



## Onderzoek implementatie klemming in ZSteen

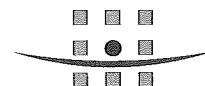
Onderdeel van 7.3 van het Onderzoeksprogramma  
Kennisleemtes Steenbekledingen

**Definitief rapport**



Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

15 juni 2007

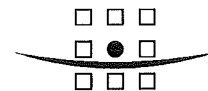


**ROYAL HASKONING**

thinking in  
all dimensions



A COMPANY OF



**ROYAL HASKONING**

**HASKONING NEDERLAND BV  
KUST & RIVIEREN**

Barbarossastraat 35

Postbus 151

6500 AD Nijmegen

(024) 328 42 84 Telefoon

(024) 360 54 83 Fax

info@nijmegen.royalhaskoning.com E-mail

www.royalhaskoning.com Internet

Arnhem 09122561 KvK

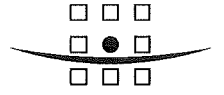
Documenttitel    Onderzoek implementatie klemming in  
                          ZSteen  
                          Onderdeel van 7.3 van het  
                          Onderzoeksprogramma Kennisleemtes  
                          Steenbekledingen  
Verkorte documenttitel    Klemming in ZSteen  
                          Status    Definitief rapport  
                          Datum    15 juni 2007  
                          Projectnaam    Technisch wetenschappelijk onderzoek  
  Steenzettingen  
Projectnummer    9R3640.A0  
Opdrachtgever    Rijkswaterstaat DWW  
                          Referentie    9R3640.A0/R0003/DJP/SEP/Nijm

Auteur(s)    D.J. Peters

Vrijgegeven door    R 't Hart

Datum/paraaf    15 juni 2007    .....

A COMPANY OF



**ROYAL HASKONING**

## SAMENVATTING

Dit rapport is een onderdeel van het Onderzoekprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen. Het betreft onderzoek op deelplan 7.3 naar de kennisleemte omtrent de bijdrage van klemming aan de stabiliteit van steenbekledingen onder golfaanval.

Met het programma ZSteen worden stijghoogteverschillen berekend die werken op de toplaagelementen van de bekledingsconstructie. In ZSteen zijn deze stijghoogteverschillen aanleiding tot beweging van de zich los naast elkaar bevindende toplaagelementen. Indien de toplaagelementen worden beschouwd als een samenwerkende ligger zijn de berekende bewegingen geringer.

In deze studie zijn beschikbare mechanica modellen van de toplaag geïmplementeerd in een berekeningmodule die, met als startgegeven de door ZSteen berekende stijghoogteverschillen, de toplaag doorrekent als samenwerkende ligger. De uitkomsten van de liggerberekeningen worden getoetst aan de aanwezige capaciteit. Op deze wijze wordt middels een numerieke mechanica berekening voor elke tijdstap de stabiliteit en de vervorming van de toplaag onder golfaanval berekend.

Het blijkt dat de geïmplementeerde mechanica kennis samen met de uitkomsten van de hydraulische berekeningen een groter inzicht geeft in de werking van de bekleding en een demonstratie geeft van een nieuwe toetsmethode. Er worden vervolgonderzoeken aanbevolen voor bepaling van de parameters en eventuele verfijningen.



**LIJST VAN SYMBOLEN:**

|                   |                     |  |
|-------------------|---------------------|--|
| A                 | [m <sup>2</sup> ]   | oppervlak toplaagelement   |
| $\alpha$          | [°]                 | hellingshoek talud dijk  |
| $\beta$           | [1/m]               | parameter ligger op elastische bedding   |
| B <sub>x</sub>    | [m]                 | dwarsafmeting toplaagelement in de richting op het talud                         |
| B <sub>y</sub>    | [m]                 | dwarsafmeting toplaagelement in de richting langs de dijk                        |
| B <sub>F</sub>    | [m]                 | dikte filterlaag   |
| D                 | [m]                 | dikte toplaag  |
| $\delta$          | [m]                 | maximale verplaatsing  |
| $\Delta$          | [-]                 | verhouding onderwater gewicht bekledingsmateriaal t.o.v. gewicht water           |
| E                 | [Pa]                | E-modulus ligger van toplaagelementen  |
| EA                | [N]                 | rekstijfheid axiaal systeem toplaag  |
| EI                | [Nm <sup>2</sup> ]  | buigstijfheid ligger van toplaagelementen  |
| $\varepsilon$     | [-]                 | rek  |
| F                 | [-]                 | stabiliteitsparameter H/ $\Delta$ D  |
|                   | [N]                 | kracht   |
| $\Phi_w$          | [m]                 | stijghoogteverschil over toplaag   |
| $\phi$            | [-]                 | hoek van inwendige wrijving  |
| $\Gamma_k$        | [-]                 | klemfactor in ZSteen   |
| $f_1$             | [-]                 | reductiefactor op inwendig hefboomsarm in voeg                                   |
| $f_2$             | [-]                 | wrijvingscoëfficiënt tussen toplaagelementen                                     |
| $f_3$             | [-]                 | factor h/D   |
| $f_4$             | [-]                 | factor in stijfheidsformule  |
| $f_5$             | [-]                 | factor in stijfheidsformule  |
| $f_6$             | [-]                 | wrijvingscoëfficiënt toplaag op bedding  |
| $f_7$             | [-]                 | factor op belastingvector in iteratieproces                                      |
| $f_8$             | [-]                 | factor op belastingvector in iteratieporces                                      |
| g                 | [m/s <sup>2</sup> ] | gravitatie versnelling   |
| G                 | [-]                 | gewicht toplaagelement   |
| h                 | [m]                 | hoogte contactvlak toplaagelement  |
|                   | [m]                 | stijghoogte  |
| H                 | [m]                 | golfhoogte (op open water)   |
| k                 | [m/s]               | doorlatendheidscoëfficiënt filterlaag  |
| k'                | [m/s]               | doorlatendheidscoëfficiënt toplaag [m/s]   |
| k <sub>x</sub>    | [N/m <sup>2</sup> ] | schuif-veerstijfheidsconstante bedding = K <sub>x</sub> / B <sub>y</sub>         |
| K <sub>x</sub>    | [N/m <sup>3</sup> ] | schuif-veerstijfheidsconstante bedding   |
| k <sub>teen</sub> | [N/m]               | laterale veerstijfheid van de teenconstructie K <sub>teen</sub> / B <sub>y</sub> |
| K <sub>teen</sub> | [N/m <sup>2</sup> ] | laterale veerstijfheid van de teenconstructie                                    |
| $\kappa$          | [1/m]               | kromming   |
| L <sub>0</sub>    | [m]                 | golflengte (op open water)   |
| $\lambda$         | [m]                 | karakteristieke lengte axiaal veersysteem  |
| $\Lambda$         | [m]                 | lek lengte   |
| L                 | [m]                 | belaste lengte geschematiseerde golfbelasting                                    |
| LF                | [-]                 | loadfactor, belastingfactor q <sub>w</sub> /q <sub>s</sub>                       |
| M                 | [Nm]                | buigend moment   |
| $\mu$             | [-]                 | wrijvingsfactor  |
| n                 | [-]                 | poriëngehalte granulair materiaal  |
| N                 | [N]                 | normaalkracht  |
| p                 | [N/m <sup>2</sup> ] | waterdruk  |
| P                 | [N]                 | kracht uit geïntegreerde waterdrukken per toplaagelement                         |

|                |                      |   |
|----------------|----------------------|---|
| q              | [N/m]                | gelijkmatig verdeelde belasting   |
|                | [N/m <sup>2</sup> ]  | gelijkmatig verdeelde belasting   |
| q <sub>s</sub> | [N/m <sup>2</sup> ]  | effectieve gewicht toplaagelementen per m <sup>2</sup> = ΔD   |
| q <sub>w</sub> | [N/m <sup>2</sup> ]  | waterdrukverschil over toplaag  |
| Q              | [N]                  | integraal van q   |
| R              | [N]                  | reactiekracht, veerkracht   |
| r              | [N/m]                | verdeelde reactiekracht   |
| ρ              | [kg/m <sup>3</sup> ] | soortelijke massa   |
| ρ <sub>w</sub> | [kg/m <sup>3</sup> ] | soortelijke massa (zee)water  |
| ρ <sub>s</sub> | [kg/m <sup>3</sup> ] | soortelijke massa steen   |
| σ              | [N/m <sup>2</sup> ]  | spanning  |
| t              | [s]                  | belastingduur   |
| t <sub>1</sub> | [s]                  | tijdstap  |
| u              | [m]                  | knoopverplaatsing   |
| uc             |                      | unity-check; toets waarbij optredende waarde wordt gedeeld door de toelaatbare en zo de belastinggraad op een schaal van 0 naar 1 geeft |
| V              | [kN]                 | dwarskracht   |
| x              | [m]                  | coördinaat in richting talud (landinwaarts is positief)   |
| X              | [m]                  | horizontale coördinaat talud in ZSteen  |
| X <sub>0</sub> | [m]                  | randafstand evenwichtsmodel   |
| ξ              | [-]                  | brekerparameter   |
| y              | [m]                  | coördinaat evenwijdig aan de dijk   |
| Y              | [m]                  | verticale coördinaat talud in ZSteen  |
| z              | [m]                  | coördinaat loodrecht op talud (neerwaarts is positief)  |



## INHOUDSOPGAVE

|     | Blz.  |    |
|-----|---|----|
| 1   | INLEIDING   | 1  |
| 1.1 | Onderzoeksprogramma                                   | 1  |
| 1.2 | Klemming in gezette steenbekledingen                  | 1  |
| 1.3 | Beschrijving functionaliteit programma ZSteen         | 1  |
| 1.4 | Scope en doel van dit onderzoek                       | 2  |
| 1.5 | Overig onderzoek inzake 'klemming'                    | 2  |
| 1.6 | Organisatie onderzoek                                 | 3  |
| 2   | MODELBSCHRIJVING                                      | 5  |
| 2.1 | Opzet evaluatie stabiliteit toplaag                   | 5  |
| 2.2 | Overzicht invoer parameters                           | 7  |
| 2.3 | Axiale continue mechanicamodellen toplaag en bedding  | 8  |
| 2.4 | Axiale gediscretiseerde mechanicamodellen             | 14 |
| 2.5 | Model met weggenomen veren                            | 18 |
| 2.6 | Model met elastoplastische veren                      | 22 |
| 2.7 | Model met no-tension elementen                        | 27 |
| 3   | BESCHRIJVING PRE-IMPLEMENTATIE                        | 35 |
| 3.1 | Structuur en output pre-implementatie mechanica model | 35 |
| 3.2 | Structuur implementatie mechanica in ZSteen           | 36 |
| 3.3 | Berekening capaciteit buiglijger                      | 38 |
| 3.4 | Berekening maatgevende verschildrukken                | 38 |
| 3.5 | Berekening optredende momenten en dwarskrachten       | 45 |
| 3.6 | Toetsing evenwicht en berekening beweging             | 47 |
| 4   | BESCHRIJVING EVALUATIE                                | 49 |
| 4.1 | Beschrijving te evalueren gevallen                    | 49 |
| 4.2 | Berekeningsresultaten waterdrukken                    | 54 |
| 4.3 | Berekeningsresultaten belastingparameters             | 60 |
| 4.4 | Berekeningsresultaten normaalkrachten                 | 61 |
| 4.5 | Berekeningsresultaten stabiliteitsgetallen            | 67 |
| 4.6 | Behaalde 'winst' in de praktijk                       | 67 |
| 5   | CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN                           | 69 |
| 5.1 | Conclusies pre-implementatie                          | 69 |
| 5.2 | Aanbevelingen   | 71 |
|     | REFERENTIES   | 70 |

## BIJLAGEN

Bijlage 1

Overzicht onderzoek Kennisleemtes Steenzettingen

Bijlage 2

Handleiding en beschrijving ontwikkelde module KlemSteen

Bijlage 3

Dump files ZSteen

## 1 INLEIDING

### 1.1 Onderzoeksprogramma

In gevolge de Wet op de Waterkering dienen steenbekledingen, als onderdeel van de waterkering, vijfjaarlijks getoetst te worden conform de Leidraad Toetsen op Veiligheid. In de praktijk kan op basis van de huidige wetenschappelijke kennis aan veel steenbekledingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden.

In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouw van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart. Het doel van dit programma is het reduceren van kennisleemtes ten einde te komen tot scherpere toetsingsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetresultaten.

Binnen dit onderzoeksprogramma heeft het voorliggende rapport betrekking op deelonderzoek 7.3: Invloed van klemkracht op stabiliteit, op deelonderzoek 8.1: Ontwikkeling ZSteen en op onderdeel V.3: Verwerking resultaten onderzoek en implementatie in modellen en leiddraden.

Het totale onderzoeksprogramma is weergegeven in bijlage 1.

### 1.2 Klemming in gezette steenbekledingen

Klemming van de toplagen van steenbekledingen draagt bij aan de stabiliteit tijdens opwaartse verschildrukken die het gevolg zijn van golfbelasting en de hydraulische eigenschappen van de bekledingsconstructie. De in de toplaag aanwezige normaalkracht veroorzaakt de klemming. De normaalkracht maakt het mogelijk om momenten en dwarskrachten op te nemen. Op deze wijze beschouwd werkt de bekleding als een ligger waarvan de optredende interne krachten die het gevolg zijn van de belasting, kunnen worden opgenomen dankzij de aanwezige normaalkracht.

De normaalkracht is aanwezig doordat de toplaag op een helling ligt. De toplaag-elementen schuiven af over de filterlaag en rusten tegen de toplaagelementen van de vorige rij. Op deze wijze ontstaat er een normaalkracht in de toplaag die richting de teen steeds groter is. Lokaal kan deze normaalkracht verminderd zijn doordat er boogwerking optreedt in het vlak van de bekleding. Tijdens opwaartse beweging van de toplaagelementen kan de normaalkracht lokaal toenemen doordat de elementen als gevolg van geometrische expansie de neven-liggende elementen wegdrücken. De lokale vergroting van de normaalkracht kan zich voordoen in de richting van het talud en ook in de lengterichting.

In dit rapport wordt normaalkrachten in de lengterichting van de dijk buiten beschouwing gelaten. Verwacht wordt dat dit bij de berekening van de sterkte van de zetting onder lokale golfklappen een licht conservatief resultaat geeft.

### 1.3 Beschrijving functionaliteit programma ZSteen

ZSteen berekent stijghoogtes de filterlaag. De input bestaat uit stijghoogtes aan de bovenzijde van de toplaag, en uit de geometrische en hydraulische eigenschappen van het systeem van toplaag (blokken of zuilen), uitvullaag, filterlaag en eventueel toe te passen geotextiel. De berekening wordt uitgevoerd met de formules van Darcy en Forchheimer.

Met de bekende stijghoogtes boven de toplaagelementen en de berekende stijghoogtes onder de toplaagelementen zijn de verschildrukken, en dan specifiek de opwaartse verschildrukken te berekenen. De opwaartse krachten worden vergeleken met het gewicht van de toplaagelementen. Indien de opwaartse kracht het gewicht overschrijdt kan beweging van een toplaagelement (= blokbeweging) optreden. Blokbeweging wordt, behalve door het eigen gewicht van het betreffende 'blok', ook tegen gegaan door 'klemming', in ZSteen op te geven als een klemfactor  $F_k$ . Deze factor is een vergrotingsfactor op het gewicht van het toplaagelement en geldt voor alle potentieel bewegende toplaagelementen.

Een andere mechanische weerstand tegen blokbeweging in ZSteen is 'wrijving'. Hierbij wordt gecontroleerd of het toplaagelement bij initiatie van bewegen, dan wel tijdens het bewegen wrijvingskracht ondervindt als gevolg van het schuiven langs het naastgelegen toplaagelement. Er worden drie gevallen onderscheiden: omhoog schuiven in de richting loodrecht op het talud, roteren, en een combinatie van schuiven en roteren. Bij het roteren ligt het toplaagelement aan tegen beide naburige toplaagelementen en is er feitelijk sprake van een (lokaal aanwezige) kleine normaalkracht.

Blokbeweging treedt relatief snel op in ZSteen. Zodra een toplaagelement beweegt neemt de verschildruk af, waardoor de versnelling van de beweging ook afneemt. Dit fenomeen wordt rekentechnisch geëvalueerd in ZSteen. Dit is een iteratief proces.

De gebruikte versie van ZSteen is 2.1.1.7.

#### 1.4 Scope en doel van dit onderzoek

ZSteen is een geavanceerd hulpmiddel om stijghoogteverschillen over de toplaag te berekenen. De evaluatie van de weerstand van de constructie tegen deze stijghoogteverschillen gaat uit van het principe van het gewicht van het enkele toplaagelement dat de verschildruk weerstaat. De weerstand wordt vergroot met een klemfactor  $F_k$  of met wrijvingskrachten. In dit onderzoek wordt geen gebruik gemaakt van de momenteel in ZSteen aanwezige definities van 'klemming' en 'wrijving'.

Er is behoefte aan het onderzoeken van het nut en de haalbaarheid van het in ZSteen implementeren van alternatieve evaluaties van het evenwicht van geklemde groepen van stenen. Het beoogde eindproduct van dit onderzoek is een in ZSteen inpasbare set evenwichtsbeschouwingen voor het toetsen van een geklemde toplaag. Haalbaarheid en nut van de inpassing zullen worden gedemonstreerd door middel van een pré-implementatie met behulp van Excel en Visual Basic.

#### 1.5 Overig onderzoek inzake 'klemming'

Het onderzoek naar de implementatie van op 'klemming' gebaseerde evenwichtsbeschouwingen in ZSteen is voornamelijk uitgevoerd in 2005. In 2006 is het pré-implementatie-product van dit onderzoek doorontwikkeld en gebruikt voor modelberekeningen die ten grondslag liggen aan de implementatie van 'klemming' in SteenToets. De modellering van de op buiging belaste ligger in SteenToets is meer geavanceerd dan in dit rapport. Hiervoor wordt verwezen naar [Peters, 2007].

## **1.6 Organisatie onderzoek**

Het onderzoek is uitgevoerd door D.J. Peters en A. Pfeiffer van Royal Haskoning en van commentaar voorzien door een klankbordgroep bestaande uit prof. ir. J.K. Vrijling, ir. A. Bezuijen (GeoDelft), ir. M. Klein Breteler (WL | Delft Hydraulics) en ir. R. 't Hart (Rijkswaterstaat DWW).

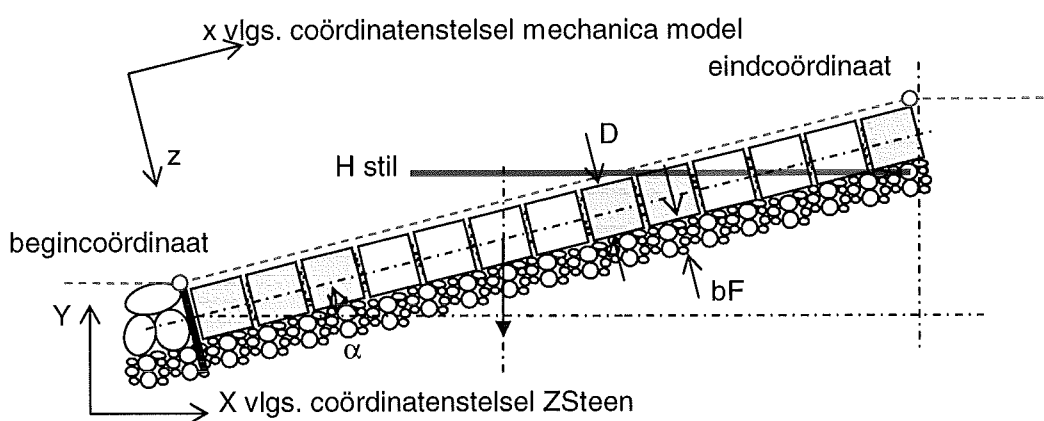


## 2 MODELBESCHRIJVING

### 2.1 Opzet evaluatie stabiliteit topplaag

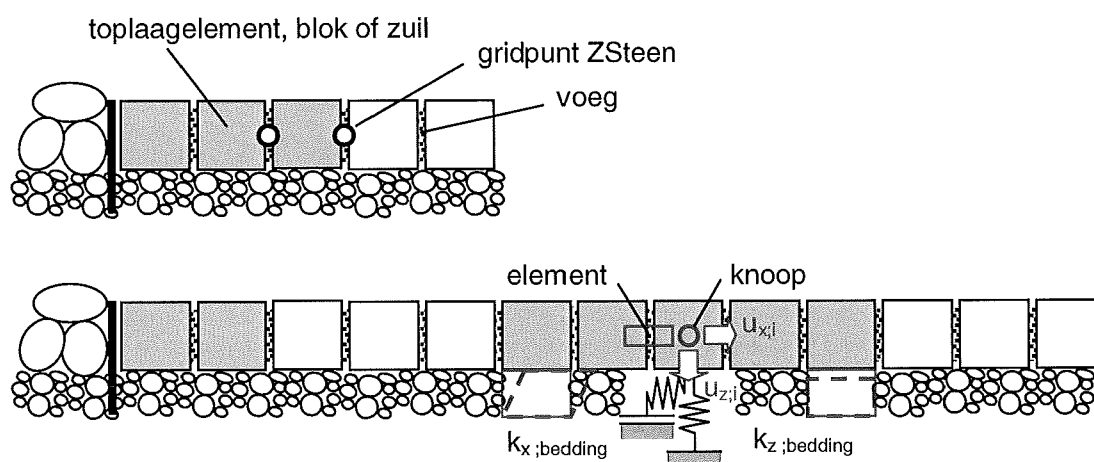
Het aan ZSteen toe te voegen mechanica model heeft als vertrekpunt de in ZSteen ingegeven geometrie van het dijktalud en de berekende stijghoogteverschillen (zonder invloed van blokbeweging).

Het mechanica model is gebaseerd op liggerwerking van de topplaag. De topplaag wordt daarbij beschouwd als een ligger op elastische bedding, waarin normaalkracht heerst veroorzaakt door de zwaartekracht.



Figuur 1: Overzicht bekledingsconstructie

De topplaag bestaat uit losse toplaagelementen die tegen elkaar aangedrukt liggen door hun eigen gewicht. Waterdrukverschillen boven en onder de toplaagelementen kunnen liftkrachten veroorzaken. Waterdrukverschillen tussen de spleten links en rechts van een toplaagelement veroorzaken toe- en/of afname van de contactkrachten tussen de toplaagelementen. In het model worden de krachten in de richtingen loodrecht op (z-richting) en evenwijdig aan het talud (x-richting) gescheiden van elkaar geëvalueerd.



Figuur 2: Terminologie en principe mechanica model

Krachten in lengterichting van het talud (y-richting vlg. coördinatenstelsel mechanica-model) worden niet in de beschouwing betrokken. In de y-richting wordt een strook met een breedte  $B_y$  beschouwd. De maat  $B_y$  kan naar keuze de breedtemaat van de blokken of zuilen zijn, of kan een strook van 1 m zijn.

De optredende krachten in de richting van het talud (x-richting) zijn van invloed op de normaalkracht in de toplaag. De berekening van de normaalkracht uit de golf data is een belangrijk onderdeel in dit onderzoek. De normaalkracht is de bepalende factor voor de moment- en dwarskrachtcapaciteit van de toplaagligger.

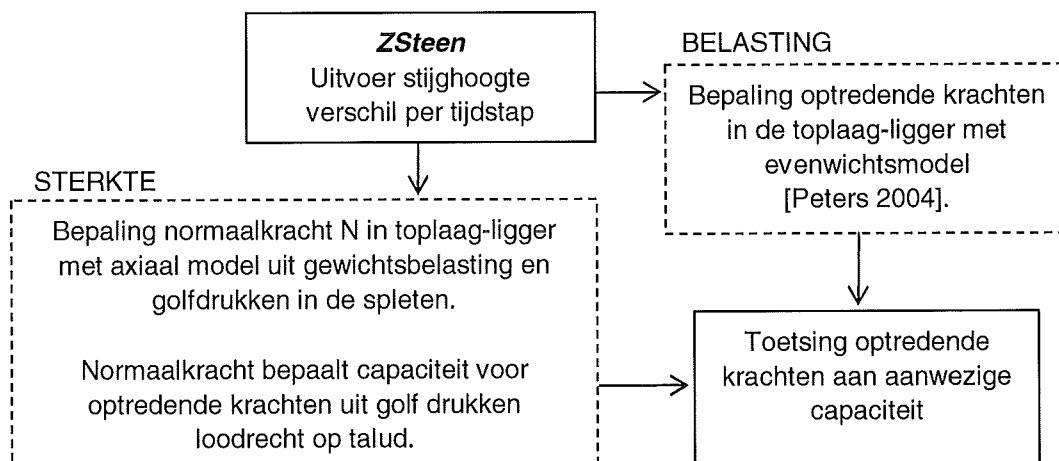
De krachten loodrecht op het talud (z-richting) geven aanleiding tot het te onderzoeken verlies van stabiliteit van de toplaag. Voor berekening van de sterkte en de vervorming van de toplaag onder invloed van deze krachten wordt gebruik gemaakt van het mechanicamodel in [Peters, 2004]. Daarin worden dwarskrachten en momenten en verplaatsing van de toplaagelementen berekend.

Er wordt in dit onderzoek geen gebruik gemaakt van de in ZSteen beschikbare berekeningsresultaten van blokbeweging. De in dit onderzoek ontwikkelde mechanica module KlemSteen berekent zelf verticale en horizontale verplaatsingen van de toplaagelementen. Bij een toekomstige implementatie in ZSteen is het theoretisch mogelijk zijn om deze resultaten nog te onderwerpen aan een berekening volgens de blokbewegingsmodule van ZSteen, die de in KlemSteen berekende verplaatsingen dan verder zou reduceren. In dat geval moet het blokbewegingsresultaat van KlemSteen per tijdstap worden ingelezen in ZSteen waarna er per tijdstap een terugkoppeling naar de verschildrukken kan plaatsvinden. In de pré-implementatie, die het resultaat is van deze studie, is hierin niet voorzien. De indruk bestaat dat de door KlemSteen berekende verplaatsingen zodanig klein zijn dat dat ook niet nodig is om een realistisch resultaat te krijgen. En verder is het ook de vraag of de fenomenen 'toestroming' en 'traagheid' bij de door KlemSteen berekende verplaatsingsvelden tot significante reductie van deze kleinere verplaatsingen leiden. In de modellering wordt geen gebruik gemaakt van het tweede-orde effect van de verticale verplaatsing op de horizontale positie van de toplaagelementen.

Het toe te voegen mechanica model voor de stabiliteit van een geklemde toplaag is gesplitst in modules volgens het onderstaande schema.

**Tabel 1: Overzichtsdigram principe mechanica module bij ZSteen**





In de navolgende paragrafen van hoofdstuk 2 wordt de theoretische achtergrond van de mechanica modellen voor bepalen van de normaalkracht in de toplaag beschreven (linkerhelft tabel 1).

In hoofdstuk 3 komt de structuur van de complete mechanica module aan de orde.

## 2.2 Overzicht invoer parameters

In tabel 2 wordt getoond welke van de in ZSteen in te voeren parameters worden gebruikt in het mechanica model. In tabel 3 wordt getoond welke invoer parameters in aanvulling op ZSteen worden gebruikt.

Tabel 2: Overzicht invoerparameters ZSteen

| Invoerparameters ZSteen                  |                      | over te nemen in mechanica model |
|--|----------------------|----------------------------------|
| Toplaag                                  |                      |                                  |
| Dikte                                    | [m]                  | Ja                               |
| Blokken                                  |                      |                                  |
| Lengte (in ri. talud)                    | [m]                  | Ja                               |
| Breedte (in ri. langs as dijk)           | [m]                  | Ja                               |
| Spleetbreedte                            | [mm]                 | Ja                               |
| Zuilen                                   |                      |                                  |
| Oppervlakte                              | [m <sup>2</sup> ]    | Ja                               |
| % open oppervlakte                       | [%]                  | n.v.t.                           |
| Soortelijke massa steen                  | [kg/m <sup>3</sup> ] | Ja                               |
| Kleefactor                               |                      | Nee                              |
| Gaten in de blokken                      | Ja/nee               | n.v.t.                           |
| Oppervlakte gat                          | [m <sup>2</sup> ]    | n.v.t.                           |
| Aantal gaten in één steen                | [-]                  | n.v.t.                           |
| Inwasmateriaal                           | Ja/nee               |                                  |
| D <sub>15</sub> inwasmateriaal           | [m]                  | n.v.t.                           |
| Porositeit inwasmateriaal                | [-]                  | n.v.t.                           |
| Geotextiel                               | Ja/nee               | n.v.t.                           |
| Uitvullaag voor egalisatie               |                      |                                  |
| Laagdikte dU                             | [m]                  | n.v.t.                           |
| Karakteristieke korrel D <sub>15</sub> U | [mm]                 | n.v.t.                           |

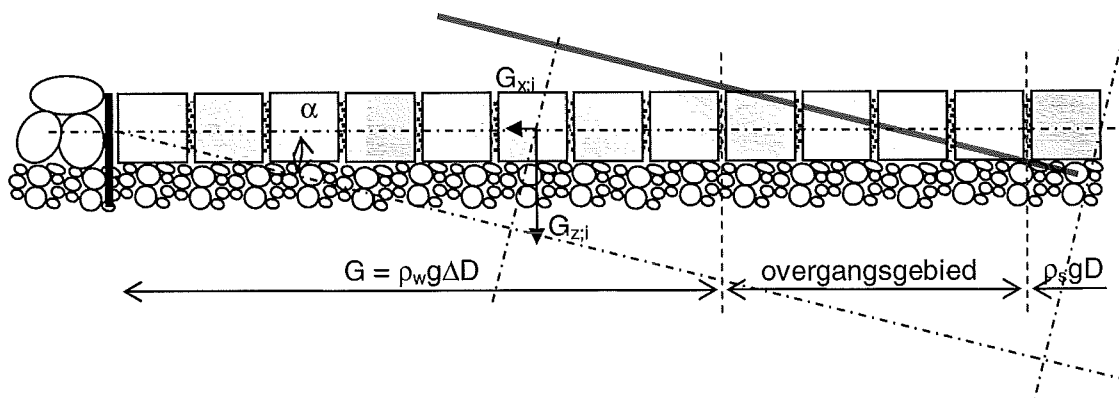
| Invoerparameters ZSteen                     |                      | over te nemen in mechanica model |
|---|----------------------|----------------------------------|
| Porositeit nU                               | [-]                  | n.v.t.                           |
| <b>Filterlaag</b>                           |                      |                                  |
| Laagdikte dF                                | [m]                  | Ja                               |
| Karakteristieke korrel D <sub>15</sub> F    | [mm]                 | Ja                               |
| Porositeit nF                               | [-]                  | Ja                               |
| <b>Taludsectie</b>                          |                      |                                  |
| Meerdere trapeziumvormige secties per talud |                      | Nee                              |
| begincoördinaat talud                       |                      | Ja                               |
| Helling                                     |                      | Ja                               |
| Eindcoördinaat of eindhoogte talud          |                      | Ja                               |
| Doorlatendheidsfactor op sectieovergangen   |                      | Nee                              |
| <b>Golf gegevens</b>                        |                      |                                  |
| Soortelijke massa water                     | [kg/m <sup>3</sup> ] | Ja                               |
| Stilwaterlijn                               | [m Ref]              | Ja                               |
| Significante golfhoogte Hs                  | [m]                  | n.v.t.                           |
| Piekperiode Tp                              | [s]                  | n.v.t.                           |
| Stormduur                                   | [uur]                | n.v.t.                           |

**Tabel 3: Overzicht invoerparameters mechanicamodel**

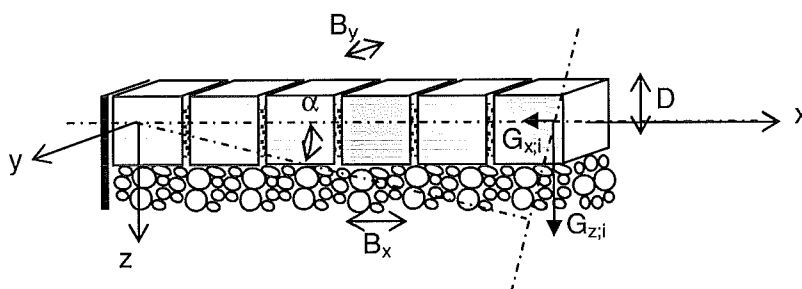
| Extra invoer parameters mechanicamodel |                      |  |
|--|----------------------|--|
| <b>Toplaag</b>                         |                      |  |
| E-modulus stenen                       | [N/mm <sup>2</sup> ] | Verdisconteerd in axiale veerstijfheid toplaag |
| Voegstijfheid                          | [N/mm <sup>3</sup> ] | Verdisconteerd in axiale veerstijfheid toplaag |
| Axiale veerstijfheid toplaag           | [N]                  | Ja   |
| Contacthoogte stenen                   | [m]                  | Ja   |
| Wrijvingscoëfficiënt tussen stenen     | [-]                  | Ja   |
| <b>Filterlaag</b>                      |                      |  |
| Afschulfstijfheid van de bedding       | [N/m <sup>3</sup> ]  | Ja   |
| Wrijvingscoëfficiënt toplaag op filter | [-]                  | Ja   |
| <b>Teenconstructie</b>                 |                      |  |
| Laterale stijfheid teen                | [N/m]                | Ja   |
| <b>Boogwerking</b>                     |                      |  |
| Veerstijfheid op overgang              | [N/m]                | Ja   |

### 2.3 Axiale continue mechanicamodellen toplaag en bedding

In deze paragraaf wordt de theorie van axiale staaf modellen besproken. Deze worden gebruikt om de toplaag te modelleren. De modellering beperkt zich tot de krachswerking in de x-richting (zie ook figuur 2).

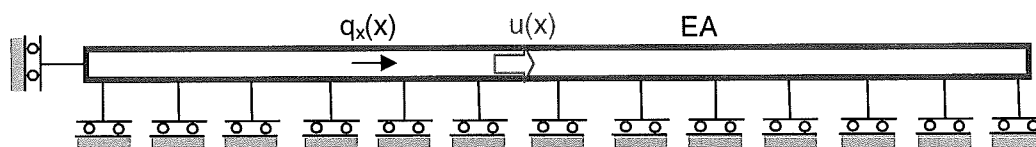


Figuur 3: Bekledingsconstructie



Figuur 4: Assenstelsel

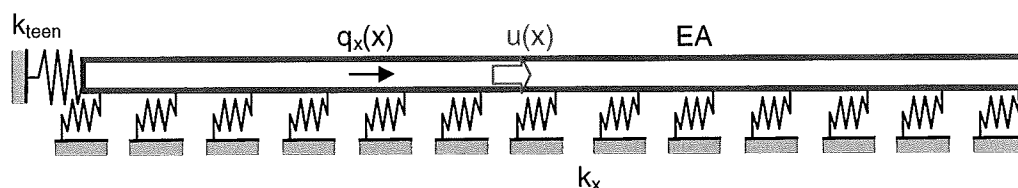
In het eerste, triviale, model wordt de toplaag beschouwd uit een elastische axiale staaf die glijdend opligt op de bedding (zie figuur 5). De normaalkracht neemt bij een constant steengewicht lineair toe naar een maximale waarde bij de teen. Dit model geeft, in de gevallen dat er geen opwaarts gericht beweging van de toplaagelementen is, een bovengrens voor de normaalkracht in de toplaag.



Figuur 5: Definitiediagram model 1: axiale staaf

Bij constante eigen gewichtsbelasting van de toplaag,  $q_x = -\rho g \Delta D \sin \alpha B_y$  [N/m], wordt een lineair verlopende normaalkracht gevonden (zie figuur 7).

In het tweede model (figuur 6) wordt de afschuif-veerstijfheid van de bedding geïmplementeerd. De toplaag schuift over de bedding en ondervindt daarbij een wrijvingsweerstand die aangenomen wordt lineair te zijn met de verplaatsing  $u_x$  van het betreffende punt in de staaf.



Figuur 6: Definitiediagram model 2: continu veer model

De verplaatsing  $u(x)$  en de normaalkracht  $N(x)$  in deze staaf worden berekend met behulp van de differentiaalvergelijking:

$$q = -EA \frac{d^2 u}{dx^2} + k_x u$$

$$N = EA \frac{du}{dx},$$

waarin:

$q = q(x)$  [N/m] = de belastingfunctie

$EA$  [N] = de rekstijfheid van de (continue) toplaag, met

$E$  [N/m<sup>2</sup>] = de gehomogeniseerde elasticiteitsmodulus van de toplaag

$A$  [m<sup>2</sup>] =  $D \times B_y$ , de oppervlakte van een loodrechte doorsnede van de toplaag

$k_x$  [N/m<sup>2</sup>] = de schuif-veerstijfheid van de filterlaag =  $K_x$  [N/m<sup>3</sup>] /  $B_y$  [m]

De gereduceerde vergelijking luidt:  $\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{1}{\lambda^2} u = 0$ ,

met

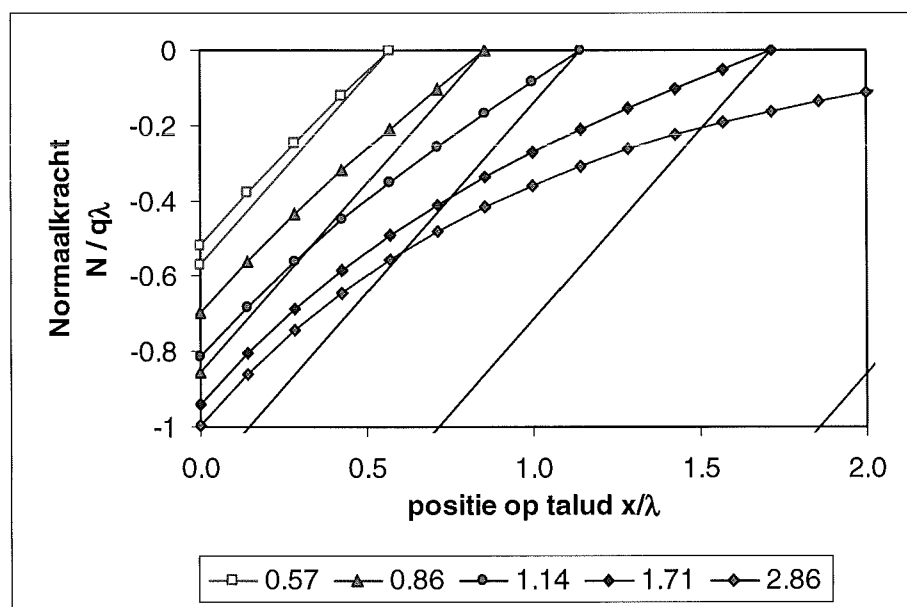
$\lambda$  [m] = karakteristieke lengte van het axiaal elastische systeem

$$\lambda = \sqrt{\frac{EA}{k_x}}$$

Met deze vergelijking wordt voor het basisgeval van een model met een constante belasting  $q(x) = q_x$  en een lengte van het model met waarde  $l$  voor de normaalkracht bij de teen gevonden:

$$N = q_x \lambda \frac{1 - e^{-2l/\lambda}}{1 + e^{-2l/\lambda}}.$$

Het blijkt dat de waarde van de normaalkracht bij de teen voor waarden van de taludlengte  $l > 2 \lambda$  niet significant meer toeneemt. Dit is weergegeven in figuur 9. Het typerende verloop van de normaalkracht voor verschillende taludlengtes  $l/\lambda$  is weergegeven in figuur 7.



Figuur 7: Normaalkrachtenlijnen  $N(x)$  voor verschillende waarden van de taludlengte  $l/\lambda$  voor model 2 met axiaal elastische bedding (gekromde lijn;  $k_{\text{teen}} = \infty$ ) en evenwichtsmodel 1 (rechte evenwijdige lijnen)

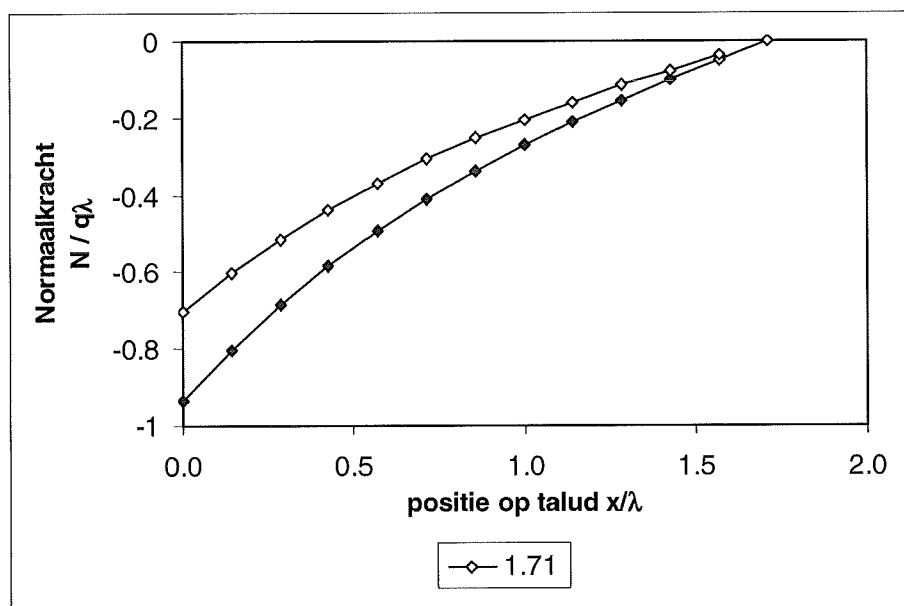
Voor waarden van de teenstijfheid  $k_{teen} \neq \infty$  wordt voor de normaalkracht tegen de teen gevonden:

$$N = \frac{q_x \lambda}{\frac{1 + e^{-2l/\lambda}}{1 - e^{-2l/\lambda}} - \frac{k_x \lambda}{k_{teen}}}$$

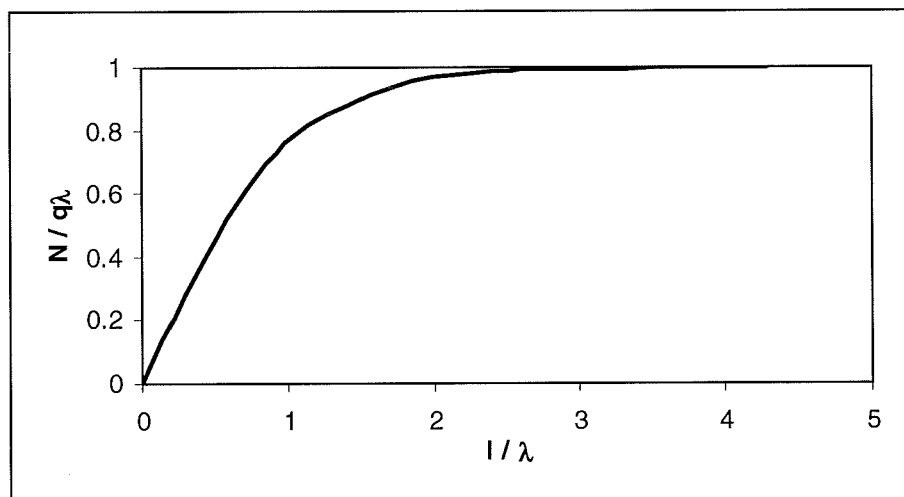
met

$k_{teen}$  [N/m] = de laterale stijfheid van de teenconstructie in het axiale model van de toplaag =  $K_{teen}$  [N/m<sup>2</sup>] /  $B_y$  [m], met  $K_{teen}$  = is de laterale stijfheid per m lengte.

Het typerend effect van een eindige veerstijfheid van de teen op de grootte van  $N_{teen}$  ( $x = 0$ ) en op het verloop  $N(x)$  is weergegeven in figuur 8.



Figuur 8: Normaalkracht  $N(x)$  voor  $l/\lambda = 1,71$  voor axiaal elastische bedding en  $k_{teen} = \infty$  (groen; identiek aan figuur 7) en voor  $k_{teen} / k_x \lambda = 1.2$  (wit)

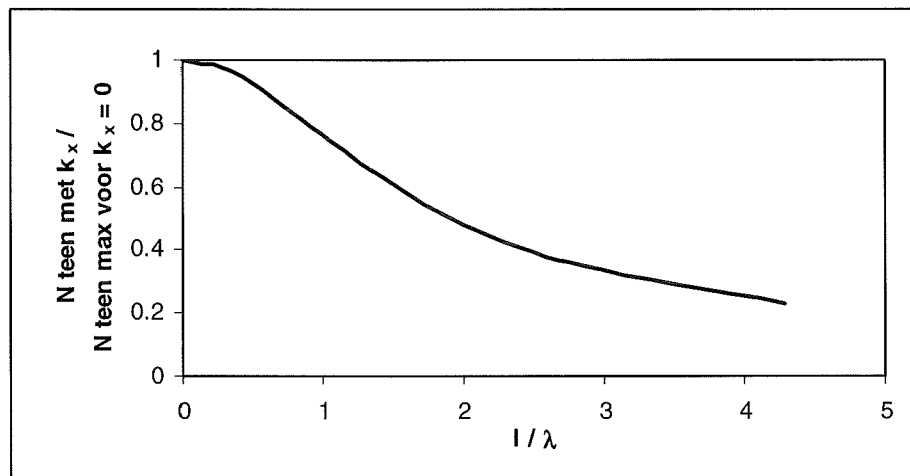


Figuur 9: Normaalkracht  $N$  bij de teen als functie van de lengte  $l$  van het talud (voor teenstijfheid  $k_{teen} = \infty$ )

In figuur 10 is een vergelijking van de uitkomsten van het model op een axiaal elastische bedding (figuur 6) getoond met de normaalkracht die ontstaat in het model volgens figuur 5. De figuur laat zien dat er bij een stijfheidsverhouding  $\lambda > l$  sprake is van een afname van de normaalkracht met meer dan 20%.

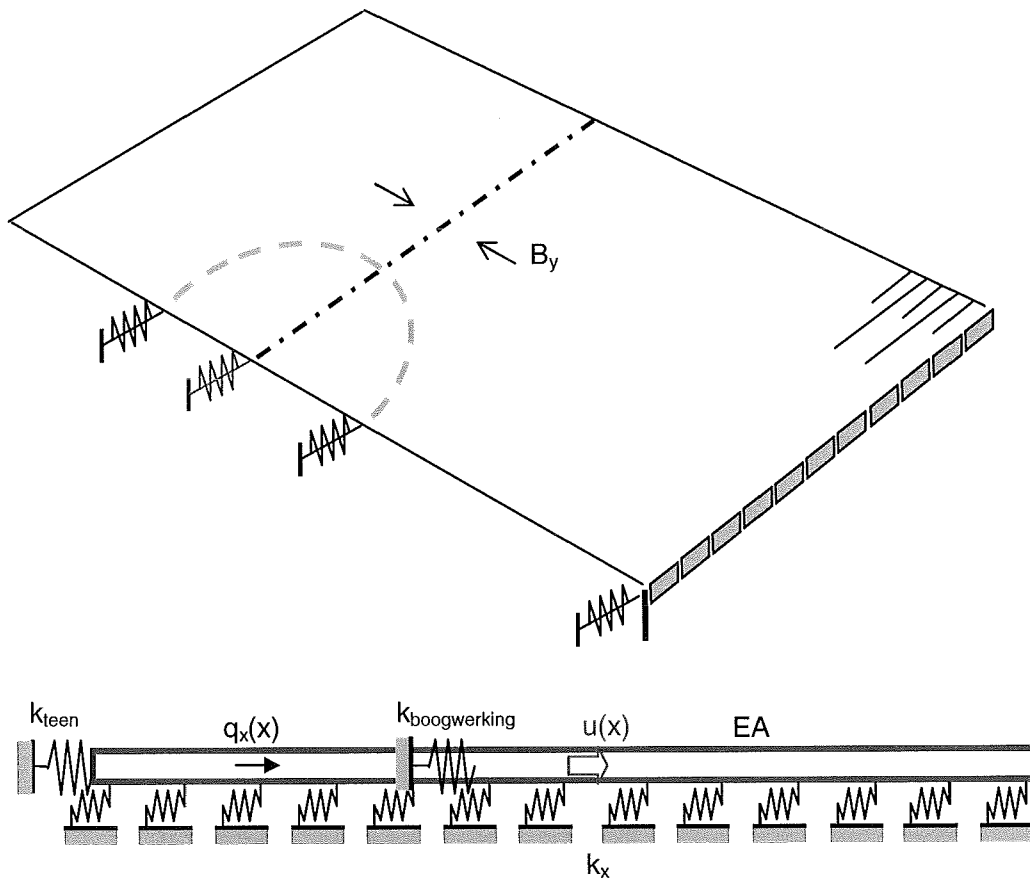
Bij waarden van bijvoorbeeld  $EA = 10^9$  N en  $k_x = 10^7$  N/m<sup>2</sup> volgt dat  $\lambda = 10$  m. Voor een talud van 10 m lang geldt dat circa 20% van het gewicht van de toplaag op de bedding 'hangt' en 80% tegen de teen rust. Voor een 20 m lang talud is zijn deze waarden 50% - 50%.

In hoofdstuk 4 wordt bij het testen aangehouden:  $EA = 10^9$  N en  $k_x = 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Waaruit volgt dat  $\lambda = 100$  m.

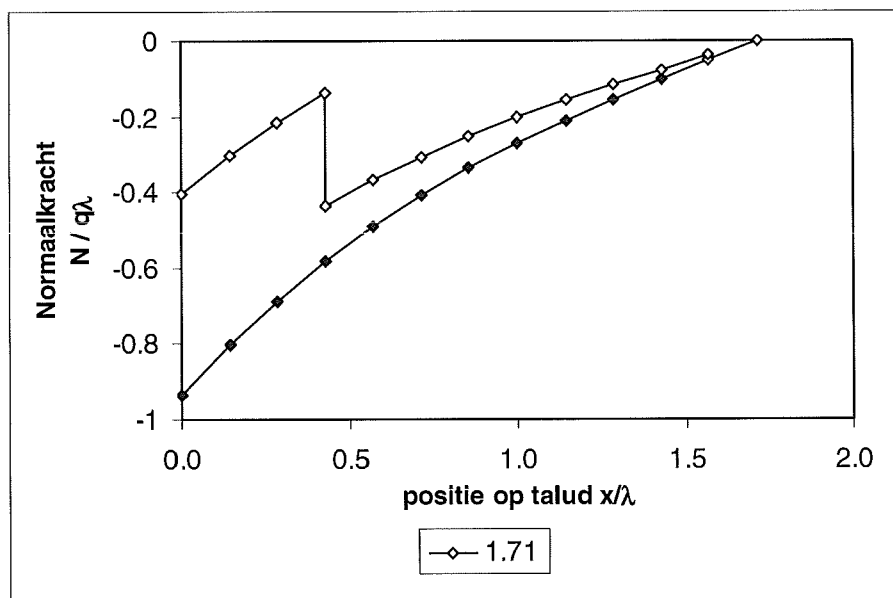


Figuur 10: Vergelijking  $N_{\text{teen}}$  uit berekening op elastische bedding met  $N_{\text{teen}}$  uit evenwichtsmodel op glijdende bedding (voor teenstijfheid  $k_{\text{teen}} = \infty$ )

In het geval dat de teenstijfheid langs de lengte van de dijk gezien niet constant is, kan dat aanleiding geven tot boogwerking. In een bepaalde dwarsdoorsnede geeft deze boog een extra elastisch steunpunt dat kan worden gerepresenteerd door een verende ondersteuning ergens halverwege het talud. In het model wordt dit gefaciliteerd met de mogelijkheid om een extra veerwaarde in te voeren op een zelf te bepalen plaats.

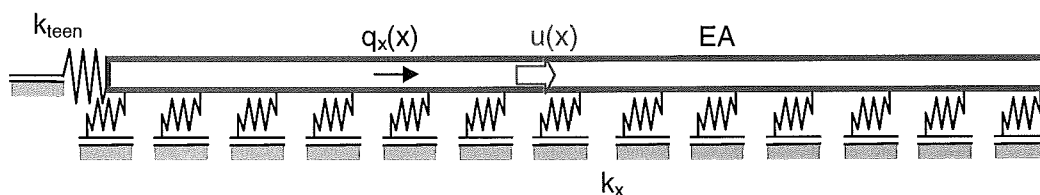


Figuur 11: Boogwerking ten gevolge van falende teen of geringere teen stijfheid



Figuur 12: Normaalkracht  $N(x)$  voor een geval met eindige veerstijfheid  $k_{teen}$  en  $k_{boogwerking}$  (vgl. figuur 8)

Een volgende stap in de verfijning van het axiale liggermodel is de limitering van de maximale schuifkracht die door de veren van de bedding kan worden geleverd. Voor de schuifveren wordt een elasto-plastische veer karakteristiek geïntroduceerd.



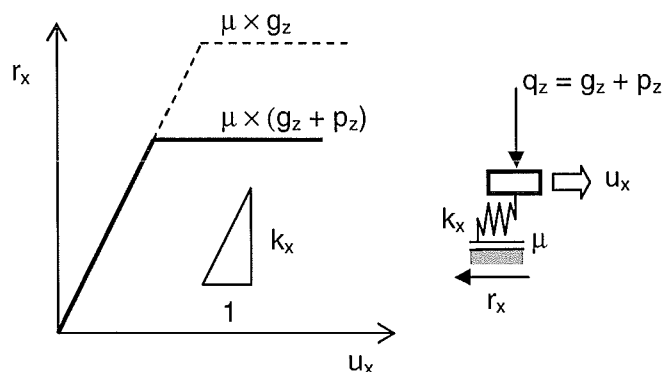
**Figuur 13:** Definitiediagram model 3: continu veer model met wrijvingselementen

De plastische capaciteit van de veer is afhankelijk van de verticale kracht op de veer. Deze verticale kracht wordt beïnvloed door de stijghoogtevariaties bij golfbelasting. In het continue model worden de krachten geformuleerd als verdeelde belastingen [N/m]. De onderstaande formules gelden voor een toplaag onder water. De statische waterdruk  $p = \rho g D B_y$  is als constante term aanwezig in de belastingen  $g_x$  en  $g_z$ . De stijghoogteverschillen zijn een functie van tijd en positie  $x$ . De verticale druk op het grensvlak tussen toplaag en bedding is daardoor ook een functie van tijd en positie  $x$ . De op dit grensvlak opneembare schuifkracht  $r_x$  kan niet groter zijn dan een door wrijving opneembare kracht. De maximale wrijvingskracht is afhankelijk van de verticale contactdruk,  $r_{x,max}(x) = \mu q_z(x)$ .

$$\begin{aligned}
 g_x &= -\rho g \Delta D \sin \alpha B_y \text{ [N/m]} \\
 g_z &= \rho g \Delta D \cos \alpha B_y \text{ [N/m]} \\
 p_z(x) &= \rho g (h_{top}(x) - h_{bedding}(x)) B_y \text{ [N/m] *} \\
 q_z(x) &= g_z + p_z(x) \text{ [N/m]} \\
 r_x(x) &= k_x u_x(x) \text{ [N/m]} \leq \mu q_z(x)
 \end{aligned}$$

Dit principe wordt nader uitgewerkt in de volgende paragrafen over discrete modellen.

\*) In de belastingformules van het continue model worden de spleetdrukken niet meegenomen.



**Figuur 14:** Definitiediagram veer en wrijvingselement met invloed van verticale gewichtskrachten ( $g_z$ ) en waterdrukkkrachten ( $p_z$ )

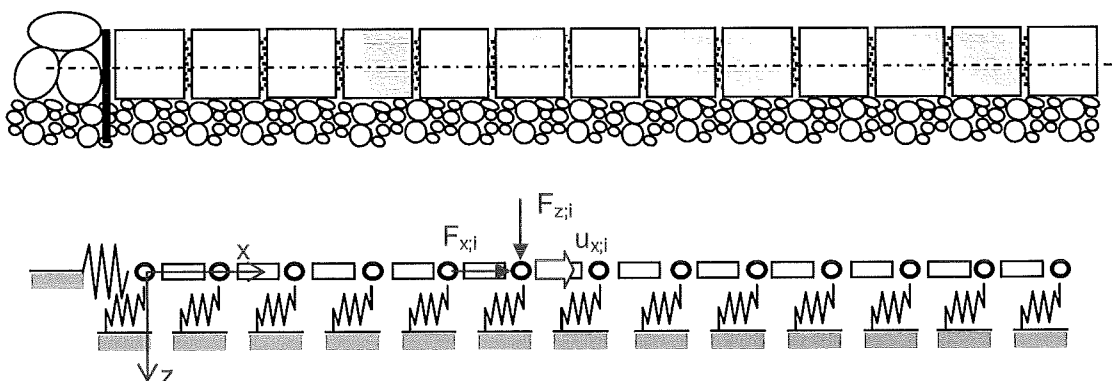
## 2.4 Axiale gediscrètiseerde mechanicamodellen

Voor de bepaling van de normaalkracht als gevolg van golfbelasting wordt een gediscrètiseerd model van de axiaal belaste ligger gehanteerd. Het model bestaat uit knopen ter plaatse van de stenen en elastische 'elementen' tussen de knopen (zie figuur 2). Deze elementen representeren het veergedrag van twee halve stenen en een voeg. De knopen zijn door middel van een discreet veerelement verbonden met de bedding.



De toplaagelementen worden belast door eigen gewichtskrachten, door drukverschillen boven en onder de toplaag, en door drukverschillen tussen de voegen. De waterdrukken worden omgerekend tot krachten die aangrijpen in het centrum van het toplaagelement. Het eventuele excentrisch ten opzichte van het zwaartepunt van het blok aangrijpen van de resultante van de waterdrukken wordt niet meegenomen.

De waterdruk geeft vermindering van contactdruk in de voegen tussen de toplaagelementen en vermindering van de contactdruk tussen de toplaagelementen en de bedding.



Figuur 15: Definitiediagram gediscretiseerd axiaal mechanica model

De fysische eigenschappen van het model liggen vast in de fysische eigenschappen van de elementen. Voor de staafelementen wordt de relatie tussen de knooppunten en de knoopverplaatsingen gegeven door:

$$\begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{xj} \end{Bmatrix} = \frac{EDB_y}{B_x} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{xi} \\ u_{xj} \end{Bmatrix}$$

Voor de veerelementen geldt:

$$F_{xi} = k_x B_x u_{xi}$$

En voor het veerelement van de teen:

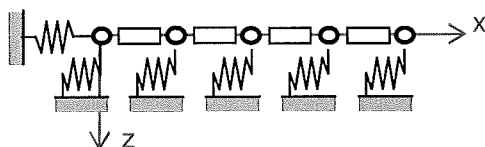
$$F_{x1} = k_{teen} u_{x1}$$

waarin:

$F_{x,i}$  = de knoopkrachten

$u_{x,i}$  = de knoopverplaatsingen

Deze knoopkrachten kunnen bij elkaar opgeteld worden en dienen evenwicht te maken met de knoopbelastingen. Voor een model van drie staafelementen ontstaat dan de volgende systeem stijfheidsmatrix  $[K]$ .



$$[K] \times \{u_x\} = \{F_x\}, \text{ met}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \frac{EDB_y}{B_x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} k_x B_x +$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} k_{teen}$$

$$\{F_x\} = \{G_x\} + \{P_x\}$$

waarin:

$EDB_y$  = de rekstijfheid van de toplaagligger

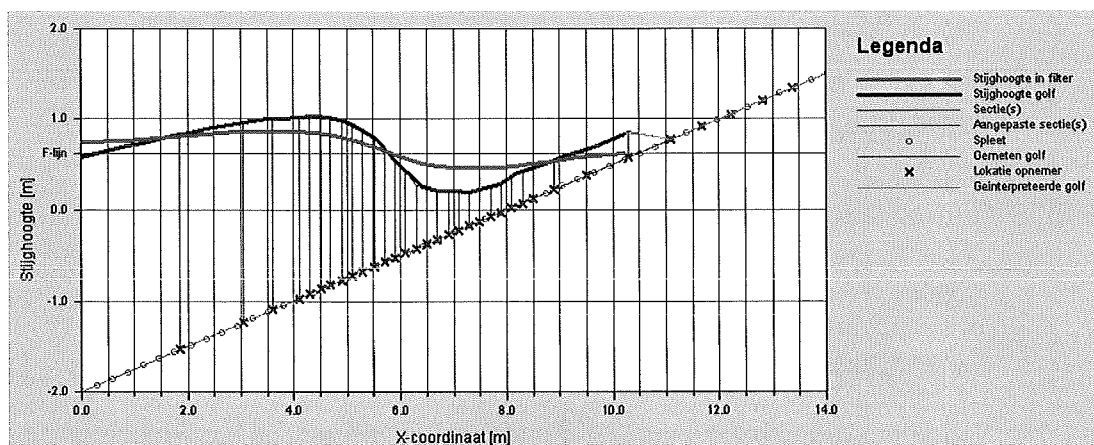
$B_x$  = de afstand tussen de knopen, gelijk aan de breedte van de toplaagelementen

De knoopbelastingen  $F_i$  bestaan uit gewichtskrachten  $G_i$  en waterdrukkrachten  $P_i$ .

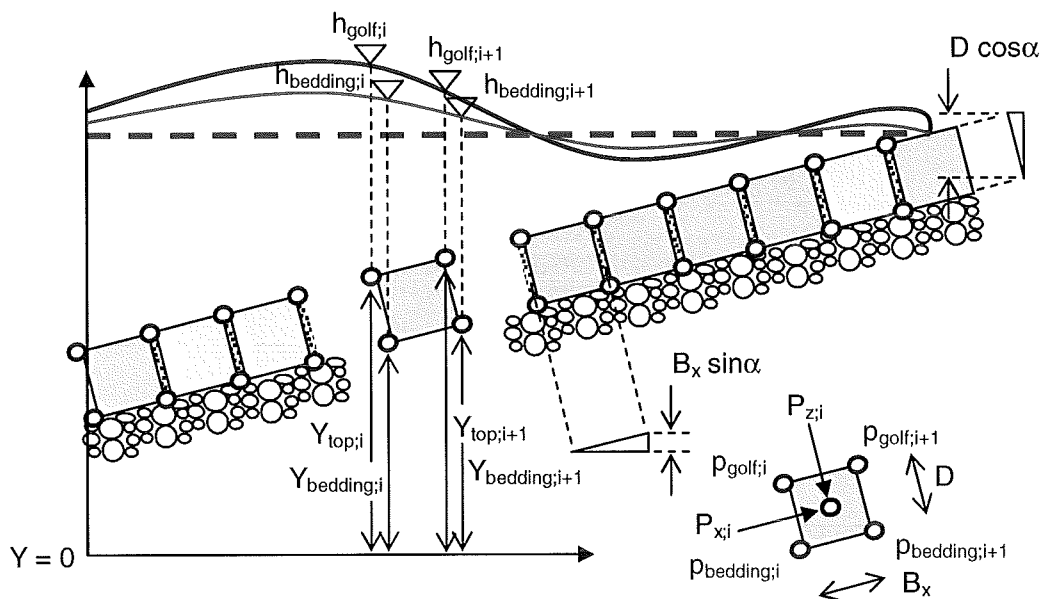
$$G_{x,i} = -\rho_s g B_x B_y D \sin \alpha$$

$$G_{z,i} = \rho_s g B_x B_y D \cos \alpha$$

De golfkrachten  $P_i$  worden berekend uit de door ZSteen berekende stijghoogteverschillen per gridpunt en per tijdstap.



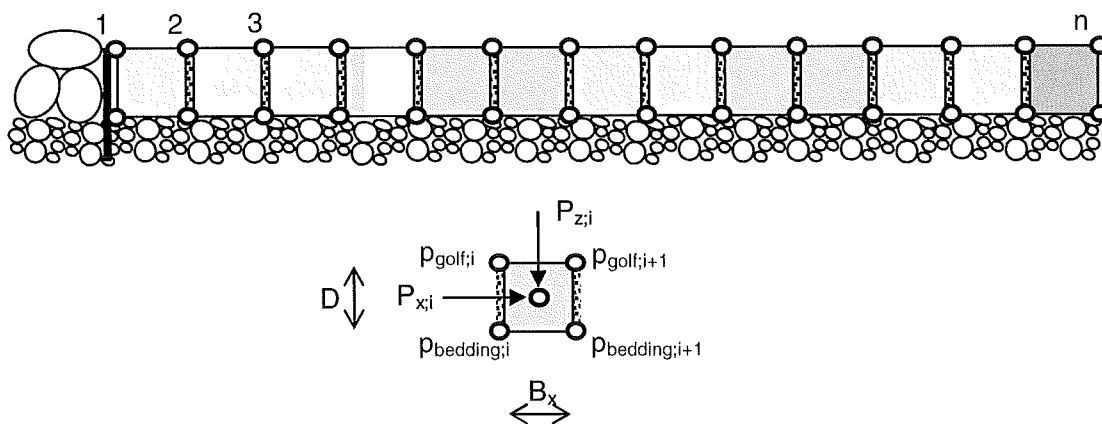
Figuur 16: Stijghoogte uitvoer ZSteen



Figuur 17: Definitiediagram omrekening stijghoogtes ZSteen naar drukken

Omrekening van stijghoogtes naar drukken in de aangegeven gridpunten geschiedt met de volgende formules.

$$\begin{aligned}
 p_{golf;i} &= \rho g (h_{golf;i} - Y_{top;i}) \\
 p_{bedding;i} &= \rho g (h_{bedding;i} - Y_{bedding;i}) \\
 p_{golf;i+1} &= \rho g (h_{golf;i+1} - Y_{top;i+1}) \\
 p_{bedding;i+1} &= \rho g (h_{bedding;i+1} - Y_{bedding;i+1}) \\
 Y_{top;i+1} &= Y_{top;i} + B_x \sin \alpha \\
 Y_{bedding;i+1} &= Y_{bedding;i} + B_x \sin \alpha \\
 Y_{top;i} &= Y_{bedding;i} + D \cos \alpha \\
 Y_{top;i+1} &= Y_{bedding;i+1} + D \cos \alpha
 \end{aligned}$$



Figuur 18: Definitiediagram integratie waterdrukken tot krachten op de knopen

Intergratie van deze drukken tot resulterende op de knoop aangrijpende krachten geschiedt met de volgende formules.

$$\begin{aligned}
 P_{x;i} &= \frac{1}{2} (p_{golf;i} - p_{golf;i+1} + p_{bedding;i} - p_{bedding;i+1}) DB_y \\
 &= \frac{1}{2} \rho g (h_{golf;i} - h_{golf;i+1} + h_{bedding;i} - h_{bedding;i+1}) DB_y + \rho g DB_x B_y \sin \alpha
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{z;i} &= \frac{1}{2} (p_{golf;i} + p_{golf;i+1} - p_{bedding;i} - p_{bedding;i+1}) B_x B_y \\
 &= \frac{1}{2} \rho g (h_{golf;i} + h_{golf;i+1} - h_{bedding;i} - h_{bedding;i+1}) B_x B_y - \rho g DB_x B_y \cos \alpha
 \end{aligned}$$

De knoopbelastingen  $F_{x;i} = G_{x;i} + P_{x;i}$  fungeren als belastingvector in het axiale model en daarmee zijn de verplaatsingen  $u_{x;i}$  en vervolgens de veerkrachten  $R_{x;i}$  en de normaalkracht  $N(x)$  in de staaf te berekenen.

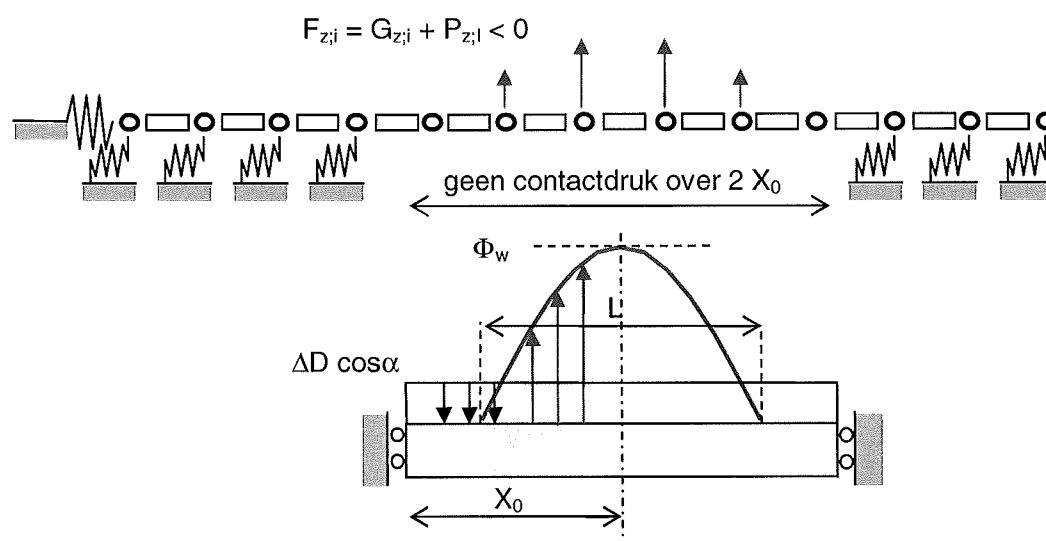
Uit de oplossing blijkt dat de normaalkracht synchroon met de golfbelasting in de tijd varieert.

## 2.5 Model met weggenomen veren

De veerkrachten moeten opgenomen worden door de schuifcapaciteit van de toplaagelementen over de bedding. De maximaal opneembare schuifkracht is gelimiteerd door de tussen de steen en de bedding aanwezige drukkracht (zie figuur 14). De drukkrachten  $F_{z;i}$  worden beïnvloed door de knoopbelastingen  $P_{z;i}$ . Op het tijdstip dat de druk weggenomen wordt doordat de opwaartse gerichte, negatieve waarde van  $P_{z;i}$  de waarde van  $G_{z;i}$  overschrijdt, kan er geen schuifkracht meer opgenomen worden.

Over het gebied waar dit optreedt, worden de veerelementen inactief gemaakt (zie figuur 19). Dit gebied varieert per tijdstap in grootte en positie. De grootte van dit gebied is afhankelijk van de grootte van het relatieve stijghoogte verschil  $\Phi_w / \Delta D \cos \alpha$  en van de lengte  $L$  waarover het opwaartse stijghoogteverschil zich uitstrekt. De wijze waarop dit wordt bepaald wordt beschreven in paragraaf 3.4.

Op deze wijze ontstaat er per tijdstap een andere systeem stijfheidsmatrix.



Figuur 19: Wegnemen veren bij ontstaan 'trek' op grensvlak toplaag en bedding

De verplaatsingen moeten in het geval van een systeemverandering worden berekend als verplaatsingsincrementen die het gevolg zijn van belastingsincrementen, zijnde het verschil tussen de belastingen in de betreffende en de voorafgaande tijdstap:  $dP_x^{t+1} = P_x^{t+1} - P_x^t$ .

De eerste tijdstap wordt berekend uit:

$$[K] \times \{u_x^{t1}\} = \{F_x^{t1}\}, \text{ ofwel: } \{u_x^{t1}\} = [K]^{-1} \{F_x^{t1}\}$$

met

$$\{F_x^{t1}\} = \{G_x\} + \{P_x^{t1}\}$$

De veerelementkrachten worden berekend met:

$$\{R_x^{t1}\} = \{u_x^{t1}\} k_x B_x$$

De normaalkrachten met:

$$N_{x;i}^{t1} = (u_{x;i+1}^{t1} - u_{x;i}^{t1}) \frac{EDB_y}{B_x}$$

De tweede tijdstap wordt berekend uit:

$$\{u_x^{t2}\} = \{u_x^{t1}\} + \{du_x^{t2}\}$$

$$\{du_x^{t2}\} = [K^{t2}]^{-1} \{dF_x^{t2}\}$$

met bijvoorbeeld:

$$[K^{t2}] = [K] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} k_x B_x$$

$$\{dF_x^{t2}\} = \{P_x^{t2}\} - \{P_x^{t1}\} + \{R_{x;3}^{t1}\}$$

$$\{R_{x;3}^{t1}\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -R_{x;3}^{t1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

De veerelementkrachten worden berekend met:

$$\{R_x^{t2}\} = \begin{bmatrix} u_{x;1}^{t2} \\ u_{x;2}^{t2} \\ 0 \\ u_{x;4}^{t2} \\ u_{x;5}^{t2} \end{bmatrix} k_x B_x,$$

De normaalkrachten met:

$$N_{x;i}^{t2} = (u_{x;i+1}^{t2} - u_{x;i}^{t2}) \frac{EDB_y}{B_x}$$

De derde tijdstap wordt berekend uit:

$$\{du_x^{t3}\} = [K^{t3}]^{-1} \{dF_x^{t3}\}$$

met bijvoorbeeld:

$$[K^{t3}] = [K] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} k_x B_x$$

$$\{dF_x^{t3}\} = \{P_x^{t3}\} - \{P_x^{t2}\} + \{R_{x;3,4}^{t2}\}$$

$$\{R_{x;3,4}^{t2}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -R_{x;3}^{t2} \\ -R_{x;4}^{t2} \\ 0 \end{Bmatrix},$$

waarin  $R_{x;3}^{t2} = 0$ , omdat deze veer ook bij de vorige tijdstap niet actief was.

De vierde tijdstap wordt berekend uit:

$$\{du_x^{t4}\} = [K^{t4}]^{-1} \{dF_x^{t4}\}$$

met bijvoorbeeld:

$$[K^{t4}] = [K] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} k_x B_x$$

$$\{dF_x^{t4}\} = \{P_x^{t4}\} - \{P_x^{t3}\} + \{R_{x;4,5}^{t3}\}$$

$$\{R_{x;4,5}^{t3}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -R_{x;4}^{t3} \\ -R_{x;5}^{t3} \end{Bmatrix}$$

waarin  $R_{x;4}^{t3} = 0$ , omdat deze veer ook bij de vorige tijdstap niet actief was.

De veerkrachten worden berekend uit:

$$\{R_x^{t4}\} = \begin{Bmatrix} u_{x;1}^{t4} \\ u_{x;2}^{t4} \\ u_{x;3}^{t4} - u_{x;3}^{t3} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} k_x B_x$$

Voor het derde veerelement, dat in deze tijdstap weer opnieuw met de bedding in aanraking komt, wordt er schuifkracht opgebouwd evenredig met de verplaatsing vanaf deze tijdstap.

In algemene zin geldt voor actieve veerelementen:

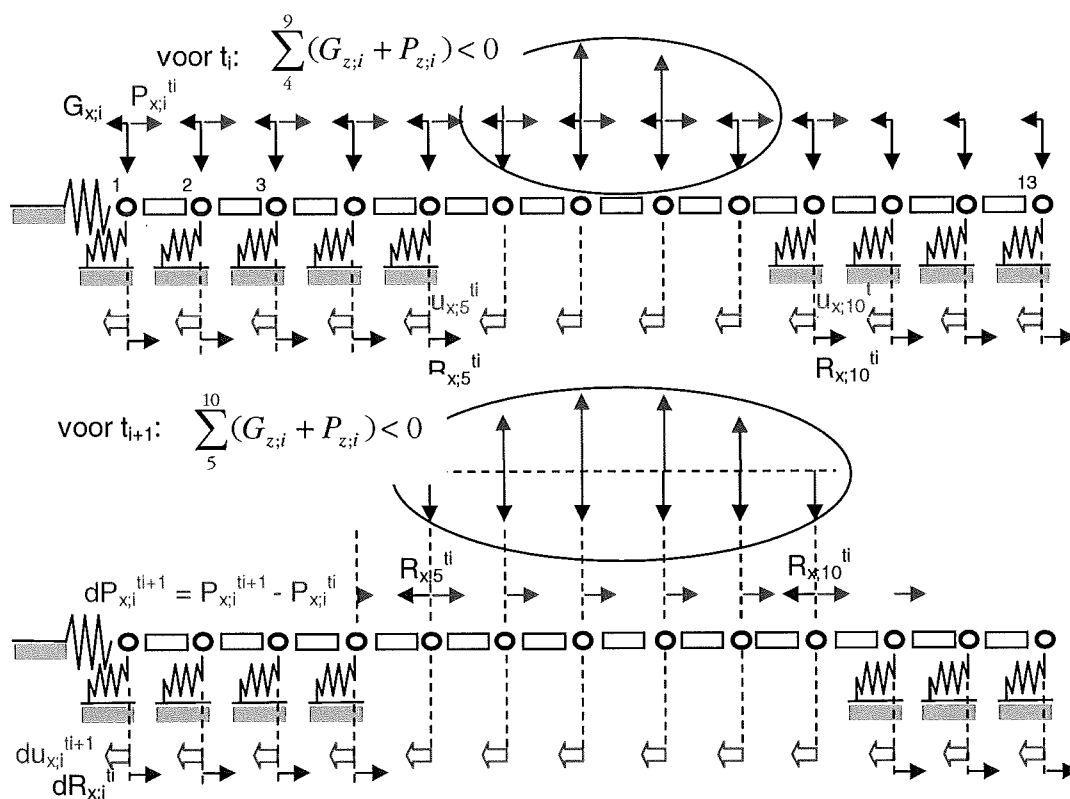
$$R_{x;i}^{ti} = (u_{x;i}^{ti} - u_{x;i}^{tj})k_x B_x,$$

waarin  $t_j$  de tijdstap sinds welke de toplaag in contact is met de bedding. Aan de start van de berekening is  $j$  voor alle veren 0. Gaandeweg de berekening, wijzigt  $j$  voor de opgelichte en weer neergedrukte stenen in het tijdstapnummer voorafgaand aan het neerdrukken op de bedding.

Het proces van optillen van de toplaag is voor een groter model schematisch weergegeven in figuur 20. Aan het einde van tijdstap  $t_i$  zijn er vier veren inactief. In de figuur zijn dat de veren onder knoop 6 t/m 9. De belastingvector  $F_{x;i}^{ti} = G_{x;i} + P_{x;i}^{ti}$  heeft geleid tot een verplaatsingsvector  $u_{x;i}^{ti}$  en tot krachten in de veren  $R_{x;i}^{ti}$ .

In de volgende tijdstap  $t_{i+1}$  blijkt dat de opwaartse waterdrukken toenemen en blijken knoop 5 t/m 10 opgelicht te worden van de bedding. De veren onder knoop 5 en 10 worden inactief gemaakt. De aan het einde van tijdstip  $t_i$  in die veren aanwezige veerkracht wordt als belasting aangebracht in tijdstap  $t_{i+1}$ . Samen met de incrementen  $dP_{x;i}^{ti+1}$  wordt hiermee de belastingvector samengesteld en worden verplaatsingsincrementen berekend.

Indien er, bijvoorbeeld bij tijdstap  $t_{i+2}$ , weer veren actief worden, zijn deze aan het begin van die tijdstap spanningsloos. Dat is ook conform de werkelijkheid. Indien de toplaag, na even te hebben gezwefd, weer contact maakt met de bedding, zal slechts een daarna optredende horizontale verplaatsing leiden tot schuifkrachten op het grensvlak van toplaag en bedding.



Figuur 20: Procedure wegnemen veren bij overschrijding capaciteit schuifveer

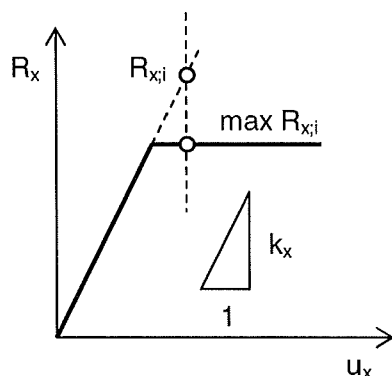
In de figuur is tevens te zien dat het wegnemen van de veren om de reden dat  $F_{z,i} = G_{z,i} + P_{z,i} < 0$  niet slechts gebeurt per individuele steen, maar indien de grootte van de opwaartse druk dat vereist ook voor stenen links en rechts van de stenen waarvoor geldt dat de opwaartse druk groter is dan het gewicht.

De procedure voor het vaststellen van het optillen staat beschreven in paragraaf 3.4.

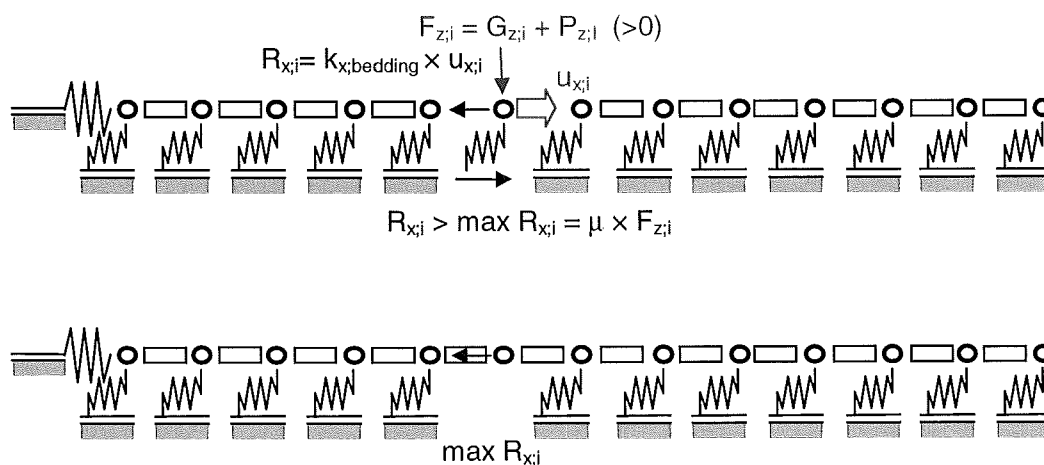
## 2.6 Model met elastoplastische veren

In elke tijdstap waarin zich dat voordoet, moet er in het elasto-plastische model een aftopping plaatsvinden van de veerkrachten onder de stenen die nog wel contact maken met de bedding, maar die boven hun capaciteit op schuif worden belast. Uitgaande van een veergedrag met een elastische en daarna een ideaalplastische tak volgens figuur 14, wordt overschrijding van de capaciteit gemodelleerd door het elimineren van de veer en het aanbrengen van een knoopbelasting ter grootte van de plastische capaciteit voor die tijdstap.

Omdat deze belasting de verplaatsingen weer beïnvloedt, moet deze berekening iteratief uitgevoerd worden. Op deze wijze wordt er binnen één tijdstap geïtereerd, waarbij de systeem stijfheidsmatrix en de belastingvector telkens bijgesteld worden. Aan het begin van de daarop volgende nieuwe tijdstap wordt het betreffende veerelement weer actief gemaakt. Bij de nieuwe tijdstap behoort een nieuwe veercapaciteit. In de nieuwe tijdstap wordt, indien nodig, met belasting incrementen naar een nieuw evenwicht geïtereerd.



Figuur 21: Overschrijding veercapaciteit in elastische berekening



Figuur 22: Wegnemen veer bij overschrijding capaciteit schuifveer



Bij het rekenen met een eindige schuifcapaciteit tussen toplaag en bedding wordt er onderscheid gemaakt tussen de situatie voor het zwevende deel van de ligger, waar geen contactkracht meer is tussen de toplaag en de bedding (paragraaf 2.5), en het deel van de ligger buiten de dwarskrachtenuitpunten. Daar heerst wel contactkracht  $G_z + P_z > 0$ . De waarde van de over te dragen schuifkracht is gelimiteerd tot  $f_6 \times (G_z + P_z)$ , met  $f_6 = \mu$ , de wrijvingscoëfficiënt tussen de toplaag en de bedding. Voor dit rapport wordt gerekend met  $f_6 = 0.6$ .

Per tijdstap wordt  $\{du_x\}$  berekend uit  $\{dP_x\}$ . Dit geschiedt in eerste instantie elastisch met een matrix waarbij voor de betreffende tijdstap de veren onder het zwevende deel zijn weggenomen. De in de daaraan voorafgaande tijdstap in de aanwezige veerkrachten worden meegenomen in de belastingvector.

De procedure daarvoor wordt stap voor stap beschreven, waarbij het aantal te behandelen gevallen telkens toeneemt.

Tijdstap 1

Iteratie 1

$$[K]\{du_x^{ti}\} = \{dP_x^{ti} + R_x^{ti-1}\}$$

$$\{du_x^{ti}\} = [K]^{-1}\{dP_x^{ti} + R_x^{ti-1}\},$$

waarin de vector  $\{R_x^{ti-1}\}$  slechts waarden bevat van de krachten  $R_x$  op de posities waar de stenen in de tijdstap ti losraken, en dus in tijdstap ti-1 nog contact maakten (zie paragraaf 2.5).

Het verplaatsingsincrement  $\{du_x^{ti}\}$  is daarmee bekend. Opgeteld bij de verplaatsingsvector van de vorige tijdstap geeft dit de verplaatsingsvector in de tijdstap ti.

$$\{u_x^{ti}\} = \{u_x^{ti-1}\} + \{du_x^{ti}\}$$

Hieruit is  $R_x$  te berekenen. Voor de berekening van  $R_x$  worden een aantal gevallen onderscheiden:

- voor de zwevende knopen:  $R_x = 0$ ;
- voor de elementen met overschreden veercapaciteit, zie iteratie 2;
- voor de overige veerelementen:  $R_x = u_x^{ti} \times k_x$

Toets voor alle veerelementen of  $\frac{R_{x,i}}{f_6\{P_{z,i} + G_z\}} \leq 1$

Indien deze toets  $> 1$  geeft voor een aantal knopen i worden deze veerelementen inactief gemaakt in de matrix K.



Figuur 23: Model bij overschrijding schuifcapaciteit in derde veerelement

Iteratie 2

$$[K^2] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & -1 & 2 & -1 & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \frac{EDB_y}{B_x} + \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 0 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} k_x B_x + \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 0 & & & \\ & & 0 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & 0 \end{bmatrix} k_{teen}$$

(voorbeeld voor  $i = 3$ ; zie figuur 23)

Ten behoeve van het overzicht is alleen de hoofddiagonaal, dan wel de band van de matrices aangegeven. De overige elementen van de matrix zijn nul.

Bereken:

$$\{du_x^{i;2}\} = [K^2]^{-1} (\{dP_x^i\} + \{R_x^{i-1}\} + \{R_{x,max,i}^i\}),$$

$$\text{met } R_{x,max,i}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_{-1} f_6 (P_{z;3}^i + G_z) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\text{waarin } e_{-1} = -\frac{u_{x;3}^{i-1}}{|u_{x;3}^{i-1}|}$$

indien  $u_x$  negatief was voordat het element opgelicht werd, moet  $R_{x,max,i}$  in deze tijdstap als een positieve knoopbelasting worden aangebracht.

De oplossing voor de verplaatsing wordt nu gevonden door het resultaat van de tweede iteratie bij de oplossing van de vorige tijdstap op te tellen.

$$\{u_x^{ii;2}\} = \{u_x^{ii-1}\} + \{du_x^{ii;2}\}$$

Bereken hieruit  $R_{x;i}$ , rekening houdend met de verschillende gevallen.

- Voor zwevende knopen:

$$R_{x;i} = 0$$

- Voor elementen met overschreden veercapaciteit:

$$R_{x;i} = e_1 f_6(P_{z;i}^{ii} + G_z), \text{ met } e_1 = \frac{u_{x;i}^{ii-1}}{|u_{x;i}^{ii-1}|}$$

- Voor de elementen die plastisch waren: zie stap 3
- Voor de overige elementen:

$$R_{x;i} = u_x^{ii;2} \times k_x$$

Toets voor alle veerelementen of  $\frac{R_{x;i}^{ii;2}}{f_6\{P_{z;i} + G_z\}} \leq 1$

Zolang de toets waarden  $> 1$  geeft moet de stap 2 berekening opnieuw worden uitgevoerd. Het is mogelijk dat elementen die bij de 2<sup>o</sup> iteratie nog geen schuifkrachtoverschrijding te zien gaven, dat na wegneming van een naburige veer, in een volgende iteratie wel doen.

Indien alle waarden  $R_{x;i} \leq 1$  dan zijn de iteraties voor deze tijdstap afgerond

Bewaar  $du_x^{ii;a}$ ,  $u_x^{ii}$  en  $R_x^{ii}$

Markeer de veren met overschreden capaciteit in een vector, waarbij per element de laatste tijdstap wordt bewaard waarvoor het element plastisch was.

$$\{p\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ tj \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bij volgende tijdstappen wordt er altijd eerst weer een eerste iteratie gedaan volgens het protocol van iteratie 1. Alle veren waarvoor geldt  $G_z + P_z > 0$  worden aangebracht.

Tijdstap 2 (of hoger)

Iteratie 1

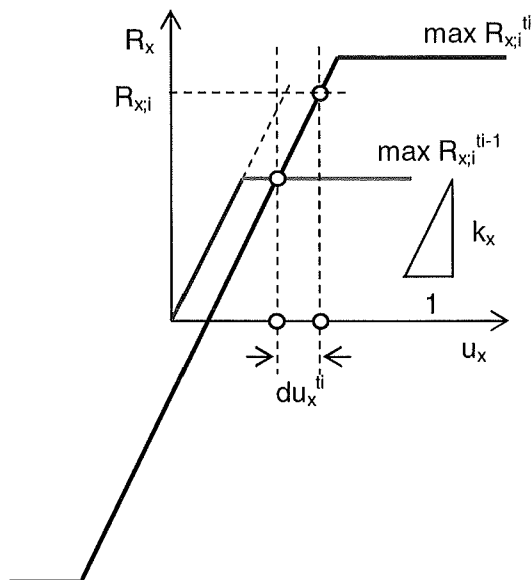
De berekening geschiedt als bij de beschrijving van tijdstap 1. Echter bij de bepaling van de veerkrachten  $R_x$  moet rekening gehouden worden met een extra geval:

- voor de zwevende knopen:  $R_x = 0$
- voor de elementen met overschreden veercapaciteit, zie iteratie 2.

- voor elementen die in de vorige tijdstap plastisch waren (zie figuur 24):  
 $R_{x,i} = R_{x,i}^{i-1} + du_x^i \times k_x B_x$ , of, meer algemeen voor elementen die plastisch waren in een eerdere tijdstap  $t_j$ :  
 $R_{x,i} = R_{x,i}^{j} + (u_x^i - u_x^j) \times k_x B_x$
- voor de overige veerelementen:  $R_x = u_x^i \times k_x B_x$

Toets voor alle veerelementen of  $\frac{R_{x,i}}{f_6 \{P_{z,i} + G_z\}} \leq 1$

Indien er elementen zijn met een schuifkrachtsverhouding  $> 1$  dan volgt een tweede iteratie.



Figuur 24: Veerkracht na overschrijding plastische capaciteit in een vorige tijdstap

Iteratie 2

(de formules zijn algemeen geschreven voor iteratie nr. a)

Veerelementen wegnemen die bij de toets een overschrijding van de schuifcapaciteit te zien geven. Belastingvector uitbreiden met termen voor de plastische schuifkracht.

$$\{du_x^{i;a}\} = [K^a]^{-1} (\{dP_x^i\} + \{R_x^{i-1}\} + \{R_{x,max,i}^i\})$$

$$\text{met } R_{x,max,i}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_{-1} f_6 (P_{z;3}^i + G_z) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

waarin  $e_{-1} = - \frac{R_{x;3}^{i-1} + du_{x;3}^{i;a} \times k_x B_x}{|R_{x;3}^{i-1} + du_{x;3}^{i;a} \times k_x B_x|}$

Bereken de nieuwe verplaatsingsvector  $\{u_x^{i;a}\}$ .

Bepaal  $\{R_x\}$

- Voor zwevende knopen:

$$R_{x;i} = 0$$

- Voor elementen met overschreden veercapaciteit:

$$R_{x;i} = e_1 f_6 (P_{z;i}^{ti} + G_z), \text{ met } e_1 = \frac{u_{x;i}^{i-1} - u_{x;i}^{ij}}{|u_{x;i}^{i-1} - u_{x;i}^{ij}|},$$

waarin:

tj = de tijdstap waarin het betreffende veerelement de vorige keer plastisch was.

- Voor elementen die plastisch waren in een eerdere tijdstap tj:

$$R_{x;i} = R_{x;i}^{tj} + (u_{x;i}^{i;a} - u_{x;i}^{tj}) \times k_x B_x$$

- Voor de overige elementen:

$$R_{x;i} = u_{x;i}^{i;a} \times k_x B_x$$

Toets voor alle veerelementen of  $\frac{R_{x;i}^{i;a}}{f_6 \{P_{z;i} + G_z\}} \leq 1$

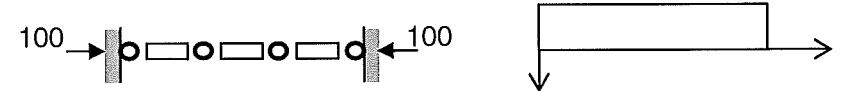
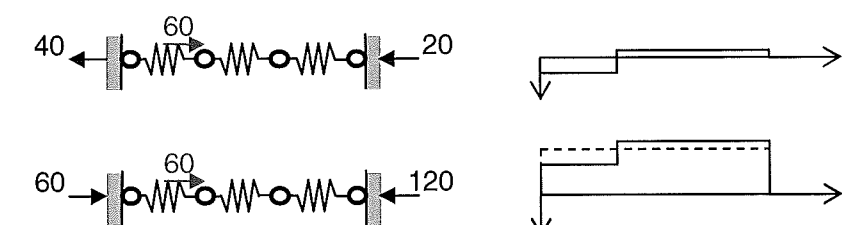
Iteraties uitvoeren zolang er veerelementen zijn waarvoor deze toets > 1 geeft.

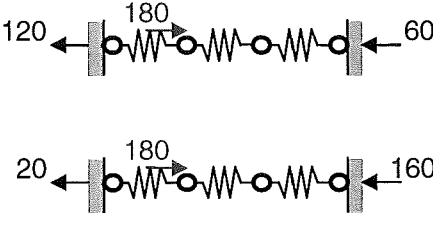
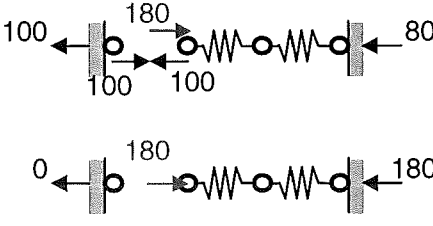
Bewaar  $\{du_x^{i;a}\}$ ,  $\{u_x^{i;a}\}$ ,  $\{R_x^{i;a}\}$  en de bijgewerkte vector  $\{p\}$ .

## 2.7 Model met no-tension elementen

Uit testen van een voorlopige versie van het programma KlemSteen bleek dat de spleetdrukken incidenteel zo groot kunnen zijn dat ze de drukkrachten die in de voegen heersen volledig compenseren, en – in het geval van een mechanicasysteem met een elastische axiale staaf – zelfs trek veroorzaken. In de praktijk kan dat niet. De stenen liggen los tegen elkaar en zullen bij overschrijding van de contactdruk van elkaar weggedrukt worden. De voeg gaat open staan. In het onderstaande getallen voorbeeld wordt duidelijk gemaakt hoe dit opgevangen wordt in een elastisch axiaal verensysteem. De veren van de bedding zijn in het voorbeeld niet aanwezig.

Tabel 4: Overzicht procedure elimineren van trek

| Beschrijving   | Overzicht model met normaalkrachtsdiagram  |
|--|--|
| tijdstap ti-1 uniforme normaalkracht van 100   |  |
| tijdstap ti met knoopbelasting $P_{x;2} = 60$ ; $du_x$ en $dN^i$ worden berekend en opgeteld bij $N^{i-1}$ |  |

| Beschrijving   | Overzicht model met normaalkrachtsdiagram  |
|--|--|
| tijdstap $t_i$ met knoopbelasting $P_{x,2} = 180$ ; $du_x$ en $dN^{ii}$ worden berekend en opgeteld bij $N^{i-1}$ ; in element 1 ontstaat trek   |  |
| $2^{\circ}$ iteratie tijdstap $t_i$ met knoopbelasting $P_{x,2} = 180$ ; element 1 wegnemen en $N_1^{i-1}$ aanbrengen als knoopbelasting; $du_x$ en $dN^{ii}$ worden berekend en opgeteld bij $N^{i-1}$ ; trek is geëlimineerd; element 1 ligt los tussen knoop 1 en 2 |  |

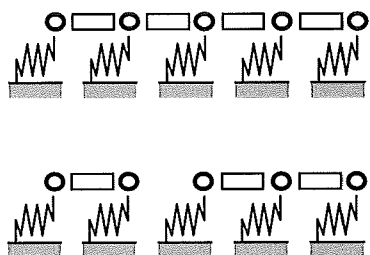
In de tabel is een voorbeeld gegeven van het principe van superpositie van een elastisch berekende tijdstap op het resultaat van de vorige tijdstap. In de eerste rij is het model, bestaande uit drie elementen en vier knopen weergegeven met het resultaat van tijdstap  $t_i$ . In de tweede rij van de tabel is de belasting zodanig laag dat er geen trek ontstaat. In de derde rij is de belasting hoger en ontstaat de wel trek. In de vierde rij is getoond hoe de tweede iteratie verloopt. Het berekeningsresultaat van de vierde rij komt in plaats van de derde en wordt opgeteld bij het resultaat van de vorige tijdstap.

Hierna wordt deze procedure uitgeschreven met de te hanteren formules.

Na berekening van de verplaatsing  $\{u_{x,i}\}$  van de tijdstap, moet in elke tijdstap de normaalkracht berekend worden uit de oplossing voor de verplaatsing.

$$N_{x,i} = (u_{x,i+1} + u_{x,i}) \frac{EB_y D}{B_x}$$

Indien  $N_{x,i} > 0$  heerst er trek in de toplaag. Dat is fysisch niet mogelijk. De berekening moet voor de betreffende tijdstap waarin de trek ontstaat opnieuw uitgevoerd worden middels een  $2^{\circ}$  iteratie met een gewijzigd stelsel van vergelijkingen. In de  $2^{\circ}$  iteratie wordt weer gestart met het resultaat van de vorige tijdstap. Het element waar in bij de eerste iteratie trek was ontstaan, wordt weggenomen en ter weerszijden van het weggenomen element wordt de normaalkracht die in het element aanwezig was aangebracht als knoopbelasting. Deze knoopbelastingen maken de randen van het weggenomen element spanningsloos. De knoopbelastingen zijn zodanig van richting dat ze de knopen ter weerszijden van het weg te nemen element naar elkaar toe trekken. Rechts van het weggenomen element werkt de knoopbelasting in negatieve x-richting en links van het element in positieve x-richting.



Figuur 25: Model met vier elementen en trek in het tweede element

$$\{du_x^{ii;2}\} = [K^2]^{-1} (\{dP_x^{ii}\} + \{N_{x,i}^{ii-1}\})$$

met

$$[K^2] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & -1 & 2 & -1 & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \frac{EB_y D}{B_x} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & & & \\ 0 & 1 & -1 & & \\ & -1 & 1 & 0 & \\ & & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{EB_y D}{B_x} + \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} k_x B_x$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ -1 & 1 & 0 & & \\ & 0 & 1 & -1 & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \frac{EB_y D}{B_x} + \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} k_x B_x$$

$$\{N_{x,j=2}^{ii-1}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -N_{x,2}^{ii-1} \\ N_{x,2}^{ii-1} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Bereken met behulp van deze vergelijkingen  $du_x^{ii;2}$

$$u_x^{ii} = u_x^{ii-1} + du_x^{ii;2}$$

Iteratie 2 is een verbeterde oplossing voor het verplaatsingsincrement van de (gehele) tijdstap vervangt daarbij iteratie 1.

$$N_{x,i} = (u_{x,i+1}^{ii} - u_{x,i}^{ii}) \times \frac{EB_y D}{B_x},$$

echter voor  $j = 2$ :  $N_{x,2} = 0$

Indien in één tijdstap bij de eerste berekening meerdere elementen tegelijkertijd trek vertonen, wordt er voor gekozen alleen het element met de grootste trekkracht te verwijderen. In vrijwel alle gevallen heeft dit bij de tweede iteratie tot gevolg dat de trek ook uit de naburige elementen verdwenen is. Er stelt zich namelijk een nieuw evenwicht in waarin er geen trek van betekenis in een randelement kan bestaan.

Het wegnemen van meerdere aan elkaar grenzende, zwevende elementen is niet mogelijk omdat de tussenliggende knopen dan vrije knopen worden.

In het geval waarin het wegnemen van het element met maximale trek in de eerste iteratie niet leidt tot het verdwijnen van de trek in de naburige elementen, moet in een nieuwe iteratie een ander element worden weggenomen. Er wordt gekozen om het element weg te nemen dat aan het einde van de eerste iteratie maximale trek heeft, niet zijnde een element juist naast het reeds weggenomen element.

Indien er zeer geringe trekkrachten overblijven in de elementen, is er geen bezwaar om dit resultaat te accepteren en door te gaan naar de volgende tijdstap. Dit gebeurt in het programma alleen indien er na enige iteraties nog geringe trek overblijft.

Indien er op meerdere posities met enige tussenafstand trek ontstaat, wordt er op beide posities dezelfde procedure gevolgd, waarbij er twee niet-aan-elkaar-grenzende elementen worden weggenomen. Dit gebeurt in twee opeenvolgende iteraties. Er kunnen nooit twee toplaag elementen tegelijkertijd worden uitgenomen. De tussenliggende elementen zijn dan niet stabiel op de bedding, en kunnen naar beneden glijden.

Bij de tijdstap  $t_i$ , volgend op een tijdstap  $t_{i-1}$  waarin trek op dreigde te treden en een element verwijderd is, wordt de berekening als volgt aangepakt.

Eerst wordt het in de vorige tijdstap verwijderde element weer tussen de twee systemen geplaatst en wordt er een verplaatsingsincrement  $du_x^{i;1}$  berekend met de stijfheidsmatrix van het gehele systeem  $[K]$ . Dit increment wordt opgeteld bij de verplaatsingsvector van de vorige tijdstap en de normaalkrachten worden bepaald. Dit is de eerste iteratie. Deze kan twee resultaten opleveren. a) Indien dit in het betreffende element een drukkracht oplevert, betekent dit dat ergens in deze tijdstap de openstaande voeg is dichtgedrukt. b) Indien uit de eerste iteratie blijkt dat er nog steeds een trekkracht heerst, betekent dit dat het element mogelijk nog steeds los ligt en dat ook deze tijdstap zonder het betreffende element moet worden uitgevoerd.

Er wordt een tweede berekening uitgevoerd (iteratie 2). Daarbij wordt het betreffende element weer verwijderd en wordt er een verplaatsingsincrement  $du_x^{i;2}$  berekend met de stijfheidsmatrix van de twee systemen  $[K^2]$ .

Dit increment wordt opgeteld bij de verplaatsingsvector van de vorige tijdstap en de normaalkrachten worden bepaald. In geval a) is de berekening nu afgerond.

De denkbeeldige normaalkracht in het verwijderde element wordt bepaald uit de verplaatsingen van de nevenliggende knopen.

$$N_i = ((u_{x;i+1}^{i-1} + du_{x;i+1}^{i;2}) - (u_{x;i}^{i-1} + du_{x;i}^{i;2})) \times EB_y D / B_x$$

Indien dit een (hoge) drukkracht is, geval b), betekent dit dat het element niet gedurende de gehele in deze tijdstap aangebrachte belasting los tussen de knopen blijft liggen, maar onder invloed van een deel van de belasting weer vast komt te liggen, en vervolgens bij het optreden van de rest van de belasting in deze tijdstap functioneert als drukelement. De correcte oplossing voor deze tijdstap wordt dan verkregen uit:

$$\{du_x^i\} = [K^2]^{-1} f_7 \{dP_x^i\} + [K]^{-1} (1 - f_7) \{dP_x^i\}$$

$$f_7 = \begin{cases} -\frac{u_{x;i}^{i-1} - u_{x;i+1}^{i-1}}{du_{x;i}^{i;2} - du_{x;i+1}^{i;2}} & \text{voor } du_{x;i}^{i;2} - du_{x;i+1}^{i;2} < |u_{x;i}^{i-1} - u_{x;i+1}^{i-1}| \\ 1.0 & \text{voor } du_{x;i}^{i;2} - du_{x;i+1}^{i;2} \geq |u_{x;i}^{i-1} - u_{x;i+1}^{i-1}| \end{cases}$$

$$\{du_x^i\} = f_7 \times \{du_x^{i;2}\} + (1 - f_7) \times \{du_x^{i;1}\}$$



De belastingvector in deze tijdstappen behoeft niet uitgebreid te worden met een term  $\{N_{xj}^{i-1}\}$ . De waarde van deze vector is nul omdat het betreffende element aan het einde van de vorige tijdstap  $t_{i-1}$  reeds spanningsloos was.

Het kan ook voorkomen dat er in een tijdstap op meer dan één positie in de ligger trek ontstaat, of dat er nog trek heerst die reeds in een vorige tijdstap aanwezig was en er trek op een nieuwe positie bij komt. In dat geval wordt het oude trekgeval ingevuld met een steen en het nieuwe behandeld alsof er in de ligger voor het eerst trek ontstaat. Trek mag niet voorkomen in naast elkaar liggende elementen. In dat geval moet de (in de praktijk altijd zeer geringe) trek worden verwaarloosd en wordt er gewoon doorgerekend als ware het een drukkracht.

Het invullen van een 'oud' trekgeval met een steen in combinatie met het weghalen van een steen op een andere locatie komt alleen voor binnen een tijdstap. Aan het einde van een tijdstap wordt slechts één weggenomen element geaccepteerd. Elke eerste iteratie van een nieuwe tijdstap is met een volledig gevulde ligger. Bij de tweede iteratie wordt dan de steen met maximale trek weggenomen en indien er dan nog trek blijkt te zijn ontstaan in een ander element  $k$  (niet zijnde een naburig element van  $j$ ) wordt het eerste trekgeval (element  $j$ ) ingevuld en dat gebeurt als volgt.

De grootte van het gat op de plaats van element  $j$  aan het einde van de vorige tijdstap is:  $u_{x;j}^{i-1} - u_{x;j+1}^{i-1}$ .

Er wordt een 3<sup>o</sup> run gemaakt met matrix  $[K^3]$  waarin zowel element  $j$  als  $k$  ontbreken. Met de verplaatsingsincrementvector wordt berekend wat de verandering van de grootte van het gat zou zijn in het geval dat de belasting werkt op een zetting met twee gaten:

$$du_{x;j}^{i;3} - du_{x;j+1}^{i;3}$$

Vervolgens wordt een run gemaakt met matrix  $[K^4]$  waarin element  $k$  ontbreekt.

De verplaatsing wordt vervolgens berekend uit:

$$\{du_x^i\} = [K^3]^{-1} f_8 \{dP_x^i - N_{x;k}^{i-1}\} + [K^4]^{-1} (1 - f_8) \{dP_x^i - N_{x;k}^{i-1}\}$$

$$f_8 = - \frac{u_{x;j+1}^{i-1} - u_{x;j}^{i-1}}{du_{x;j+1}^{i;3} - du_{x;j}^{i;3}}$$

$$\{du_x^i\} = f_8 \times \{du_x^{i;3}\} + (1 - f_8) \times \{du_x^{i;4}\}$$

De term  $N_{x;k}^{i-1}$  is hier weer toegevoegd aan de belastingvector omdat bij deze runs het effect meegenomen moet worden van het wegnemen van de steen  $k$  die in de vorige tijdstap een normaalkracht bevatte.

Nu moet worden gecontroleerd of het gat op de plaats van element  $k$  nog steeds 'ruimte' biedt. In het geval dat  $u_{x;k}^i - u_{x;k+1}^i > 0$  dan blijkt het vervangen van het weg te nemen element  $j$  door  $k$  geen goede oplossing en moet de oorspronkelijke oplossing met het weg te nemen element  $j$  worden gekozen.

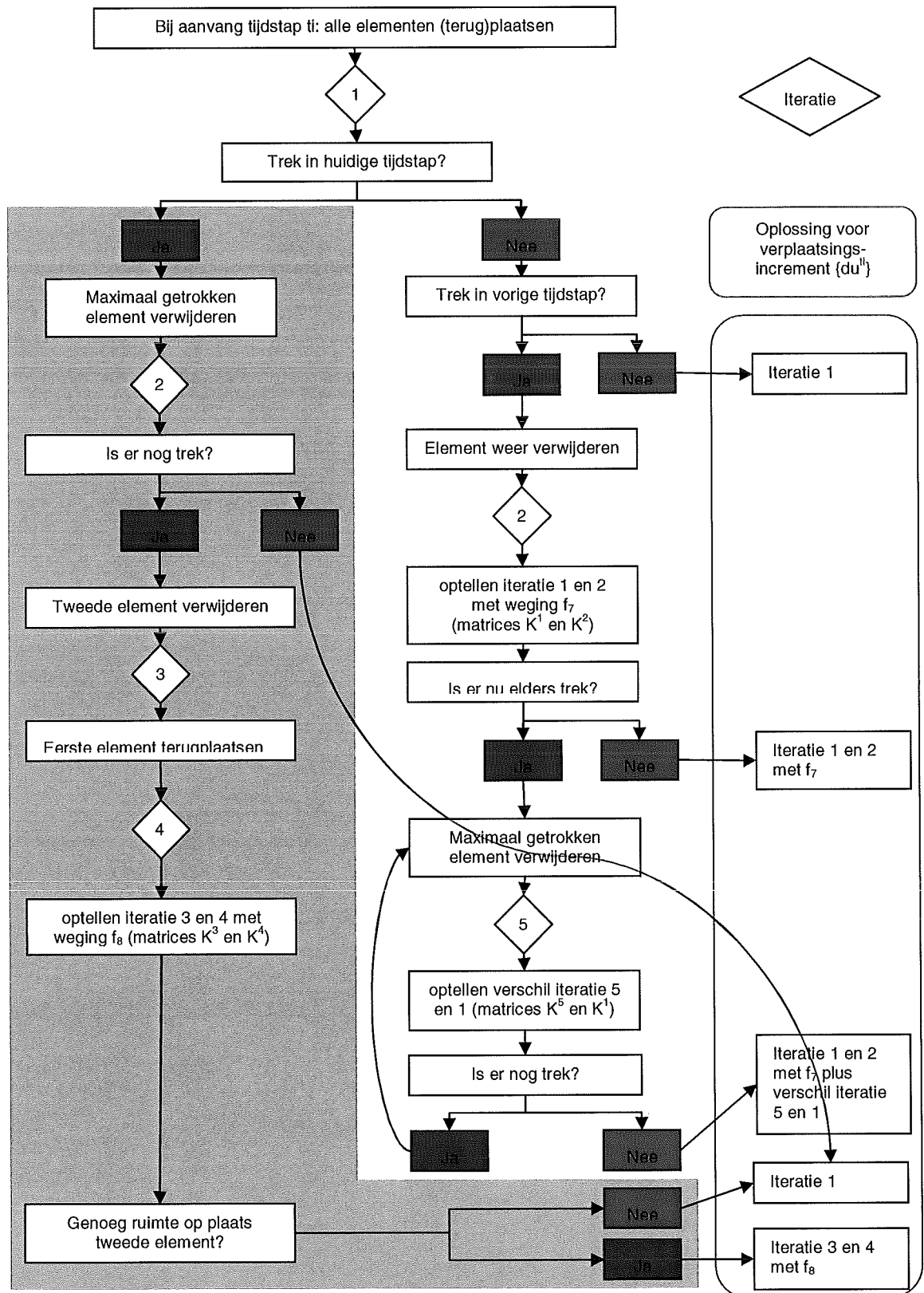
Het verwisselen van trekelement (met de factor  $f_8$ ) en het controleren of dit een verbeterde oplossing voor de tijdstap geeft, is een handeling die uitgevoerd wordt in een iteratie die automatisch als laatste van de tijdstap wordt beschouwd.

Het hiervoor beschreven proces van de eerste iteratie na een eerder trekgeval (met de factor  $f_7$ ) is niet noodzakelijkerwijs de laatste iteratie. In het geval dat er nog iteraties met een ander trekelement volgen, moet voorkomen worden dat de berekening van het reeds teruggeplaatste element  $j$  opnieuw wordt gedaan waarbij de berekening in een onbepaalde toestand kan geraken. Dit wordt bereikt door de te berekenen iteraties volgend op de iteraties waarbij een element dat in een vorige tijdstap trek gaf en in een eerste iteratie succesvol teruggeplaatst is, te behandelen als optelling van een nieuwe oplossing en niet als vervanging.

Indien na terugplaatsing van element  $j$  in element  $m$  trek ontstaat, wordt eerst een berekeningsrun gemaakt met  $[K]$  en een belastingvector  $\{-dP_x^{ii}\}$ , en vervolgens een berekeningsrun met  $[K^5]$ , waarin alleen element  $m$  ontbreekt, en een belastingvector  $\{+dP_x^{ii}\}$ . De verkregen oplossingen worden opgeteld bij de vorige iteratie:

$$\{u_x^{ii}\} = \{u_x^{ii-1}\} + \{du_x^{ii,1}\} - [K] \times \{dP_x^{ii}\} + [K^5] \times \{dP_x^{ii}\}$$

Tabel 5: Stroomschema inzake no-tension elementen in KlemSteen



In de linker stroomtak (grijs) wordt het verwijderen van een element gedaan, al dan niet voor de eerste maal. Rechts het terugplaatsen van een element dat in vorige tijdstap trek gaf gedaan.



### 3 BESCHRIJVING PRE-IMPLEMENTATIE

#### 3.1 Structuur en output pre-implementatie mechanica model

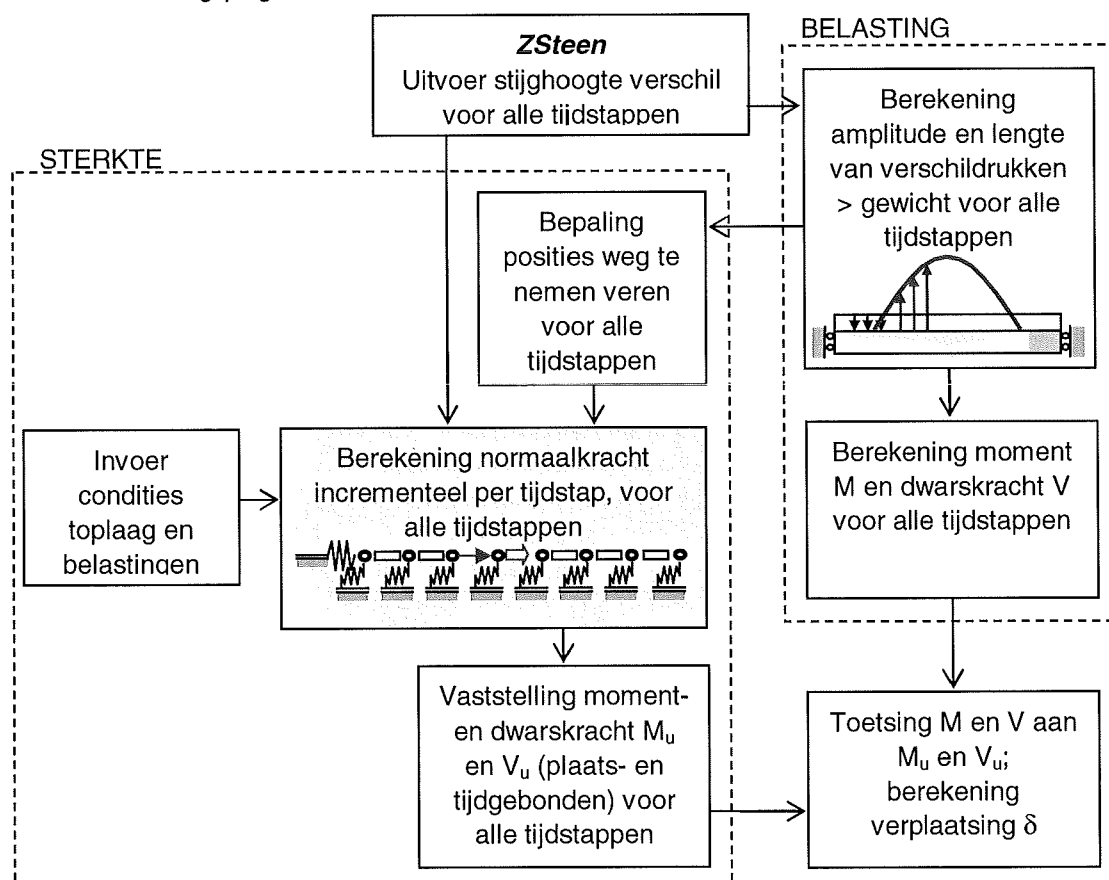
De in paragraaf 2.1 gepresenteerde basis structuur, met een zoveel mogelijk gescheiden evaluatie van de sterkte en van de belasting, is nader uitgewerkt in tabel 6. De verschillende stappen in de bepalingen zijn genummerd in modules.

Het 'rekenhart' bevindt zich in de in kleur aangegeven modules. In het rekenhart van het spoor 'sterkte' wordt de normaalkracht bepaald met behulp van de in hoofdstuk 2 beschreven axiale liggertheorie. Input voor deze module zijn de geometrie en fysische eigenschappen van het systeem, de golfkrachten  $P_x$  en informatie over het zweven van de toplaag als gevolg van  $P_z > G_z$ .

In het rekenhart van het spoor 'belasting' wordt het 'zweven' van de toplaag voor elke tijdstap bepaald, en met de formules uit [Peters 2004] worden de inwendige krachten berekend uit de krachten  $P_z$  en  $G_z$ .

De bewerkingen die plaatsvinden in de modules zijn beschreven in de navolgende paragrafen. De modules zijn uitgeschreven in het Visual Basic-programma Klemsteen. De geprogrammeerde structuur wordt meer in detail beschreven in bijlage 2. Voorbeelden van de grafische uitvoer zijn gegeven in hoofdstuk 4.

Tabel 6: Structuur geprogrammeerde mechanica module KlemSteen



De berekening van de normaalkracht is te onderscheiden in oplossingen voor de normaalkracht veroorzaakt door de gewichtskrachten en door de golfkrachten.

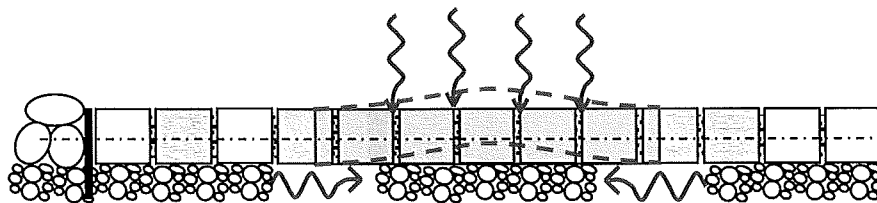
### 3.2 Structuur implementatie mechanica in ZSteen

In ZSteen worden de hydraulische belastingen boven en onder de toplaag per tijdstap berekend. Vervolgens wordt er voor de tijdstappen waar instabiliteit blijkt een iteratie uitgevoerd waarbij de steenbeweging wordt berekend samen met reductie van de belasting door effecten van vertraagde toestroming en traagheid van de steen. Voor de mechanische stabiliteit van de losse steen is dat een goede en noodzakelijke werkwijze, omdat de losse steen niet in evenwicht is en gedurende de tijdstap versneld beweegt.

Bij de implementatie van Klemsteen in ZSteen kan de hydraulische berekening en de mechanica berekening per tijdstap na elkaar worden uitgevoerd. Het is niet goed mogelijk om ergens op een willekeurige tijdstap een oplossing te berekenen. ZSteen zowel als KlemSteen hebben de belastinghistorie nodig om correcte oplossingen voor een tijdstap te berekenen. Vanwege de systeemveranderingen door het wegnemen van veren is het resultaat van de vorige tijdstap telkens nodig om tot een goede correcte oplossing voor een nieuwe tijdstap te komen. De berekening binnen de tijdstap gebeurt zo nodig iteratief. De normaalkrachten worden per element, per tijdstap bewaard. Vervolgens wordt er uit het bekende verloop van de stijghoogte voor alle tijdstappen de optredende momenten en dwarskrachten bepaald. Deze worden vervolgens getoetst aan de op de betreffende plaats en tijd aanwezige normaalkracht, die zowel voor moment als dwarskracht de sterkte levert. Op deze wijze is er voor elke tijdstap een toets of er evenwicht is of niet. De eis is dat er evenwicht moet zijn. Anders dan bij de losse steen is er in een tijdstap met  $\Phi > \Delta D$ , geen versnelde beweging van de steen, maar een subtiele beweging van het systeem van de ene naar de andere evenwichtstoestand.

Traagheidskrachten, die er altijd zijn, bepalen slechts met hoeveel tijdsvertraging de constructie vervormt naar de evenwichtstoestand van de volgende tijdstap. De traagheid heeft niet een significant belastingreducerend effect. De tijdstappen in de onderzochte files hebben een tijdstap van  $t = 0.03$  à  $0.07$  sec. De trillingstijd  $T$  van het bewegende deel van de toplaag is, afhankelijk van de grootte van de belaste lengte en de grootte van de vervorming circa  $0.2$  à  $0.5$  sec. De verhouding  $t / T = 0.06$  à  $0.35$ . Indien we aannemen dat de hydraulische belasting een blokvorm heeft in het tijdsdomein, dan geldt dat belastingen onder de  $t / T = 0.15$  een dynamische amplificatie geven kleiner dan  $1.0$  en boven de  $0.15$  groter dan  $1.0$ . Met  $t / T = 0.06$  à  $0.35$  is de dynamische amplificatie maximaal  $1.6$ . Bij een maatgevende belasting over twee of drie tijdstappen wordt  $t / T = 0.18$  à  $1.05$ . De belasting heeft in het tijdsdomein over het grotere aantal tijdstappen echter geen blokvorm, maar een zaagtandvorm. Dan wordt voor de dynamische amplificatie ook een waarde van maximaal circa  $1.6$  gevonden.

Bij de vervorming van een geklemde toplaag zullen er altijd meerdere elementen tegelijk bewegen. Toestroming van water om de holte te vullen, die onder de toplaag ontstaat bij opwaarts bewegen, zal kunnen geschieden horizontaal door het filter, maar ook verticaal door de spleten (zie figuur 26). Toestroming naar een platte holte zal veel sneller verlopen dan toestroming naar een compacte holte onder één steen.



Figuur 26: Toestroming bij vervorming

Tabel 7: Voorgestelde structuur implementatie in ZSteen



### 3.3 Berekening capaciteit buigligger

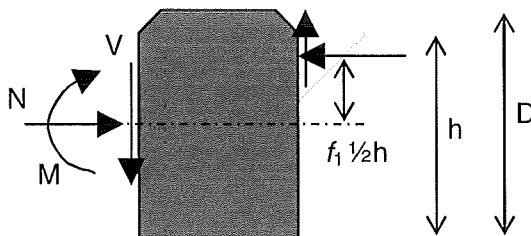
Na berekening van de normaalkrachten conform de beschrijving in hoofdstuk 2 volgt de stap van de toplaag als axiaal staafstelsel naar een stelsel met de doorsnedegrootheden van een buigligger.

Conform het model zijn de capaciteit voor het moment en de dwarskracht van de buigligger afhankelijk van de normaalkracht. Hiervoor worden de formules uit [Peters, 2004] gebruikt.

$$M_u = f_1 \times N \times \frac{1}{2}h$$

$$V_u = f_2 \times N$$

met  $f_1$  = reductiefactor op inwendig hefboom = 0.7  
 met  $f_2$  = wrijvingscoëfficiënt tussen stenen = 0.55  
 met  $h$  = contacthoogte stenen =  $f_3 \times D$ , met  $f_3 = 0.9$



Figuur 27: Capaciteit buigend moment en dwarskracht

De factor  $f_3$  is theoretisch afhankelijk van de normaalkracht. Hoe groter de normaalkracht, hoe kleiner  $f_3$ . Vooral bij overdracht van drukspanningen door (los) voegmateriaal is deze afhankelijkheid reëel. Bij ontbreken van voegmateriaal en/of bij afdracht van drukspanningen via de aanliggende randen van toplaagelementen is  $f_3$  constant (en praktisch vrijwel gelijk aan 1.0). De defaultwaarde  $f_3 = 0.9$  in de pre-implementation is een praktische benadering en een veilige schatting. Bij hoge normaalkrachten in voegen met contactspanningen die via los materiaal worden overgedragen, is de werkelijke waarde van  $f_3$  mogelijk kleiner. Zie ook paragraaf 4.2.

Het resultaat van deze berekeningstap is een maximaal opneembaar moment en een maximaal opneembare dwarskracht per tijdstap per element.

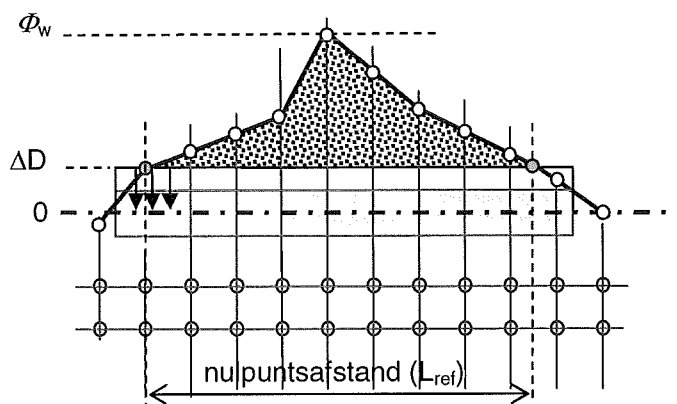
### 3.4 Berekening maatgevende verschildrukken

De rechterhelft van de structuur van tabel 6 ('belasting') start met de berekening van de krachten in z-richting (loodrecht op het talud). De basis voor berekening van de maatgevende verschildrukken is de ZSteen uitvoer van de stijghoogtes per gridpunt per tijdstap.

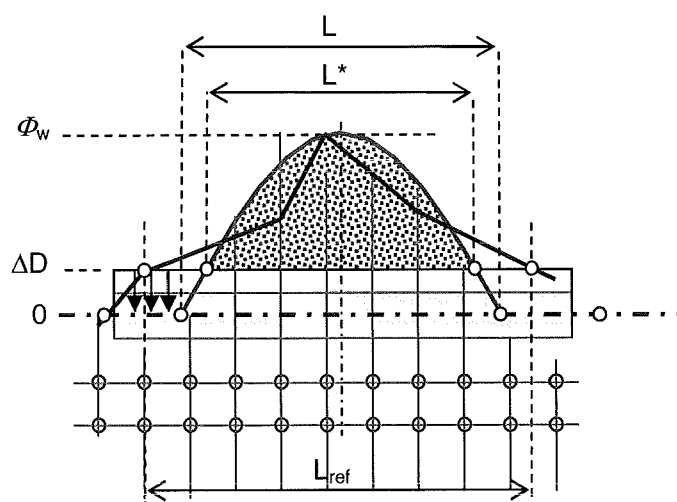
Het verschil van tussen de belastingen  $q_w$  en  $q_s$  wordt berekend. Als de opwaarts gerichte  $q_w$  een zodanig grote waarde heeft dat  $q_s - q_w < 0$ , dan is er sprake van uplift. Alleen deze resulterende negatieve waarden zijn relevant.



Per tijdstap wordt de grootste negatieve waarde van de druk bepaald en worden de negatieve drukken ter weerszijden van de piekwaarde geïntegreerd. Dit geschiedt over het gebied dat ter weerszijden begrensd wordt door de dichtstbijzijnde nulwaarde.



**Figuur 28:** Definitiediagram integraal opwaarts drukverschil (in termen van stijhoogtes), het paarse signaal is het verschil tussen het rode en groene signaal in figuur 16



**Figuur 29:** Definitiediagram geschematiseerd drukverloop; het oppervlak van het gearceerde gedeelte komt overeen met dat van figuur 28

De integraal wordt omgerekend naar een equivalente sinusbelasting die refereert aan het sinusvormige drukverloop met model parameters amplitude  $q_w$  en (in x-richting gemeten) lengte  $L$ . De amplitude van de sinusvorm wordt gelijk gekozen aan piekwaarde  $\Phi_w$  van de ZSteen belasting. De lengte  $L$  volgt uit gelijkstelling van de integraal van de afgesnotten sinusverdeling met de integraal van de ZSteen belasting.

$$h(z) = \Phi_w \cos \pi \frac{x}{L}$$

$$\int_{-\frac{1}{2}L^*}^{\frac{1}{2}L^*} (h(z) - \Delta D) dx$$

De geschatte waarde van de integraal bedraagt  $\frac{2}{\pi} (\Phi_w - \Delta D) L^*$ .

Voor  $\Phi_w / \Delta D \gg 1$  is deze waarde exact.

De formules voor het grootste stijghoogte verschil, de druk en de belastingfactor zijn als volgt:

$$\Phi_w = | \min (h_{\text{golf}} - h_{\text{bedding}}) | \text{ [m]}$$

$$q_w = \rho g \Phi_w \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$$q_s = \rho g \Delta D \cos \alpha \text{ [N/m}^2\text{]}$$

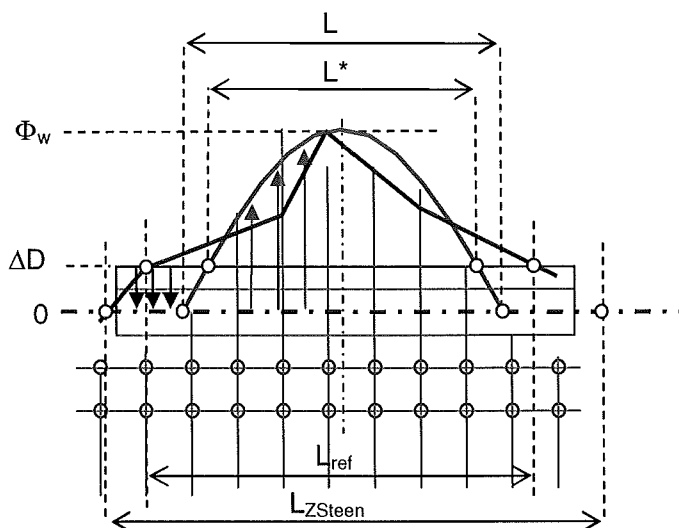
$$\frac{q_w}{q_s} = \frac{\Phi_w}{\Delta D \cos \alpha}, \text{ waarin } \cos \alpha \text{ in de praktijk meestal gelijk wordt genomen aan 1.}$$

Bovenstaande definitie moet worden aangehouden. Bij definitie van  $q_w = \rho g (\Phi_w + D)$  en  $q_s = \rho_s g D$ , is het verschil  $q_w - q_s$  gelijk, maar het quotiënt afwijkend.

Het resultaat van deze bepalingen zijn de parameters (dimensieloos:)  $\Phi_w / \Delta D \cos \alpha$  en  $L / D$  per tijdstep, als mede de locatie van de piek.

Om inzicht te krijgen in welke mate de belastingschematisering met de sinus overeenkomt met het door ZSteen berekende drukverloop, wordt het verschil tussen het berekende belasting verloop en het geschematiseerde uitgedrukt met een parameter voor de scheefheid en een parameter voor de mate van geconcentreerdheid van de belasting. De werkwijze bij bepaling van de geschematiseerde belasting en de registratie van de afwijkingen middels de genoemde parameters is weergegeven in twee definitiediagrammen, figuur 30 en 31.






Het paarse verloop in figuur 30 is een voorbeeld van een verschildruksignaal uit ZSteen. De nulpunten ter weerszijden van een gebied met een opwaarts gericht drukverschil bevinden zich op een afstand  $L_{\text{ZSteen}}$  van elkaar. Van het ZSteen verschildruksignaal wordt het eigen gewicht van de toplaag  $(\rho_s - \rho) g D$  afgetrokken. De nulpuntsafstand in het overblijvende signaal is  $L_{\text{ref}}$ . De schematisatie in de vorm van het blauwe sinusvormige verloop wordt bepaald uit integratie van het overblijvende signaal tussen de nulpunten. Dit oppervlak is gelijk aan het oppervlak van het afgesnoten sinussignaal met piek  $q_w - q_s$  en nulpuntsafstand  $L^*$ . Het sinussignaal kan vervolgens worden geëxtrapoleerd naar de nullijn, waardoor de nulpuntsafstand  $L$  wordt gevonden.



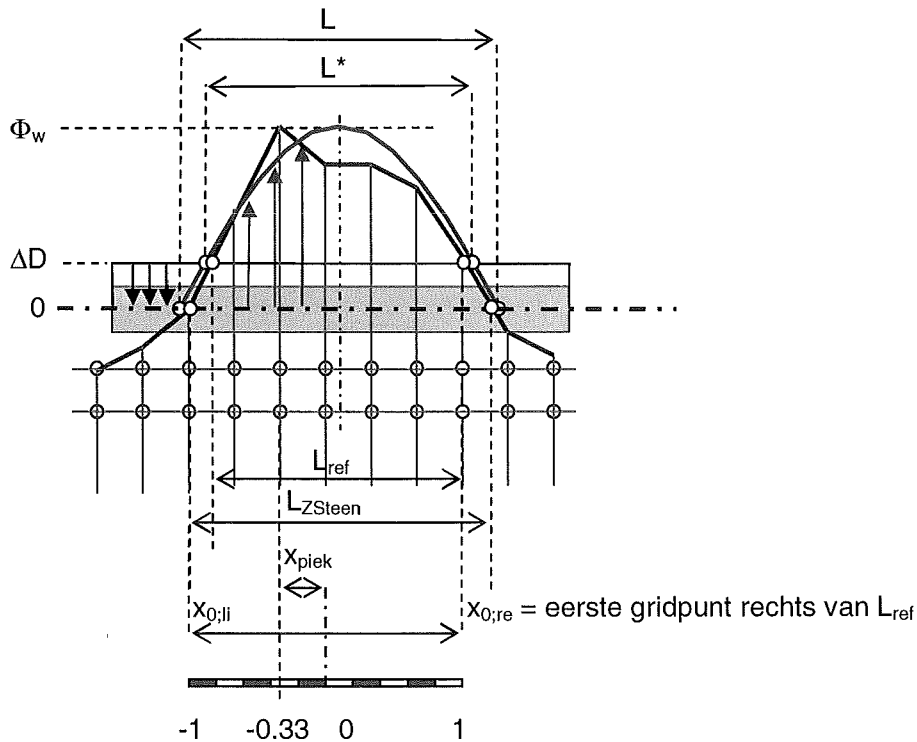
**Figuur 30: Definitiediagram piekparameter**

De parameter  $L^* / L_{ref}$  is een maat voor geconcentreerdheid van het ZSteen signaal. Indien  $L^* / L_{ref} = 1$  dan is de door ZSteen berekende belasting ongeveer sinusvormig, indien  $L^* / L_{ref} > 1$  dan neigt het ZSteen signaal naar een blokvorm, indien  $L^* / L_{ref} < 1$  dan neigt het ZSteen signaal naar een driehoeksvorm, al dan niet met een sterke lokale piek.

Tabel 8: Karakteristieke waarden piekparameter

| ZSteen signaal   | Schema   | $L^* / L_{ref}$          |
|--|--|--------------------------|
| blok      | <br>sinus | $\frac{1}{2} \pi = 1.57$ |
| sinus     |  | 1.0                      |
| driehoek  |  | $\frac{1}{4} \pi = 0.79$ |
| piek      |  | 0.5 à 0.6                |

De positie van het geschematiseerde belasting signaal wordt afgeleid uit de positie van de nulpunten. Dat betekent dat de positie van het maximum van de sinus niet altijd samenvalt met de positie van de piek van het ZSteen signaal. De afwijking van de piek van het ZSteen signaal ten opzichte van het midden van de afstand  $L_{ZSteen}$  tussen de twee nulpunten wordt beschreven met de scheefheidparameter:  $x_{piek} / \frac{1}{2} L_{ZSteen}$ , waarin  $x_{piek}$  het verschil tussen de x-coördinaat van de piek en die van het midden van de afstand tussen de nulpunten. De scheefheidparameter kan daarmee zowel positief als negatief zijn.



**Figuur 31: Definitiediagramm schieffheidfactor met schaalbalk voor de schieffheidparameter  $x_{piek} / \frac{1}{2} L_{ZSteen}$**

Indien  $x_{piek} / \frac{1}{2} L_{ZSteen} = 0$  dan valt de piek van het ZSteen signaal samen met de piek van de geschematiseerde sinus.

Indien  $x_{piek} / \frac{1}{2} L_{ZSteen} < 0$ , dan is het ZSteen signaal schief verdeeld en bevindt de piek zich dichterbij de teen van het talud. Indien  $x_{piek} / \frac{1}{2} L_{ZSteen} > 0$  bevindt de piek zich verder van de teen.

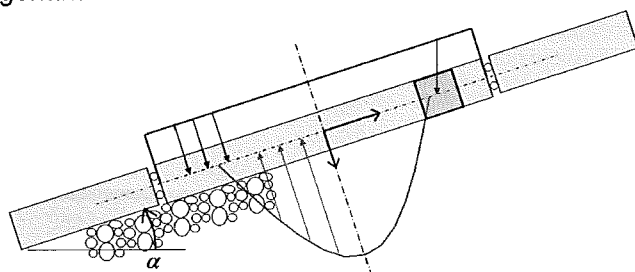
In de tabel op de volgende bladzijde zijn als voorbeeld voor een willekeurige ZSteen uitvoer per relevante tijdstap de waarden van de verschillende parameters gepresenteerd.



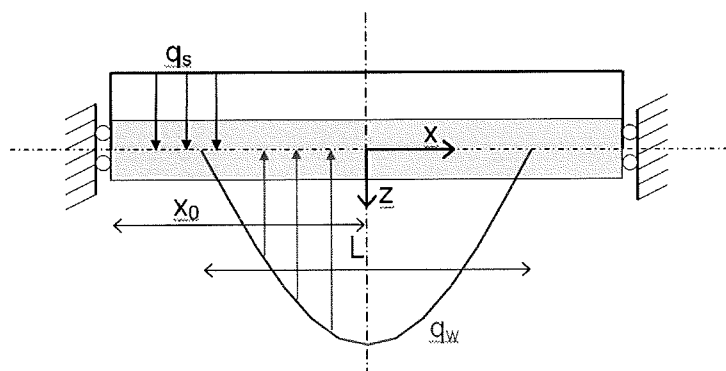


### 3.5 Berekening optredende momenten en dwarskrachten

De inwendige krachten in de toplaag worden berekend uit het de parameters van de geschematiseerde belasting. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de formules uit [Peters, 2004]. In [Peters, 2007] wordt een verder uitgewerkte schematisering gehanteerd.



Figuur 32: Positie model in talud



Figuur 33: Definitiediagram bezwijkmodel

De opwaartse waterbelasting

$$q_w(x) = q_w \cos \frac{\pi x}{L} \text{ voor } -\frac{1}{2}L < x < \frac{1}{2}L$$

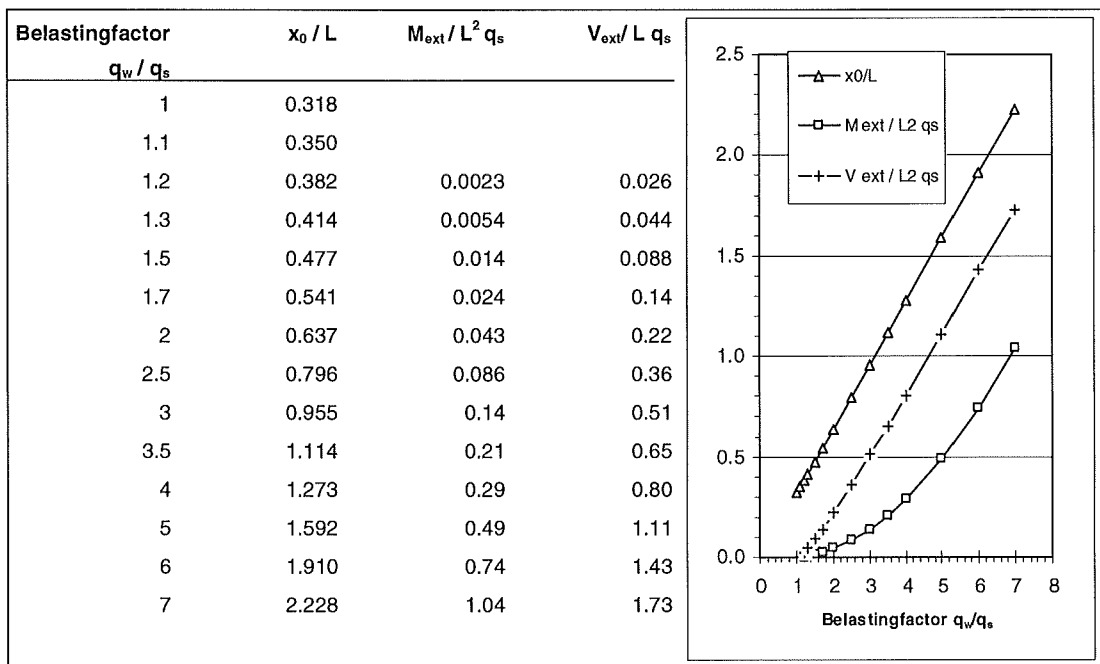
Het optredende moment is:

$$\begin{aligned} \frac{M_{ext}}{q_s L^2} &= 0 && \text{voor } \frac{q_w}{q_s} \leq 1 \\ &= \frac{q_w - 1}{\frac{1}{2}\pi - 1} \left( \frac{1}{4\pi} - \frac{1}{16} \right) && \text{voor } 1 < \frac{q_w}{q_s} < \frac{1}{2}\pi \\ &= \left( \frac{1}{2\pi^2} - \frac{1}{4\pi} \right) \frac{q_w}{q_s} + \frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{q_w}{q_s} \right)^2 && \text{voor } \frac{q_w}{q_s} \geq \frac{1}{2}\pi \end{aligned}$$

De optredende dwarskracht is:

$$\begin{aligned} \frac{V_{ext}}{q_s L} &= 0 && \text{voor } \frac{q_w}{q_s} < \frac{1}{2}\pi \\ \frac{V_{ext}}{q_s L} &= \frac{1}{\pi} \frac{q_w}{q_s} - \frac{1}{2} && \text{voor } \frac{q_w}{q_s} \geq \frac{1}{2}\pi \end{aligned}$$

Tabel 10: Modelberekeningen buigend moment en dwarskracht als functie van  $q_w/q_s$





### 3.6 Toetsing evenwicht en berekening beweging

Het oordeel over de stabiliteit van de toplaag kan worden gevormd door de resultaten van de optredende momenten en dwarskrachten te vergelijken met de capaciteit. Ook de opwaartse verplaatsing wordt getoetst.

Bij toetsen van de sterkte van de geklemde toplaag gelden de eisen  $M_{ext} < M_u$  en  $V_{ext} < V_u$ . De berekening van  $M_{ext}$ ,  $V_{ext}$ ,  $M_u$  en  $V_u$  is beschreven in paragraaf 3.5 en 3.4. De stabiliteitsgetallen worden uitgedrukt in zogenaamde unity-checks op het moment en de dwarskracht.

$$\frac{M_{ext}}{M_u} < 1; \quad \frac{V_{ext}}{V_u} < 1$$

Naast deze sterktecriteria moet ook worden voldaan aan een vervormingscriterium. De achterliggende redenen hiervoor zijn:

- Voorkomen van migratie van het filter:  $\delta < D_{50;F}$ .
- Voorkomen van verzwakking van de toplaag door afname van de sterkte en stijfheid bij herhaalde belasting

Voor een criterium voor de opwaartse verplaatsing wordt gebruik gemaakt van de meetresultaten uit [Peters, 2004]. Belastingwaarden met gelijke verplaatsing  $\delta / D$  zijn te beschrijven met:

$$\frac{\Phi_w}{\Delta D} = 1 + f_4 \left( \frac{L}{D} \right)^{f_5}$$

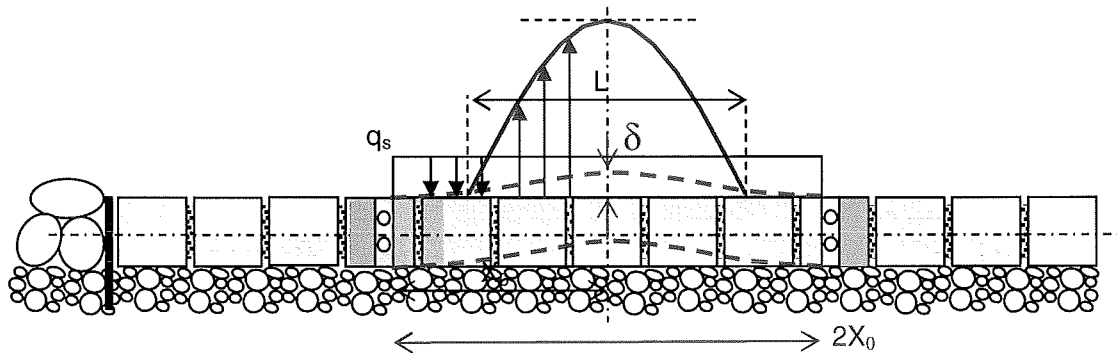
met  $f_4$  en  $f_5$  afhankelijk van type toplaagelement, en afhankelijk van normaalkracht. Op basis van de meetresultaten van de veldproeven kan een aanbeveling van de vervorming worden gedaan. Geschatte waarden voor Hydroblocks bij  $\delta / D = 0.07$  zijn:  $f_4 = 6$  en  $f_5 = -0.8$ . Deze waarden kunnen voor toepassing in dit model lineair worden geïnterpoleerd tussen 0 en 0.07 D en kunnen worden geëxtrapoleerd tot circa 0.1 D.

De verplaatsing wordt relatief ten opzichte van de toplaagdikte gepresenteerd. De toetswaarde voor  $\delta$  bedraagt tot nader inzicht 0.1 D.

$$\frac{\delta}{D} \leq 0.1$$

$$\frac{\delta}{D} = 0.07 \frac{\frac{\Phi_w}{\Delta D}}{1 + f_4 \left( \frac{L}{D} \right)^{f_5}} \leq 0.1$$

De maximale verplaatsing  $\delta$  in [m] moet worden gecombineerd een sinusvormfunctie voor de verplaatsing van de omliggende stenen (zie figuur 34).



Figuur 34: Definitiefiguur vormfunctie verplaatsing

De data waar de bepaling van de parameters op zijn gebaseerd zijn beperkt in aantal. Vergaring van meer meetwaarden is gepland. Vooralsnog worden voor alle typen toplaagelementen deze waarden aangehouden.

## 4 BESCHRIJVING EVALUATIE

### 4.1 Beschrijving te evalueren gevallen

Voor de te evalueren cases wordt gebruik gemaakt van een aantal constructies die variëren voor wat betreft de belasting en de hydraulische eigenschappen.

De mechanische eigenschappen van de constructies worden constant gehouden.

De veerstijfheid van de teen  $K_{\text{teen}} = 10^6 \text{ N/m}^2$ .

De E-modulus van de toplaag is  $30 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ , waarmee de axiale stijfheid van de toplaag  $EDB_y = 7.5 \times 10^6 \text{ N}$ , met  $d = 0.25 \text{ m}$  en  $B_y = 1 \text{ m}$ .

De schuif-veerstijfheid van de filterlaag  $k_x = 60 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ .

Er wordt geen overgangsconstructie of boogwerking in gevoerd.

De stijghoogteverschillen voor de te evalueren cases worden berekend door de constructies te onderwerpen aan een toetsberekening in ZSteen. Het programma zoekt zelf een passend golfbestand. Het programma introduceert gridpunten in de voegen, gerekend vanaf de teen tot aan het punt waar er golfdruk op het talud gemeten wordt. Dit aantal gridpunten kan verschillen per tijdstap. Klemsteen zoekt het maximale aantal gridpunten in een set van tijdstappen en neemt dit aantal als constante voor het bepalen van het aantal knopen van het mechanicamodel. In Klemsteen is er de mogelijkheid om boven dit niveau nog extra stenen toe te voegen. Bij de testberekeningen is daar geen gebruik van gemaakt.

Er worden twee typen toplaag constructies onderzocht die in de standaard bibliotheek van ZSteen voorkomen, een blokken- en een zuilenbekleding, te weten: Haringmanblokken en Hydroblocks. De bekledingsdikte is 0.25 m. Voor de zuilenbekleding is de breedte maat 0.3 m. Voor Haringman blokken is deze maat 0.5 m. De maat  $B_x$  is in de richting tegen het talud op (x-richting). In de richting langs de dijk (y-richting) wordt voor de breedte van de ligger van toplaagelementen  $B_y$  1 m gerekend. Hiervoor kan in het de berekening een strook van een steen worden gekozen.

Tabel 11: Eigenschappen toplaag

|                  | volumieke<br>massa $\rho_s$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Dikte $D$<br>[m] | Zuilopper-<br>vlak $A$<br>[m <sup>2</sup> ] | Breedte $B_x$<br>[m] |                   |
|------------------|---|------------------|---|----------------------|-------------------|
| Haringmanblokken | 2350  | 0.25             |   | 0.5                  | Voeg = 5 mm       |
| Hydroblocks      | 2350  | 0.25             | 0.09  | 0.3                  | Open ruimte = 12% |

Tabel 12: Eigenschappen filter en voegvulling

|                       | Laagdikte $b_f$<br>[m] | Korrel $D_{15}$<br>[m] | Porositeit $n$ |
|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| Filter steenslag fijn | 0.5                    | 0.015                  | 0.3            |
| Filter steenslag grof | 0.5                    | 0.025                  | 0.4            |
| Voegvulling           |                        | 0.005                  | 0.6            |

Voor het stil water niveau zou in een realistisch geval 4 m kunnen worden gekozen. Er is bij de test gekozen voor 3 m. Het aantal gridpunten tot de teen op 0.0 + Ref is dan kleiner. Bij de gekozen golfhoogtes treden er geen maatgevende stijghoogte verschillen op ter plaatse van de onderste blokken.



**Tabel 13: Testbelastingen berekend met Anamos**
 $SWL = h_1 = 3.0 \text{ m}$ 
 $Niveau \text{ teen } h_2 = 0.0 \text{ m}$ 
 $Niveau \text{ top talud } h_3 = 8.0 \text{ m}$ 
 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 
 $\rho_s = 2350 \text{ kg/m}^3$ 
 $\Gamma_{klem} = 1.0$ 

| Case | $H_s$<br>[m] | $T_p$<br>[s] | helling<br>$\cot \alpha$ | toplaag<br>D [m] | zuil | $A_z$<br>[m <sup>2</sup> ] | $A_{ro}$  | inwasmateriaal   |     | Filter |                   |       | golf<br>steil-<br>heid<br>$S_o$ | breker<br>$\xi_{op}$ | lek<br>$\Lambda$<br>[m] | stabiliteit F | stijghoogte-<br>verschil<br>$\Phi_w / \Delta D$ |
|------|--------------|--------------|--------------------------|------------------|------|----------------------------|-----------|------------------|-----|--------|-------------------|-------|---------------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|---|
|      |              |              |                          |                  | blok | B<br>[m]                   | s<br>[mm] | $D_{15}$<br>[mm] | n   | $b_F$  | $D_{15F}$<br>[mm] | $n_F$ |                                 |                      |                         |               |   |
| 1    | 1.7          | 5.5          | 5                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.036                           | 1.05                 | 0.51                    | 5.4           | 1.1   |
| 2    | 1.7          | 5.5          | 5                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.036                           | 1.05                 | 1.05                    | 5.4           | 1.5   |
| 3    | 1.7          | 5.5          | 5                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.036                           | 1.05                 | 1.42                    | 5.4           | 1.8   |
| 4    | 1.7          | 5.5          | 5                        | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.036                           | 1.05                 | 1.05                    | 5.4           | 1.5   |
| 5    | 1.7          | 5.5          | 5                        | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.036                           | 1.05                 | 1.26                    | 5.4           | 1.7   |
| 6    | 2.2          | 7.0          | 5                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.029                           | 1.18                 | 0.51                    | 7.6           | 1.3   |
| 7    | 2.2          | 7.0          | 5                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.029                           | 1.18                 | 1.05                    | 7.6           | 1.7   |
| 8    | 2.2          | 7.0          | 5                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.029                           | 1.18                 | 1.42                    | 7.6           | 2.0   |
| 9    | 2.2          | 7.0          | 5                        | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.029                           | 1.18                 | 1.05                    | 7.6           | 1.7   |
| 10   | 2.2          | 7.0          | 5                        | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.029                           | 1.18                 | 1.26                    | 7.6           | 1.9   |
| 11   | 2.2          | 6.5          | 4                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.033                           | 1.37                 | 0.51                    | 8.3           | 1.4   |
| 12   | 2.2          | 6.5          | 4                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.033                           | 1.37                 | 1.05                    | 8.3           | 1.9   |
| 13   | 2.2          | 6.5          | 4                        | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.033                           | 1.37                 | 1.42                    | 8.3           | 2.2   |
| 14   | 2.2          | 6.5          | 4                        | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.033                           | 1.37                 | 1.05                    | 8.3           | 1.9   |
| 15   | 2.2          | 6.5          | 4                        | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.033                           | 1.37                 | 1.26                    | 8.3           | 2.0   |
| 16   | 2.2          | 8.0          | 3.5                      | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.022                           | 1.92                 | 0.51                    | 10.5          | 1.6   |
| 17   | 2.2          | 8.0          | 3.5                      | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.022                           | 1.92                 | 1.05                    | 10.5          | 2.2   |
| 18   | 2.2          | 8.0          | 3.5                      | 0.25             | zuil | 0.09                       | 12%       | 5                | 0.6 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.022                           | 1.92                 | 1.42                    | 10.5          | 2.4   |
| 19   | 2.2          | 8.0          | 3.5                      | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 15                | 0.3   | 0.022                           | 1.92                 | 1.05                    | 10.5          | 2.2   |
| 20   | 2.2          | 8.0          | 3.5                      | 0.25             | blok | 0.5                        | 5         | geen             | 1.0 | 0.5    | 25                | 0.4   | 0.022                           | 1.92                 | 1.26                    | 10.5          | 2.3   |



Op deze wijze ontstaan er vijf constructietypen, weergegeven in tabel 14.

Tabel 14: Invoer gegevens toplaagconstructies

|   | Blok/zuilttype | Filter | Voegvulling | Leklengte [m]<br>(berekend in Anamos) |
|---|----------------|--------|-------------|---------------------------------------|
| 1 | Zuilen         | Fijn   | Nee         | 0.51                                  |
| 2 | Zuilen         | Fijn   | Ja          | 1.05                                  |
| 3 | Zuilen         | Grof   | Ja          | 1.42                                  |
| 4 | Haringblokken  | Fijn   | Nee         | 1.05                                  |
| 5 | Haringblokken  | Grof   | Ja          | 1.26                                  |

De vijf bekledingsconstructies worden elk toegepast in enige belastingsituaties. De taludhelling wordt gevarieerd door deze 1:3½, 1:4 en 1:5 te maken. ZSteen heeft geen golfbestanden voor taluds flauwer dan 1:4, maar voor KlemSteen is een flauwer talud toch relevant. De stil waterlijn wordt op +3.0 m ref gehouden. Onderzijde talud op 0.0 m ref en bovenzijde op +5.0 m ref. Voor de golfhoogte  $H_s$  wordt aangehouden 1.7 en 2.2 m. Met periode  $T_p$  tussen de 5.5 en 8.0 sec. Conform de bevindingen in het Deltagoorrapport [Klein Breteler, 2000] is bij een leklengte  $\Lambda < 0.5$  à 0.7 m en een brekerparameter  $\xi_{op} < 2.0$  à 2.5 een krachtige golfklap te verwachten.

Tabel 15: Invoergegevens en door ZSteen gebruikt golfbestand

| Case | helling<br>cot $\alpha$ | breker<br>$\xi_{op}$ | leklengte<br>$\Lambda$<br>[m] | kans op<br>golfklap? | golfbestand                       |
|------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1    | 5                       | 1.05                 | 0.51                          | ja                   | T400K107.gef                      |
| 2    | 5                       | 1.05                 | 1.05                          | ja                   |                                   |
| 3    | 5                       | 1.05                 | 1.42                          |                      |                                   |
| 4    | 5                       | 1.05                 | 1.05                          | ja                   |                                   |
| 5    | 5                       | 1.05                 | 1.26                          |                      |                                   |
| 6    | 5                       | 1.18                 | 0.51                          | ja                   | T400K119.gef<br>4877 tijdstappen  |
| 7    | 5                       | 1.18                 | 1.05                          | ja                   |                                   |
| 8    | 5                       | 1.18                 | 1.42                          |                      |                                   |
| 9    | 5                       | 1.18                 | 1.05                          | ja                   |                                   |
| 10   | 5                       | 1.18                 | 1.26                          |                      |                                   |
| 11   | 4                       | 1.37                 | 0.51                          | ja                   | T400K140.gef<br>6108 tijdstappen  |
| 12   | 4                       | 1.37                 | 1.05                          |                      |                                   |
| 13   | 4                       | 1.37                 | 1.42                          |                      |                                   |
| 14   | 4                       | 1.37                 | 1.05                          |                      |                                   |
| 15   | 4                       | 1.37                 | 1.26                          |                      |                                   |
| 16   | 3.5                     | 1.92                 | 0.51                          |                      | T350K192.gef<br>19414 tijdstappen |
| 17   | 3.5                     | 1.92                 | 1.05                          |                      |                                   |
| 18   | 3.5                     | 1.92                 | 1.42                          |                      |                                   |
| 19   | 3.5                     | 1.92                 | 1.05                          |                      |                                   |
| 20   | 3.5                     | 1.92                 | 1.26                          |                      |                                   |

De in tabel 15 met blauw aangegeven regels worden met ZSteen en met Klemsteen nagerekend.

## 4.2 Berekeningsresultaten waterdrukken

Inlezen en aftoppen van de stijghoogteverschillen van ZSteen geeft per tijdstap een piekwaarde en een lengte. In tabel 16 zijn de door ZSteen berekende maximale stijghoogte verschillen gegeven, als ook de lengte waarover ze optreden. Dit is vergeleken met Anamos resultaten.

De piekwaarde van het stijghoogteverschil in Anamos is een waarde op één punt. Het weergegeven maximale stijghoogteverschil berekend met ZSteen/Klemsteen is het gemiddelde werkend over een steen.

De lengte L waarover in Anamos een stijghoogte verschil groter dan  $\Delta D$  optreedt wordt indicatief berekend uit:

$$L = \frac{\Phi_w - \Delta D}{\Phi_w} (d_s \times (\tan \beta - \tan \alpha) + 2 \times \Lambda)$$

In Klemsteen wordt de L berekend volgens de beschrijving in paragraaf 3.4.

Tabel 16: Vergelijking stijghoogte verschillen Anamos en ZSteen/Klemsteen

| Case | Anamos   |               | ZSteen / Klemsteen |                           |               |
|------|----------|---------------|--------------------|---------------------------|---------------|
|      | $\Phi_w$ | $\frac{L}{D}$ | $\Phi_w$           | $\frac{\Phi_w}{\Delta D}$ | $\frac{L}{D}$ |
| 1    | 0.36     | 0.4           |                    |                           |               |
| 2    | 0.51     | 3.6           |                    |                           |               |
| 3    | 0.61     | 6.0           |                    |                           |               |
| 4    | 0.51     | 3.6           |                    |                           |               |
| 5    | 0.57     | 4.9           |                    |                           |               |
| 6    | 0.45     | 1.9           | 0.83               | 2.5                       | 0.65          |
| 7    | 0.58     | 5.0           | 1.82               | 5.4                       | 2.5           |
| 8    | 0.68     | 7.6           |                    |                           |               |
| 9    | 0.58     | 5.1           | 1.66               | 4.9                       | 4.8           |
| 10   | 0.63     | 6.3           |                    |                           |               |
| 11   | 0.48     | 2.2           | 1.84               | 5.5                       | 1.0           |
| 12   | 0.63     | 5.4           | 2.86               | 8.5                       | 2.2           |
| 13   | 0.74     | 8.0           | 2.79               | 8.3                       | 2.8           |
| 14   | 0.63     | 5.4           | 1.98               | 5.9                       | 3.8           |
| 15   | 0.68     | 6.7           |                    |                           |               |
| 16   | 0.56     | 4.1           |                    |                           |               |
| 17   | 0.73     | 7.9           |                    |                           |               |
| 18   | 0.82     | 10.5          |                    |                           |               |
| 19   | 0.73     | 8.0           | 2.14               | 6.3                       | 4.6           |
| 20   | 0.78     | 9.4           |                    |                           |               |

De test cases 6 en 11 geven geen waarden voor L/D groter dan 1.0 en zijn daarmee niet relevant.

De waarden L/D blijken in dit geval maximaal 5. In berekening met grotere leklengtes, bijvoorbeeld  $\Lambda = 3.5$  m blijkt dat de waarden van L/D hoger kunnen oplopen, bijvoorbeeld tot L/D = 10 à 15.

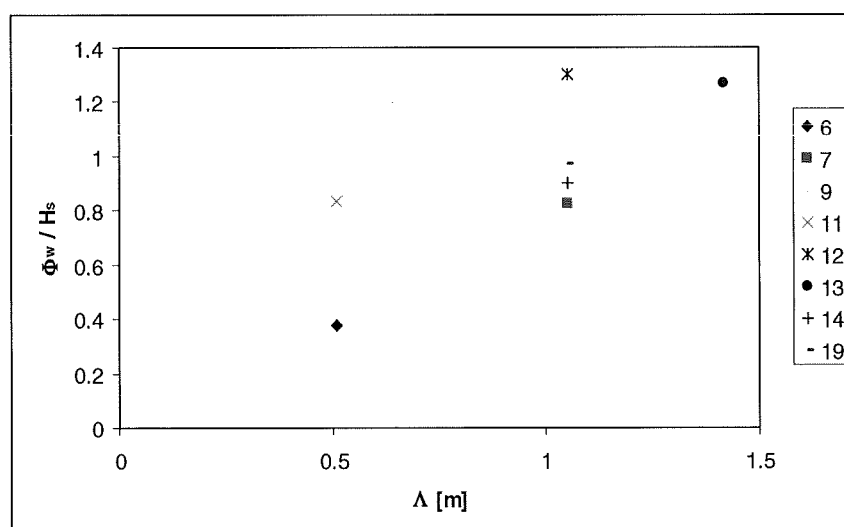


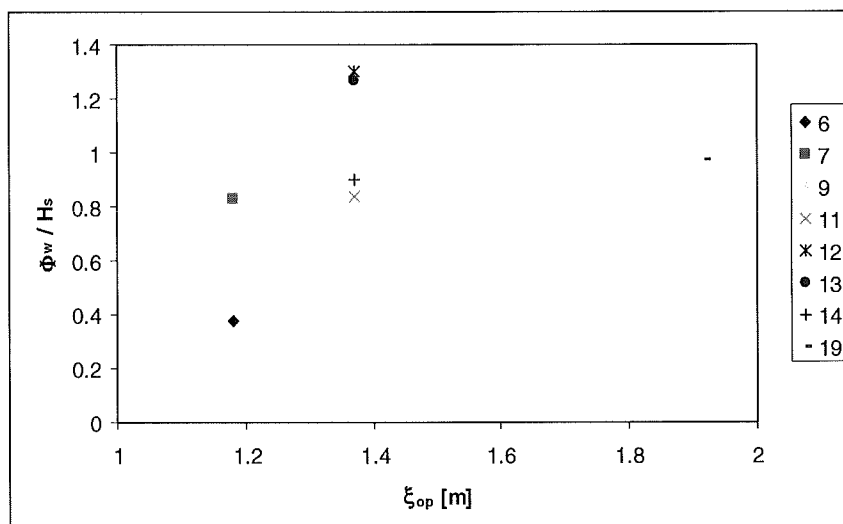
**Tabel 17: Resultaten stijghoogteverschillen**

| Case | maximum $\Phi_w$ [m] | Aantal tijdstappen $\Phi_w > 2 \Delta D$ | idem / totaal aantal tijdstappen | maximum L [m] | Aantal tijdstappen L > 2 D | idem / totaal aantal tijdstappen |
|------|----------------------|--|----------------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------------|
| 6    | 0.83                 | 9  | 0.002                            | 0.16          | 0                          | 0                                |
| 7    | 1.82                 | 485                                      | 0.099                            | 0.62          | 7                          | 0.001                            |
| 9    | 1.67                 | 402                                      | 0.082                            | 1.20          | 270                        | 0.055                            |
| 11   | 1.84                 | 57                                       | 0.009                            | 0.24          | 0                          | 0                                |
| 12   | 2.86                 | 743                                      | 0.122                            | 0.55          | 1                          | 0.0002                           |
| 13   | 2.79                 | 989                                      | 0.162                            | 0.71          | 56                         | 0.009                            |
| 14   | 1.98                 | 591                                      | 0.097                            | 0.94          | 249                        | 0.041                            |
| 17   | 2.14                 | 122                                      | 0.006                            | 1.14          | 108                        | 0.006                            |

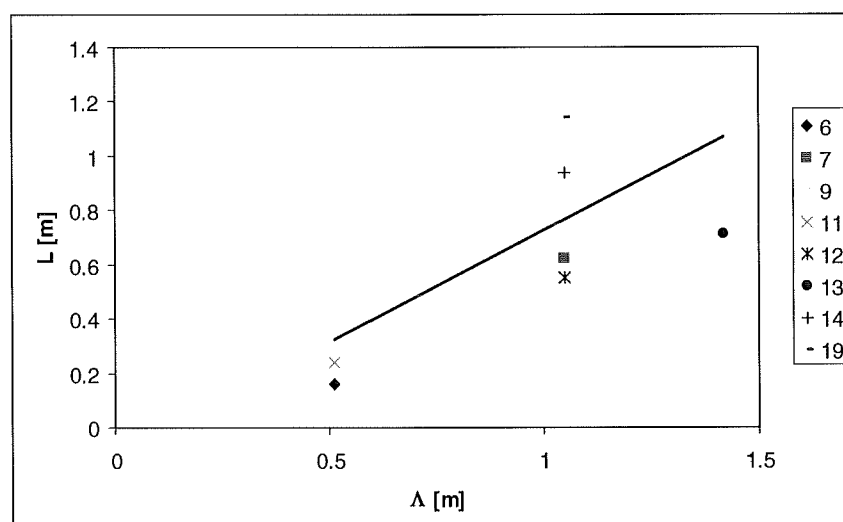
**Tabel 18: Stijghoogteverschillen vergeleken met  $H_s$ , leklengte en brekerparameter**

| Case | $H_s$ | max $\Phi_w$ | max $\frac{\Phi_w}{H_s}$ | $\Lambda$ [m] | $\xi_{op}$ |
|------|-------|--------------|--------------------------|---------------|------------|
| 6    | 2.2   | 0.83         | 0.38                     | 0.51          | 1.18       |
| 7    | 2.2   | 1.82         | 0.83                     | 1.05          | 1.18       |
| 9    | 2.2   | 1.67         | 0.76                     | 1.05          | 1.18       |
| 11   | 2.2   | 1.84         | 0.84                     | 0.51          | 1.37       |
| 12   | 2.2   | 2.86         | 1.30                     | 1.05          | 1.37       |
| 13   | 2.2   | 2.79         | 1.27                     | 1.42          | 1.37       |
| 14   | 2.2   | 1.98         | 0.90                     | 1.05          | 1.37       |
| 17   | 2.2   | 2.14         | 0.97                     | 1.05          | 1.92       |


**Figuur 35: Vergelijking berekend stijghoogteverschil met leklengte**



**Figuur 36: Vergelijking berekend stijhoogteverschil met brekerparameter**



**Figuur 37: Vergelijking berekende belaste lengte L met leklengte**

De berekende maximale stijhoogteverschillen zijn relatief groot. Ze zijn berekend uit de toetsgolfbestanden van ZSteen die een serie van de hoogst gemeten golfdrukken bevatten. Daardoor is het niet onmiddellijk duidelijk hoe groot de 0.1% en 2% overschrijdingswaarden van het stijhoogteverschil zijn. Ter indicatie is het aantal tijdstappen waarbij de waarde van  $\Phi_w$  groter is dan  $2 \times \Delta D$  aangegeven in tabel 17.

Het stijhoogteverschil gedeeld door de significante golfhoogte geeft waarden tot maximaal circa 1.2. Deze wordt geacht bij golfterugtrekking en bij open bekledingen circa 0.3 te bedragen en bij golfklappen mogelijk 0.7 à 0.9. De grootste waarden van de stijhoogteverschillen doen zich voor bij leklengtes  $> 1$  m. Op basis van Deltagootproeven wordt verondersteld dat er bij leklengtes  $\Delta < 0.5$  à  $0.7$  m maatgevende golfklappen optreden.

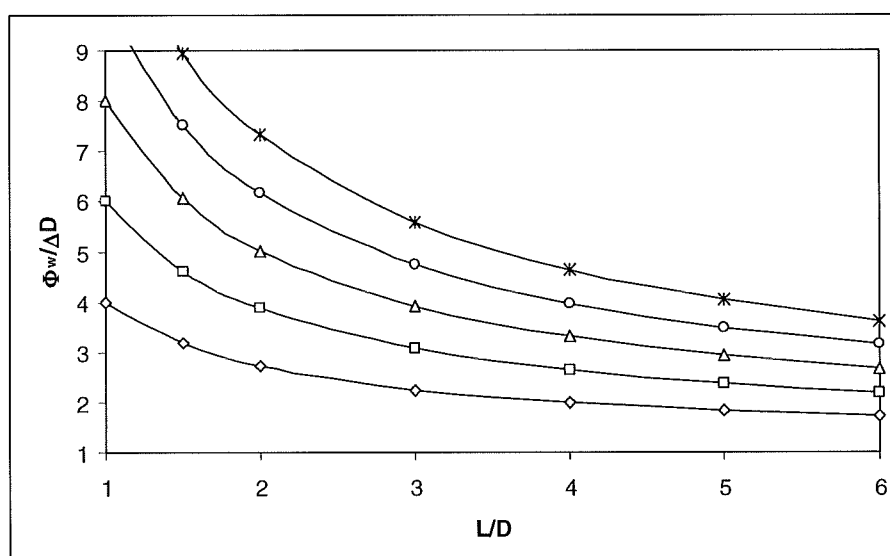
De in figuur 37 waar te nemen trend dat de lengte  $L$  bij benadering lineair toeneemt met de leklengte is conform de verwachting volgens de theorie in Anamos.

Aanbevolen wordt om uit te zoeken waar en wanneer de maximale stijghoogte verschillen optreden. Tevens wordt aanbevolen om de lengte van originele, lange, *real time* golfbestanden te vergelijken met de data verkregen uit de gecomprimeerde golfbestanden, waardoor er meer statistische vergelijkingen kunnen worden gemaakt.

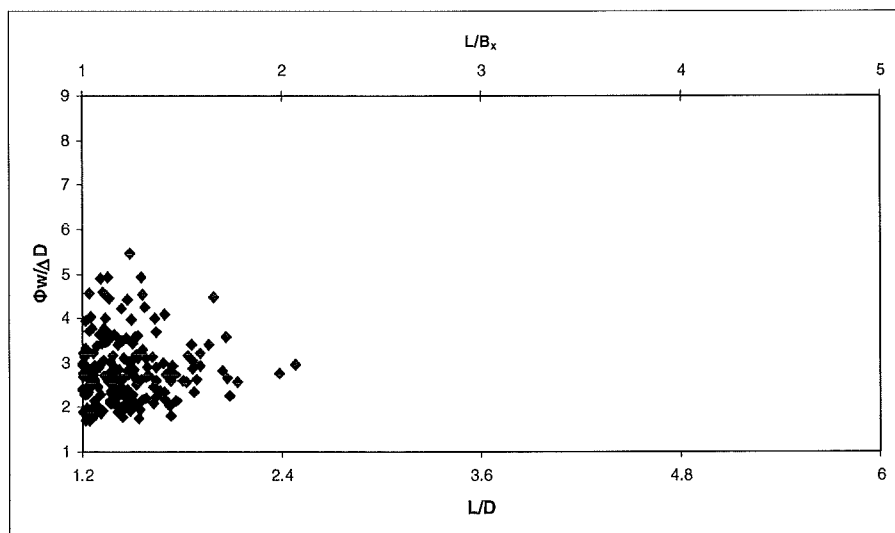
Op de volgende bladzijden zijn de waarden van de stijghoogte en de aaneengesloten lengte waarover deze een voldoende grote opwaarts gerichte waarde heeft, tegen elkaar uitgezet. Alle figuren geven een concentratie van belastingen links onder in de figuur. Conform het model van de geklemde toplaag moeten deze waarden zich telkens bevinden onder de curve van een hyperbool

$$\frac{\Phi}{\Delta D} = 1 + a \left( \frac{L}{D} \right)^b,$$

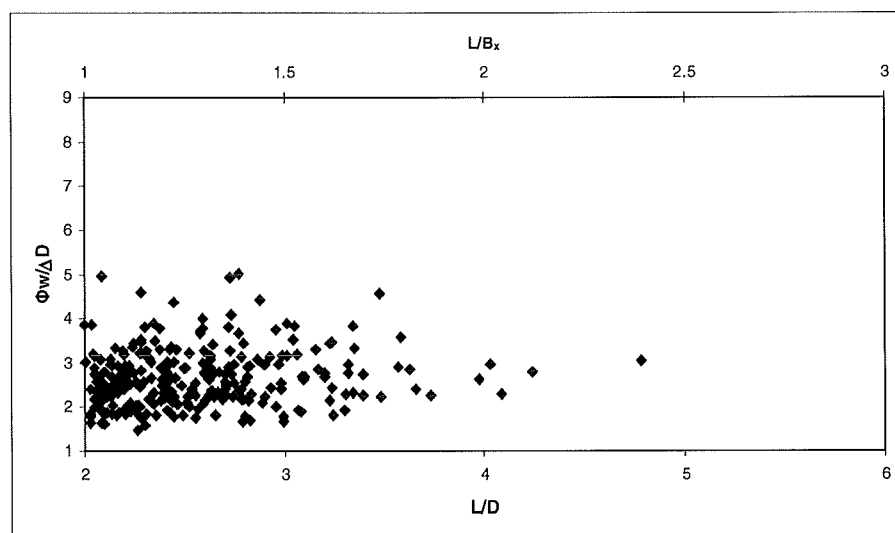
met  $b = -0.7$  à  $-0.8$ , en  $a = 5$  tot  $11$ ,  
 waarmee de sterkte bij  $L/D = 1$  op  $6$  tot  $12$  komt.



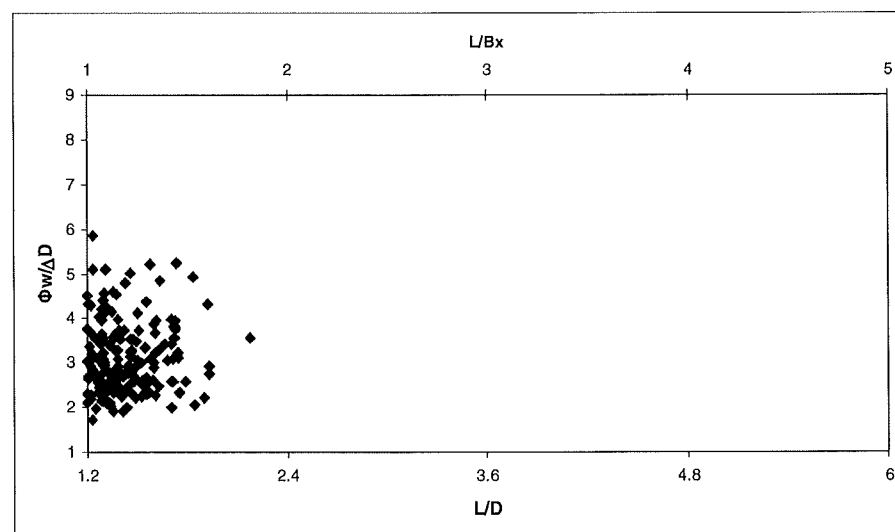
Figuur 38: Relatie stijghoogte en belaste lengte  $\Phi/\Delta D = a (L/D)^{-0.8}$ , met  $a = 3$  resp.  $5, 7, 9$  en  $11$



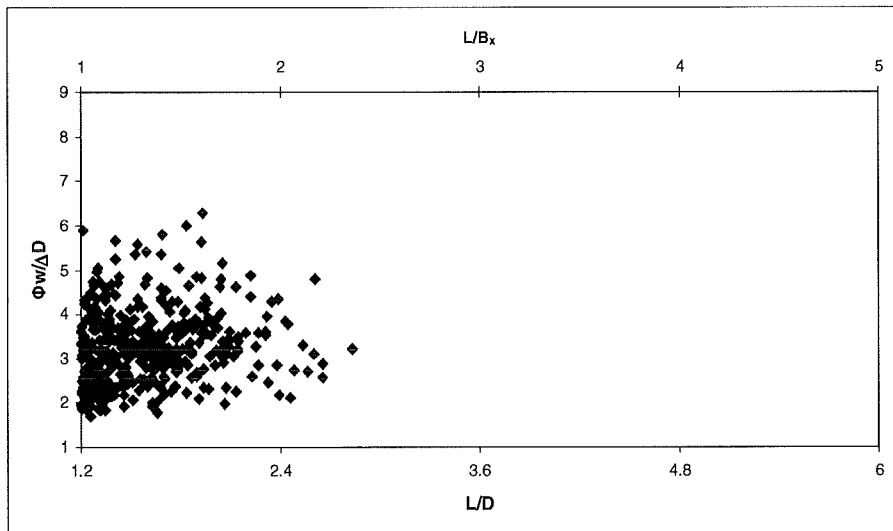
Figuur 39: Stijghoogtes  $> \Delta D$  en lengte waarover deze werkt  $> B_x$  voor case 7



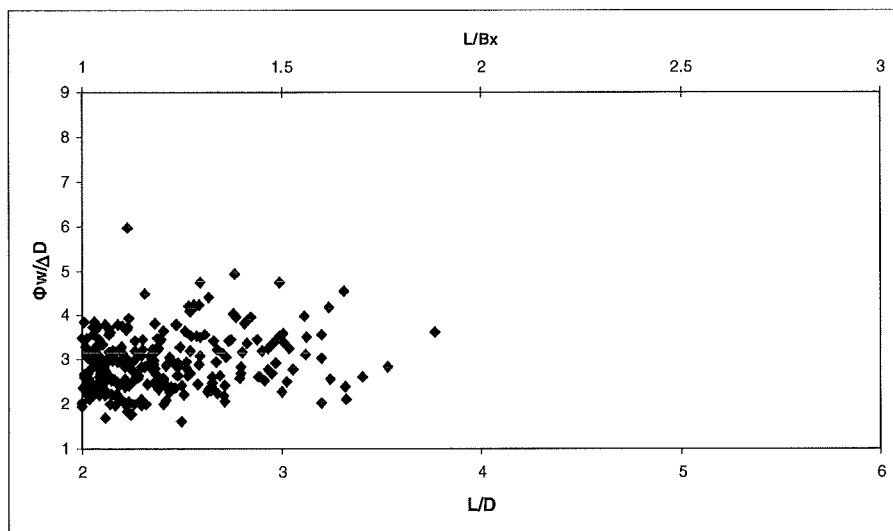
Figuur 40: Stijghoogtes  $> \Delta D$  en lengte waarover deze werkt  $> B_x$  voor case 9



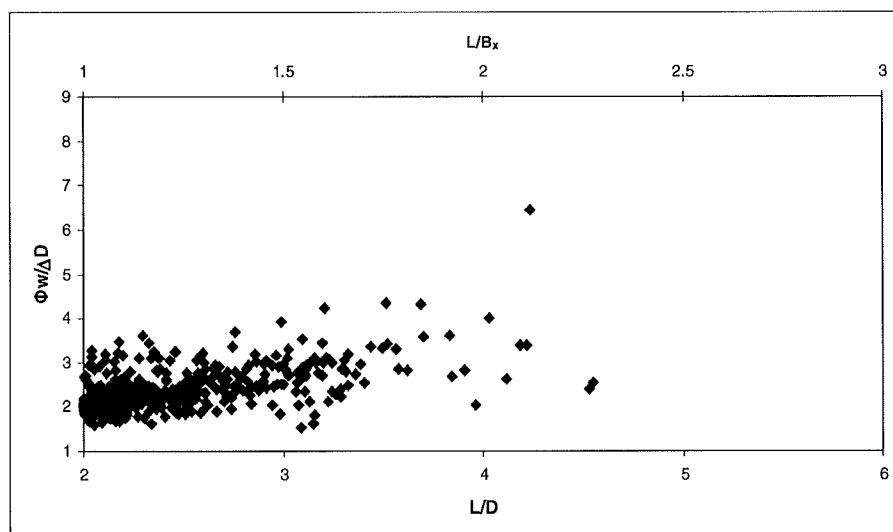
Figuur 41: Stijghoogtes  $> \Delta D$  en lengte waarover deze werkt  $> B_x$  voor case 12



Figuur 42: Stijghoogtes  $> \Delta D$  en lengte waarover deze werkt  $> B_x$  voor case 13



Figuur 43: Stijghoogtes  $> \Delta D$  en lengte waarover deze werkt  $> B_x$  voor case 14



Figuur 44: Stijghoogtes  $> \Delta D$  en lengte waarover deze werkt  $> B_x$  voor case 17

### 4.3 Berekeningsresultaten belastingparameters

Voor alle test cases is voor alle tijdstappen met  $\Phi_w - \Delta D > 0$  de geometrie van de het belasting diagram nagerekend. De resultaten daarvan zijn gepresenteerd in de onderstaande tabellen.

Tabel 19: Scheefheidparameter, gemiddelde en standaardafwijking

| Case | Aantal tijdstappen $\Phi_w > \Delta D$ | scheefheidparameter |      |        |          |
|------|--|---------------------|------|--------|----------|
|      |  | min                 | max  | $\mu$  | $\sigma$ |
| 6    | 268                                    | -0.33               | 0.33 | 0.033  | 0.229    |
| 7    | 1233                                   | -0.71               | 0.81 | 0.013  | 0.263    |
| 9    | 1143                                   | -0.71               | 0.71 | 0.008  | 0.247    |
| 11   | 643                                    | -0.50               | 0.50 | 0.017  | 0.222    |
| 12   | 1992                                   | -0.71               | 0.78 | -0.040 | 0.243    |
| 13   | 2788                                   | -0.75               | 0.86 | -0.095 | 0.265    |
| 14   | 1872                                   | -0.67               | 0.71 | -0.014 | 0.247    |
| 17   | 6732                                   | -0.71               | 0.67 | -0.104 | 0.218    |

Tabel 20: Piekparameter, gemiddelde en standaardafwijking

| Case | piekparameter |       |          |
|------|---------------|-------|----------|
|      | max           | $\mu$ | $\sigma$ |
| 6    | 0.160         | 0.052 | 0.037    |
| 7    | 0.245         | 0.105 | 0.057    |
| 9    | 0.395         | 0.161 | 0.09     |
| 11   | 0.181         | 0.061 | 0.041    |
| 12   | 0.255         | 0.098 | 0.06     |
| 13   | 0.271         | 0.108 | 0.055    |
| 14   | 0.383         | 0.145 | 0.089    |
| 17   | 0.356         | 0.098 | 0.065    |

De scheefheidparameter is in de meeste gevallen gemiddeld tussen de  $-0.1$  en  $0.1$ . De spreiding is vrij groot. Er is dus gemiddeld even zo veel sprake van een scheef belasting signaal naar beneden als naar boven. De scheefheid heeft extreme waarden naar  $\pm 0.7$  à  $\pm 0.8$ . Bij test case 6 en 11 zijn de extreme waarden lager. Dat kan te maken hebben met het geringere aantal gevallen met stijghoogteverschil  $\Phi_w > \Delta D$ .

De standaarddeviatie is  $0.25$ . Dat betekent dat in totaal  $20\%$  van de tijdstappen een scheefheidparameter kleiner dan  $-0.33$ , dan wel groter dan  $0.33$  heeft. Bij een dergelijke scheefheid neemt de dwarskracht bij benadering toe met een factor  $1.5$  ten opzichte van een symmetrisch geval.

De gemiddelde piekparameter ligt tussen de  $0.2$  en  $0.4$ . Deze waarden representeren een vrij steil pieksignaal. Uit de overwegend lage waardes voor het gemiddelde pieksignaal kan worden geconcludeerd dat het Zsteen belastingsignaal overwegend een vrij spits pieksignaal heeft.

Dit betekent dat de gekozen sinusvormige belastingschematisering niet conform de werkelijkheid is. Omdat er bij de omrekening van het werkelijke belastingsignaal naar de sinusvormige belasting gebruik wordt gemaakt van de ruimtelijke integraal van de belasting zullen de verschillen tussen een gemodelleerd driehoekig signaal en een gemodelleerd sinusvormig signaal niet groot zijn. Niettemin zal er sprake zijn van verschillen. Formules voor een gepiekt signaal zullen leiden tot grotere momenten en dwarskrachten in de toplaagligger.

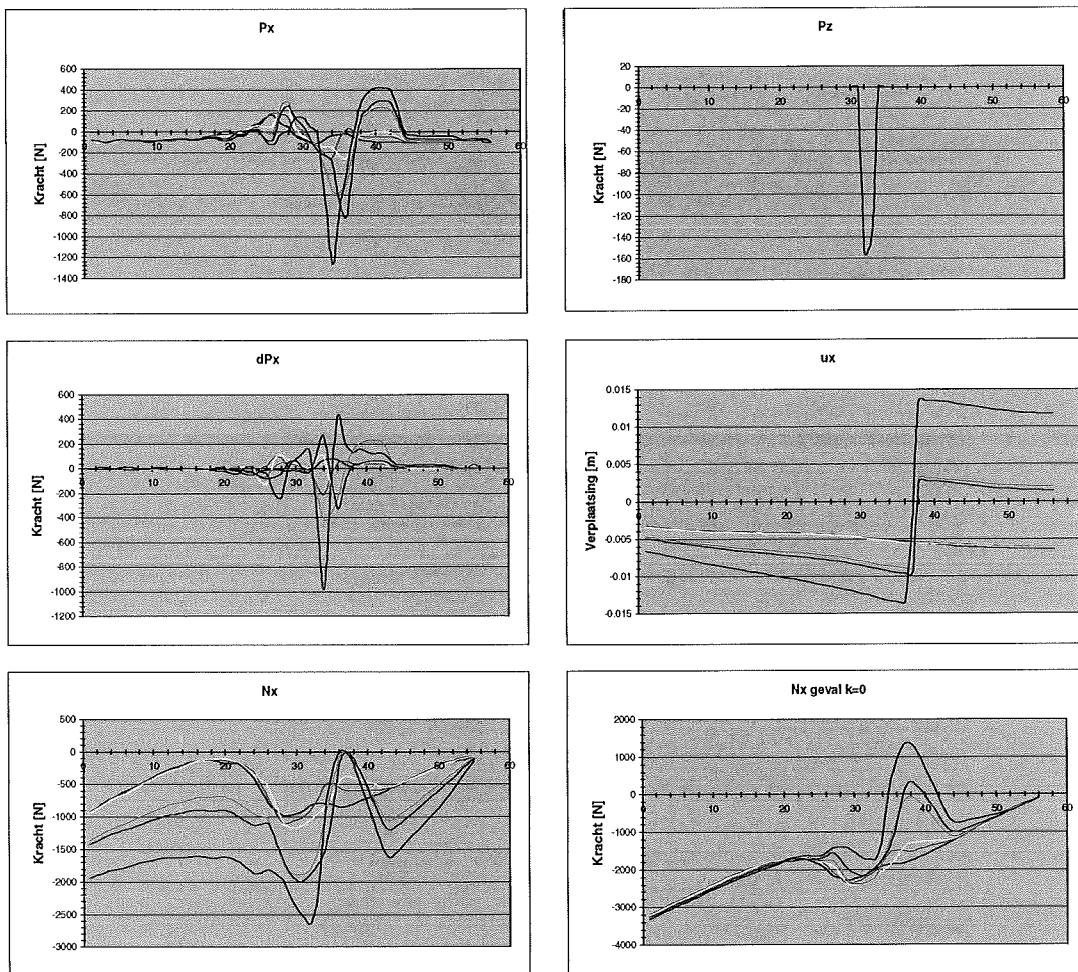
Op grond van de waarneming dat het signaal in vrijwel alle hier geteste gevallen sterk gepiekt is, verdient het aanbeveling in Klemsteen ook formules voor een gepiekt signaal op te nemen.

Voor test cases met een grotere leklengte, opgenomen in een concept versie van dit rapport, bleek de piekparameter een wijdere range te hebben: 0.2 tot 0.6, waardoor de modellering met de sinus voor een deel van de tijdstappen dichterbij de werkelijkheid lag.

#### 4.4 Berekeningsresultaten normaalkrachten

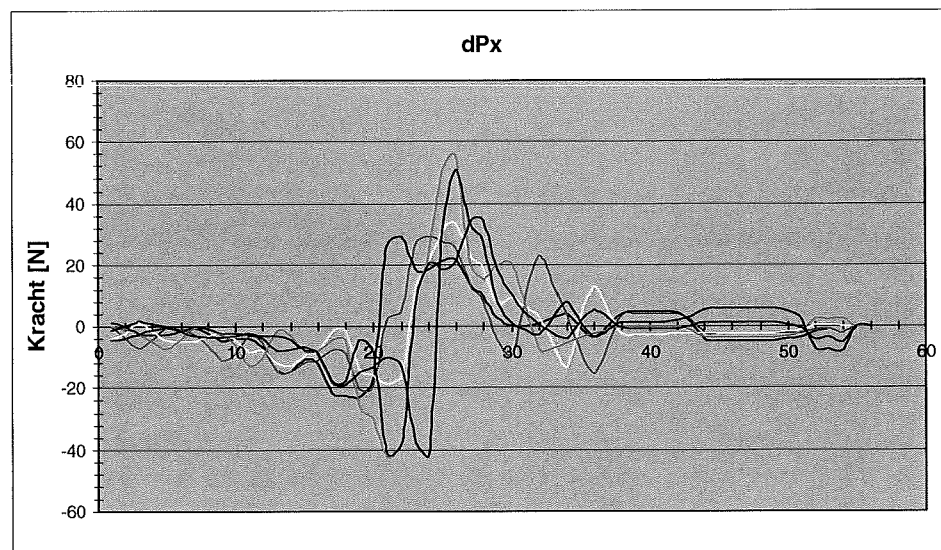
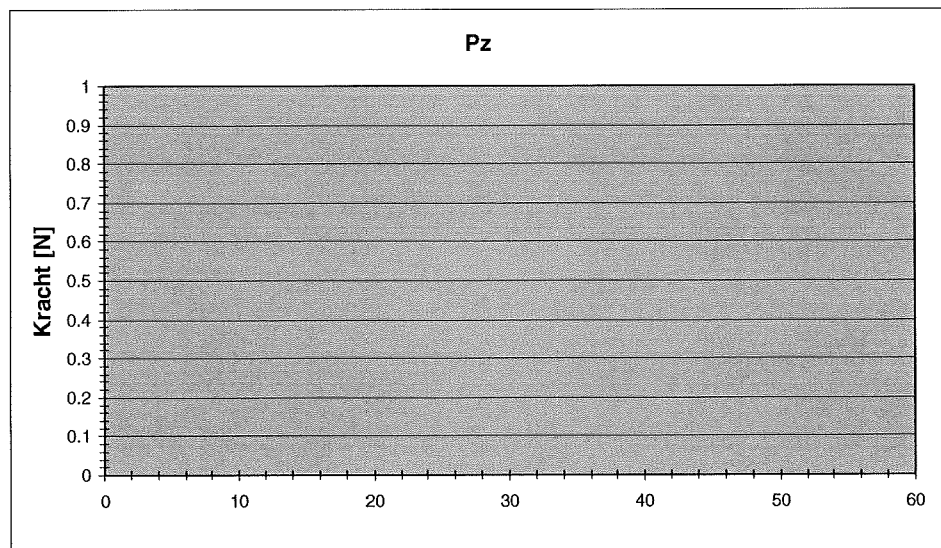
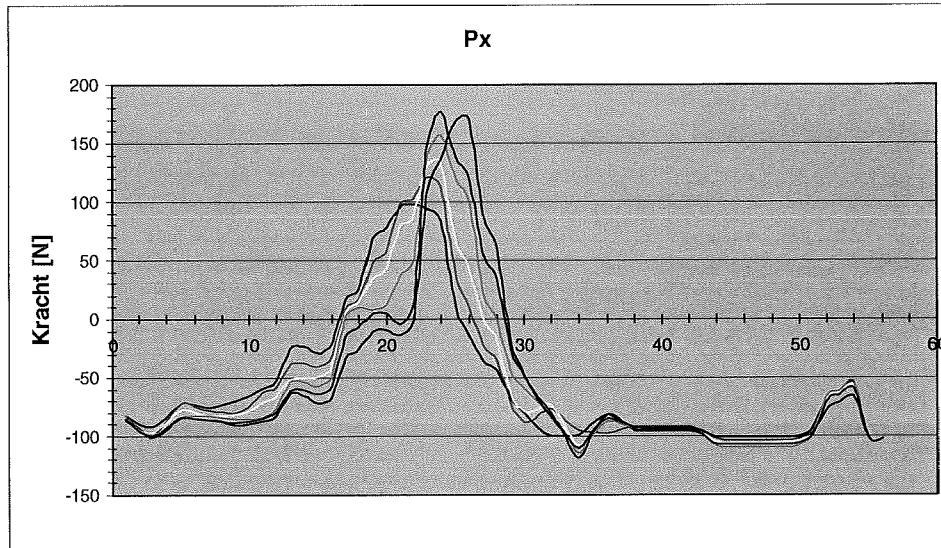
Enige resultaten van berekeningen van de normaalkracht zijn weergegeven in de volgende figuren. Voor een aantal tijdstappen zijn het stijghoogte verloop in de vorm van de krachten  $P_{z,i}$ , de axiale krachten  $P_{x,i}$  en  $dP_{x,i}$ , de verplaatsing  $u(x)$  en de normaalkracht  $N(x)$  geplot. Ook is de normaalkracht geplot indien deze berekend wordt met model 1 (zie hoofdstuk 2). Deze normaalkracht in het geval  $k=0$  is een inzichtelijke weergave van de belasting. De grafieken 'N in geval  $k=0$ ' zijn weergegeven ter vergelijking met de berekende normaalkracht met het verenmodel met no-tension elementen.

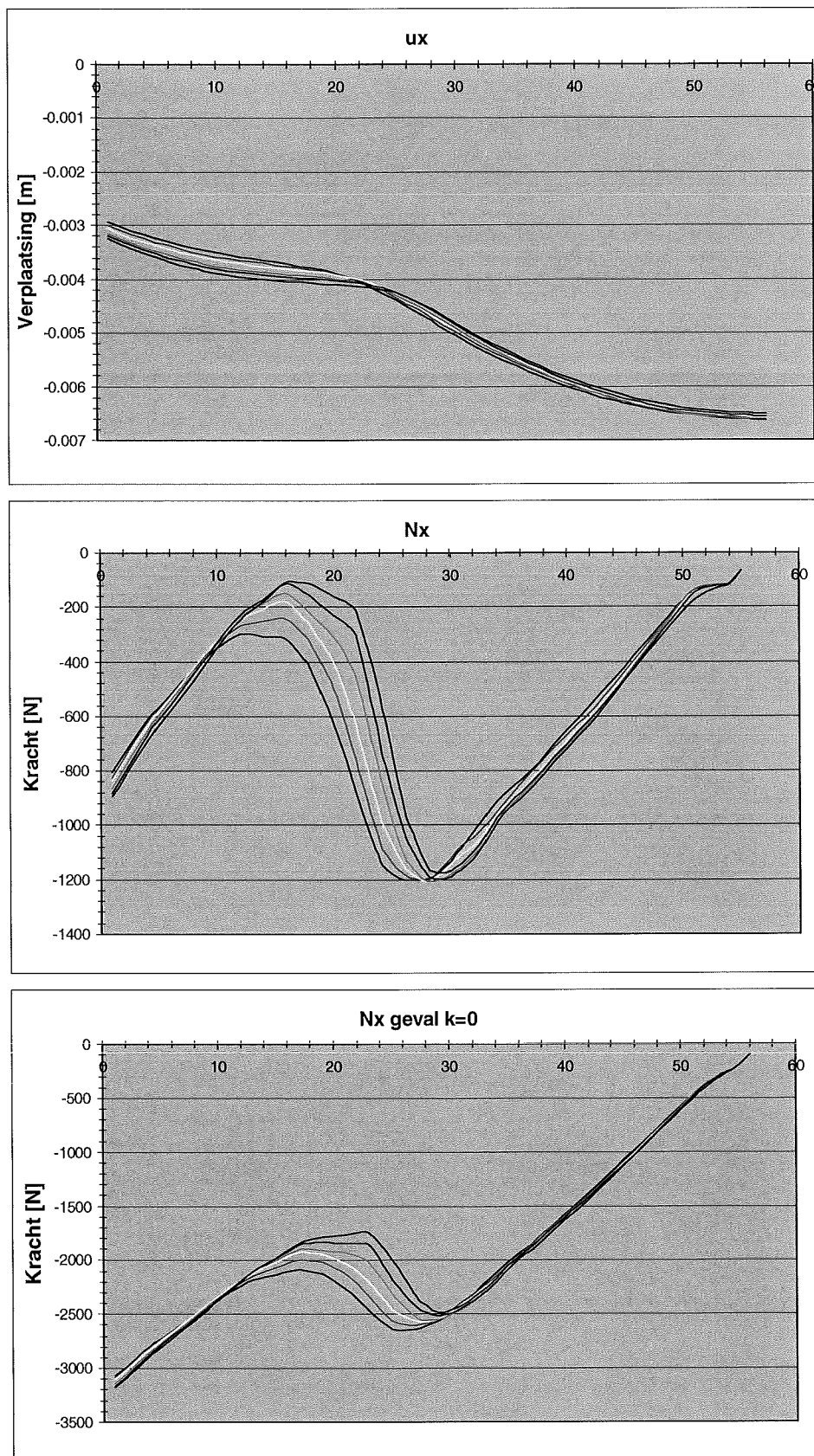
De normaalkracht heeft in de tijdstappen 17 tot 22 een redelijk 'normaal' verloop tijdens een opkomend front. Het front is zodanig hoog dat er net geen trek in de toplaag ontstaat. In de daarop volgende tijdstappen (23 tot 28) ontstaat een golfklap waarbij er plotseling circa 15 elementen hoger wel trek optreedt. De spleetdrukken zijn daar aanzienlijk hoger. Middels iteratieve berekeningen wordt telkens een oplossing gevonden middels het wegnemen van een element, zichtbaar in de vorm van een sprong in de verplaatsing en een 'dip' in de normaalkrachtlijn.



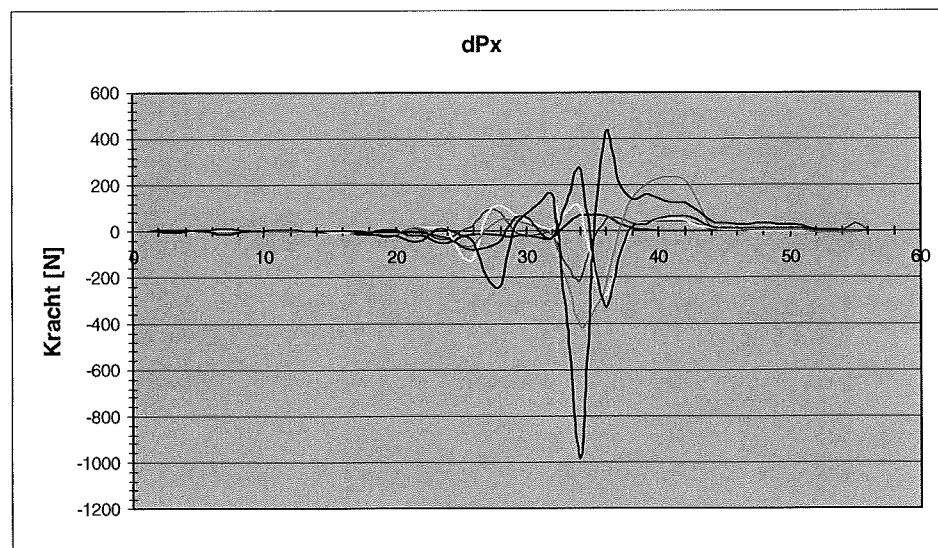
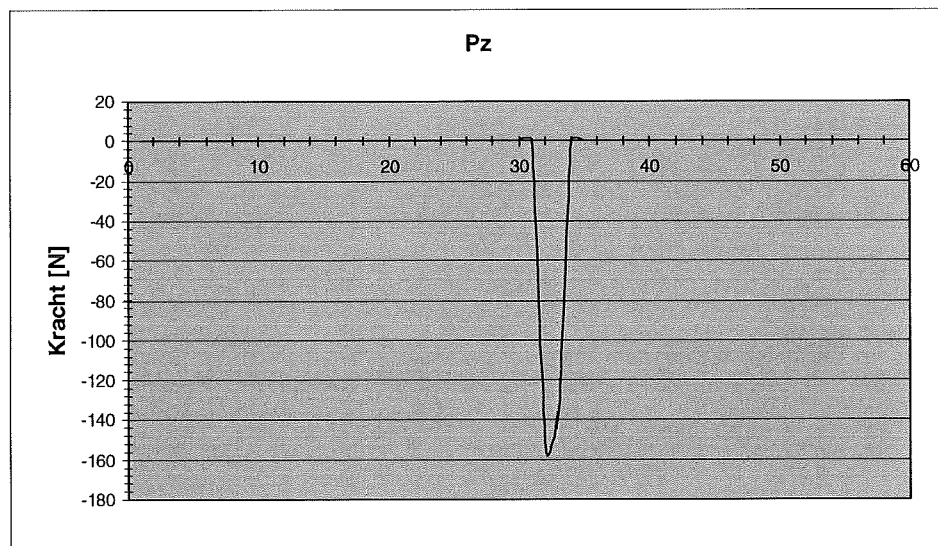
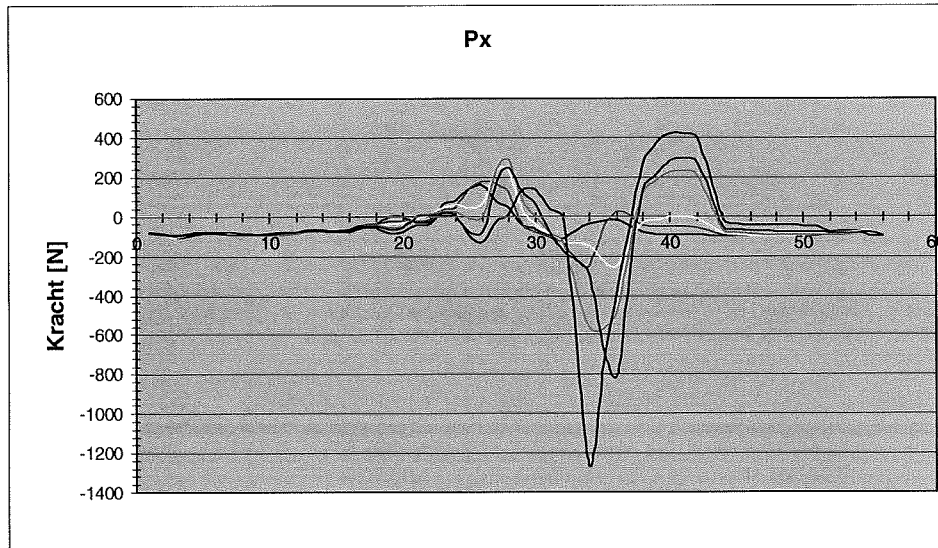
Figuur 45: Grafieken met resultaten  $P_x$ ,  $P_z$ ,  $dP_x$ ,  $u_x$ ,  $N$  en  $N$  in geval  $k=0$ , zoals gepresenteerd op het uitvoerblad van klemsteen

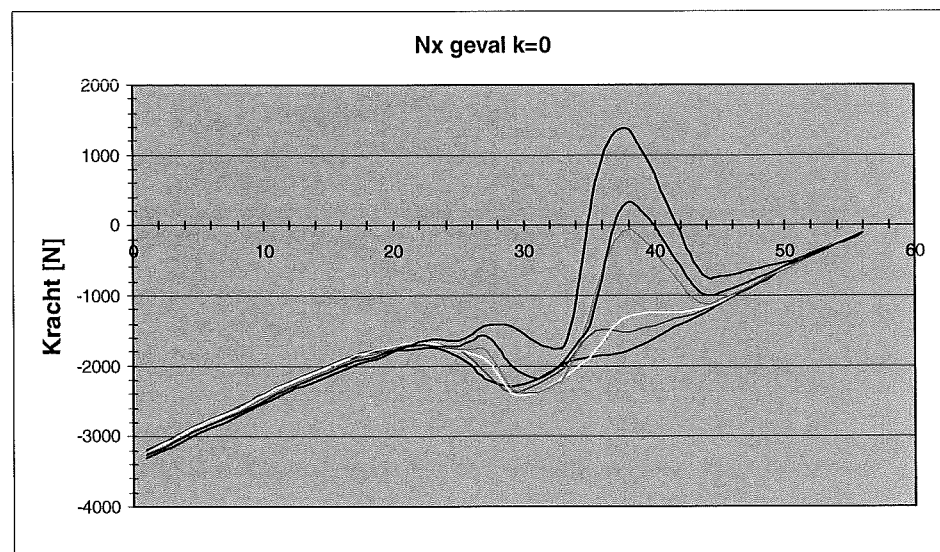
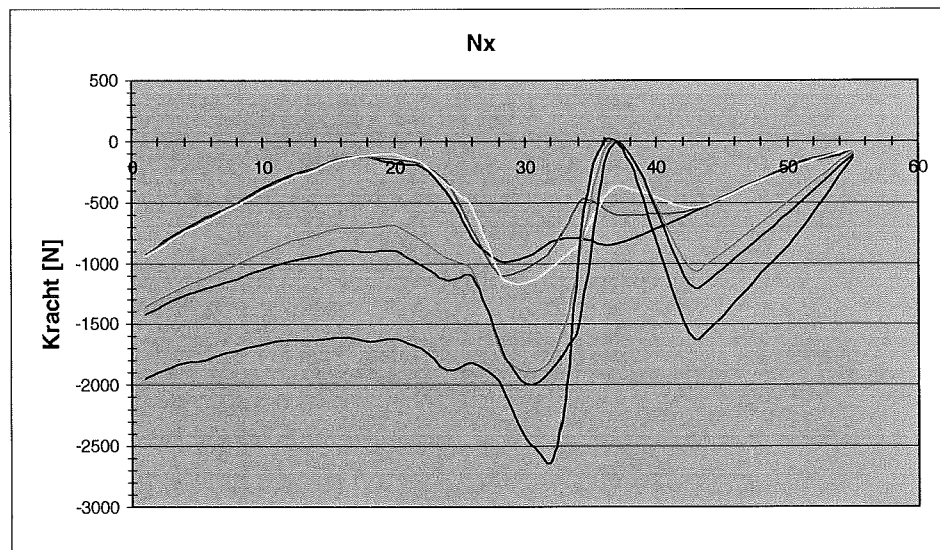
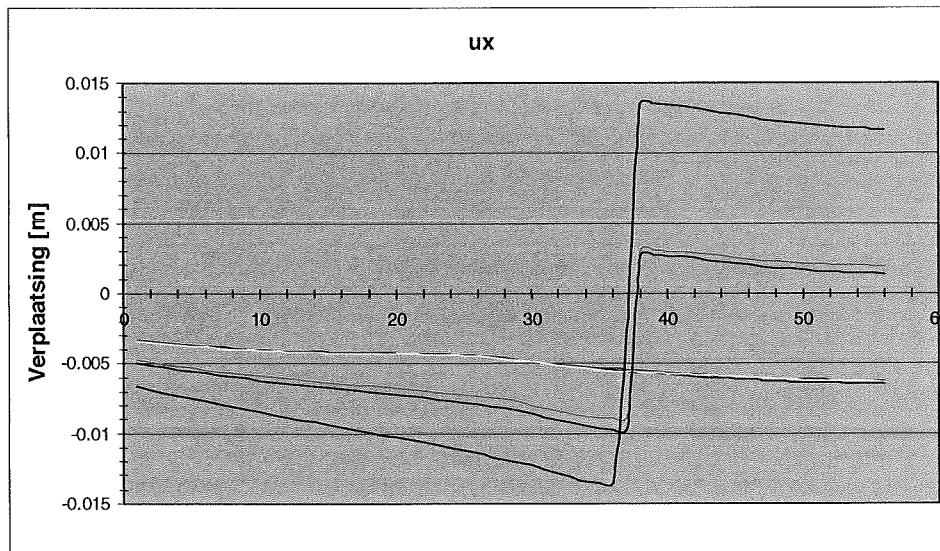






Figuur 46: Grafieken voor zes tijdstappen 20 t/m 25 uit test file 6





Figuur 47: Grafieken voor zes tijdstappen 23 t/m 28 uit test file 6

## 4.5 Berekeningsresultaten stabiliteitsgetallen

De kwantitatieve resultaten van de stabiliteit van de gekozen verificatieberekeningen zijn te zien in de hierna volgende tabellen en figuren.

Per geval worden de maximale verplaatsing en de unity checks voor de dwarskracht, het moment en de steenbeweging weergegeven. De unity checks geven weer of het resultaat aan de maximum opneembare kracht voldoet. Zolang de unity check onder de één blijft, voldoet de steenzetting.

Voor de parameter  $f_4$  is een waarde van 3.0 aangehouden, wat voor zuilen bekledingen enigszins conservatief is. Voor de maximale verplaatsing geldt het criterium:  $\delta_{cr} = 0.1D$

Tabel 21: Overzicht berekende stabiliteitsgetallen; voor de cases 6 en 11 zijn er geen resultaten voor M en V wegens zeer kleine L/D; wel resultaten voor  $\Phi/\Delta D$ : zie tabel 22

| Case | uc M / $M_u$ | uc V / $V_u$ | uc $\delta$ / $\delta_{cr}$ |
|------|--------------|--------------|-----------------------------|
| 7    | nihil        | 0.019        | 1.26                        |
| 9    | 0.16         | 0.55         | 1.55                        |
| 12   | 0.64         | 0.46         | 1.27                        |
| 13   | 0.15         | 0.30         | 2.02                        |
| 14   | 0.21         | 0.43         | 1.64                        |
| 19   | 0.10         | 0.37         | 2.37 *)                     |

\*) uitschieter in 20000 tijdstappen, opvolgende waarde is 1.59

Opvallend is dat in de meeste gevallen het criterium voor de dwarskracht eerder overschreden wordt dan dat voor het moment M. Bij de kleinere leklengtes met meer geconcentreerde belastingen is het ook verklaarbaar dat de dwarskracht een groter probleem vorm dan het moment.

Het is conform de verwachting dat de verplaatsing maatgevend is. Bij het gehanteerde criterium leiden de geteste gevallen tot te grote verplaatsingen.

## 4.6 Behaalde 'winst' in de praktijk

Voor de onderzochte gevallen is de winst in stabiliteit ten opzichte van de stabiliteit van een theoretisch niet-geklemd zetting, waarbij  $\Phi$  maximaal gelijk is aan  $\Delta D$ , een factor 5 à 8. In de onderstaande tabel zijn de belastingfactoren getoond van de gevallen die voldoen aan de stabiliteitscriteria.

In de praktijk werd reeds impliciet op een bijdrage van klemming gerekend, waardoor constructies met  $F < 6$  stabiel werden geacht. Uit de berekende gevallen blijkt dat ook voor  $F > 6$ , namelijk tot  $F = 10.5$  stabiliteit kan worden verklaard. In de Deltagoot wordt ook incidenteel waargenomen dat dergelijke sterktes worden gehaald.

De resultaten van de in dit onderzoek onderzochte gevallen waren met betrekking tot de te behalen winst aanvankelijk conservatief. Er werd gerekend met relatief korte taluds en relatief ondoorlaatbare toplagen. Dit was omdat de matrix die in Excel kan worden opgelost niet groter dan circa  $40 \times 40$  was. In de huidige versie van klemsteen kunnen ook matrixen van  $80 \times 80$ , met 20000 tijdstappen doorgerekend worden.

Er is gerekend met zettingen met meer realistische, korte lek lengtes die de stijghoogteverschillen en de lengte waarover deze werken, beperken. De nu gepresenteerde stabiliteitsgetallen zijn hoger. Dit vindt zijn verklaring in het feit dat bij langere taluds de normaalkracht toeneemt en bij meer realistische, zeer doorlaatbare toplagen de stijghoogteverschillen kleiner zijn.

Tabel 22:  $\Phi_w / \Delta D$  voor op klemming voldoende gevallen

| Case  | F    | $\frac{\Phi_w}{\Delta D}$ |
|-------|------|---------------------------|
| 6 *)  | 7.6  | 2.5                       |
| 7     | 7.6  | 5.4                       |
| 9     | 7.6  | 4.9                       |
| 11 *) | 8.3  | 5.5                       |
| 12    | 8.3  | 8.5                       |
| 13    | 8.3  | 8.3                       |
| 14    | 8.3  | 5.9                       |
| 17    | 10.5 | 6.3                       |

\*) voldoet ruim

De berekeningen met het KlemSteen model lijken de stelling te onderbouwen dat er met een geklemde steenzettingen lokale stijghoogteverschillen tot minimaal 3 à 5 maal, en in incidentele gevallen tot 5 à 8 maal het gewicht van de toplagelementen kunnen worden weerstaan.

## 5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1 Conclusies pre-implementatie

De implementatie van een liggermodel voor een toplaagconstructie voor de toetsing van de stabiliteit van de toplaag geeft goede resultaten. Het blijkt goed mogelijk om vanuit bekende verschildrukken vervormingen van de toplaag te berekenen en om te toetsen aan bezwijkcriteria van een geklemde zetting.

In deze studie zijn de formules uit het met laboratoriumproeven gevalideerd bezwijkmodel van een onder bekende condities geklemd toplaagdeel ingepast in een axiaal model van de toplaag dat de normaalkracht berekent. De sterkte van een geklemd toplaag is een functie van de normaalkracht.

Zowel de normaalkrachtberekening als de toetsing van toelaatbare verschildrukken zijn uitstekend uit te voeren als postprocessing achter de hydraulische berekeningen van ZSteen. De filosofie van de mechanica berekeningen achter ZSteen is die van een modulair systeem van mechanica modellen die afzonderlijk kunnen worden verfijnd en gevalideerd. Op deze wijze blijft de rekentijd relatief kort en is ook inzichtelijk wat er berekend wordt.

Het pre-implementatie product is geprogrammeerd in Visual Basic. Dit geeft, zolang er gerekend wordt in het werkgeheugen van de computer, nauwelijks beperkingen. In het geval van tussentijds of achteraf wegschrijven van resultaten naar Excel neemt de snelheid van het programma sterk af.

#### Belastingschematisatie

Er is gekozen om een sinusvormige belastingschematisatie in te voeren. Deze werd realistisch geacht, is eenvoudig te parameteriseren en is gevalideerd met proefnemingen. Het blijkt dat de ZSteen verschildruksignalen niet allemaal sinusvormig zijn. Voor de testberekeningen blijkt er een tendens naar een driehoekig, piekvormig verloop.

Het is wenselijk dat er ook een theoretische uitwerking van formules van momenten, dwarskrachten en verplaatsing komt voor een toplaagligger belast met een driehoekig verloop van de verdeelde belasting. Evenzo voor asymmetrische driehoeksbelasting.

#### Bewijkmodel

In het kader van de studie in dit rapport is tevens onderzocht en vastgesteld dat uitbreidingen van het geschematiseerde belastingsignaal met neerwaartse verschildrukken aan één zijde in het elastische bereik van het mechanicsysteem significante afwijkingen geeft in de waarden van moment en dwarskracht. In het bezwijkstadium verdwijnen deze afwijkingen als gevolg van het niet-lineaire verband tussen moment en kromming.

#### Axiaal mechanicamodel

Het axiale mechanicamodel blijkt gevoelig voor de verhouding van teenstijfheid en schuif-veerstijfheid van de filterlaag. Bij wat hogere schuif-veerstijfheid kan 'trek' in de bekleding optreden, wat niet correct is. Deze trek moet worden voorkomen doordat de teenstijfheid ten minste circa een factor 10 stijver is dan de schuif-veerstijfheid onder de stenen. Op het tijdstip dat er stenen gelift worden, blijft de teen-veerstijfheid voldoende steun geven om trek in de ligger te voorkomen.

Het blijkt mogelijk om te rekenen aan het voorkomen van trek als gevolg van hoge spleetdrukken.

#### Bemerkingen bij axiaal model

'Trek' in de voegen die een gevolg is van een te lage teenstijfheid is niet rekentechnisch te corrigeren en komt in de praktijk overeen met slecht, of niet-geklemd constructies. Indien de teenstijfheid lager is dan circa 10 maal de schuifstijfheid van de bedding, rusten de elementen niet stabiel tegen de teen en ontstaan er bij belastingen meerdere losse elementen met trek in de voegen. Het programma kan daar geen correcte berekening van maken.

Het is niet duidelijk of nabij de teen de modellering van de filterlaag als een rij onafhankelijke schuifveren voldoende correct is.

#### Kwantitatieve resultaten falen van de toplaag

Voor de onderzochte gevallen is de winst in stabiliteit ten opzichte van een niet-geklemd zetting een factor 3 à 8. Ten opzichte van de 6-ksi-regel is daarmee theoretisch een toename van de sterkte te verklaren tot circa 75% boven dit niveau.

#### Onzekerheden normaalkracht

Het model gaat uit van een initiële liggerwerking. De liggerwerking mag niet geheel onderbroken zijn door openstaande voegen. Dit geeft naar verwachting geen beperking van de toepassing van het model. In dat geval is immers met het oog reeds vast te stellen dat er geen sterkte uit klemming te verwachten is. In de praktijk blijkt vaak dat er zich boven de hoogwaterlijn spleten bevinden. In de verificatieruns is gerekend met opbouw van normaalkracht vanaf het punt van maximale golfoploop. Voor het punt van opbouw van normaalkracht kan ook een willekeurig niveau tussen deze lijn en de top van het talud worden gekozen. Hoe hoger het punt gekozen wordt, hoe hoger de berekende stabiliteitsgetallen zullen zijn. Zie hiervoor ook [Peters, 2007].

#### Beperkingen model

Het falen van de teen door een verschuiving met behoud van (enige) veerstijfheid is gemodelleerd met een extra veer die boogwerking simuleert. Op deze wijze ontstaat er tussen de boog en de teen een zone met verminderde normaalkracht en lossere liggende toplaagelementen. Het is de vraag in hoeverre deze oplossing het eventuele zakken en falen van de teen afdoende simuleert.

Fysische niet-lineariteit van de schuifveren en van de toplaag, die geen trek kan opnemen, is volledig in dit rapport opgenomen en is nu ook operationeel in de pré-implementatie.

Geometrische niet-lineariteit van de beweging van de bekleding is niet opgenomen. Dit treedt op in het bezwijkstadium van de geklemd toplaag, als de opwaarts bewegende delen van de toplaag roteren en verplaatsen in het vlak van de toplaag. Dit drukt de bovenliggende toplaagelementen omhoog en doet de normaalkracht toenemen.

Het weglaten van de geometrische niet-lineariteit is conservatief voor de grootte van de normaalkracht en de berekende stabiliteitsgetallen.



## 5.2 Aanbevelingen

### Dynamisch gedrag

Onder in vloed van golfklappen treedt sterke variatie van verschildrukken op. Tot nu toe wordt uitgegaan van de opwaartse waterdrukken als grootste bedreiging voor de stabiliteit van de bekledingselementen. Het kan ook zo zijn dat de element liftkrachten ondervinden als gevolg van golfklapdrukken bovenop het talud. Bij een zeer hoge neerwaartse druk met een duur van circa 0,25 maal de Eigen trillingsperiode van de constructie is de terugvering van de constructie maximaal. De bekledingselementen worden zeer plotseling en krachtig in de bedding gedrukt en op het moment dat ze terug willen veren is ook de belasting al weer weg, of (erger) er heerst nog overdruk onder de elementen. Bij een no-tension bedding kunnen de elementen dan opveren en losraken van de bekleding.

Na kwantitatieve studie van dit fenomeen zou dit in correctiefactoren in de modellen kunnen worden verwerkt.

### Verificatie parameters in veldproeven

Uit veldproeven kunnen waarden van de axiale veerstijfheid van de bekleding, de schuifveerstijfheid van de filterlaag en de stijfheid van de teen worden bepaald of afgeleid.

Ook is het van belang dat er een model of een inspectiemethode wordt ontwikkeld om boogwerking te detecteren en te kwantificeren.

Deze verificatie betreft ook het middels terugrekenen vaststellen van de grootte van de parameters sterkteparameters  $f_1$ ,  $f_2$ , en  $f_3$  en de stijfheidparameters  $f_4$  en  $f_5$ . Voor deze parameters zijn in de pré-implementatie voorlopige waarden aangehouden, gebaseerd op de analyse van de laboratoriumproeven.

### Belastingschematisatie

Op dit moment is de belasting geschematiseerd als sinusvormig. Een aanvulling dan wel uitbreiding met (asymmetrische) driehoeksvormige belastingen is gewenst.

### Verificatie veermodel

Het axiale veermodel moet mogelijk worden getoetst met enige eindige elementensommen (Plaxis). De bedoeling daarvan is:

- a) verificatie van het al dan niet toelaatbaar zijn van het verwaarlozen van de afhankelijkheid van de veren
- b) verificatie van de correcte theoretische beschrijving van herhaalde verplaatsingen

### Los blok falen

Om klemming überhaupt succesvol te implementeren is de reststerkte van de bekleding van belang. Studie naar de condities waaronder het filter in tact blijft deels reeds uitgevoerd. Indien mag worden verondersteld dat de condities in voldoende mate aanwezig zijn kan er een verfijning en uitbreiding van het model worden gerealiseerd analoog aan de Diana schematiseringen van liggers (zie [Derkzen 2004]). Daarbij worden twee of meer ligger parallel geschakeld waarvan in één ligger een element ontbreekt. Dit is een relatief eenvoudige mogelijkheid van implementatie van een mechanica model dat de redundancy van een onderbroken de toplaag simuleert.



## REFERENTIES

[Peters, 2004]

Laboratorium onderzoek betreffende klemming van gezette steenbekledingen, Royal Haskoning, ref. 9P0669/R001 d.d. 18 november 2004

[GeoDelft, 2003]

Gebruikershandleiding Zsteen, versie 1.8, maart 2003

[Klein Breteler, 2000]

Analyse rapport Deltagootproeven, WL, mei 2000

[Derkzen 2004]

Numerieke analyse van laboratorium proeven op geklemde steenzettingen, afstudeerverslag TU Delft, juni 2004

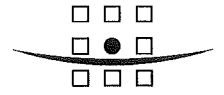
[Peters, 2007]

Memo's betreffende het implementatiegereed maken van het klemmingsonderzoek in SteenToets, 15 juni 2007



## **Bijlage 1**

### **Overzicht onderzoek Kennisleemtes Steenzettingen**



**ROYAL HASKONING**

## **Bijlage 2**

### **Handleiding en beschrijving module KlemSteen**





## Handleiding KlemSteen 2.0.xls

Opgesteld door Joris Blom, 19 december 2006

Klemsteen simuleert het gedrag van een steenzetting aan de hand van stijghoogte gegevens zoals geproduceerd door Zsteen. Het programma is gebaseerd op het spreadsheetprogramma Excel en geschreven in de bijbehorende programmeeromgeving Visual Basic for Applications (VBA), beide van Microsoft. Voor het gebruik van KlemSteen 2.0 moet Excel geïnstalleerd zijn en het uitvoeren van macro's worden toegestaan.

Met de stijghoogtegegevens van Zsteen en enkele analytische formules en een numeriek model worden de optredende normaal- en dwarskrachten en momenten bepaald. Deze worden getoetst aan maximaal opneembare momenten. De maximale verplaatsing wordt ook bepaald en getoetst.

Het onderliggende numerieke model beschouwt de axiale krachten en verplaatsingen. In het model wordt de steenzetting beschouwd als een op een elastische bedding opgelegde staaf. De stijghoogteverschillen die Zsteen oplevert, worden opgelegd als belasting. Hiermee zijn de optredende axiale verplaatsingen en normaalkrachten in de staaf te berekenen. Doorgaans bevinden zich in de steenconstructie extra onderdelen zoals een teen- en overgangsconstructie. De teenconstructie is aan te brengen als extra veer als eerste knoop in de discretisatie. De overgangsconstructie is ook als extra veer in te voeren, echter ook op iedere gewenste knoop. De liggerwerking van de constructie wordt analytisch beschouwd en wordt gecombineerd met de uitkomsten van het numerieke model.

### **Gebruik van KlemSteen**

Bij het openen vraagt Excel, afhankelijk van de gekozen veiligheidsinstellingen, om het al of niet toestaan van het gebruik van macro's. Hierop dient "toestaan" te worden gekozen.

Direct hierna opent het scherm "Open". Daar moet een invoerfile worden gekozen. Dit is een "\*.zsd" bestand zoals deze door Zsteen worden uitgevoerd. Als dit scherm niet opent staat de veiligheidsinstelling van Excel geen macro's toe.

Na het kiezen van een invoerfile opent het formulier "Algemene gegevens". Hierin kunnen alle rekenopties worden ingevuld of gewijzigd. Indien er geen nieuwe berekening hoeft te worden gemaakt kan dit menu worden afgesloten.

### *Menustructuur*

Bij het openen van KlemSteen wordt er in de menustructuur van Excel een menu KlemSteen toegevoegd. In dit menu kunnen nieuwe Zsteen bestanden worden geopend en kunnen de algemene gegevens van de laatste berekening worden bekeken.

### *Algemene gegevens*

Dit formulier vormt de basis van de berekening. De gegevens worden standaard ingevuld zoals deze worden uitgelezen uit de "zsd" file, of volgens een aantal realistische waarden. Er zijn vier onderdelen.

- 1) Steen, Helling en Overige gegevens
- 2) Reken opties
- 3) Overgangsconstructie
- 4) Opzet

Ad 1)

De steengegevens worden in principe uitgelezen uit de invoerfile. Mocht het voor de berekening nodig zijn andere eigenschappen toe te kennen is dit mogelijk. Dan zijn de stijghoogteberekeningen uit Zsteen echter niet meer per definitie goed. Ook de hoek van het talud en de dichtheid van het water kan worden ingevuld. Voor het gemak worden de bijbehorende sinus, cosinus en  $\Delta$  waarden direct berekend.

In principe hoeft er in dit deel niets te worden ingevuld

Ad 2)

Hier kunnen de berekeningen van KlemSteen en de uitvoer worden aangepast. Links kan worden gekozen of KlemSteen de uitgelezen data uit de "zsd" file ook wegschrijft en of er extra elementen moeten worden opgenomen. Indien **Extra elementen** wordt geselecteerd volgt er ná dit formulier een veld waarin kan worden aangegeven hoe lang de zetting is. Indien er geen extra stenen wordt geselecteerd is de zetting zo lang als de invoerfile vereist, namelijk tot de bovenste steen waarover (binnen het gekozen aantal tijdstappen) een stijghoogteverschil berekend wordt. Indien **invoer wegschrijven** wordt aangevinkt worden de drukken die Zsteen heeft berekend op de eerste twee werkbladen van Excel weggeschreven.

Rechts kunnen de stijfheden van het systeem worden opgegeven. Allereerst **k bed**, de beddings veer längs de zetting, standaard op  $60.000 \text{ N/m}^3$ . Daaronder kan **k teen**, de teenstijfheid worden ingevuld, standaard  $1.000.000 \text{ N/m}^2$ . Als derde optie kan ook de toplaag een stijfheid worden toegekend, standaard  $30.000.000 \text{ N/m}^2$ .

De laatste optie in dit onderdeel is het aantal **tijdstappen**. Deze optie staat standaard op het aantal tijdstappen dat in Zsteen is doorgerekend. Er kan echter een lagere waarde worden ingevuld.

Ad 3)

Hier kunnen de eigenschappen van een overgangsconstructie worden ingevoerd. Standaard staan beide waarden op nul en beïnvloeden de berekeningen niet. De overgangsconstructie wordt bepaald door een veer met een veerconstante ( $\text{N/m}^2$ ) en de knoop waarop deze aangrijpt.

Ad 4)

De laatste optie is de invoer van een verticale waterstandsopzet. Als hier een waarde wordt ingevuld zal de waterstand lineair oplopen tot de ingevoerde waarde.

Uitgaande van de ingevoerde waarde en een tijdstap van 1/15 seconde wordt de stijgsnelheid en het aantal stenen oploop dat er gedurende de berekening wordt bereikt.

*Invoer Extra Stenen*

Indien er onder ad 2) voor is gekozen de zetting te verlengen met de optie Extra elementen zal na het formulier Algemene gegevens een formulier worden getoond waarop de zettingslengte kan worden aangepast. Onder het invoerveld wordt het basis (of minimaal) aantal stenen getoond met de bijbehorende afmetingen en het nieuwe aantal elementen met de afmetingen.

**Resultaten KlemSteen**

Klemsteen verricht in verband met de rekensnelheid en de benodigde iteratiestappen de meeste berekeningen in het geheugen van de computer. De uitkomsten worden naar een werkblad uitgevoerd en op een ander werkblad in grafieken gepresenteerd.

Tijdens de berekeningen worden de werkbladen van links naar rechts ingevuld. Het is belangrijk dat de werkbladen op dezelfde plaats blijven staan en dezelfde naam houden; de scripts kiezen een werkblad op basis van plaatst of naam.

In totaal zijn er 12 tabbladen. Deze zijn onderverdeeld in vier groepen:

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Invoer          | (blauw) |
| Verschildrukken | (rood)  |
| Uitkomsten      | (groen) |
| Grafieken       | (geel)  |

#### *Invoer*

De invoer bestaat uit twee tabbladen: Bedding en golf. Als bij het openen van de Zsteen file is gekozen voor de optie invoer wegschrijven (standaard) wordt op deze tabbladen de met Zsteen berekende stijghoogte uitgevoerd.

#### *Verschildrukken*

De verschildrukken worden ook op twee tabbladen berekend:  $P_z$  en  $P_x\_F_x$ .

Op de eerstgenoemde worden de drukverschillen haaks op de zetting berekend. Deze waarden zijn berekend door de verschildrukken en het steengewicht bij elkaar op te tellen en deze waarden af te kappen op nul. Wat overblijft zijn de waarden die de zetting effectief van de granulaire laag afdrücken: waardes waarin de resulterende opwaartse druk groter is dan de neerwaartse druk en zijn dus allen negatief zijn.

Na deze berekening worden een aantal eigenschappen van de drukverschillen bepaald. Per tijdstap wordt de maximum waarde van de opwaartse drukken berekend en twee kolommen naast de tabel ingevuld. De positie van het maximum staat één kolom verder. Weer één kolom verder wordt de waarde van de bepaalde integraal van de opwaartse drukken weergegeven. Er wordt geïntegreerd vanaf het eerste nulpunt vanuit het maximum tot aan het eerstvolgende nulpunt. In de daarop volgende kolom wordt de lengte weergegeven, deze wordt bepaald door middel van een analytische formule door de numerieke lengte om te zetten naar een lengte benodigd voor een sinusvormige belasting en is niet gelijk aan de lengte van het geïntegreerde gebied. Ook wordt er een kolom LocMax en LocMin aangemaakt waarin wordt bepaald hoeveel kolommen het vanuit het maximum is naar het eerste nulpunt respectievelijk aan de rechter- en linkerzijde. Met deze waarden wordt ook de skewness kolom bepaald, ofwel hoever het maximum zich procentueel uit het midden bevindt en aan welke zijde. Staat er een negatieve waarde dan bevindt het maximum zich links van het midden, positief rechts van het midden. De kolom  $L/L^*$  is een kolom waar er bekeken wordt hoe de analytische lengtes zich verhouden. Deze zijn afhankelijk van de maximale waterdruk. Dan wordt berekend hoeveel elementen eruit moeten op basis van de berekende lengte ( te zien in kolom 'length') waarover de opwaartse sinusvormige druk analytisch groter is dan de neerwaartse. Er wordt nu bepaald wat de eerste en de laatste elastische veer is die uit de latere berekening gehaald dient te worden. Tenslotte wordt de maximaal opneembare momenten en dwarskrachten over de tijdstappen worden bepaald. Dit gebeurt door middel van een eenvoudige analytische formule met als enige onbekende de maximale opwaartse druk.

Op het tabblad  $P_x\_F_x$  staan de belastingsverschillen over de knopen längs de zetting. Deze waarden zijn uitgedrukt in Newtons. De waterdrukken en het steengewicht wordt hier omgerekend naar axiale belastingen op de knopen.

### *Uitkomsten*

Er worden zes verschillende parameters uitgevoerd om de zetting te beschrijven.

- 1) dPx. De axiale belastingsverschillen ten opzichte van de vorige tijdstap.
- 2) ux. De totale knoopverplaatsing op een gegeven tijdstap.
- 3) dRx. Reactiekracht op de granulaire laag per element.
- 4) Nx. De normaalkracht in de zetting.
- 5) N<sub>xk0</sub>. De normaalkracht in de zetting als er geen wrijving met de granulaire laag zou zijn.
- 6) UC. Unity Checks. Standaard methode om de belasting en de sterkte te vergelijken. Een waarde kleiner dan één geeft een voldoende sterke zetting aan.

### *Grafieken*

Op deze twee tabbladen worden de gegevens grafisch weergegeven. Op 'Grafieken Tijd' staan de gegevens die per tijdstap één waarde opleveren: de unity checks en de maximale drukverschillen. Op 'Grafieken Knoop' worden de parameters per tijdstap en per element weergegeven. Met de buttons bovenin het werkblad kan door de tijdstappen worden geschoven. Ook kunnen de waarden in de velden handmatig worden aangepast om een bepaalde range aan tijdstappen weer te geven.

## **Bijlage 3**

### **Dump files ZSteen**



Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 17:20:35
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case6-3.zsd
CREATED BY  : ZSteen version 2.1.1.7
=====
                BEGINNING OF DATA                =====
```

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen

Turbulente stroming met grote lek lengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Hydroblocks ingewassen
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.30 = Lengte
0.30 = Breedte
0.0005000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2300 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
0 = No
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.10 = n Inwasmateriaal
1 = Zuil
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
40.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
Constructie-1
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items

Constructie-1

Hydroblocks ingewassen

0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items

steenslag

65535 = Kleur

0.50 = BF

0.0150 = D15F

0.300 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil

2.20 = Hs

7.00 = Tp

1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef

2.80 = Initial Phreatic Head

1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)

0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)

1.00 = Scale factor

0.000 = First gauge position X

0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]



[SECTIONSIZES]

1 = number of sections

0 129 1 = section number, joint cross count, joint along count

[END OF SECTIONSIZES]

[WAVE STEPCOUNT]

4877 = number of timesteps in wave

[END OF WAVE STEPCOUNT]

[WAVE STEP]

0 = wave step index

0.000000 = wave time instant

[SECTIONHEAD]

0 = section index

52 = number of joints in cross direction

1 = number of joints in along direction

| bedding   | golf      |
|-----------|-----------|
| 3.6992707 | 3.7646668 |
| 3.6796496 | 3.6986781 |
| 3.6249066 | 3.6275118 |
| 3.5502975 | 3.5514677 |
| 3.4510765 | 3.4528747 |
| 3.3194004 | 3.3195009 |
| 3.2069758 | 3.2068745 |
| 3.1163900 | 3.1163761 |
| 3.0174673 | 3.0176803 |
| 2.9045313 | 2.9045568 |
| 2.8029906 | 2.8000572 |
| 2.7226653 | 2.7227561 |
| 2.6341762 | 2.6399380 |
| 2.5190539 | 2.5163404 |
| 2.4353232 | 2.4145803 |
| 2.3951124 | 2.3950979 |
| 2.3537282 | 2.3683567 |
| 2.2823473 | 2.2665460 |
| 2.2500933 | 2.1647353 |
| 2.2513986 | 2.2187050 |
| 2.2779885 | 2.2770739 |
| 2.3190379 | 2.3191809 |
| 2.3570834 | 2.3612879 |
| 2.3836164 | 2.3828155 |
| 2.4160808 | 2.4029262 |
| 2.4777934 | 2.4765822 |
| 2.5551676 | 2.5624721 |
| 2.6090260 | 2.6098934 |
| 2.6534932 | 2.6532574 |
| 2.7006564 | 2.7005581 |
| 2.7505684 | 2.7489497 |
| 2.8134896 | 2.8131375 |
| 2.8854467 | 2.8854108 |
| 2.9608816 | 2.9608883 |
| 3.0367931 | 3.0390971 |

|           |                 |
|-----------|-----------------|
| 3.0945092 | 3.0957345       |
| 3.1402933 | 3.1397269       |
| 3.1941657 | 3.1936442       |
| 3.2571481 | 3.2571406       |
| 3.3206371 | 3.3206371       |
| 3.3841335 | 3.3841335       |
| 3.4476182 | 3.4476300       |
| 3.5103604 | 3.5111264       |
| 3.5625616 | 3.5649179       |
| 3.6010638 | 3.6011754       |
| 3.6374257 | 3.6374329       |
| 3.6736083 | 3.6736904       |
| 3.7085620 | 3.7099479       |
| 3.7350217 | 3.7462054       |
| 3.7426146 | 3.7824629       |
| 3.7331309 | 3.8187204       |
| 3.6522187 | 3.8492742       |
| 3.2200000 | = phreatic head |
| 0.0310718 | = phreatic rate |

[END OF SECTIONHEAD]

[SECTIONLIFT]

0 = section index

cross along

[END OF SECTIONLIFT]

[END OF WAVE STEP]

Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 17:18:10
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case7-3.zsd
CREATED BY   : ZSteen version 2.1.1.7
```

===== BEGINNING OF DATA =====

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen

Turbulente stroming met grote leklengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Hydroblocks ingewassen
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.30 = Lengte
0.30 = Breedte
0.0005000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2350 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
1 = Yes
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.60 = n Inwasmateriaal
1 = Zuil
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
40.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
```

Constructie-1

```
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items

Constructie-1

Hydroblocks ingewassen

0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items

steenslag

65535 = Kleur

0.50 = BF

0.0150 = D15F

0.300 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil

2.20 = Hs

7.00 = Tp

1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef

2.80 = Initial Phreatic Head

1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)

0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)

1.00 = Scale factor

0.000 = First gauge position X

0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]

[SECTIONSIIZES]

1 = number of sections  
 0 129 1 = section number, joint cross count, joint along count  
 [END OF SECTIONSIIZES]

[WAVE STEPCOUNT]  
 4877 = number of timesteps in wave  
 [END OF WAVE STEPCOUNT]

[WAVE STEP]  
 0 = wave step index  
 0.0000000 = wave time instant

[SECTIONHEAD]  
 0 = section index  
 52 = number of joints in cross direction  
 1 = number of joints in along direction

| bedding   | golf      |
|-----------|-----------|
| 3.5155014 | 3.7646668 |
| 3.5090249 | 3.6986781 |
| 3.4874776 | 3.6275118 |
| 3.4465750 | 3.5514677 |
| 3.3841631 | 3.4528747 |
| 3.3012155 | 3.3195009 |
| 3.2068483 | 3.2068745 |
| 3.1128634 | 3.1163761 |
| 3.0139983 | 3.0176803 |
| 2.9101184 | 2.9045568 |
| 2.8126847 | 2.8000572 |
| 2.7244316 | 2.7227561 |
| 2.6391217 | 2.6399380 |
| 2.5554446 | 2.5163404 |
| 2.4874647 | 2.4145803 |
| 2.4379975 | 2.3950979 |
| 2.4009550 | 2.3683567 |
| 2.3741927 | 2.2665460 |
| 2.3610194 | 2.1647353 |
| 2.3587660 | 2.2187050 |
| 2.3616932 | 2.2770739 |
| 2.3718168 | 2.3191809 |
| 2.3900061 | 2.3612879 |
| 2.4157351 | 2.3828155 |
| 2.4505491 | 2.4029262 |
| 2.4977262 | 2.4765822 |
| 2.5543091 | 2.5624721 |
| 2.6062853 | 2.6098934 |
| 2.6547457 | 2.6532574 |
| 2.7051151 | 2.7005581 |
| 2.7595738 | 2.7489497 |
| 2.8208094 | 2.8131375 |
| 2.8881217 | 2.8854108 |
| 2.9589481 | 2.9608883 |
| 3.0268887 | 3.0390971 |
| 3.0871062 | 3.0957345 |

3.1412175 3.1397269  
3.1975354 3.1936442  
3.2578231 3.2571406  
3.3195296 3.3206371  
3.3793694 3.3841335  
3.4347963 3.4476300  
3.4829989 3.5111264  
3.5211892 3.5649179  
3.5484154 3.6011754  
3.5655792 3.6374329  
3.5737289 3.6736904  
3.5751261 3.7099479  
3.5712570 3.7462054  
3.5551406 3.7824629  
3.5160292 3.8187204  
3.4383695 3.8492742  
3.2200000 = phreatic head  
0.0215413 = phreatic rate

[END OF SECTIONHEAD]

[SECTIONLIFT]

0 = section index  
cross along

[END OF SECTIONLIFT]

[END OF WAVE STEP]

Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 17:16:03
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case9-3.zsd
CREATED BY   : ZSteen version 2.1.1.7
```

===== BEGINNING OF DATA =====

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen

Turbulente stroming met grote lek lengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Haringmanblokken
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.50 = Lengte
0.50 = Breedte
0.0050000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2350 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
0 = No
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.60 = n Inwasmateriaal
0 = Blok
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
40.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
```

Constructie-1

```
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items

Constructie-1

Haringmanblokken

0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items

steenslag

65535 = Kleur

0.50 = BF

0.0150 = D15F

0.300 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil

2.20 = Hs

7.00 = Tp

1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef

2.80 = Initial Phreatic Head

1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)

0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)

1.00 = Scale factor

0.000 = First gauge position X

0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]

[SECTIONSIZES]



1 = number of sections  
 0 82 1 = section number, joint cross count, joint along count  
 [END OF SECTIONIZES]

[WAVE STEPCOUNT]  
 4877 = number of timesteps in wave  
 [END OF WAVE STEPCOUNT]

[WAVE STEP]  
 0 = wave step index  
 0.000000 = wave time instant

[SECTIONHEAD]  
 0 = section index  
 33 = number of joints in cross direction  
 1 = number of joints in along direction

| bedding   | golf            |
|-----------|-----------------|
| 3.5027165 | 3.7646668       |
| 3.4854542 | 3.6597632       |
| 3.4271993 | 3.5399262       |
| 3.3194556 | 3.3558240       |
| 3.1769981 | 3.1794041       |
| 3.0263917 | 3.0313193       |
| 2.8651934 | 2.8530495       |
| 2.7232906 | 2.7203438       |
| 2.5905389 | 2.5649029       |
| 2.4858939 | 2.4110154       |
| 2.4209173 | 2.3803133       |
| 2.3822565 | 2.2324647       |
| 2.3735801 | 2.2134010       |
| 2.3789917 | 2.2975600       |
| 2.4019206 | 2.3639159       |
| 2.4437179 | 2.3956521       |
| 2.5113662 | 2.4949785       |
| 2.5966295 | 2.6007900       |
| 2.6734364 | 2.6698757       |
| 2.7572162 | 2.7461354       |
| 2.8558244 | 2.8505556       |
| 2.9655938 | 2.9682100       |
| 3.0677860 | 3.0811952       |
| 3.1540134 | 3.1505222       |
| 3.2462699 | 3.2457923       |
| 3.3409126 | 3.3458555       |
| 3.4256964 | 3.4459187       |
| 3.4909260 | 3.5459819       |
| 3.5297811 | 3.6057011       |
| 3.5452551 | 3.6628389       |
| 3.5453660 | 3.7199766       |
| 3.5252022 | 3.7771143       |
| 3.4501997 | 3.8342520       |
| 3.2200000 | = phreatic head |
| 0.0190533 | = phreatic rate |

[END OF SECTIONHEAD]

[SECTIONLIFT]  
0 = section index  
cross along  
[END OF SECTIONLIFT]  
  
[END OF WAVE STEP]

Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 17:04:44
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case11-3.zsd
CREATED BY   : ZSteen version 2.1.1.7
=====
```

===== BEGINNING OF DATA =====

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen

Turbulente stroming met grote lek lengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Hydroblocks ingewassen
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.30 = Lengte
0.30 = Breedte
0.0005000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2350 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
0 = No
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.10 = n Inwasmateriaal
1 = Zuil
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
32.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
Constructie-1
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items

Constructie-1

Hydroblocks ingewassen

0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items

steenslag

65535 = Kleur

0.50 = BF

0.0150 = D15F

0.300 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil

2.20 = Hs

6.50 = Tp

1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef

2.80 = Initial Phreatic Head

1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)

0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)

1.00 = Scale factor

0.000 = First gauge position X

0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]

[SECTIONSIIZES]

```

1 = number of sections
0 104 1 = section number, joint cross count, joint along count
[END OF SECTIONIZES]

```

```

[WAVE STEPCOUNT]
6108 = number of timesteps in wave
[END OF WAVE STEPCOUNT]

```

```

[WAVE STEP]
0 = wave step index
0.0000000 = wave time instant

```

```

[SECTIONHEAD]
0 = section index
42 = number of joints in cross direction
1 = number of joints in along direction

```

| bedding   | golf      |
|-----------|-----------|
| 2.7183476 | 2.8063998 |
| 2.6930699 | 2.7159318 |
| 2.6236725 | 2.6254639 |
| 2.5350570 | 2.5349959 |
| 2.4546275 | 2.4537454 |
| 2.3881752 | 2.3803432 |
| 2.3431847 | 2.3407050 |
| 2.3113752 | 2.3094850 |
| 2.2877971 | 2.2970497 |
| 2.2405344 | 2.2396837 |
| 2.2009540 | 2.1568153 |
| 2.1949081 | 2.1731370 |
| 2.1990871 | 2.1917980 |
| 2.2137223 | 2.2151144 |
| 2.2237107 | 2.2240000 |
| 2.2321211 | 2.2258056 |
| 2.2499059 | 2.2498993 |
| 2.2676829 | 2.2681267 |
| 2.2829417 | 2.2758990 |
| 2.3140690 | 2.3121965 |
| 2.3566291 | 2.3642700 |
| 2.3832295 | 2.3760172 |
| 2.4320710 | 2.4222637 |
| 2.5171047 | 2.5287423 |
| 2.5648366 | 2.5697185 |
| 2.5938371 | 2.5782680 |
| 2.6494432 | 2.6494696 |
| 2.7032323 | 2.7063785 |
| 2.7405610 | 2.7382445 |
| 2.7903478 | 2.7895243 |
| 2.8505022 | 2.8493700 |
| 2.9146050 | 2.9233248 |
| 2.9499018 | 2.9568935 |
| 2.9681596 | 2.9374630 |
| 3.0278365 | 3.0174799 |
| 3.1325689 | 3.1362884 |

3.2222736 3.2233367  
3.2949259 3.2992509  
3.3461622 3.3476110  
3.3848792 3.4033581  
3.3947122 3.4620891  
3.3781413 3.5359247  
3.2200000 = phreatic head  
0.0185690 = phreatic rate

[END OF SECTIONHEAD]

[SECTIONLIFT]

0 = section index  
cross along

[END OF SECTIONLIFT]

[END OF WAVE STEP]

Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 17:12:45
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case12-3.zsd
CREATED BY   : ZSteen version 2.1.1.7
=====
```

===== BEGINNING OF DATA =====

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen

Turbulente stroming met grote leklengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Hydroblocks ingewassen
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.30 = Lengte
0.30 = Breedte
0.0005000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2350 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
1 = Yes
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.60 = n Inwasmateriaal
1 = Zuil
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
32.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
```

Constructie-1

```
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items

Constructie-1

Hydroblocks ingewassen

0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items

steenslag

65535 = Kleur

0.50 = BF

0.0150 = D15F

0.300 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil

2.20 = Hs

6.50 = Tp

1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef

2.80 = Initial Phreatic Head

1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)

0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)

1.00 = Scale factor

0.000 = First gauge position X

0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]

[SECTIONSIIZES]



```

1 = number of sections
0 104 1 = section number, joint cross count, joint along count
[END OF SECTIONIZES]

```

```

[WAVE STEPCOUNT]
6108 = number of timesteps in wave
[END OF WAVE STEPCOUNT]

```

```

[WAVE STEP]
0 = wave step index
0.0000000 = wave time instant

```

```

[SECTIONHEAD]
0 = section index
42 = number of joints in cross direction
1 = number of joints in along direction

```

| bedding   | golf      |
|-----------|-----------|
| 2.5593179 | 2.8063998 |
| 2.5529263 | 2.7159318 |
| 2.5327419 | 2.6254639 |
| 2.4975328 | 2.5349959 |
| 2.4508790 | 2.4537454 |
| 2.4013789 | 2.3803432 |
| 2.3599204 | 2.3407050 |
| 2.3260889 | 2.3094850 |
| 2.2985662 | 2.2970497 |
| 2.2725491 | 2.2396837 |
| 2.2543474 | 2.1568153 |
| 2.2462152 | 2.1731370 |
| 2.2440354 | 2.1917980 |
| 2.2447205 | 2.2151144 |
| 2.2480907 | 2.2240000 |
| 2.2548728 | 2.2258056 |
| 2.2663184 | 2.2498993 |
| 2.2820750 | 2.2681267 |
| 2.3023438 | 2.2758990 |
| 2.3298133 | 2.3121965 |
| 2.3638960 | 2.3642700 |
| 2.4018992 | 2.3760172 |
| 2.4495114 | 2.4222637 |
| 2.5080189 | 2.5287423 |
| 2.5571832 | 2.5697185 |
| 2.5995211 | 2.5782680 |
| 2.6495432 | 2.6494696 |
| 2.6997306 | 2.7063785 |
| 2.7450743 | 2.7382445 |
| 2.7951847 | 2.7895243 |
| 2.8499500 | 2.8493700 |
| 2.9043244 | 2.9233248 |
| 2.9498361 | 2.9568935 |
| 2.9905312 | 2.9374630 |
| 3.0456460 | 3.0174799 |
| 3.1127604 | 3.1362884 |

3.1698224 3.2233367  
3.2118204 3.2992509  
3.2378203 3.3476110  
3.2501987 3.4033581  
3.2526084 3.4620891  
3.2480529 3.5359247  
3.2200000 = phreatic head  
0.0066651 = phreatic rate

[END OF SECTIONHEAD]

[SECTIONLIFT]

0 = section index  
cross along

[END OF SECTIONLIFT]

[END OF WAVE STEP]

Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 16:47:31
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case13-3.zsd
CREATED BY  : ZSteen version 2.1.1.7
```

===== BEGINNING OF DATA =====

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen

Turbulente stroming met grote leklengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Hydroblocks ingewassen
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.30 = Lengte
0.30 = Breedte
0.0005000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2350 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
1 = Yes
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.60 = n Inwasmateriaal
1 = Zuil
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
32.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
Constructie-1
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items  
Constructie-1  
Hydroblocks ingewassen  
0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items  
steenslag  
65535 = Kleur  
0.50 = BF  
0.0250 = D15F  
0.400 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil  
2.20 = Hs  
6.50 = Tp  
1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef  
2.80 = Initial Phreatic Head  
1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)  
0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)  
1.00 = Scale factor  
0.000 = First gauge position X  
0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]

[SECTIONSIZES]

```

1 = number of sections
0 104 1 = section number, joint cross count, joint along count
[END OF SECTIONIZES]

```

```

[WAVE STEPCOUNT]
6108 = number of timesteps in wave
[END OF WAVE STEPCOUNT]

```

```

[WAVE STEP]
0 = wave step index
0.0000000 = wave time instant

```

```

[SECTIONHEAD]
0 = section index
42 = number of joints in cross direction
1 = number of joints in along direction

```

| bedding   | golf      |
|-----------|-----------|
| 2.4646237 | 2.8063998 |
| 2.4627576 | 2.7159318 |
| 2.4551761 | 2.6254639 |
| 2.4400949 | 2.5349959 |
| 2.4178219 | 2.4537454 |
| 2.3905583 | 2.3803432 |
| 2.3655225 | 2.3407050 |
| 2.3444779 | 2.3094850 |
| 2.3277515 | 2.2970497 |
| 2.3145413 | 2.2396837 |
| 2.3061454 | 2.1568153 |
| 2.3026421 | 2.1731370 |
| 2.3018536 | 2.1917980 |
| 2.3019742 | 2.2151144 |
| 2.3033634 | 2.2240000 |
| 2.3071346 | 2.2258056 |
| 2.3144612 | 2.2498993 |
| 2.3259474 | 2.2681267 |
| 2.3421844 | 2.2758990 |
| 2.3645287 | 2.3121965 |
| 2.3930605 | 2.3642700 |
| 2.4267927 | 2.3760172 |
| 2.4680499 | 2.4222637 |
| 2.5170667 | 2.5287423 |
| 2.5622932 | 2.5697185 |
| 2.6044114 | 2.5782680 |
| 2.6517805 | 2.6494696 |
| 2.7006465 | 2.7063785 |
| 2.7468398 | 2.7382445 |
| 2.7962715 | 2.7895243 |
| 2.8486858 | 2.8493700 |
| 2.8994504 | 2.9233248 |
| 2.9444215 | 2.9568935 |
| 2.9854994 | 2.9374630 |
| 3.0344821 | 3.0174799 |
| 3.0884716 | 3.1362884 |

3.1344859 3.2233367  
3.1701945 3.2992509  
3.1951862 3.3476110  
3.2106450 3.4033581  
3.2179579 3.4620891  
3.2199090 3.5359247  
3.2200000 = phreatic head  
-0.0003841 = phreatic rate  
[END OF SECTIONHEAD]

[SECTIONLIFT]  
0 = section index  
cross along  
[END OF SECTIONLIFT]

[END OF WAVE STEP]

Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 17:07:01
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case14-3.zsd
CREATED BY   : ZSteen version 2.1.1.7
```

===== BEGINNING OF DATA =====

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen

Turbulente stroming met grote leklengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Haringmanblokken
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.50 = Lengte
0.50 = Breedte
0.0050000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2350 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
0 = No
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.60 = n Inwasmateriaal
0 = Blok
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
32.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
Constructie-1
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items

Constructie-1

Haringmanblokken

0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items

steenslag

65535 = Kleur

0.50 = BF

0.0150 = D15F

0.300 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil

2.20 = Hs

6.50 = Tp

1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef

2.80 = Initial Phreatic Head

1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)

0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)

1.00 = Scale factor

0.000 = First gauge position X

0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]

[SECTIONSIZES]



```

1 = number of sections
0 67 1 = section number, joint cross count, joint along count
[END OF SECTIONIZES]

```

```

[WAVE STEPCOUNT]
6108 = number of timesteps in wave
[END OF WAVE STEPCOUNT]

```

```

[WAVE STEP]
0 = wave step index
0.0000000 = wave time instant

```

```

[SECTIONHEAD]
0 = section index
27 = number of joints in cross direction
1 = number of joints in along direction

```

| bedding   | golf            |
|-----------|-----------------|
| 2.5532040 | 2.8063998       |
| 2.5366477 | 2.6638326       |
| 2.4865495 | 2.5212653       |
| 2.4121306 | 2.3997041       |
| 2.3503649 | 2.3286730       |
| 2.3051737 | 2.2985490       |
| 2.2685526 | 2.1995769       |
| 2.2532504 | 2.1736463       |
| 2.2514906 | 2.2059532       |
| 2.2558473 | 2.2240000       |
| 2.2690478 | 2.2440895       |
| 2.2932463 | 2.2707285       |
| 2.3306877 | 2.3075432       |
| 2.3841554 | 2.3715829       |
| 2.4522466 | 2.4289091       |
| 2.5403936 | 2.5666261       |
| 2.6084331 | 2.5911091       |
| 2.6905389 | 2.6996889       |
| 2.7628626 | 2.7515796       |
| 2.8468072 | 2.8458896       |
| 2.9299890 | 2.9617753       |
| 2.9945188 | 2.9356440       |
| 3.0900848 | 3.0970933       |
| 3.1756683 | 3.2446974       |
| 3.2260997 | 3.3389679       |
| 3.2444500 | 3.4265092       |
| 3.2435462 | 3.5339348       |
| 3.2200000 | = phreatic head |
| 0.0059181 | = phreatic rate |

```

[END OF SECTIONHEAD]

```

```

[SECTIONLIFT]
0 = section index
cross along
[END OF SECTIONLIFT]
[END OF WAVE STEP]

```

Dump Data ZSteen

```
=====
COMPANY      : Royal Haskoning
LICENSE      : 00901
DATE         : 21-2-2006
TIME         : 17:08:56
FILENAME     : C:\ZSteen\16feb\case17-3.zsd
CREATED BY   : ZSteen version 2.1.1.7
```

===== BEGINNING OF DATA =====

[INPUT DATA]

[RUN IDENTIFICATION]

Controleberekening ZSteen  
Turbulente stroming met grote leklengte

[CALCULATIONTYPE]

```
0      = Check
0      = Scheve golfaanval (0 = uit; 1 = aan)
0      = Havendammen (0 = uit; 1 = aan)
```

[TOP LAYERS]

```
1 = number of items
Hydroblocks ingewassen
33023 = Kleur
0.25 = Dikte
0.50 = Lengte
0.50 = Breedte
0.0050000 = Spleetbreedte
12.00 = Percentage open oppervlak
2350 = Rho steen
1.00 = Klemfactor
0.00 = Wrijving toplagen en ondergrond
0 = No
0.000 = Oppervlakte gat
0 = Aantal gaten
1 = Yes
0.005 = D15 inwasmateriaal
0.60 = n Inwasmateriaal
1 = Zuil
0.09 = Oppervlakte zuil
```

[SECTIONS]

```
1 = number of items
1
0.00 = X-Links
28.00 = X-Rechts
0.00 = Y-Links
8.00 = Y-Rechts
Constructie-1
1 = Closed
1.00 = Doorlatendheid onderste spleet
```

[SECTIONS WIDTH]

1.00 = Breedte van de secties

[BUILDTYPES]

1 = number of items

Constructie-1

Hydroblocks ingewassen

0

0

steenslag

[GEOTEXTILES]

0 = number of items

[FILLLAYERS]

0 = number of items

[FILTERLAYERS]

1 = number of items

steenslag

65535 = Kleur

0.50 = BF

0.0150 = D15F

0.300 = nF

[BASELAYERS]

0 = number of items

[WAVECOMMON]

1000.00 = Rho Water

[WAVEDIMENSION]

3.00 = H Stil

2.20 = Hs

8.00 = Tp

1.0 = TStorm

[WAVEWAVEFILE]

bm4\_Wave\_1.gef

2.80 = Initial Phreatic Head

1 = Wavestate (0: Random; 1: Periodic; 2: Symmetric)

0 = Scaling enabled (0 = no; 1 = yes)

1.00 = Scale factor

0.000 = First gauge position X

0.000 = First gauge position Y

[END OF INPUT DATA]

[OUTPUT DATA]

[SECTIONSIZES]

1 = number of sections

0 92 1 = section number, joint cross count, joint along count

[END OF SECTIONSIZES]

[WAVE STEPCOUNT]

19414 = number of timesteps in wave

[END OF WAVE STEPCOUNT]

[WAVE STEP]

0 = wave step index

0.0000000 = wave time instant

[SECTIONHEAD]

0 = section index

37 = number of joints in cross direction

1 = number of joints in along direction

bedding golf

2.7238914 2.7327804

2.7231435 2.7327804

2.7210533 2.7327804

2.7170614 2.7327804

2.7102961 2.7327804

2.6993557 2.7273899

2.6827718 2.6973320

2.6614493 2.6672741

2.6369973 2.6372162

2.6122299 2.6071583

2.5901367 2.5872748

2.5700276 2.5683635

2.5512834 2.5494522

2.5339406 2.5305409

2.5186392 2.5067223

2.5070065 2.4816659

2.4999565 2.4660599

2.4970069 2.4525612

2.4970338 2.4464112

2.5003139 2.4467256

2.5091339 2.4614418

2.5252568 2.4978751

2.5481636 2.5328006

2.5767879 2.5656252

2.6106779 2.5993267

2.6502818 2.6352327

2.6971310 2.6761743

2.7530895 2.7453703

2.8149089 2.8145663

2.8776203 2.8833051

2.9353312 2.9519729

2.9846430 3.0155781

3.0232433 3.0785236

3.0494098 3.0554722

3.0726267 3.0039712

3.1079544 3.0812472  
3.1528041 3.1692828  
3.2200000 = phreatic head  
-0.0115869 = phreatic rate  
[END OF SECTIONHEAD]

[SECTIONLIFT]  
0 = section index  
cross along  
[END OF SECTIONLIFT]

[END OF WAVE STEP]

