

# Wateraccumulatie

TECHNISCH DOSSIER

FEBRUARI 2006



Dit technisch dossier geeft constructeurs en toetsende instanties inzicht in de nieuwe normteksten en rekenregels voor het belastinggeval regenwater.



**Uitgave** Bouwen met Staal, Zoetermeer • ISBN 90-72830-61-X

**Redactie** ir. Cor van Eldik • ing. Marco Pauw

**Redactie-adres** Bouwen met Staal • Postbus 190 2700 AD Zoetermeer • tel. (079) 3531277 • fax (079) 3531278 • email bms@bouwenmetstaal.nl



**Vormgeving** Klats publiciteit en reclame, Delft

**Druk** Salland de Lange, Deventer

**Illustraties** Peter Welleman

**Vrijwaring** Uitgever, auteurs en redacteuren verklaren dat de inhoud van deze brochure zorgvuldig en naar beste weten is samengesteld. Zij aanvaarden geen aansprakelijkheid voor eventuele (zet)fouten en voor schade, van welke aard dan ook, die het gevolg is van handelingen en/of beslissingen die zijn gebaseerd op de geboden informatie.

© **Bouwen met Staal 2006** Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, in welke vorm dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

- 2 *S.N.M. Wijte*  
**Veranderingen bij het belastinggeval regenwater** —————   
Over het wijzigingsblad A1 bij NEN 6702
- 5 **Software**
- 6 *C.A. van Bentum en A.C.W.M. Vrouwenvelder*  
**Nieuwe factor  $\gamma_M$**   
De probabilistische achtergrond van de modelfactor
- 8 *J. Blaauwendraad*  
**Praktische methode om wateraccumulatie te toetsen** —————   
Nieuwe rekenregels in NPR 6703
- 18 *S.N.M. Wijte*  
**Grenswaterstand snel berekend**  
Vuistregels voor dakconstructies met beperkte stijfheid
- 20 **Andere publicaties industriële gebouwen**

# Veilig onder dak

Eind vorig jaar was ik aanwezig bij een workshop van de CUR over het onderwerp 'leren van instortingen'. Daarbij bleek dat de meeste calamiteiten in ons land hun oorsprong vinden in menselijke fouten. Eén van de inleiders maakte een onderscheid in de aard van de fouten: op micro-, meso- of macro-niveau. Micro-niveau wil zeggen: veroorzaakt door de toevallige fout van één persoon, bijvoorbeeld een rekenfout van een constructeur. Een fout op meso-niveau duidt op een structureel probleem, bijvoorbeeld het ontbreken van een interne kwaliteitscontrole bij het ingenieursbureau. En het macro-niveau houdt in dat er sprake is van een systeemfout; de inleider noemde het bezwijken van platte daken door wateraccumulatie een voorbeeld van zo'n systeemfout. Immers er bezwijken in Nederland al enkele decennia zo'n tien tot twintig daken per jaar door deze oorzaak; dus moet er meer aan de hand zijn dan een enkele toevallige fout.

Al in 1980 bracht het toenmalige Staalbouwkundig Genootschap (nu: vereniging Bouwen met Staal) een publicatie uit over het fenomeen wateraccumulatie, zonder dat dit evenwel leidde tot een vermindering van het aantal schadegevallen. Pas in 2002 kwam de ommekeer: op één dag bezweken toen zes daken tijdens zware regenbuien. Het instorten van het dak van het woon/warenhuis Ikea in Amsterdam trok de meeste media-aandacht en leidde zelfs tot vragen in de Tweede Kamer. De VROM-Inspectie bracht daarop begin 2003 de onderzoeksrapportage *Instortingen van lichte platte daken* uit. Dit rapport schetste de omvang van de problematiek en gaf aanbevelingen om een einde te maken aan deze 'systeemfout'. Naast de zes ingestorte daken zijn ruim honderd eerdere instortingen geanalyseerd. Bij alle onderzochte calamiteiten bleek dat er geen of volstrekt onvoldoende aandacht was voor het fenomeen wateraccumulatie.

De minister van VROM heeft inmiddels alle gemeenten verzocht om bij het verlenen van bouwvergunningen scherper te controleren op het voorkómen van wateraccumulatie en om bestaande gebouwen te inventariseren op het risico van wateraccumulatie. Daaruit bleek (nog niet in alle gemeenten is de inventarisatie afgerond) dat enkele duizenden daken niet voldoen.

Een andere aanbeveling uit het rapport van de VROM-Inspectie was het opstellen van een praktijkrichtlijn om het belastinggeval regenwater eenvoudiger te kunnen berekenen. Hiermee kan in veel gevallen de toch weerbarstige iteratieve rekenmethode in NEN 6702 worden omzeild. Inmiddels is NPR 6773 als concept gepubliceerd. De commissie die deze conceptnorm heeft opgesteld heeft als bijproduct een aanpassing van NEN 6702 ontwikkeld. Deze aanpassing moet verzekeren dat een dakconstructie eenzelfde mate van veiligheid heeft tegen bezwijken door wateraccumulatie als tegen andere belastingcombinaties.

De uitgebreide aandacht die het technisch dossier *Wateraccumulatie* van Bouwen met Staal aan dit onderwerp besteedt, zal zeker helpen om te bereiken dat we in ons regenrijke land niet alleen droog, maar ook veilig onder een licht plat dak kunnen verblijven.

*ir. Erik Kool*  
VROM-Inspectie

# Veranderingen bij het belastinggeval regenwater

Op 1 september 2005 is de normtekst over het belastinggeval regenwater gewijzigd. Constructeurs en toetsende instanties moeten nu door het verschijnen van het wijzigingsblad A1 bij NEN 6702 rekening houden met een modelfactor, een wateropvoerende capaciteit en een nieuwe bepalingmethode voor (de grootte van) de regenwaterbelasting. Wat houden deze nieuwe definities en methodes in? Zijn voor de constructie van platte daken nu zwaardere (staal)profielen nodig of juist niet? Een korte uiteenzetting van de feiten.

*ir. S.N.M. Wijte*

Simon Wijte is adviseur bij adviesbureau

ir. J.G. Hageman in Rijswijk.

Met het wijzigingsblad A1 bij NEN 6702 is de inhoud van artikel 8.7.1 (regenwater) herschreven. Nog steeds moet de constructeur bij het beoordelen van een constructie op de effecten van een belasting door regenwater uitgaan van een geheel verstopt regulier hemelwaterafvoersysteem. De krachtsverdeling in de constructie moet vervolgens iteratief worden bepaald bij een gegeven waterstand. Het wijzigingsblad bevat echter drie belangrijke veranderingen:

- de bepaling van de krachtsverdeling (wateropvoerende capaciteit);
- de modelfactor;
- gewijzigde bepaling van de belasting door regenwater.

## **Bepaling van de krachtsverdeling (wateropvoerende capaciteit)**

Een waterbelasting op een plat dak leidt tot geometrisch niet-lineair gedrag. De grootte en de plaats van de belasting hangt immers af van de vervormingen van de constructie. Het gedrag van een dakconstructie onder waterbelasting is vergelijkbaar met het knikgedrag van bijvoorbeeld een kolom.

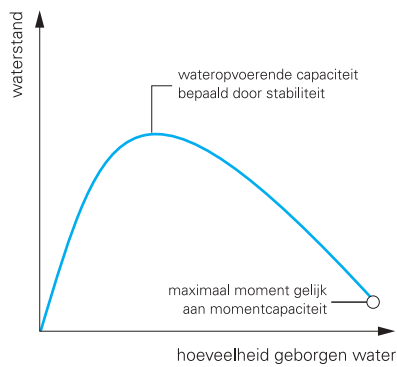
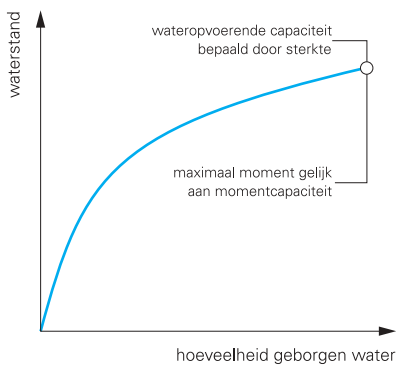
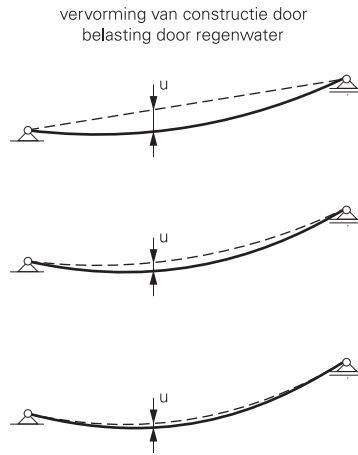
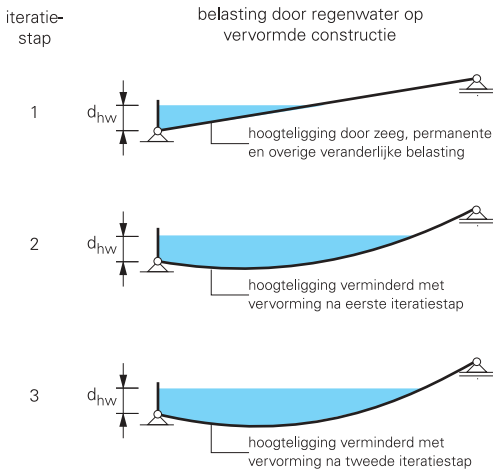
De krachtsverdeling in een constructie door regenwaterbelasting kan iteratief worden bepaald. Dit iteratieproces (*afb. 1*) kan convergeren (er ontstaat een evenwichtssituatie) of divergeren (er ontstaat geen evenwichtssituatie). Het gedrag van de constructie onder waterbelasting kan grafisch worden beschreven door

de hoeveelheid geborgen water (watervolume op het dak) uit te zetten tegen de waterstand (*afb. 2*). Hierbij bestaat onderscheid tussen constructies met een toenemende waterstand bij een toenemende berging en constructies waarbij na het bereiken van een maximale waterstand bij een verder toenemende berging de waterstand juist gaat dalen.

In het eerste geval bepaalt de sterkte van de constructie de grootte van maximale waterstand op het dak. In het tweede geval is het stabiliteitsgedrag (stijfheid) van de constructie maatgevend voor de grootte van de maximale waterstand. Wanneer in de tweede situatie de maximale waterstand op de constructie is bereikt, dan zijn de spanningen in de constructie vaak nog geheel niet kritisch. Het toetsen op spanningen, zoals gebruikelijk bij het beoordelen van de uiterste grenstoestand, zegt daarom onvoldoende over de veiligheid van de constructie. De maximaal mogelijke waterstand op het dak wordt ook wel 'de wateropvoerende capaciteit' van de constructie genoemd. NEN 6702 schrijft een waterstand als belasting voor. Uit deze waterstand en de hoogteligging van de constructie volgt de representatieve waarde van de belasting over de lengte van de ligger. Hierna volgt de iteratieberekening. Bij een divergerende iteratie bepaalt de stijfheid van de constructie de wateropvoerende capaciteit. Bij divergentie is de gekozen waterstand groter dan de wateropvoerende capaciteit van de constructie.

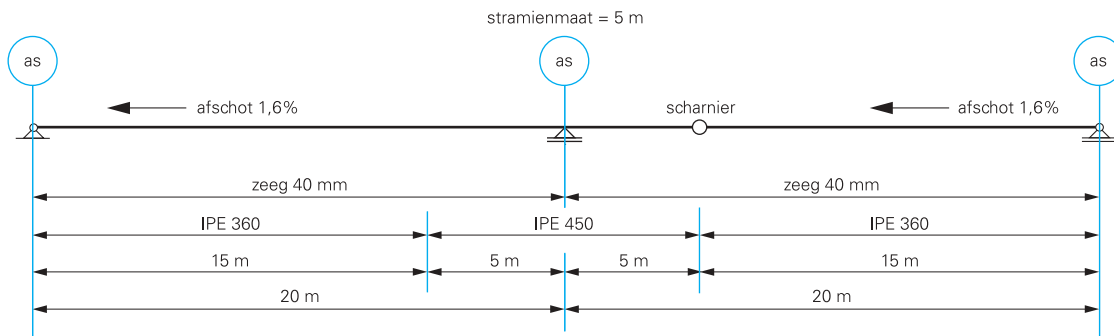
## **Literatuur**

1. NEN 3215, Binnenriolering, eisen en bepalingmethoden, 2002 + A1, 2004. NEN, Delft.
2. NEN 6702, Technische grondslagen voor bouwconstructies. TGB 1990. Belastingen en vervormingen, 2001 + A1, 2005 + ontwerp A2, 2005. NEN, Delft.



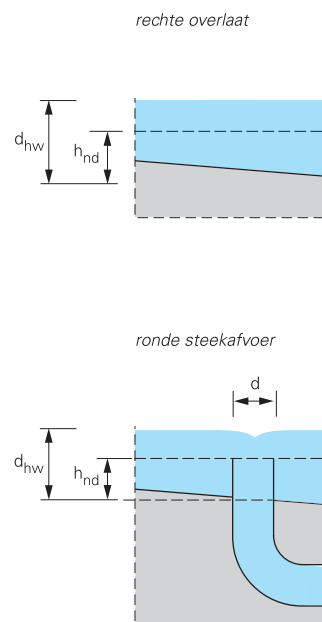
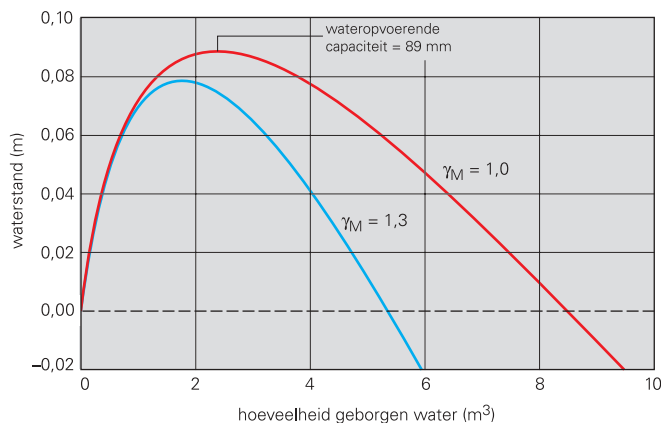
1. Grafische weergave van iteratieproces.

2. Verhouding tussen de waterstand en de geborgen hoeveelheid water.



3. Voorbeeldconstructie.

4. Verhouding tussen waterstand en geborgen hoeveelheid water bij voorbeeldconstructie.



### Voorbeeld

Bij een gegeven constructie (afb. 3) treden bij een waterstand van 87 mm, in het veld de volgende spanningen op:

- (permanent)  $\sigma_{g,rep} = 48 \text{ N/mm}^2$ ;
- (regenwater)  $\sigma_{q,rep} = 41 \text{ N/mm}^2$ .

De rekenwaarde van de spanning bij een fundamentele combinatie voor veiligheidsklasse 2 met een referentieperiode van vijftig jaar is  $1,2 \cdot 48 + 1,3 \cdot 41 = 111 \text{ N/mm}^2$ . Dit is beduidend lager dan de treksterkte van het staal ( $235 \text{ N/mm}^2$ ).

Wanneer de waterstand wordt verhoogd tot 90 mm, dan divergeert de iteratie: er is geen evenwichtsstand. De relatie tussen de waterstand en de hoeveelheid geborgen water van deze constructie staat in afbeelding 4. Ondanks de beperkte grootte van de spanningen bij een waterstand van 87 mm is de constructie niet in staat een 3 mm hogere waterstand te dragen. Dit voorbeeld illustreert dat een toets van de spanningen met de voorgeschreven belastingsfactoren onvoldoende veiligheid garandeert. Daarom is in NEN 6702 een modelfactor geïntroduceerd.

### Modelfactor

De modelfactor ( $\gamma_M$ ) garandeert voldoende veiligheid tussen de voorgeschreven waterstand en de wateropvoerende capaciteit van een constructie. Met deze modelfactor wordt als het ware een rekenwaarde van de water-

opvoerende capaciteit bepaald. De grootte van de modelfactor (1,3 voor nieuwbouw) is bepaald met een veiligheidsbeschouwing door TNO Bouw & Ondergrond, zie artikel *Nieuwe factor  $\gamma_M$*  op pagina 8. Een voorbeeld van de invloed van de modelfactor op de verhouding tussen de waterstand en de hoeveelheid geborgen water staat in afbeelding 4. De wateropvoerende capaciteit is door de modelfactor gereduceerd van 89 tot 78 mm.

### Belasting door regenwater

In de vorige versie van NEN 6702 is de waterstand (belasting door regenwater) op het dak voorgeschreven door een formule met de breedte van de noodafvoeren en het oppervlak van het dak. Deze formule was gebaseerd op een afvoer met een lange overlaat bij een neerslagintensiteit van  $433 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ .

Met het wijzigingsblad zijn de volgende zaken gewijzigd of geïntroduceerd:

- afvoergebied en neerslagintensiteit;
- type noodafvoer;
- detaillering van de noodafvoer.

### Afvoergebied en neerslagcapaciteit

Een afvoergebied is dat deel van het oppervlak van een dak (of meerdere daken) waarbij het regenwater zich verzamelt bij hetzelfde laagste punt. In één afvoergebied is de waterstand overal gelijk. Het af te voeren debiet vanuit een afvoergebied is gelijk aan het product van het oppervlak van het afvoergebied en de

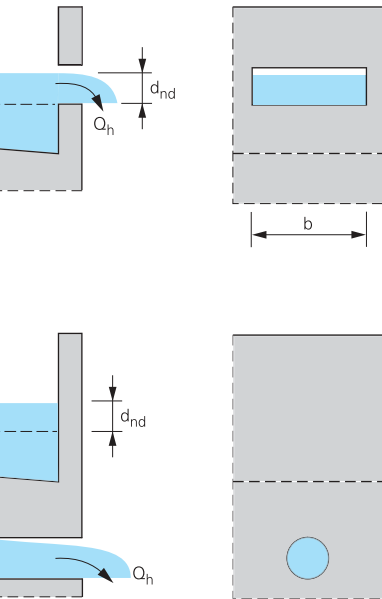
nieuwe neerslagintensiteit van  $0,047 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  ( $= 470 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ ). Deze intensiteit is gebaseerd op nieuwe gegevens van het KNMI. De hoogst gemeten neerslag in de afgelopen vijftig jaar is 14 mm in vijf minuten. Deze neerslagintensiteit moet worden beschouwd als stationaire hoeveelheid.

### Type noodafvoer

Het wijzigingsblad A1 beschouwt twee type noodafvoeren: een rechte vrije overlaat (in de dakrand) en een ronde steekafvoer (in het dakvlak), zie afbeelding 5. Een steekafvoer leidt het regenwater weliswaar naar binnen, maar het dakvlak, waarin de steekafvoer is gemonteerd, zakt mee tijdens een accumulatie. Daardoor ontstaat een grootste waterhoogte precies bóven de noodafvoer zodat het water sneller kan worden weggeleid. Een steekafvoer is vooral nuttig bij grote afvoergebieden of wanneer de wateropvoerende capaciteit van de constructie beperkt is.

### Detaillering van de noodafvoer

De kans op een verstopte noodafvoer moet minimaal zijn. Het verstopping van het reguliere hemelwaterafvoersysteem is één van de belangrijkste oorzaken of – beter gezegd – voorwaarden voor wateraccumulatie. Een noodafvoer moet daarom grote openingen hebben en altijd een vrije uitloop hebben boven het maaiveld van het aangrenzende terrein. Het is toegestaan om noodafvoeren, vooral steek-

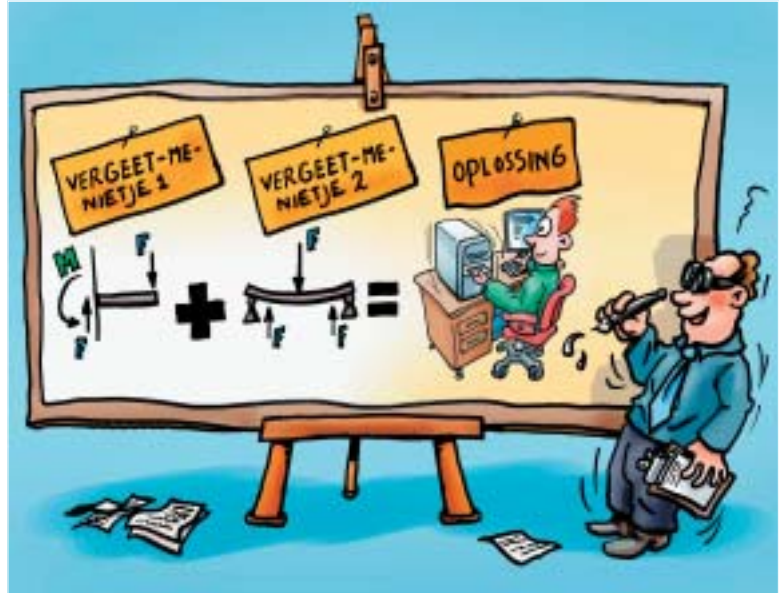


5. Twee typen noodafvoeren.

afvoeren, aan te sluiten op een verzamelleiding. Deze verzamelleiding moet dan wel een vrije uitloop hebben en voldoende capaciteit (bepaald met NEN 3215). De afmetingen van de leidingen en openingen moeten zo zijn dat deze niet eenvoudig door vuil verstopt raken. Hiervoor zijn in het wijzigingsblad detaileringseisen opgenomen.

#### Tot slot: géén zwaardere profielen

Het belastinggeval regenwater leidt zelden tot zwaardere staalprofielen. De constructie moet worden ontworpen op de maatgevende veranderlijke belasting anders dan die door regenwater. Vervolgens wordt van de berekende constructie de wateropvoerende capaciteit bepaald. De grootte hiervan kan positief worden beïnvloed door het afschot van de constructie te vergroten. Vervolgens moeten de noodafvoeren zo worden ontworpen dat de voorgeschreven waterstand kleiner is dan de wateropvoerende capaciteit van de constructie. Met andere woorden: de bouwkundige voorzieningen voor hemelwaterafvoer zijn bepalend voor de grootte van de belasting op de constructie. Als de noodafvoeren voldoende capaciteit hebben, zal het belastinggeval regenwater niet de voor de constructie maatgevende belasting zijn. •



## Software

#### Bouwen met Staal

*Wateraccumulatie 1.10,*  
Rotterdam, 2006.  
[www.bouwenmetstaal.nl](http://www.bouwenmetstaal.nl)

#### ICCS

*STAAT.pro,*  
*module wateraccumulatie,*  
Hoofddorp, 2005.  
[www.iccs.nl](http://www.iccs.nl)

#### Matrix CAE

*MatrixFrame,*  
*module wateraccumulatie,*  
Nijmegen, 2005.  
[www.matrix-software.com](http://www.matrix-software.com)

#### SCIA W+B Software

*SCIA•ESA PT,*  
*module esas.30,*  
Arnhem, 2005.  
[www.scia.nl](http://www.scia.nl)

#### Technosoft

*TS/Raamwerken,*  
*module TS/Raamwerken*  
*Wateraccumulatie,*  
Deventer, 2005.  
[www.technosoft.nl](http://www.technosoft.nl) •

# Nieuwe factor $\gamma_M$

ir. C.A. van Bentum

prof.ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder

Carine van Bentum werkt bij TNO Bouw en Ondergrond in Delft bij de afdeling Civiele Infrastructuur. Ton Vrouwenvelder werkt eveneens bij TNO Bouw en Ondergrond en is deeltijdhoogleraar aan de TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

Door een aangepaste behandeling van de veiligheidsproblematiek uit het basisdocument NEN 6700, TGB 1990, Algemene Basiseisen, is een extra veiligheidsfactor op de stijfheid geïntroduceerd. Deze zogeheten modelfactor ( $\gamma_M$ ) is verwerkt in de nieuwe versie van NEN 6702. Dit artikel gaat in op de probabilistische achtergrond van  $\gamma_M$ , voor nieuwbouw én bestaande bouw.

## Literatuur

C.A. van Bentum en A.C.W.M. Vrouwenvelder, *Bepaling veiligheidsfactoren voor wateraccumulatie op daken* (TNO-rapport 2004-BC-R0056). Delft 2005.

NEN 6700 eist voor veiligheidsklasse 2 een betrouwbaarheidsindex  $\beta = 3,4$ . Dit komt overeen met een maximale faalkans van  $3 \cdot 10^{-4}$  voor de referentieperiode, in dit geval vijftien jaar.

Per jaar bezwijken ongeveer twintig daken op een totaal van honderdduizend daken. De kans op een verstopping is dus minimaal 0,0002 per jaar. In werkelijkheid is dit getal hoger omdat niet elke verstopping leidt tot een instorting. De kans is dus – min of meer – onregistreerbaar. In de betrouwbaarheidsanalyse is uitgegaan van 0,001. Op een referentieperiode van vijftig jaar betekent dit een kans van 0,015. De bovengrensbenadering voor de kans op instorting bij een verstopping is de maximale faalkans gedeeld door de kans op verstopping:

$$P_{\text{falen|verstopping}} = \frac{P_f}{P_v} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{0,015} = 2 \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Deze kans komt overeen met een betrouwbaarheidsindex  $\beta = 2$ .

## Sterktetoets

De nieuwe NEN 6702 geeft voor de sterketoets de volgende veiligheidsfactoren (veiligheidsklasse 2):

- $\gamma_g = 1,2$  (op de belasting door eigen gewicht);
- $\gamma_F = 1,3$  (op de belasting door regenwater);
- $\gamma_M = 1,3$  (op de stijfheid);
- $\gamma_m = 1,0$  (op de materiaalsterkte).

De veiligheidsfactor op de stijfheid is nieuw. De reden om dit in te voeren is dat het bezwijkgedrag bij lichte daken wordt gedomineerd door de stijfheid, niet door de sterkte. De situatie wordt daarmee enigszins vergelijkbaar met het knikgedrag van een drukstaaf. Voor de sterkte-eis geldt:

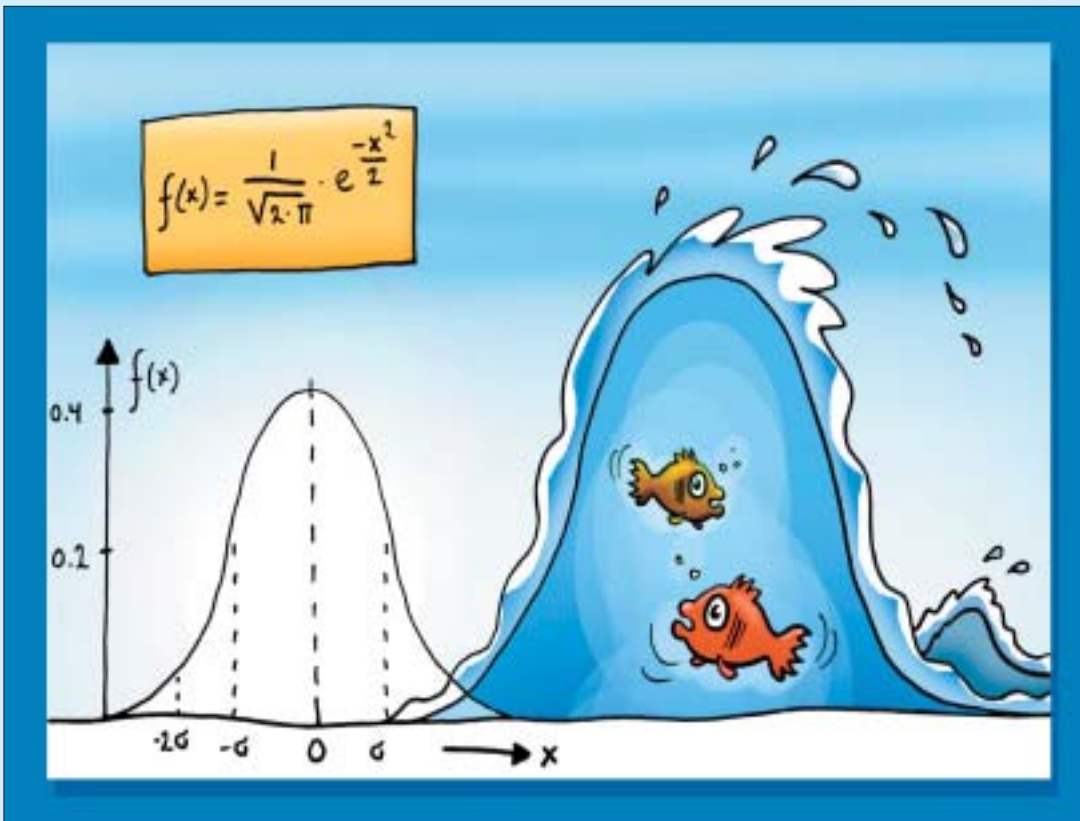
$$\frac{M_k}{\gamma_m} \geq \gamma_g M_g + \gamma_F M_w \quad (2)$$

$M_k$  is de karakteristieke sterkte van het dak en  $M_g$  het moment door eigen gewicht. Het moment door de regenwateraccumulatie  $M_w$  wordt berekend met een waterhoeveelheid die wordt bepaald door de hoogte van de noodafvoer, de hoogte van het watervolume bij de ontwerpregenbui en de doorbuiging. Bij de berekening van de doorbuiging geldt – zoals

Tabel 1. Parameters.

parameter	verdeling	gemiddelde	$V = \sigma/\mu$	
a	hart-op-hart afstand dakliggers	deterministisch	5 m	–
$\ell$	lengte ligger	deterministisch	15 m	–
A	dakoppervlak voor een afvoer	deterministisch	150 m <sup>2</sup>	–
b	breedte noodafvoer	deterministisch	0,5 m	–
cot( $\phi$ )	dakhelling	normaal	60°	7%
h	hoogte van noodafvoer	normaal	0,05 m	10%
d	waterhoogte boven noodafvoer	normaal	0,05 m	10%
$\rho$	massadichtheid water	deterministisch	1000 kg/m <sup>3</sup>	–
g	versnelling zwaartekracht	deterministisch	10 m/s <sup>2</sup>	–
$F_g$	belasting door eigen gewicht	normaal	12,79 kN	5%
k	stijfheid van de ligger	normaal	1080 kN/m	10%
M	opneembaar moment	normaal	132 kNm	7%





gebruikelijk – geen belastingfactor, maar wel dus een factor op de stijfheid.

### Voorbeeldberekening

Een dakligger (IPE 400) is belast door het eigen gewicht en regenwater. De doorbuiging door het eigen gewicht wordt gecompenseerd met een zeeg. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende parameters. De laatste drie grootheden zijn de eigenschappen van een IPE 400. De variatiecoëfficiënten  $V$  (= standaardafwijking  $\sigma$  gedeeld door gemiddelde  $\mu$ ) voor de als onzeker gekwalificeerde (deterministische) grootheden zijn geschat met de JCSS Probabilistisch Model Code.

Met deze gegevens is een controle op de sterkte uitgevoerd met  $\gamma_g = 1,2$ ;  $\gamma_F = 1,3$ ;  $\gamma_M = 1,3$  en  $\gamma_m = 1,0$ . Het karakteristieke opneembaar moment ( $M_k$ ) is de gemiddelde waarde van dat moment minus 1,64 maal de standaardafwijking, in dit geval 116 kNm. De ligger voldoet net. Een betrouwbaarheidsanalyse is gemaakt met de Form-procedure van de TNO-toolbox voor probabilistische berekeningen, Probox. Hieruit volgt een betrouwbaarheidsindex van  $\beta = 2,1$ . Zonder  $\gamma_M = 1,3$  wordt een te lage waarde gevonden, namelijk  $\beta = 1,4$ . Eén voorbeeld is te weinig om een voorschrift op te baseren, maar verschillende berekeningen komen op vrijwel hetzelfde resultaat. Een paar keer werd een iets te lage  $\beta = 1,8$  gevonden, maar dat is gezien het grote aantal veronderstellingen niet direct verontrustend.

### Bestaande bouw

De Regeling voor Aanschrijving van het Bouwbesluit eist voor bestaande bouw een betrouwbaarheidsindex van 2,2. Met de ‘kans op verstopping’ van 0,015 komt de minimaal vereiste  $\beta$  voor bestaande bouw op ongeveer 1,0.

Dezelfde regeling geeft voor bestaande bouw, veiligheidsklasse 2, de volgende belastingfactoren: 1,15 voor eigen gewicht en 1,05 voor de variabele belasting. Met een materiaalfactor van 1,0 wordt de betrouwbaarheidsindex  $\beta$  als functie van de veiligheidsfactor  $\gamma_M$  op de stijfheid als volgt:

$\gamma_M$	1,3	1,2	1,1	1,0
$\beta$	1,5	1,2	1,0	0,8

### Nieuwbouwfactoren

Voor bestaande bouw geldt dus  $\gamma_M = 1,1$ . In 2002 bezweek door wateraccumulatie een aantal daken waaronder het woon/warenhuis Ikea in Amsterdam. Vanwege Tweede Kamervragen over instortingen door wateraccumulatie is een groot aantal dakconstructies beoordeeld met de toen geldende nieuwbouwfactoren (2003): 1,2 voor eigen gewicht, 1,3 voor regenwater, 1,0 voor sterkte en 1,0 voor stijfheid. Ook voor deze dakconstructies zijn betrouwbaarheidsniveaus bepaald met als resultaat een gemiddelde waarde  $\beta = 1,4$ , dat royaal ligt bóven de vereiste ondergrens van 1,0. De in 2003 goedgekeurde daken zijn dus (gezien vanuit de eisen voor bestaande bouw) voldoende veilig.

### Betrouwbaar

De modelfactor op de stijfheid in geval van nieuwbouw ( $\gamma_M = 1,3$ ) geeft voldoende betrouwbaarheid voor regenwateraccumulatie. Met deze extra factor lijkt een afzonderlijke stijfheidstoets voor de wateropvoerende capaciteit niet nodig. De analyse van de modelfactor is gebaseerd op veronderstellingen, zoals de kans op verstopping en instorting. Ook is een sterk vereenvoudigd model gebruikt om de sterkte te toetsen. De verwachting is echter dat een nauwkeurigere modellering niet leidt tot een andere factor.

De belastingfactoren mogen worden gereduceerd voor de beoordeling van de veiligheid van bestaande bouw. De veiligheidsfactor op de stijfheid kan daarbij ook worden teruggebracht van 1,3 naar 1,1. Bestaande daken die zijn berekend met de gammafactor van de stijfheid van 1,0 met de belastingfactoren op nieuwbouwniveau, voldoen echter óók. •

# Praktische methode om wateraccumulatie te toetsen

Toetsen op wateraccumulatie is (nog steeds) actueel. Zo is in het wijzigingsblad A1 op NEN 6702 en in de NPR 6703 een aantal nieuwe inzichten verwerkt, net als het resultaat van een recent ontwikkelde rekenmethode. De achtergronden van die rekenmethode worden in dit artikel uitgelegd. Voor rechthoekige grondvormen van lichte, vlakke daken kan een handmatige berekening worden uitgevoerd voor het bepalen van de sterkte bij wateraccumulatie.

## *prof.dr.ir. J. Blaauwendraad*

Johan Blaauwendraad is emeritus-hoogleraar Toegepaste Mechanica van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft.

De constructeur doet er goed aan eerst het stijfheidgetal  $n = EI/EI_{cr}$  van de dakconstructie te bepalen. Het maakt een groot verschil of  $n > 1$  dan wel  $n \leq 1$ . Voor  $n > 1$  kan een berekening worden uitgevoerd op het niveau van  $q\ell^2/8$ . Verschillende opleggingen worden gemakkelijk meegenomen. Een stapeling van spanten, gordingen en dakplaten vormt geen extra moeilijkheid en het dak mag onder afschot liggen en een zeeg hebben.

Voor  $n < 1$  moet de constructeur oppassen. Het dak kan dan instabiel worden bij een laag spanningsniveau. De wateropvoerende hoogte laat zich in dat geval aflezen uit een grafiek. De situatie voor  $n = 1$  is een overgangsgeval.

### **Basismodel**

Voor het beschrijven van het basismodel gaan we uit van een plat dak zonder afschot. De doorbuiging door de permanente belasting is opgeheven door het aanbrengen van een zeeg. Voorlopig gaan we ervan uit dat het dak bestaat uit vrij opgelegde liggers met lengte  $\ell$  en een hart-op-hart afstand  $a$ . Voor het soortelijk gewicht van water hanteren we in de voorbeelden  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ . We nemen aan dat een regenbui lange tijd aanhoudt en dat de gewone afvoer onvoldoende capaciteit heeft of verstopt is, zodat de ruimte boven het dak met regenwater wordt gevuld tot aan de noodafvoer. We gaan ervan uit dat deze noodafvoer wel voldoende capaciteit heeft, zodat de waterstand niet hoger dan de afstand  $d$  boven het dak stijgt.

Doordat de dakconstructie doorbuigt, komt er extra water op het dak te staan (wateraccumulatie). We nemen aan dat de constructie elastisch blijft en dat er een eind komt aan het voortdurend aangroeien van de doorbuiging. De uiteindelijke doorbuiging in het midden van de overspanning noemen we  $\delta_u$ . Het linkerdeel van *afbeelding 1* geeft deze situatie weer. In de besproken eindsituatie bestaat de waterbelasting uit een constant deel met hoogte  $d$  en een niet-constant deel met als grootste waarde  $\delta_u$ .

Beide belastingcomponenten zijn te combineren door voor de doorbuiging een sinuslijn aan te nemen en voor de constante belasting een sinusbelasting met topwaarde  $d_u$ , zie het middendeel van *afbeelding 1*. We kunnen  $d_u$  zo kiezen dat de sinusbelasting halverwege de overspanning hetzelfde moment oplevert als de constante belasting. Voor de sinusbelasting bedraagt het moment  $\alpha\gamma d_u \ell^2/\pi^2$  en voor de constante belasting  $\alpha\gamma d \ell^2/8$ . Dit betekent praktisch gezien dat  $d_u = 1,25d$ . De som van  $d_u$  en  $\delta_u$  noemen we  $w_u$ .

De totale belasting heeft nu de vorm van een sinus en daarvoor is de doorbuiging eveneens een sinus met als topwaarde:

$$\delta_u = \frac{\alpha\gamma(d_u + \delta_u)\ell^4}{\pi^4 EI} \quad (1)$$

Formule (1) laat zien dat de doorbuiging gedeeltelijk door zichzelf wordt veroorzaakt.



Het is verder gebruikelijk om een kritische stijfheid  $EI_{cr}$  in te voeren volgens:

$$EI_{cr} = \frac{\alpha \gamma \ell^4}{\pi^4} \quad (2)$$

De verhouding tussen de werkelijke stijfheid en de kritische stijfheid noemen we  $n = EI/EI_{cr}$ . Uit (1) volgt dan voor de grootste doorbuiging  $\delta_u = d_u/(n-1)$ . En omdat  $w_u = d_u + \delta_u$ , kan  $w_u$  worden berekend met:

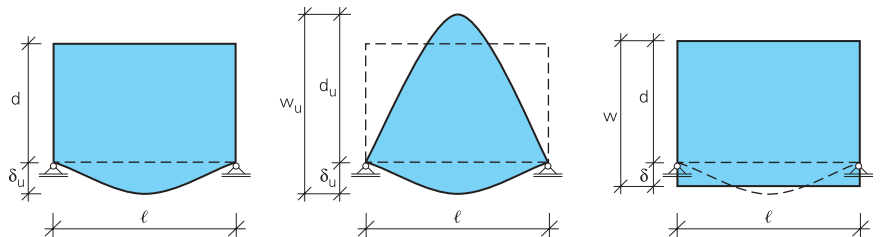
$$n = \frac{EI}{EI_{cr}} \quad (3)$$

$$w_u = \frac{n}{n-1} d_u$$

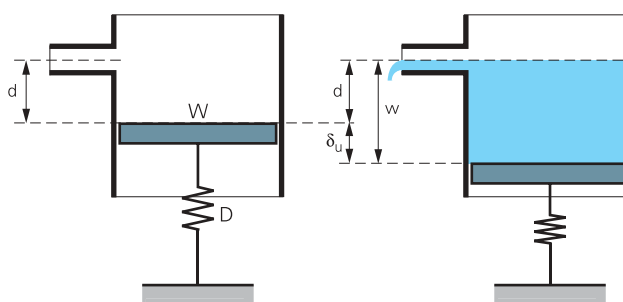
Zolang geldt  $n > 1$ , dan hebben  $w_u$  en  $\delta_u$  hetzelfde teken als  $d_u$ . Wanneer  $n$  van bovenaf nadert tot 1, nadert de noemer in (3) tot nul en worden  $w_u$  en  $\delta_u$  oneindig groot. De constructie bezwijkt dan!

### Voor $n > 1$

De theorie is uitsluitend geldig voor  $n > 1$ . (Later komen we terug op situaties met  $n < 1$ ). Zolang  $EI > EI_{cr}$ , dan wordt er een evenwichtstoestand gevonden en bepaalt de sterkte van de ligger of het dak wel of niet bezwijkt. Tot zover komt de behandeling overeen met veel andere publicaties. Maar hiermee lopen we vast bij een andere manier van opleggen,



1. Waterbelasting: (links) werkelijke waterbelasting; (midden) sinusvormige belasting; (rechts) gelijkmatig verdeelde belasting.



2. Zuiger-veermodel van een dak: (links) zonder water en (rechts) met water.

## Voorbeeld 1

### Horizontaal dak met uitsluitend dakliggers

We beschouwen een horizontaal dakdeel met overspanning  $\ell = 15$  m, ondersteund door liggers IPE 450 met een afstand hart-op-hart  $a = 5$  m. De buigstijfheid van de liggers bedraagt  $EI = 7,09 \cdot 10^4$  kNm<sup>2</sup>. De dakplaten op de liggers worden zeer stijf verondersteld. De initiële doorbuiging door het eigen gewicht is  $\delta_{u,i} = 0,016$  m. De waterhoogte aan de dakrand is  $d_{hw} = 0,10$  m. Deze dakconstructie is eerder uitgewerkt in *Bouwen met Staal 177*<sup>[2]</sup>. We beperken ons in dit voorbeeld tot het bepalen van het moment door het gewicht van het water. In het model rekenen we met:

$$d = 0,8\delta_{u,i} + d_{hw} = 0,8 \cdot 0,016 + 0,100 = 0,113 \text{ m}$$

Het soortelijke gewicht van water is  $\gamma = 10$  kN/m<sup>3</sup>. Eerst voeren we een berekening uit met een modelfactor  $\gamma_M = 1$  en daarna met  $\gamma_M = 1,3$ .

Bij een modelfactor  $\gamma_M = 1$  volgt de stijfheid uit formule (6):

$$D = \frac{\pi^4 EI}{\ell^3} = \frac{\pi^4 \cdot 7,09 \cdot 10^4}{15^3} = 2046 \text{ kN/m}$$

De specifieke waterbelasting volgt uit formule (5):

$$W = \gamma a \ell = 10 \cdot 5 \cdot 15 = 750 \text{ kN/m}$$

Hieruit volgt:

$$n = \frac{D}{W} = \frac{2046}{750} = 2,73$$

De bijkomende zakking  $\delta$  en totale waterkolom  $w$  zijn dan:

$$\delta = \frac{1}{n-1} d = \frac{1}{2,73-1} \cdot 0,113 = 0,065 \text{ m}$$

$$w = \frac{n}{n-1} d = \frac{2,73}{2,73-1} \cdot 0,113 = 0,178 \text{ m}$$

De totale waterbelasting volgt uit formule (7):

$$F = Ww = 750 \cdot 0,178 = 134 \text{ kN}$$

Het moment in de ligger wordt hiermee:

$$M = \frac{1}{8} F \ell = \frac{1}{8} \cdot 134 \cdot 15 = 251 \text{ kNm}$$

Ter vergelijking: het computerprogramma ESA PT, dat hier als exact mag worden beschouwd, geeft voor dit voorbeeld als uitkomst:  $M = 253$  kNm.

Voor een modelfactor  $\gamma_M = 1,3$  verloopt de berekening als volgt:

$$n = \frac{D}{W} = \frac{2046}{1,3 \cdot 750} = 2,10$$

$$w = \frac{n}{n-1} d = \frac{2,10}{2,10-1} \cdot 0,113 = 0,216 \text{ m}$$

$$F = Ww = 750 \cdot 0,216 = 162 \text{ kN}$$

$$M = \frac{1}{8} F \ell = \frac{1}{8} \cdot 162 \cdot 15 = 304 \text{ kNm}$$

Het moment voor het belastinggeval water valt nu ruim 20% groter uit.

## Voorbeeld 2

### Horizontaal dak met spanten en gordingen

Het horizontaal dak bestaat uit spanten met hoofdliggers HEA 900 met elk een lengte  $\ell_s = 20$  m en een buigstijfheid  $EI_s = 886400$  kNm<sup>2</sup> én gordingen IPE 300 met lengte  $\ell_g = 10$  m en  $EI_g = 17600$  kNm<sup>2</sup>. De gordingen, hart-op-hart 5 m, lopen door over de spanten. Dit betekent dat de stijfheid van de gordingen vijf maal groter is dan bij een vrije oplegging. De vervorming van de dakplaten wordt niet mee beschouwd. Er geldt  $d_{hw} = 150$  mm.

In dit voorbeeld beperken we ons tot het berekenen van de momenten die optreden door de waterbelasting. We beschouwen een dakdeel tussen twee hoofdliggers. Het aantal gordingevelden is  $N_g = 4$ . De doorbuiging voor de hoofdliggers en de gordingen door de permanente belasting bedraagt respectievelijk 12,5 mm en 2,2 mm. In het model brengen we 80% in rekening als initiële zakking (afgerond):  $\delta_{i,s} = 10$  mm en  $\delta_{i,g} = 2$  mm. We gaan dus werken met:  $d = 0,150 + 0,010 + 0,002 = 0,162$  m. De modelfactor bedraagt  $\gamma_M = 1,3$ . Achtereenvolgens worden de volgende rekenstappen gemaakt:

$$W = g \alpha_s \ell_s = 10 \cdot 10 \cdot 20 = 2000 \text{ kN/m}$$

$$D_s = \frac{\pi^4 EI_s}{\gamma_M \ell_s^3} = \frac{\pi^4 \cdot 886400}{1,3 \cdot 20^3} = 8302 \text{ kN/m}$$

$$D_g = 5 \frac{\pi^4 N_g EI_g}{\gamma_M \ell_g^3} = 5 \frac{\pi^4 \cdot 4 \cdot 17600}{1,3 \cdot 10^3} = 26375 \text{ kN/m}$$

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_s} + \frac{1}{D_g} = \frac{1}{8302} + \frac{1}{26375} = \frac{1}{6314}$$

$$n = \frac{D}{W} = \frac{6314}{2000} = 3,157$$

$$w = \frac{n}{n-1} d = \frac{3,157}{3,157-1} \cdot 0,162 = 0,237 \text{ m}$$

$$F = Ww = 2000 \cdot 0,237 = 474 \text{ kN}$$

$$M_s = \frac{1}{8} F \ell_s = \frac{1}{8} \cdot 474 \cdot 20 = 1185 \text{ kNm}$$

$$M_g = -\frac{1}{12} \frac{F \ell_g}{N_g} = -\frac{1}{12} \cdot \frac{474 \cdot 10}{4} = -99 \text{ kNm}$$

Ter vergelijking: uit het programmadeel van ESA PT voor wateraccumulatie volgen de waarden  $M_s = 1191$  kNm en  $M_g = -107$  kNm, met respectievelijk een foutmarge van 0,5% en 7,5%.

#### Opmerking

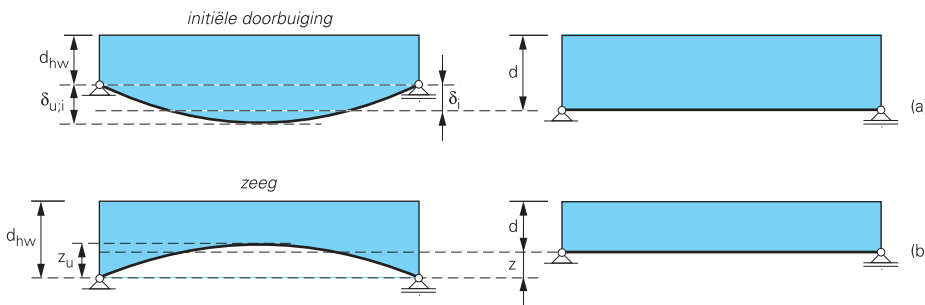
We hadden de waarde  $n$  ook per onderdeel van het dak kunnen uitrekenen en daaruit  $n$  voor het totale systeem kunnen bepalen. Dat leidt tot dezelfde waarde:

$$n_s = \frac{D_s}{W} = \frac{8302}{2000} = 4,151$$

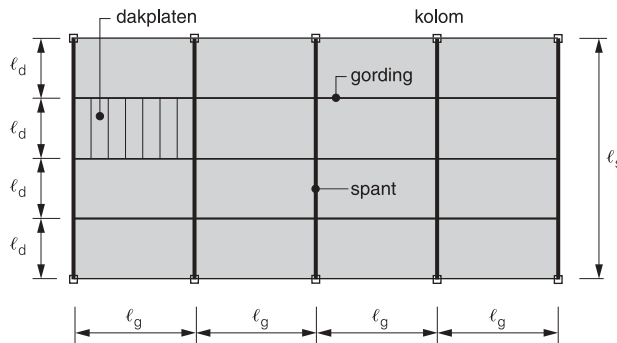
$$n_g = \frac{D_g}{W} = \frac{26375}{2000} = 13,188$$

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n_s} + \frac{1}{n_g} = \frac{1}{4,151} + \frac{1}{13,188} = \frac{1}{3,157}$$

Eveneens dezelfde waarde wordt voor  $n$  gevonden wanneer de formule  $EI/EI_{cr}$  wordt gebruikt in plaats van  $D/W$ . De lezer kan dit zelf oefenen.



3. De dakopstand  $d$  in het model wordt (a) groter dan de werkelijke dakopstand  $d_{hw}$  door een initiële doorbuiging en (b) kleiner dan de werkelijke dakopstand  $d_{hw}$  door een zeeg.



4. Plattegrond van een dak met spanten, gordingen en dakplaten.

omdat de sinusvorm voor de waterbelasting uitsluitend geldt voor een vrij opgelegde ligger. In dit artikel vervangen we daarom de gebruikelijke aanpak door een werkwijze die ook bruikbaar is bij andere randvoorwaarden.

We gaan daarvoor terug naar *afbeelding 1*. Hebben we eerder het constante waterdeel vervangen door een sinus, nu doen we het omgekeerde en vervangen we het niet-constante deel met topwaarde  $\delta_u$  door een constant deel met de waarde  $\delta$  (zie het rechterdeel van *afb. 1*). De som van  $d$  en  $\delta$  noemen we  $w$ . Merk op dat we nu geen index  $u$  gebruiken. Dat levert het zuigermodel van *afbeelding 2*, dat eerder is gepubliceerd in *Bouwen met Staal*<sup>[1]</sup>. In dit artikel zijn de symbolen  $W$  en  $D$  ingevoerd. Het specifieke watergewicht  $W$  staat voor het gewicht (in kN) van een laag water van één meter dik.

De veerstijfheid  $D$  is de kracht (ook in kN) die nodig is om de veer in het elastische traject één meter in te drukken. De grootheden  $W$  en  $D$  hebben dezelfde dimensie kN/m. Voor het model is op eenvoudige wijze af te leiden<sup>[1]</sup>:

$$n = \frac{D}{W} \quad (4)$$

$$w = \frac{n}{n-1} d$$

De analogie met formule (3) voor de sinusbelasting is evident. We richten het model zo in, dat  $n = D/W$  dezelfde waarde krijgt als bij de

sinusbelasting. De waarde van  $W$  is eenvoudig te bepalen uit het soortelijk gewicht  $\gamma$  en het dakoppervlak  $a\ell$  dat de ligger moet ondersteunen:

$$W = \gamma a \ell \quad (5)$$

De grootte van de stijfheid  $D$  bepalen we uit de eis dat  $n$  in het model overeen moet komen met de definitie volgens (1). Hieruit volgt:

$$D = \frac{\pi^4 EI}{\ell^3} \quad (6)$$

Met deze stijfheid leidt het model voor een gelijkmatig verdeelde belasting tot een constante verplaatsing  $\delta$  die kleiner is dan de topverplaatsing  $\delta_u$ . Er geldt:  $\delta = 0,8\delta_u$ .

In het model gebruiken we uitsluitend een gelijkmatig verdeelde belasting. Uit de constante waterkolom  $w$  en het specifieke watergewicht  $W$  berekenen we 'kort-door-de-bocht' de totale belasting  $F$  en daaruit (voor een vrij opgelegde ligger) het moment  $M$  volgens:

$$F = Ww \quad \text{en} \quad M = \frac{1}{8} F\ell \quad (7)$$

Voor een ligger die vrij is opgelegd, geldt een verhouding van 0,8 tussen de constante waarde en de topwaarde van de verplaatsing. Echter dezelfde verhouding kan met goede nauwkeurigheid ook worden gehanteerd voor andere typen opleggingen. Daarom vervangen we elke niet-constante doorbuiging door een constante doorbuiging en elke niet-constante

belasting door een constante belasting. Daarbij hanteren we steeds een factor 0,8 voor de verhouding tussen  $\delta$  en  $\delta_u$ .

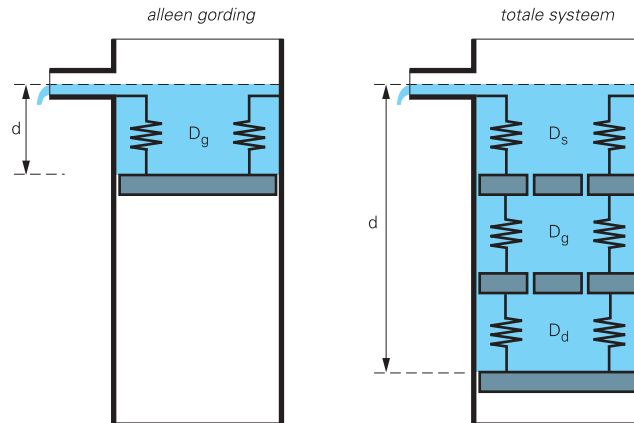
### Zeeg of initiële doorbuiging

We beschouwen nu een dak met een initiële doorbuiging door de permanente belasting (of door bouwfouten). De waterstand  $d_{hw}$  aan de dakrand is zo groot dat het dak volledig onder water staat. De topwaarde van de initiële doorbuiging bedraagt  $\delta_{u,i}$ . In het model brengen we hiervan  $\delta_i = 0,8\delta_{u,i}$  in rekening (*afb. 3a*). De relatie tussen de grootte  $d$ , waarmee we in het model moeten werken, en de werkelijke dakopstand  $d_{hw}$  is dan  $d = d_{hw} + \delta_i$ . We kunnen ook het geval beschouwen dat er een zeeg  $z$  aanwezig is waardoor  $d$  kleiner wordt dan  $d_{hw}$ . Wanneer de topwaarde van de zeeg  $z_u$  is en de equivalente constante zeeg  $z = 0,8z_u$ , dan geldt  $d = d_{hw} - z$  (*afb. 3b*). In feite is een zeeg een (bijzonder geval van een) initiële doorbuiging met een negatief teken. De juistheid van deze aanpak in het model wordt ondersteund door de resultaten van berekeningen in de afstudeerstudie van Keppler<sup>[3]</sup>. *Voorbeeld 1* geeft een toepassing van deze methode.

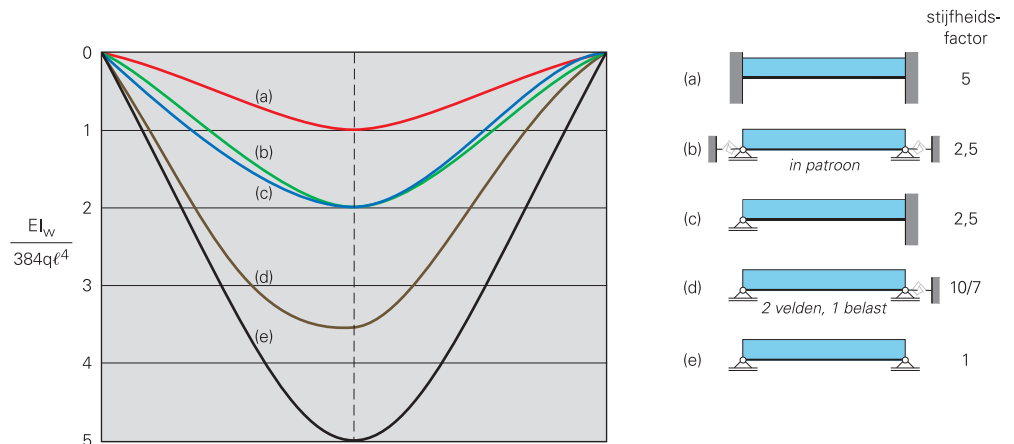
### Samengesteld dak

We beschouwen nu een dakconstructie die bestaat uit een systeem van spanten (hoofdliggers), gordingen (liggers) en dakplaten. In *afbeelding 4* definiëren we de lengten  $\ell_s, \ell_g$

5. Serieschakeling van veren voor een systeem van spanten, gordingen en dakplaten.



6. Stijfheidsfactoren voor verschillende randvoorwaarden van een belaste ligger of dakplaat.



en  $\ell_d$ , respectievelijk voor spant, gording en dakplaat.

In het model beschouwen we een dakdeel dat correspondeert met één spant: dus een veld tussen twee spanten. Dit spantveld is verdeeld in  $N_g$  gordingvelden ( $N_g = 4$  in *afb. 4*). In het model wordt aangenomen dat de twee buitenste gordingen de halve stijfheid hebben. De belasting van de gordingen op het spant wordt opgevat als een gelijkmatig verdeelde belasting. Hetzelfde geldt voor de belasting van de dakplaten op de gordingen. In het dakdeel tussen twee spanten komen  $N_d$  dakplaten voor, elk met een breedte van één meter. Voor de bepaling van  $N_d$  wordt een sommatie gemaakt over alle gordingvelden tussen twee spanten. Voorlopig nemen we aan dat alle onderdelen vrij op elkaar zijn gelegd. De totale doorbuiging is een sommatie van de afzonderlijke doorbuiging van spanten, gordingen en platen.

Wanneer we de spanten vervangen door een veer, de gordingen door een andere veer en ook de dakspanten met een eigen veer beschrijven, moet van deze drie veren een serieschakeling worden gemaakt, zie *afbeelding 5*. Elk van de drie veren neemt in dit model dezelfde waterbelasting op. Voor het bepalen van de respectieve veerstijfheden beschouwen we, zoals afgesproken, een dakdeel tussen twee spanten. We noemen weer het gewicht van één meter water op dit dakdeel  $W$ . Met dit dakdeel correspondeert de stijfheid  $D_s$  van één spant. De gezamenlijke stijfheid van  $N_g$  gordingen in

dit dakdeel noemen we  $D_g$  en de stijfheid van de  $N_d$  dakplaten van dit dakdeel  $D_d$ .

Voor een serieschakeling van veren moeten we de reciproque waarden van de afzonderlijke veren sommeren om de reciproque waarde van de veerstijfheid  $D$  van het systeem te vinden:

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_s} + \frac{1}{D_g} + \frac{1}{D_d} \quad (8)$$

De formules (4) en (7) voor het berekenen van  $n$ ,  $w$  en  $F$  blijven onveranderd geldig. De berekening van de momenten in spant, gording en dakplaat verloopt nu als volgt:

$$M_s = \frac{1}{8} F \ell_s; \quad M_g = \frac{1}{8} \frac{F \ell_g}{N_g}; \quad M_d = \frac{1}{8} \frac{F \ell_d}{N_d} \quad (9)$$

Wanneer in formule (8) zowel het linker- als het rechterlid worden vermenigvuldigd met het specifieke watergewicht  $W$  van het dak tussen twee spanten gaat deze formule over in:

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n_s} + \frac{1}{n_g} + \frac{1}{n_d} \quad (10)$$

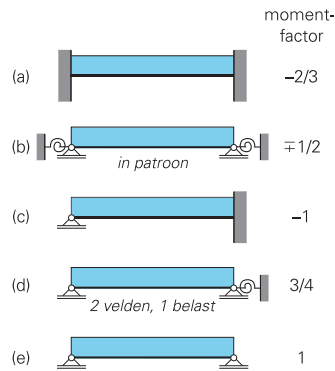
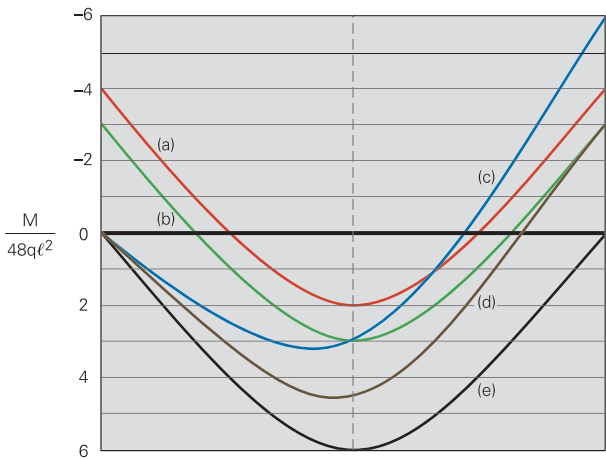
Zo staat de formule voor het bepalen van  $n$  in de NPR 6703. Hier wordt nog opgemerkt dat  $n_g$  en  $n_d$  ook kunnen worden bepaald door één gording en één dakplaat te beschouwen. Het maakt verder geen verschil of voor het berekenen van  $n$  de hier beschreven methode met  $D/W$  wordt gevolgd of de klassieke aanpak

met  $EI/EI_{cr}$ . *Voorbeeld 2* toont hoe de methode voor een samengesteld dak verloopt.

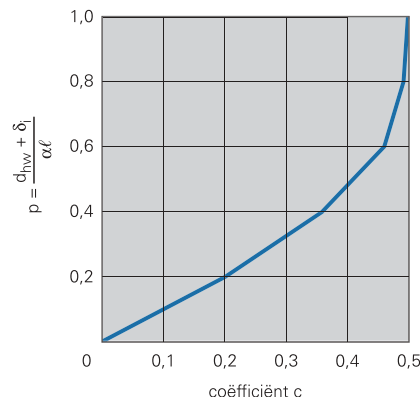
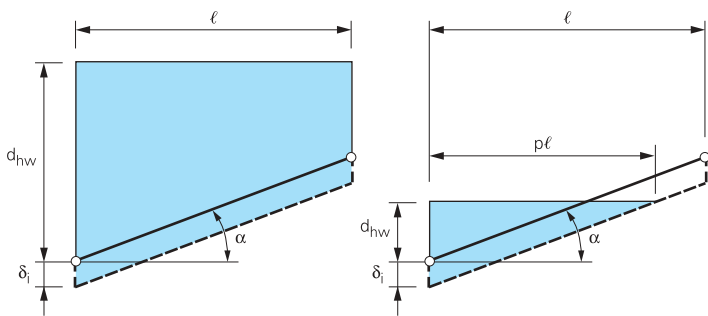
**Verschillende randvoorwaarden**

Tot hier is als randvoorwaarde gekozen dat de liggereinden vrij zijn van moment (geval e in *afbeelding 6*). Maar gordingen bijvoorbeeld kunnen doorlopen over de spanten. Er is dan sprake van liggers die aan beide zijden zijn ingeklemd (a). Het eindveld van een Gerberligger zal overeenkomst vertonen met een vrij opgelegde ligger (e). Dakplaten hebben vaak de lengte van twee gordingvelden en vormen dan een tweeveldssysteem met een tussensteunpunt. Beide velden kunnen worden belast (c), maar voor wateraccumulatie is het belasten van één veld meer bepalend (d). Dakplaten kunnen ook in patroon worden gelegd (b).

In *afbeelding 6* is voor al deze verschillende gevallen de zakkingslijn getekend voor een gelijkmatig verdeelde belasting. Als de stijfheid van de vrij opgelegde ligger 1 wordt genoemd, is de stijfheid van de andere gevallen groter dan 1. De verhouding is in *afbeelding 6* als stijfheidsfactor aangegeven. De stijfheid  $D$  wordt berekend met formule (6) en vermenigvuldigd met de stijfheidsfactor die bij de betreffende randvoorwaarden hoort. Het effect is dat bij een gegeven  $EI$  het stijfheidsgetal groter wordt. Wie  $n$  berekent met de formule  $n = EI/EI_{cr}$  kan hetzelfde bereiken door  $EI_{cr}$  te delen door de stijfheidsfactor van *afbeelding 6*. Zo gebeurt het in NPR 6703 (Wateraccumulatie).



7. Momentfactoren voor verschillende randvoorwaarden van een belaste ligger of dakplaat.



8. Afschot met een initiële doorbuiging (links) geheel onder water; (midden) gedeeltelijk onder water; (rechts) grafiek voor de coëfficiënt c.

Het berekenen van de momenten vraagt extra aandacht. De momentenlijn zal anders zijn dan bij een vrij opgelegde ligger en het grootste moment kan verschillen in grootte en plaats van optreden. In *afbeelding 7* is de momentenlijn getekend van de verschillende gevallen uit *afbeelding 6*. Om het moment te berekenen wordt formule (7) gebruikt, maar vermenigvuldigd met de momentfactor die in *afbeelding 7* wordt genoemd. Een minteken geeft aan dat het moment optreedt bij het steunpunt. In het geval b van *afbeelding 7* voor in patroon gelegde dakplaten moet worden bedacht dat de momentwaarde het gemiddelde is langs een opleglijn van de dakplaten. Afwisselend is het moment nul en maximaal. De factor  $-1/2$  moet dus nog worden vermenigvuldigd met 2, zodat de maximale waarde  $-1$  is.

Er wordt verder op geattendeerd dat de oplegreacties ongelijkmatig zijn verdeeld als de dakplaten niet in patroon liggen. De grootste oplegreactie is dan 25% groter. Hiermee kan rekening worden gehouden door de berekende  $n_g$  te delen door 1,25.

### Dak onder afschot

We onderzoeken de invloed van een afschot aan de hand van een dak onder een helling  $\alpha$  met een initiële doorbuiging  $\delta_i$ . We onderscheiden nu twee situaties: één waarbij het gehele dakvlak onder water staat en één waarin dit slechts gedeeltelijk het geval is. In dit deel

van het artikel beperken we ons tot daken waarvoor geldt  $n > 1$ .

In het veer-zuigermodel kunnen we uitsluitend een constante waarde voor  $d$  invoeren. Wanneer het dak geheel onder water staat (linkerdeel van *afbeelding 8*), kan met goede nauwkeurigheid voor de waterhoogte halverwege het dak worden aangehouden:

$$d = d_{hw} + \delta_i - \frac{1}{2} \alpha \ell \quad (11)$$

De juistheid van deze aanpak wordt bevestigd door de afstudeerstudie van Keppler<sup>[3]</sup>. Wanneer het dak niet helemaal onder water staat, voeren we in navolging van [2] de coëfficiënt  $p$  in volgens de definitie in het midden-deel van *afbeelding 8*. De waarde van  $p$  varieert tussen 0 en 1. De momentenlijn is niet symmetrisch en de maximale waarde treedt niet op in het midden. Toch wijkt de vorm voor een groot deel van het bereik  $0 < p < 1$  weinig af van een momentenlijn met het maximum in het midden. We kunnen daarom de werkelijke momentenlijn vervangen door een equivalente momentenlijn met het maximum in het midden van de overspanning. Voor diverse waarden van  $p$  in het bereik  $0 < p < 1$  is bepaald welke equivalente constante waterdiepte  $d$  een gegeven dakopstand  $d_{hw}$  kan vervangen bij een gegeven helling  $\alpha$  en een initiële doorbuiging  $\delta_i$ . Daaruit volgt:

$$d = d_{hw} + \delta_i - c \alpha \ell \quad (12)$$

De coëfficiënt  $c$  is een functie van  $p$  en bovendien nagenoeg onafhankelijk van  $n$ . Verder geldt:  $c \leq 0,5$ . De grootte van  $c$  kan worden afgelezen uit het rechterdeel van *afbeelding 8*. Deze grafiek is ook opgenomen in NPR 6703. De lezer wordt eraan herinnerd dat het model, zoals tot hier behandeld, uitsluitend geldig is voor  $n = EI/EI_{cr} > 1$ .

Bij een dak met afschot moet aan de berekening van het moment in de dakplaat extra zorg worden besteed. Het zuiger-veermodel veronderstelt namelijk dat de liggers min of meer even zwaar belast worden met een grootste waarde ergens langs de overspanning. Hetzelfde wordt ook verondersteld voor de dakplaten. Maar bij aanwezigheid van afschot van enige betekenis zal boven de dakplaat direct naast de dakrand de grootste waterkolom optreden. Daarom moet bij afschot altijd een tweede berekening worden gemaakt voor de dakplaat langs de dakrand. De ondersteuning van de dakplaat kan hierbij als star worden opgevat. *Voorbeeld 3* (pag. 14) bevat een uitwerking van de voorgestelde aanpak.

### Model voor extreem slap dak ( $n < 1$ )

Tot nog toe hebben we daken beschouwd met een stijfheid groter dan de kritische stijfheid, waarvan het bezwijken wordt bepaald door de sterkte. Uitsluitend voor zulke daken ( $n > 1$ ) is het afgeleide model geldig. In de praktijk blijken extreem slappe daken voor te komen, waarvan het stijfheidgetal  $n$  kleiner is dan 1.

### Voorbeeld 3

#### Dak onder afschot met gordingen en dakplaten

Dit voorbeeld is beschikbaar gesteld door Pieters Bouwtechniek in Haarlem. Het dak bestaat uit vrij opgelegde liggers IPE 270 (we noemen deze liggers hier gording) met een lengte  $\ell_g = 10$  m en een buigstijfheid  $EI_g = 12159$  kNm<sup>2</sup> en dakplaten met een lengte  $\ell_d = 4,5$  m en een buigstijfheid  $EI_d = 157,5$  kNm<sup>2</sup>/m. De dakplaten zijn in patroon gelegd en de vervorming van de dakplaten wordt mee beschouwd. Het dak heeft een afschot van 16 mm/m, dus  $\alpha = 0,016$ . De gordingen hebben een zeeg van 20 mm. Aan de dakrand geldt  $d_{hw} = 116$  mm. We beschouwen een dakdeel tussen twee gordingen. Hiervoor geldt  $N_d = 10$ . Het eigen gewicht van de gordingen is 0,36 kN/m en het eigen gewicht van de dakplaten plus isolatie en dakbedekking is 0,4 kN/m<sup>2</sup>.

Deze dakconstructie is ontworpen toen er nog geen modelfactor bestond. Daarom wordt hier gerekend met  $\gamma_M = 1,0$ .

Dit voorbeeld bestaat uit de volgende zes onderdelen:

- stap 1 bepaal initiële momenten door permanente belasting;
- stap 2 bereken initiële doorbuigingen;
- stap 3 bereken  $n$ ,  $d$  en  $w$ ;
- stap 4 bereken waterbelasting en momenten;
- stap 5 extra berekening voor dakplaat aan rand;
- stap 6 toets voor momenten.

#### 1. Bepaal initiële momenten door permanente belasting

De belasting en de momenten door het eigen gewicht op de gording en de dakplaten wordt als volgt bepaald:

$$F_{i;g} = 0,4 \cdot 10 \cdot 4,50 + 10 \cdot 0,36 = 21,6 \text{ kN}$$

$$F_{i;d} = 0,4 \cdot 10 \cdot 4,50 = 18,0 \text{ kN}$$

$$M_{i;g} = \frac{1}{8} F_{i;g} \ell_g = \frac{1}{8} \cdot 21,6 \cdot 10 = 27,0 \text{ kNm}$$

$$M_{i;d} = -\frac{1}{8} \frac{F_{i;d} \ell_d}{N_d} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{18,0 \cdot 4,5}{10} = -1,01 \text{ kNm/m}$$

#### 2. Bereken initiële doorbuigingen

Voor de buigstijfheid van de dakplaten voeren we een factor 5/2 in, omdat de platen over twee velden doorlopen in een verspringend patroon.

$$W = \gamma \alpha_g \ell_g = 10 \cdot 10 \cdot 4,50 = 450 \text{ kNm}$$

$$D_g = \frac{\pi^4 EI_g}{\ell_g^3} = \frac{\pi^4 \cdot 12159}{10^3} = 1184 \text{ kN/m}$$

$$D_d = \frac{5}{2} \frac{\pi^4 N_d EI_d}{\ell_d^3} = \frac{5}{2} \frac{\pi^4 \cdot 10 \cdot 157,5}{4,5^3} = 4209 \text{ kN/m}$$

De doorbuiging door het eigen gewicht bedraagt dan:

$$\delta_{i;g} = \frac{F_{i;g}}{D_g} = \frac{21,6}{1184} = 0,018 \text{ m}$$

$$\delta_{i;d} = \frac{F_{i;d}}{D_d} = \frac{18,0}{4209} = 0,004 \text{ m}$$

#### 3. Bereken $n$ , $d$ en $w$

$$n_g = \frac{D_g}{W} = \frac{1184}{450} = 2,63$$

$$n_d = \frac{D_d}{W} = \frac{4209}{450} = 9,35$$

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n_g} + \frac{1}{n_d} = \frac{1}{2,63} + \frac{1}{9,35} = \frac{1}{2,05}$$

Dezelfde uitkomst wordt gevonden wanneer  $n_g$  en  $n_d$  worden berekend als het quotiënt van  $EI$  en  $EI_{cr}$ .

$$\delta_i = \delta_{i;g} + \delta_{i;d} - \text{zeeg} = 0,018 + 0,004 - 0,016 = 0,006 \text{ m}$$

$$d_{hw} = 0,116 \text{ m}$$

$$p = \frac{d_{hw} + \delta_i}{\alpha \ell} = \frac{0,116 + 0,006}{0,160} = 0,76$$

$$c = 0,48 \text{ (aflezen uit afb. 5)}$$

$$d = d_{hw} + \delta_i - c \alpha \ell = 0,116 + 0,006 - 0,48 \cdot 0,160 = 0,045 \text{ m (zie formule (12))}$$

$$w = \frac{n}{n-1} d = \frac{2,05}{2,05-1} \cdot 0,045 = 0,088 \text{ m}$$

#### 4. Bereken waterbelasting en momenten

$$F = Ww = 450 \cdot 0,088 = 39,6 \text{ kN}$$

$$M_g = \frac{1}{8} F \ell_g = \frac{1}{8} \cdot 39,6 \cdot 10 = 49,5 \text{ kNm}$$

$$M_d = -\frac{1}{8} \frac{F \ell_d}{N_d} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{39,6 \cdot 4,5}{10} = -2,23 \text{ kNm/m}$$





### 5. Extra berekening voor dakplaat aan rand

$$d_d = d_{hw} + \delta_{i;d} = 0,116 + 0,004 = 0,120 \text{ m}$$

$$w_d = \frac{n_d}{n_d - 1} d_d = \frac{9,35}{9,35 - 1} \cdot 0,120 = 0,134 \text{ m}$$

$$W = \gamma \cdot 1 \cdot \ell_d = 10 \cdot 1 \cdot 4,5 = 45 \text{ kN/m}$$

$$F_d = W_d w_d = 45 \cdot 0,134 = 6,03 \text{ kN}$$

$$M_d^{rand} = -\frac{1}{8} F_d \ell_d = -\frac{1}{8} \cdot 6,03 \cdot 4,5 = -3,39 \text{ kNm}$$

De waarde van  $M_{d;rand}$  is in absolute zin groter dan de eerder berekende waarde  $M_d$  en is dus maatgevend.

### 6. Toets voor momenten

De volgende momenten zijn bepalend:

gording	$M_{i;g} = 27,0 \text{ kNm}$	$M_g = 49,5 \text{ kNm}$
dakplaat	$M_{i;d} = -1,01 \text{ kNm/m}$	$M_d = -3,40 \text{ kNm/m}$

De te toetsen momenten zijn:

$$M_g = 1,2 \cdot 27,0 + 1,3 \cdot 49,5 = 96,8 \text{ kNm}$$

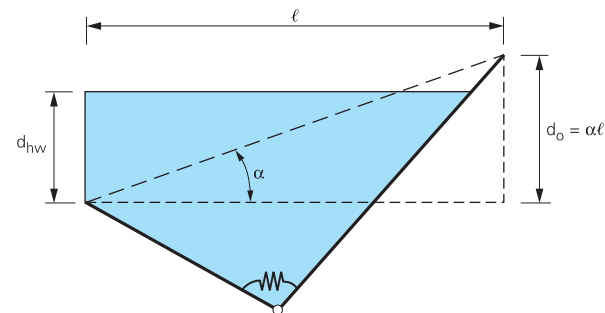
$$M_d = -1,2 \cdot 1,01 - 1,3 \cdot 3,40 = -5,63 \text{ kNm/m}$$

We vergelijken hieronder de drie verschillende berekeningsmethoden.

	liggers	dakplaten
berekening Pieters Bouwtechniek	89,9	-5,88
computerprogramma ESA PT	<b>93,9</b>	<b>-5,54</b>
methode Blaauwendraad	96,8	-5,63

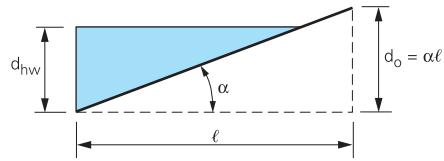
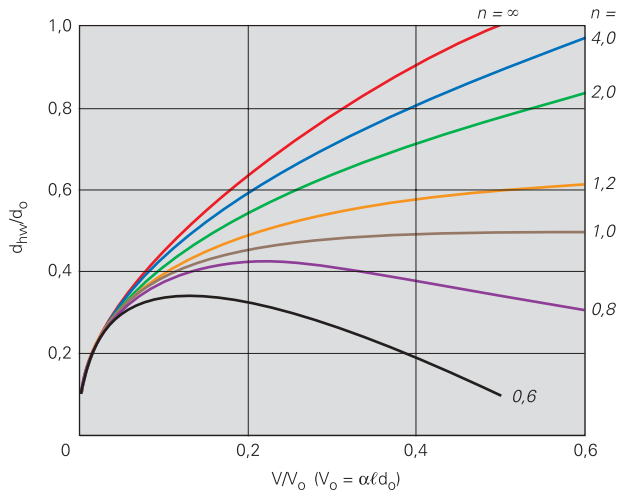
We kunnen ESA PT als een exacte oplossing beschouwen.

De grootste afwijking daarvan is slechts 6%.

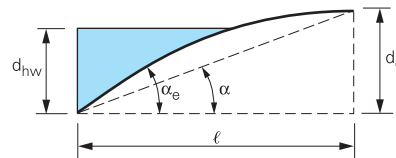
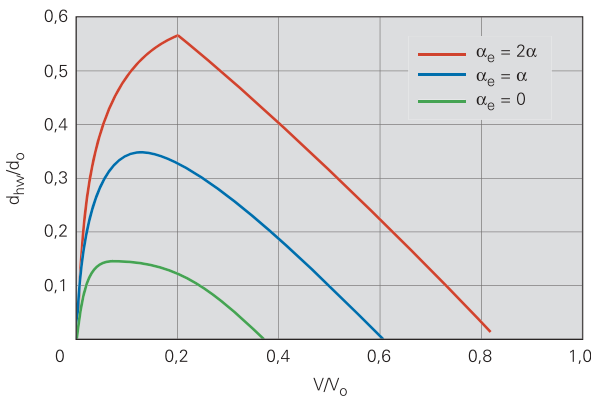


9. Alternatief model voor zeer slappe daken onder afschot.

Voor een dak dat geheel onder water staat is dat onmogelijk, maar niet voor een dak met afschot waarop het water onder de nok van het dak blijft. Dan kan de waarde van  $n$  kleiner worden dan 1, maar er is nu wel een extra probleem. Wijte<sup>[5]</sup> heeft aangetoond dat zulke daken kunnen bezwijken, ook al is de sterktegrens nog niet overschreden. Er bestaat dan een instabiliteitgrens waarboven de waterhoogte niet kan stijgen. De zogeheten ‘wateropvoerende capaciteit’ wordt bereikt, terwijl de spanningen nog geheel onder het niveau van de vloeispanning kunnen liggen. Voor dit geval is een alternatief model ontwikkeld, gebaseerd op *afbeelding 9*. De overspanning is weer  $\ell$ , de hoek van afschot  $\alpha$  en de waterhoogte aan de dakrand  $d_{hw}$ . Dit alternatieve model benadert de zakkingslijn met twee rechte delen die aansluiten onder een hoek. Ter plaatse van de knik wordt een elastisch scharnier aangebracht. De positie van deze rotatieveer wordt halverwege de waterspiegel in de evenwichtstoestand gekozen. Naarmate de waterhoogte aan de dakrand stijgt, schuift het rotatiescharnier verder naar rechts. Het model is algemener dan het zuiger-veermodel: het werkt voor  $n < 1$  en geeft eveneens goede resultaten voor daken met  $n > 1$  en voor waterhoogten die boven de nok uitgaan. Voor de afleiding van het model wordt verwezen naar [7]. We beginnen met het resultaat voor een dak waarvan de initiële doorbuiging door het eigen gewicht is gecompenseerd door een zeeq.



10. Resultaten van het elastisch model bij een ideaal vlak dak.



11. Invloed van een initiële doorbuiging door permanente belasting bij  $n = 0,6$ .

#### Voorbeeld 4 Controle van de wateropvoerende capaciteit

Een constructeur heeft een dak ontworpen, opgebouwd uit hoofdliggers, gordingen en dakplaten. Voor de 15 m lange hoofdliggers, hart-op-hart 10 m, is gekozen voor een IPE 400 ( $EI_g = 48573 \text{ kNm}^2$ ) en voor de doorgaande gordingen, hart-op-hart 5 m, een profiel IPE 220 ( $EI_d = 5821 \text{ kNm}^2$ ). Voor alle belastingcombinaties anders dan water voldoet deze keuze.

De constructeur vermoedt dat hij te maken heeft met een zeer slap dak en wil weten of er gevaar is voor het overschrijden van de wateropvoerende capaciteit. Het dak heeft een afschot van 1,6%. De doorbuiging door permanente belasting wordt gecompenseerd met een zeeg, dus  $\alpha_e = \alpha$ . Wanneer de noodafvoer werkt, dan treedt aan de dakrand een waterhoogte op van  $d = 0,12 \text{ m}$ . Tussen twee hoofdliggers komen drie gordingvelden voor ( $N_g = 3$ ). De constructeur beschouwt de dakplaten als oneindig stijf. De modelfactor is 1,3. De berekening verloopt dan als volgt.

#### Berekening n

$$W = \gamma \alpha_s \ell_s = 10 \cdot 10 \cdot 15 = 1500 \text{ kNm}$$

$$D_s = \frac{\pi^4 EI_s}{\gamma_M \ell_s^3} = \frac{\pi^4 \cdot 48573}{1,3 \cdot 15^3} = 1078 \text{ kN/m}$$

$$D_g = 5 \frac{\pi^4 N_g EI_g}{\gamma_M \ell_g^3} = 5 \frac{\pi^4 \cdot 3 \cdot 5821}{1,3 \cdot 10^3} = 6543 \text{ kN/m}$$

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_s} + \frac{1}{D_g} = \frac{1}{1078} + \frac{1}{6543} = \frac{1}{925}$$

$$n = \frac{D}{W} = \frac{925}{1500} = 0,62$$

#### Bepaling wateropvoerende capaciteit

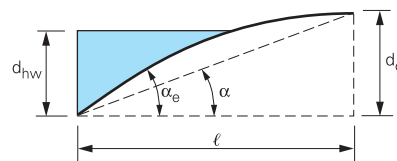
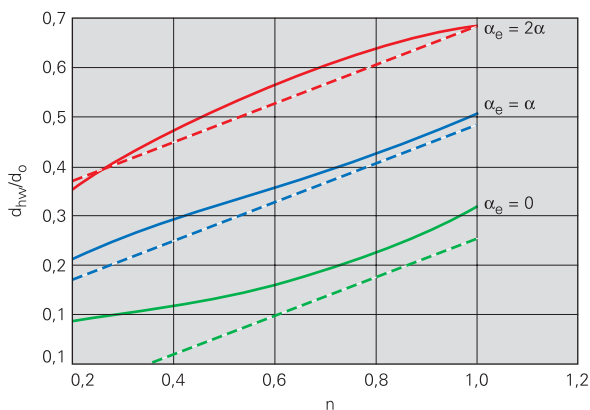
De berekende  $n$  is kleiner dan 1. Er is dus gevaar voor het bereiken van een 'limit point'. Uit formule (13) volgt met  $n = 0,62$  en  $\alpha_e = \alpha$ :

$$\frac{d_{hw;stab}}{d_o} = \frac{d_{hw;stab}}{\alpha \ell} = 0,32$$

De grootste toelaatbare waarde voor de wateropvoerende capaciteit is dus:

$$d_{hw} = 0,32 \alpha \ell = 0,32 \cdot 0,016 \cdot 15 = 0,077 \text{ m}$$

De constructeur moet de constructie verstijven, omdat het dak niet de optredende waterhoogte ( $d = 0,12 \text{ m}$ ) kan opnemen.



12. De waterhoogte aan de dakrand  $d_{hw}$  als functie van  $n$  voor drie waarden van  $\alpha_e$ .

Het blijkt dat het resultaat voor alle denkbare situaties kan worden vastgelegd in één grafiek (afb. 10). Langs de horizontale as staat in dimensieloze vorm het geborgen volume water en op de verticale as de dimensieloos gemaakte waterhoogte. Voor elke waarde van  $n$  geldt een andere curve. Voor  $n < 1$  hebben de curven een 'limit point', gevolgd door een dalende tak. Bij het 'limit point' gaat de stabiliteit verloren, terwijl de sterktegrens nog niet hoeft te zijn bereikt. De overgang tussen wel of geen dalende tak ligt bij  $n = 1$ . Bij dat stijfheidgetal geldt  $d_{hw}/d_0 = 0,51$  zodat het water op het dak tot ongeveer halverwege de nok kan stijgen. Voor waarden  $n > 1$  is altijd de sterkte bepalend en is geldig wat hiervoor is besproken.

Afbeelding 10 is geldig voor  $0 < d_{hw}/d_0 < 1$ . Bij  $d_{hw}/d_0 = 1$  staat het gehele dak onder water. Het is een prettige uitkomst dat alle mogelijke combinaties van parameters kunnen worden afgedekt met één grafiek. De grafiek wordt uitsluitend anders wanneer er een doorbuiging of zegg resteert na het aanbrengen van de permanente belasting.

Het is duidelijk dat een zeer licht dak met een 'limit point' gemakkelijk een gevaarlijke situatie oplevert. Om dit te vermijden, of althans te zorgen dat het 'limit point' voldoende hoog ligt, wordt in wijzigingsblad A1 van NEN 6702 voorgeschreven dat de werkelijke buigstijfheden van spant, gordingen en dakplaten in de berekening moeten worden gedeeld door een modelfactor  $\gamma_M$  met de waarde 1,3.

Voor die gereduceerde stijfheden moet worden aangetoond dat een eventueel 'limit point' hoger ligt dan de hoogste waterstand die kan optreden. In afbeelding 11 wordt de gevoeligheid van de wateropvoerende capaciteit  $d_{hw}$  voor een zegg of voor de initiële doorbuiging door de permanente belasting gedemonstreerd voor een dak met  $n = 0,6$ . De zegg of doorbuiging wordt vastgelegd met de equivalente afschothoek  $\alpha_e$ .

In afbeelding 12 zijn de doorgetrokken lijnen de topwaarden van  $d_{hw}$  bij diverse waarden van  $n$ . De grootte van de initiële doorbuiging of zegg wordt weer aangegeven met de equivalente afschothoek  $\alpha_e$ . In NPR 6703 worden de drie lijnen samengevat in de formule:

$$d_{hw;stab} = \left( -0,15 + 0,4n + 0,22 \frac{\alpha_e}{\alpha} \right) \alpha \ell \quad (13)$$

In afbeelding 10 zijn dit de gestippelde rechte lijnen. Voor  $\alpha_e = 0$  neemt NPR 6703 een grotere marge ten opzichte van de modeluitkomst dan voor  $\alpha_e = 2\alpha$ , omdat het rekenmodel dan minder nauwkeurig is. Voorbeeld 4 bevat een uitwerking van een dak met een 'limit point'. •

## Literatuur

1. J. Blaauwendraad, 'Platte daken toetsen in een handomdraai', *Bouwen met Staal* 171 (2003), p. 40-43.
2. H.J. Fijneman, F. van Herwijnen en H.H. Snijder, 'Wateraccumulatie eenvoudig berekend', *Bouwen met Staal* 177 (2004), p. 45-51.
3. T. Keppler, *Wateraccumulatie op lichte platte dakconstructies. Deel II. Eindrapport*, afstudeerverslag Sectie Gebouwen en Bouwtechniek, TU Delft CiTG 2004.
4. A.W. Tomà, *Het beoordelen van vlakke daken op wateraccumulatie*, uitgave Staalbouwkundig Genootschap, Rotterdam 1980.
5. S.N.M. Wijte, *Diverse aspecten met betrekking tot het belastingsgeval regenwater in NEN 6702*, PAO-cursus Wateraccumulatie, 30 oktober 2003.
6. J. Blaauwendraad, *Wateraccumulatie op lichte vlakke daken. Een eenvoudig model* (rapport CM2004.001), TU Delft CiTG 2004.
7. J. Blaauwendraad, *Wateraccumulatie op lichte vlakke daken. Een algemeen model voor afschot en zegg* (rapport CM2005-001), TU Delft CiTG 2005.

# Grenswaterstand snel berekend

ir. S.N.M. Wijte

Simon Wijte is adviseur

bij adviesbureau

ir. J.G. Hageman in Rijswijk.

## Literatuur

NPR 6703 (ontwerp),

Wateraccumulatie, aanvullende rekenregels en vereenvoudigingen voor het belastingsgeval regenwater in NEN 6702. NEN, Delft 2005.

Een iteratieve berekening van wateraccumulatie is omslachtig en tijdrovend. Gelukkig kan het eenvoudiger. De NPR 6703 geeft vuistregels voor een ondergrens voor de wateropvoerende capaciteit van een constructie. Met deze ondergrens kan een goed noodafvoersysteem worden ontworpen.

Het geometrisch niet-lineaire deel van de belasting door regenwater laat zich analytisch beschrijven indien de stijfheid van de constructie voldoende groot is. Constructies met een stijfheid lager dan de kritische stijfheid, zijn echter – met afschot – toch in staat om belasting door regenwater te dragen.

## $EI/EI_{cr}(n) \geq 0,6$ : tweede-orde effect verwaarloosbaar

Afbeelding 1 geeft het gedrag van een constructie onder afschot bij een belasting door regenwater. Hierbij is uitgegaan van een ligger onder afschot  $\alpha$ , waarbij de doorbuiging door de permanente belasting gelijk is aan de zeeg. De variabelen zijn dimensieloos: de waterstand  $d_{hw}$  is gedeeld door  $d_o (= \alpha \ell)$  en het volume  $V$  door  $V_o (= \alpha \ell^2$ ;  $a$  is de hart-op-hart afstand van de liggers). De verhouding tussen de geborgen hoeveelheid water en de waterstand op een

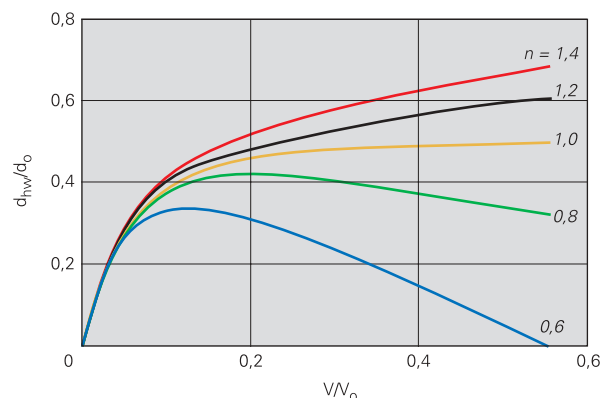
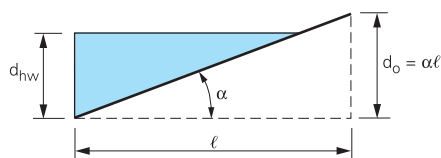
dak is bij beperkte berging onafhankelijk van  $n$ . Het tweede-orde effect van de belasting door regenwater is in die situatie dus beperkt. Afbeelding 2 schetst de (positieve) invloed van een zeeg op de wateropvoerende capaciteit. De invloed van de zeeg is in rekening te brengen door de combinatie van de zeeg ( $u$ ) en het afschot ( $\alpha$ ) uit te drukken in de hoekverdraaiing ( $\alpha_c$ ) bij het laagste punt. Voor liggers met een parabolische zeeg geldt:  $\alpha_c = \alpha + 4u/\ell$ . Ook voor getoogde liggers (of liggers met een zeeg) is het tweede-orde effect door wateraccumulatie klein bij een beperkte berging van water. Bij constructies met  $n \geq 0,6$ , mag het tweede-orde effect worden verwaarloosd mits de waterstand niet groter is dan  $d_{hw;grens}$  ( $= 0,25\alpha_c \ell$ ). Bij beperkte waterstanden is de iteratieve berekening dus overbodig. Een berekening van de eerste-orde krachtsverdeling is dan voldoende.

De grootte van  $d_{hw;grens}$  is in afbeelding 3 grafisch weergegeven. Bij constructies met een significante resterende zeeg of een met een voldoende afschot, leidt de grootte van de grenswaterstand tot een praktisch ontwerp van de noodafvoeren. Bijvoorbeeld: bij een overspanning van 20 m en een resterend afschot ( $= \alpha_c$ ) van 2% volgt een  $d_{hw;grens}$  van 100 mm.

## Benadering wateropvoerend vermogen

Voor situaties waarbij de grootte van  $d_{hw;grens}$  onvoldoende is, moet een iteratieve berekening worden gemaakt. Deze iteratieve berekening leidt niet tot een evenwichtsstand als de aangehouden waterstand groter is dan de wateropvoerende capaciteit van de constructie. De wateropvoerende capaciteit  $d_{hw;stab}$  is voor constructies met  $n \leq 1,0$  te benaderen. Wanneer de voorgeschreven waterstand groter is dan  $d_{hw;stab}$  dan ontstaat er bij constructies

1. Verhouding tussen waterstand en geborgen water bij een ligger onder afschot.





met een  $n \leq 1,0$  geen evenwichtsstand (divergerende iteratie). Voor  $d_{hw;stab}$  geldt:

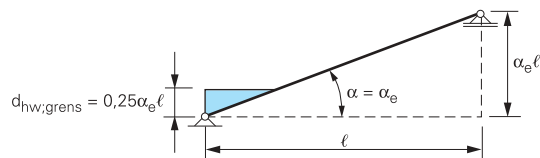
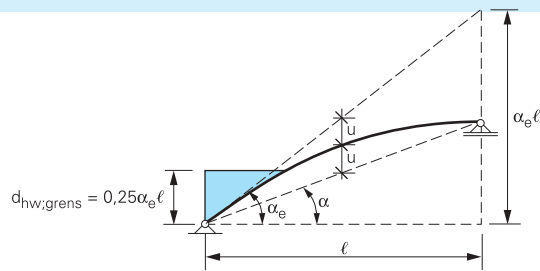
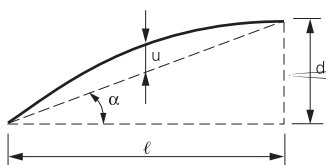
$$d_{hw;stab} = (-0,15 + 0,4n + 0,22\alpha_e/\alpha)\alpha\ell$$

Bij een constructie met  $n = 0,8$ ;  $\ell = 15$  m; en  $\alpha = \alpha_e = 1,6\%$  gelden voor  $d_{hw;grens}$  en  $d_{hw;stab}$  de volgende waarden:

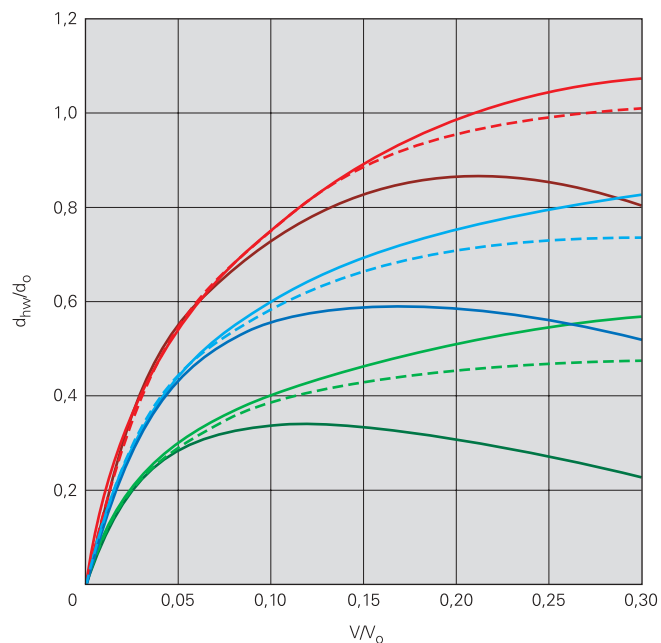
$$d_{hw;grens} = 0,25 \cdot 0,016 \cdot 15000 = 60 \text{ mm}$$

$$d_{hw;stab} = (-0,15 + 0,4 \cdot 0,8 + 0,22)0,016 \cdot 15000 = 94 \text{ mm}$$

Tot een waterstand van 60 mm is geen iteratieve berekening benodigd. Een iteratieve berekening voor de beschouwde constructie zal bij een waterstand hoger dan 94 mm divergeren. Er wordt dan geen evenwichtsstand gevonden. Bij een waterstand lager dan 94 mm is wel een evenwichtsstand mogelijk. •



3. Grafische weergave van  $d_{hw;grens}$ :



2. Invloed van zeeg op de wateropvoerende capaciteit.

# Andere publicaties industriële gebouwen

**Bouwen met Staal** is uitgever van boeken, rapporten en brochures, waarin het ontwerpen en bouwen met staal centraal staat. Op deze pagina een overzicht van de uitgaven over industriële gebouwen. Alle publicaties zijn op A4-formaat, in kleur en de prijzen zijn inclusief btw en verzendkosten. Voor informatie of bestellingen: fax (079) 3531278, e-mail: [verkoop@bouwenmetstaal.nl](mailto:verkoop@bouwenmetstaal.nl). Voor een compleet overzicht van alle uitgaven van **Bouwen met Staal**: [www.bouwenmetstaal.nl](http://www.bouwenmetstaal.nl).

## Geprofileerde staalplaat voor daken en gevels



In het eerste deel van de brochure komen mogelijke oppervlaktebehandelingen, coatings en bewerkingen van het plaatmateriaal aan de orde. Daarop volgen richtlijnen en tips voor het ontwerpen per aspect, zoals dimensionering, thermische isolatie en condensatie, akoestiek en brandveiligheid. Voor het detailleren is er onder meer een overzicht van gangbare, mechanische verbindingen en hun toepasbaarheid. De brochure sluit af met aandachtspunten voor uitvoering, onderhoud en het bepalen van de milieuprestatie van gevels en daken met geprofileerde staalplaat.

*Geprofileerde staalplaat voor daken en gevels* is onderdeel van een serie brochures over de

toepassing van (dunne) staalplaat in de bouw. De anderen zijn *Onderhoud gecoilcoate staalplaat*, *Sandwichpanelen in de bouw*, *Gevelrenovatie met Staal en Stalen daken en gevels voor woningen*.

- *Geprofileerde staalplaat voor daken en gevels*, ISBN 90-72830-27-1, A4-formaat, 58 pagina's.

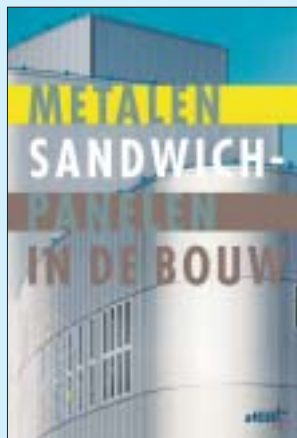
De eerste brochure is gratis; vervolgetemplen kosten € 5,50.

## Staalplaat onderhouden

*Onderhoud gecoilcoate staalplaat* is een handige, beknopte leidraad voor opdrachtgever én ontwerper voor het kosten- en milieubewust omgaan met stalen gevelbeplating met een coilcoat. Met duidelijke tabellen voor het maken van keuzes op het gebied van reinigingsmethoden, reinigingsfrequenties en behandeling van eventuele beschadigingen.

- *Onderhoud gecoilcoate staalplaat*. Herziene druk van de uitgave uit 1993, onder begeleiding van het marktteam Hallenbouw van Bouwen met Staal. 16 pagina's. De eerste brochure is gratis; vervolgetemplen kosten € 5,50.

## In een sandwich



De brochure 'Metalen sandwichpanelen in de bouw' bundelt praktische informatie voor iedereen die sandwichpanelen toepast óf wil toepassen. Analooq aan het bouwproces behandelt de publicatie de mate-

riaaleigenschappen en -keuzes, het ontwerpen, detailleren, monteren, en onderhouden van sandwichpanelen.

- *Metalen sandwichpanelen in de bouw*, uitgave Bouwen met Staal, Zoetermeer, 2004, formaat A4, 52 pagina's, prijs € 11,50 (€ 10,00 voor leden).

## Parkeren op of onder stalen bedrijfshallen



In oktober 2005 heeft Bouwen met Staal de brochure *Parkeren op of onder stalen bedrijfshallen* uitgebracht. Deze publicatie informeert over de financiële consequenties van het parkeren op het dak en onder het gebouw. Tijdens programmering en ontwerp van bedrijventerreinen en bedrijfsgebouwen is de brochure te gebruiken voor het overwegen van varianten op het gebruikelijke parkeren naast het gebouw.

De publicatie geeft een samenvatting van een onderzoek door de werkgroep Meerlaagse Hallen van Bouwen met Staal. In deze werkgroep zijn diverse disciplines binnen de bouw (van ontwikkelaar tot en met staalproducent) vertegenwoordigd. De brochure geeft een beschrijving van vier parkeeropties bij een standaardgebouw met een stalen hoofdconstructie: op het maaiveld, onder het gebouw (al dan niet verdiept), in de kelder en op het dak. Voor elke optie worden

de investeringskosten geraamd en de verhoudingen geschetst tussen de (extra) investeringskosten en de besparing op grondkosten. Hieruit blijkt onder meer, dat naarmate de grondprijs stijgt, het alternatieve parkeren financieel aantrekkelijker wordt. De publicatie sluit af met (bouwkundige) tips voor parkeren op het dak van nieuwe en bestaande bedrijfsgebouwen.

- *Parkeren op of onder stalen bedrijfshallen*, ISBN 90-72830-59-8, A4-formaat, 20 pagina's. De eerste brochure is gratis; vervolgetemplen kosten € 5,50.

## Brandveilige hallenbouw



De brochure *Brandveilige hallenbouw met staal* is onlangs uitgegeven in een tweede, geheel herziene druk. Deze brochure geeft in beknopte, toegankelijke teksten een inleiding op het ontwerp, laat voorbeeldetails zien en geeft veel doorverwijzingen naar het Bouwbesluit en normen. De tweede helft van de brochure is voor projectvoorbeelden. Met mooie foto's en een begeleidende tekst over de keuzes die in het ontwerpproces zijn gemaakt voor de brandveiligheid. Een pdf van de brochure is te downloaden via de site [www.bouwenmetstaal.nl](http://www.bouwenmetstaal.nl), bij publicaties.

- *Brandveilige hallenbouw met staal*, tweede herziene druk onder redactie van Ralph Hamerlinck, Marco Pauw en Arend Dolsma. Formaat A4, 28 pagina's, prijs € 5,50.

## Frequenter nieuws van Bouwen met Staal? Word abonnee!



Een abonnement kost € 51,75 per jaar; buitenland € 71,00; studenten € 19,50.

Na aanmelding ontvang ik een factuur met acceptgiro voor het betalen van het abonnement.

naam \_\_\_\_\_ voorletter(s) \_\_\_\_\_ m/v \_\_\_\_\_

functie \_\_\_\_\_

bedrijf/werkzaam bij \_\_\_\_\_

soort bedrijf \_\_\_\_\_

adres \_\_\_\_\_

postcode + plaats \_\_\_\_\_

telefoon \_\_\_\_\_ fax \_\_\_\_\_

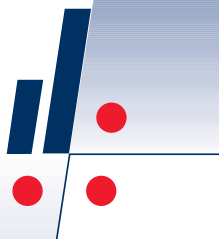
e-mail \_\_\_\_\_

handtekening \_\_\_\_\_ datum \_\_\_\_\_

Deze bon sturen naar: Bouwen met Staal, Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer, of fax (079) 353 1278.

De **stichting Bouwen met Staal** is de kennisorganisatie die alle partijen in de bouw wil faciliteren bij het toepassen van staal. Daartoe ontplooit Bouwen met Staal onder meer de volgende activiteiten:

- uitgeven van het vaktijdschrift *Bouwen met Staal*;
- uitgeven van boeken en andere publicaties voor onderwijs en praktijk;
- uitgeven van technische richtlijnen, onderzoeksrapporten en brochures;
- uitgeven van de tweejaarlijkse *Gids Staalbouw*;
- organiseren van cursussen en opleidingen;
- uitvoeren en laten uitvoeren van onderzoek;
- organiseren van de jaarlijkse Staalbouwdag;
- uitschrijven van de tweejaarlijkse Nationale Staalprijs;
- aanbieden van een gratis Helpdesk voor het beantwoorden van vragen over het toepassen van staal in de bouw;
- verstrekken van projectgebonden advies in de voorontwerpfase van projecten;
- organiseren van gratis projectbezoeken op uitnodiging.



## HELPDESK

fax (079) 353 12 78

e-mail [helpdesk@bouwenmetstaal.nl](mailto:helpdesk@bouwenmetstaal.nl)

De gratis HELPDESK is er voor algemene vragen over de toepassing van staal in de bouw. Uw vraag wordt binnen drie werkdagen beantwoord. Bij de HELPDESK kunt u terecht met vragen over ontwerpen als:

- brandveiligheid
- geïntegreerde constructies
- staal-beton constructies
- stabiliteit
- toepassingen van dunne staalplaat



Bouwen met Staal  
Boerhaavelaan 40  
2713 HX Zoetermeer  
Postbus 190  
2700 AD Zoetermeer  
tel. 079 353 12 77  
fax 079 353 12 78  
[www.bouwenmetstaal.nl](http://www.bouwenmetstaal.nl)

## Technische dossiers

Met technische dossiers informeert Bouwen met Staal constructeurs, (bouwkundig) ontwerpers, overheden en studenten over constructieve en bouwtechnische vraagstukken. Deskundigen vertellen over de achtergrond van de onderwerpen, de bestaande, nieuwe of vernieuwde rekenregels en normen én over hoe zij met het onderwerp omgaan in de praktijk. Dit technisch dossier is samengesteld door adviesbureau ir. J.G. Hageman, de Technische Universiteit Delft, TNO Bouw & Ondergrond, de VROM-inspectie en Bouwen met Staal.