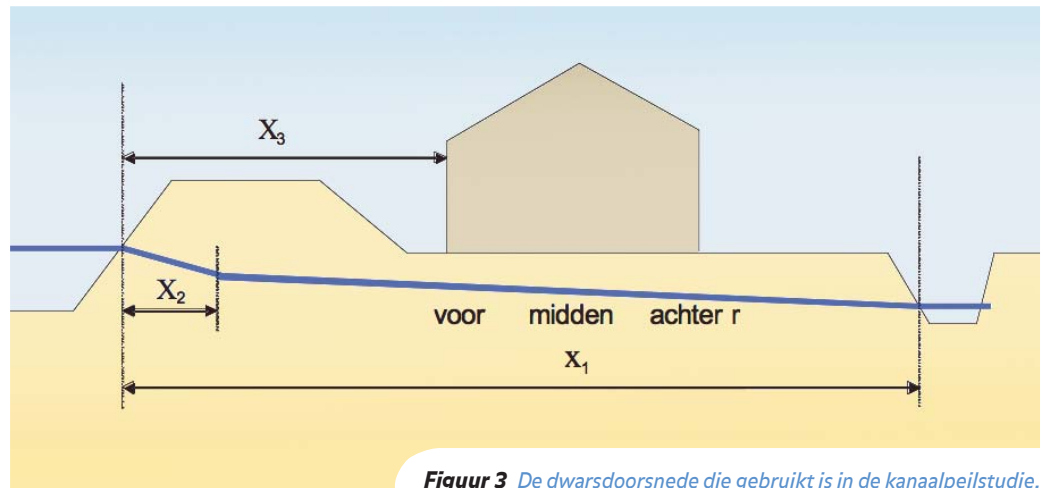
Toelaatbare verandering in kanaalpeil

De methode is tevens toegepast om de toelaatbaarheid van een peilverandering te bepalen in een gebied met slappe tot zeer slappe grond (Deltares 2008). Bij de studie zijn huizen geanalyseerd tussen een kanaaldijk en een lager gelegen poldersloot. Een verandering in waterniveau in het kanaal heeft, na enige tijd, een verandering in grondwaterniveau onder het gebouw tot gevolg. De situatie is weergegeven in *figuur 3*.

In deze studie is de variatie van de geometrische parameters niet zuiver probabilistisch uitgevoerd maar is gebruik gemaakt van een bovengrens, gemiddelde en een ondergrens waarde. De afstand van het gebouw tot het kanaal, de stijfheid van de bodem, de kwaliteit van de fundering en de verhouding tussen de intreeweerstand en de horizontale

doorlatendheid naar de sloot zijn gevarieerd. De kwaliteit van de fundering is in rekening gebracht door de variatiecoëfficiënt van zowel de belasting als de stijfheid voor goede funderingen te verkleinen en voor slechte te vergroten. Verondersteld wordt dat een slechte fundering een 25 % hogere, en een goede fundering een 25 % lagere funderingsdruk heeft. De gebruikte waarden zijn weergegeven in tabel 2. Deze waarden zijn zodanig gekozen dat ze min of meer overeenkomen met de variatie in zetting volgens de NEN normen. De toegepaste waarden voor de overige parameters zijn weergegeven in tabel 3. De C in deze tabel is de samendrukkings-constante van Koppejan.

De berekeningsresultaten van een karakteristiek geval zijn weergegeven in tabel 4. Hieruit blijkt dat de toename in de kans op schade, bij een peilverlaging van 50 mm, vrijwel verwaarloosbaar is. Dit is in overeenstemming met de verwachting, aangezien de toename in gronddruk ten gevolge van de waterpeilverlaging niet groter is dan de toename van gronddruk die het gevolg is van het aanbrengen van een betegeling voor een terras. Een dergelijke kleine verandering mag voor een gebouw in een normale staat niet resulteren in een grote toename van de kans op schade. Opgemerkt moet worden dat de zettingen ten gevolge van het gebouwgewicht voor de gevallen met een lage bodemstijfheid (samendrukkingsconstante van 10) circa 0,2 m bedragen. Dergelijke zettingen zullen in het algemeen niet acceptabel zijn en nieuwe gebouwen zullen bij een dergelijke grondgesteldheid niet op staal worden gefundeerd. Bij zo'n slappe bodem resulteert toepassen van de hier gepresenteerde methode in een kans tot maximaal 93% op zeer lichte schade (scheuren tot 1 mm breed). Dit bevestigt dat dergelijke grote initiële zettingen niet acceptabel zijn. Dat voor deze gevallen een geringe toename van de kans op lichte schade wordt gevonden is niet vreemd.



Figuur 3 De dwarsdoorsnede die gebruikt is in de kanaalpeilstudie.

Conclusies

In dit artikel wordt een methodiek gepresenteerd waarmee de kans op het optreden van schade aan gebouwen kan worden bepaald ten gevolge het gecombineerde effect van verschillende zettingsbijdragen. Met behulp van de FOSM benadering is een duidelijke, kwantificeerbare en uitbreidbare formule afgeleid voor de voorspelling van verschilrotaties binnen gebouwen. Voorspelde schadeniveaus gebaseerd op de relatie tussen hoekverdraaiing en schade (Boscardin & Cording 1989) aan de ene kant en waargenomen schade aan de andere kant vertonen een goede overeenkomst. Voor zover bekend bij de auteurs is de toepassing van deze methode voor waterbeheer in zakkingsgebieden nieuw. Eerste vergelijkingen met veldgegevens zijn bemoedigend. Toepassen van de methode lijkt daarom geschikt voor de juiste selectie van eventuele peilaanpassingen en gebouwschade. Ten tijde van het schrijven van dit artikel wordt een aanvullende studie uitgevoerd waarbij de hier gepresenteerde methodiek wordt toegepast op een groter gebied.

Dankwoord

De resultaten gepresenteerd in dit artikel vormen een deel van het resultaat van een studie die gefinancierd is door de Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning.

Referenties

- Ang, A. H-S. & Tang W.H. 1975: *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol I
- Basic Principles John Wiley & Sons, New York.
- Boscardin, M.D. & Cording E.J. 1989: *Building response to excavation-induced settlement* J. Geotech.Eng., Vol. 115, No. 1, January 1989.
- Burland, M.D. & Wroth, C.P. 1974: *Settlement of buildings and associated damage* Proc. Conf. on Settlement of Structures, Pentech Press, London, England, pp. 611-654.
- Deltares 2007: *Onderzoek effecten peilverlaging Oude Pekela* ref 414942-0012, Delft, The Netherlands.
- Deltares 2008: *Toelaatbaarheid 50 mm relatieve peilverlaging* ref 414943-0005, Delft, The Netherlands. ●

Tabel 2 Factoren voor kwaliteit fundering

| Kwaliteit fundering | Funderingsdruk $\mu_F / \mu_{FNormaal}$ | Verandering in σ_F / μ_F | Verandering in σ_K / μ_K |
|---------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Goed | 0,75 | - 0,025 | - 0,025 |
| Normaal | 1,0 | +0,000 | +0,000 |
| Slecht | 1,25 | +0,025 | +0,025 |

Tabel 3 Geometrie, stijfheid en zakkingsratio

| Variabele | Afstand [m] | Samendrukkings-constante C [-] | Zakkingsratio [-] |
|-----------|-------------|--------------------------------|-------------------|
| Laag | 1 | 10 | 0,0 |
| Gemiddeld | 10 | 20 | - |
| Hoog | 50 | 40 | 0,8 |

Tabel 4 Toename kans op lichte schade (scheuren tot 5 mm) bij een waterpeilverlaging van 50 mm en een zakkingsratio van 0,8

| Afstand tot oever (X3) [m] | | 1 | 10 | 50 |
|----------------------------|---------------------|----------------------------|------|------|
| Samendrukkings-constante C | Kwaliteit fundering | Toename kans op schade [%] | | |
| 10 | Slecht | 3,20 | 2,82 | 1,09 |
| 10 | Matig | 2,42 | 1,97 | 0,52 |
| 10 | Goed | 1,08 | 0,75 | 0,09 |
| 20 | Slecht | 0,46 | 0,28 | 0,01 |
| 20 | Matig | 0,08 | 0,04 | 0,00 |
| 20 | Goed | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 40 | Slecht | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 40 | Matig | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 40 | Goed | 0,00 | 0,00 | 0,00 |