Deltares

Enabling Delta Life

Dynamica van beweegbare waterkeringen

Trillingen in onderstroomde schuiven en uitgangspunten voor een schaalmodelopstelling

Deltares

Dynamica van beweegbare waterkeringen

Trillingen in onderstroomde schuiven en uitgangspunten voor een schaalmodelopstelling

Tom Jongeling
Christiaan Erdbrink

1200216-000

© Deltares, 2010

Deltares

Titel
Dynamica van beweegbare waterkeringen

Opdrachtgever	Project	Pagina's
Deltares	1200216-000	81

Trefwoorden
Hefschuiven, stromingsbelasting, trillingen, dynamische responsie, vormgeving, numerieke stromingsberekening

Samenvatting
In 2009 is in het kader van strategisch onderzoek (SO) Waterbouw een aanzet tot een experimenteel onderzoek gegeven, dat gericht zal zijn op de stromingsbelasting en het responsiegedrag van een onderstroomde hefschuif, en op de mogelijkheden van een (actieve) beïnvloeding van belasting en responsie. Het rapport opent met een introductie in de dynamica van constructies en stromingsgeïnduceerde trillingen. Daarna worden de resultaten van een beknopt literatuuronderzoek gepresenteerd gericht op experimentele studies met een vergelijkbare onderzoeksdoelstelling. Vervolgens worden functie-eisen voor het schaalmodel geformuleerd en wordt een aanzet gegeven tot het ontwerp van het model.

In de literatuur is daarnaast nagegaan wat de stand van zaken is met betrekking tot het numerieke rekenen aan de stroming rond constructies en de interacties van de stroming met de constructie; de resultaten hiervan worden in de bijlage gepresenteerd.

In 2010 zal het project worden voortgezet. Plan is om een tot in detail uitgewerkt ontwerp te maken voor de schaalmodelopstelling van een hefschuif en om het schaalmodel te bouwen. Afhankelijk van het beschikbare budget zal ook al een begin kunnen worden gemaakt met het uitvoeren van experimenten.

In 2010 zal tevens, in het kader van kennisoverdracht, worden meegewerkt aan een onder auspiciën van CUR te realiseren cursus met syllabus gericht op stroomsluizen, stuwen en hoogwaterkeringen.

Referenties
Projectplan SO 2009-Waterbouw voor klimaatadaptatie (projectnummer 1200216)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	dec. 2009	Tom Jongeling Christiaan Erdbrink		Otto Weiler		Tony Minns	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Onderzoeksvragen en achtergronden 1
1.2 Doelstelling van het experimentele onderzoek 1
1.3 Uitvoering van het onderzoek 2

2 Oorzaken van stromingsgeïnduceerde trillingen in constructies **5**
2.1 Schuiven in water 5
2.2 Enige basisbegrippen betreffende de dynamica van constructies in water 5
2.3 Oorzaken van stromingsgeïnduceerde trillingen 10
2.3.1 Excitatie door turbulentie in het water 11
2.3.2 Excitatie door loslatende wervels en instabiele afstroming 12
2.3.3 Zelf-excitatie 15
2.3.4 Excitatie door vloeistofoscillatie in een bekken 16
2.3.5 Excitatie door vloeistofoscillatie gekoppeld met constructiebewegingen 17
2.4 Kennisbronnen stromingsgeïnduceerde trillingen in waterbouwkundige constructies 18

3 Literatuuronderzoek: beïnvloeding stroming, stromingskrachten en responsie van constructies **21**
3.1 Literatuuronderzoek door middel van quick scan 21
3.2 Beïnvloeding van stroming, stromingskrachten en responsie: resultaten quick scan 21
3.3 Resumé van mogelijke maatregelen om stroming en responsie te beïnvloeden 28

4 Opzet van een schaalmodelopstelling voor experimenteel onderzoek aan een onderstroomde hefschuif **31**
4.1 Onderstroomde hefschuif 31
4.2 Trillingsgebieden hefschuiven met rechthoekige onderrand 31
4.2.1 Trillingen van schuiven bij horizontale graad van bewegingsvrijheid 31
4.2.2 Trillingen van schuiven bij verticale graad van bewegingsvrijheid 34
4.2.3 Trillingen van schuiven bij horizontale en verticale graad van bewegingsvrijheid 36
4.3 Schaalmodel: te simuleren fysische processen en te modelleren schuifeigenschappen 37
4.3.1 Eisen te stellen aan het model 37
4.3.2 Dynamische eigenschappen van het model 39
4.4 Te onderzoeken opties voor beïnvloeding van stromingskrachten en responsie 39
4.5 Het meetframe 41
4.6 Te meten grootheden 44

5 Samenvatting **47**

Referenties

Bijlage:

A Literatuuronderzoek: numerieke berekening van stroming rond constructies A-1
A.1 Introduction A-2
A.1.1 Background A-2
A.1.2 Interests A-2
A.1.3 Approach and structure A-2
A.2 Categorization A-3
A.2.1 Introduction A-3
A.2.2 Notions and research frameworks A-3
A.2.3 Bluff bodies A-4
A.2.4 Search criteria A-5
A.3 Overview of current research A-6
A.3.1 Flow around circular cylinder A-6
A.3.2 Variations of flow around circular cylinder A-7
A.3.3 Flow around sharp-cornered bluff bodies A-9
A.3.4 Fluid-Structure Interaction (FSI) A-12
A.3.5 Numerical modeling of vortex-induced vibrations (VIV) A-13
A.3.6 Other numerical flow studies involving structures A-14
A.3.7 Non-numerical studies on flow around structures A-15
A.3.8 Hydraulic software packages used in research studies A-17
A.4 Backgrounds on numerical models A-17
A.4.1 URANS A-17
A.4.2 LES A-18
A.4.3 Detached-Eddy Simulations (DES) A-18
A.4.4 Lattice-Boltzmann Method (LBM or LB) A-20
A.4.5 Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH) A-21
A.4.6 Forced and free vibrations in VIV-studies A-21
A.4.7 Sheared inflow A-22
A.4.8 Passive wake control A-22
A.4.9 Vortex method A-23
A.4.10 Coupling conditions in FSI A-23
A.5 Conclusions A-24

1 Inleiding

1.1 Onderzoeksvragen en achtergronden

Eén van de onderwerpen binnen het kerndomein Waterbouw van Strategisch Onderzoek (SO) 2009 van Deltares is de dynamica van beweegbare keringen. In het betreffende projectplan 1200216 d.d. 3 juli 2009 worden de volgende twee onderwerpen voor onderzoek genoemd:

- Vastleggen en ontsluiten van kennis op het gebied van de dynamica van waterbouwkundige constructies
- Definitie van een schaalmodelopstelling voor hydro-dynamisch onderzoek aan beweegbare en / of vervormbare constructies

De onderzoeksvragen zijn deels geïnspireerd door het verschijnen van het rapport van de Deltacommissie [Deltacommissie (2008)]. In dit rapport wordt bijvoorbeeld genoemd dat voor het beschermen van het Rijnmondgebied mogelijk nieuwe bewegende hoogwaterkeringen nodig zullen zijn. Ook worden suggesties gedaan voor het hoger opzetten van het waterpeil in het IJsselmeer. Met deze en andere suggesties wordt het duidelijk dat er in het watersysteem van Nederland nieuwe 'regelkranen' en extra (hoogwater)keringen nodig zullen zijn. Aan dergelijke regelwerken en keringen zullen deels oude, deels nieuwe eisen worden gesteld. Het ontwerpen van de nieuwe kunstwerken (hydraulische constructies) zal dus, zoals ook bij het realiseren van het Deltaplan uit 1960 gebeurde, vragen om onderzoek. Dit onderzoek ligt dan o.a. op het gebied van de dynamica van constructies in interactie met stromend water, golven, wind en ijsgang.

Zoals ook besproken met een afvaardiging van RWS Dienst Infrastructuur (RWS-DI), is de kennis en ervaring op dit gebied, voor een belangrijk deel ingebed in een generatie van ingenieurs bij RWS, het bedrijfsleven en bij Deltares, die bezig is met pensioen te gaan. Het is daarom urgent om deze kennis in de komende jaren door te geven aan een volgende generatie.

Over de in het verleden uitgevoerde projecten is veel geschreven en gepubliceerd. Dit zou je (oneerbiedig) 'dode' kennis kunnen noemen. Het is van groot belang de kennis weer te laten leven in mensen. Daarvoor is allereerst nodig dat deze mensen een overzicht hebben (al is het op hoofdlijnen) van de verschillende aspecten, toegang hebben tot de literatuur en kennisbronnen, en weten wat daar te vinden is. Deze mensen kunnen zodoende de verdere ontwikkeling van de kennis gaan dragen. Om de 'dode' kennis weer tot leven te laten komen is het ook nodig dat er een project wordt uitgevoerd, waarin kennis actief wordt gebruikt en ontwikkeld. In het projectplan is daarom voorgesteld om bij Deltares een opstelling te realiseren voor experimenteel onderzoek (schaalmodelopstelling), waarbij de onderzoeksvraag ligt op de grens van de bestaande kennis.

1.2 Doelstelling van het experimentele onderzoek

Het te bouwen schaalmodel zal zijn gericht op het onderzoek van het dynamische gedrag (trillen) van beweegbare keringen in stromend water en van de optredende stromingskrachten. In de meest simpele vorm bestaat een kering uit een vertikaal of horizontaal

beweegbare schuif in een stroomvoerend kanaal; in volledig geopende toestand hangt de schuif boven het water of is weggeborgen in een kas (in bodem of oever). Dergelijke constructies komen o.a. voor bij schutsluizen, spuisluizen en waterkeringen. Voorbeelden van het laatste zijn de stormvloedkeringen in de Hollandse IJssel, de afgedamde Maas en het Hartelkanaal. Voorbeelden van meer complexe kunstwerken zijn de stuwen in Rijn en Maas en de drijvende deuren van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg.

Het trillen van een schuif (of kering) kan optreden tijdens openen, sluiten en water afvoeren, maar ook als gevolg van lekstromingen in gesloten toestand. Het trillen wordt veroorzaakt door interactie tussen de (loslatende) stroming en de constructie, de laatste gekenmerkt door zijn massa- en stijfheidsverdeling, vervormings- en verplaatsingsmogelijkheden, en de wijze waarop de belastingen worden afgedragen naar de fundatie of ondersteuningspunten. Het dynamisch gedrag van het water (grenslaagvorming, loslaatpunten, afstroming met wervelvorming, loslaatfrequentie) wordt veelal sterk bepaald door de geometrie van de rand waarlangs het water stroomt. Andere aspecten spelen echter ook een rol, zoals wandruwheid, turbulentie in de aanstroming, stroomsnelheid, en grootte van de doorstroomopening. De laatste verandert tijdens openen en sluiten. Ook kan, zoals bijvoorbeeld bij de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg het geval is, de verval- en stroomrichting omkeren gedurende de periode dat de kering in bedrijf is.

Wanneer het er om gaat trillingen en instabiel gedrag van constructies te voorkomen (of tenminste te limiteren) en de optredende stromingskrachten te beheersen, zijn de vormgeving van de rand waarlangs het water stroomt (en de nabije omgevingsgeometrie) alsmede de dynamische eigenschappen van de constructie in de vorm van massa, stijfheid, demping en mechanisch systeem, dus van groot belang. Om het hoofd te bieden aan veranderende hydraulische omstandigheden zou het wenselijk kunnen zijn om de vorm en/of de dynamische eigenschappen van de constructie in de bedrijfsfase aan te kunnen passen, bijvoorbeeld door middel van uitklapbare kleppen, of door verandering van de stijfheid van de constructie (zoals o.a. kan worden gerealiseerd door verandering van de voorspanning). Ook zou de stroming zelf kunnen worden beïnvloed, bijvoorbeeld door ventilatie van het lagedrukgebied onder een schuif. Dergelijke opties zijn voor kunstwerken nog nauwelijks eerder onderzocht.

De schaalmodelopstelling zal zo worden ontworpen dat experimenteel onderzoek naar deze opties kan worden uitgevoerd. De onderzoeksvraag luidt daarmee:

Het onderzoeken van de mogelijkheden om de vorm van de constructie, dan wel de dynamische eigenschappen van de constructie, dan wel de stromingskarakteristieken aan te passen, zodanig dat trillingen en instabiliteit van de constructie alsmede stromingskrachten kunnen worden beheerst over een breed bereik aan hydraulische condities en gebruiksomstandigheden en voor variërende stroomrichtingen. Het onderzoek zal zich in eerste instantie richten op een verticaal beweegbare schuif.

1.3 Uitvoering van het onderzoek

In 2009 is een aanzet tot het experimentele onderzoek gegeven. In de literatuur is eerst door middel van een ‘quick scan’ gezocht naar artikelen waarin onderzoek met een vergelijkbare doelstelling wordt beschreven als het experimentele onderzoek dat in het huidige onderzoek zal worden uitgevoerd; de resultaten van deze quick scan worden kort samengevat in Hoofdstuk 3. In hetzelfde hoofdstuk wordt ook een beknopt overzicht gepresenteerd van

potentiële kennisbronnen met betrekking tot stromingsgeïnduceerde trillingen. In Hoofdstuk 4 worden functie-eisen voor het schaalmodel geformuleerd en wordt een aanzet gegeven tot het ontwerp van het model. In de literatuur is daarnaast nagegaan wat de stand van zaken is met betrekking tot het numerieke rekenen aan de stroming rond constructies en de interacties van de stroming met de constructie; de resultaten hiervan worden in Bijlage A gepresenteerd. Het rapport opent in Hoofdstuk 2 met een introductie in de dynamica van constructies en stromingsgeïnduceerde trillingen.

Het in dit rapport beschreven onderzoek is eind 2009 uitgevoerd door ir. T.H.G. Jongeling; de literatuurstudie numerieke stromingsberekening (Bijlage A) is door ir. C.D. Erdbrink uitgevoerd. Projectleider was ir. O.M. Weiler.

In 2010 zal het project worden voortgezet. Plan is om een tot in detail uitgewerkt ontwerp te maken voor de schaalmodelopstelling en om het schaalmodel te bouwen. Afhankelijk van het beschikbare budget zal dan ook al een begin kunnen worden gemaakt met het uitvoeren van experimenten.

In 2010 zal tevens, in het kader van kennisoverdracht, worden meegewerkt aan een onder auspiciën van CUR te realiseren cursus met syllabus gericht op stroomsluizen, stuwen en hoogwaterkeringen.

2 Oorzaken van stromingsgeïnduceerde trillingen in constructies

2.1 Schuiven in water

Schuiven worden toegepast om de stroming van water van het ene vloeistofbekken naar het andere vloeistofbekken actief te kunnen regelen en beheersen. Vanwege die regelfunctie zullen schuiven daarom veelvuldig worden blootgesteld aan dynamische stromingsbelastingen. In gesloten toestand kunnen schuiven evenzeer langdurig worden belast door een statische vervalbelasting, al dan niet in combinatie met een wisselende golfbelasting.
De hydraulische belastingen vertonen dus een sterk geschakeerd beeld. De duur c.q. de periode van de dynamische belastingen varieert van zeer kort (golfklapbelastingen) tot zeer lang (getijde-bewegingen) en het verloop van de belasting in de tijd kan variëren van zeer onregelmatig (turbulente excitatie), stootvormig (botsende ijsschotsen, golfklappen) tot zeer regelmatig (wervelvorming in afstroming, monochrome golven). Complicerend in dit geheel is dat er extra krachten (interactiekrachten) worden opgewekt in het water op het moment dat de constructie onder invloed van de dynamische belastingen gaat bewegen (respondeert).

In de volgende paragrafen zal ter introductie in deze materie een korte uiteenzetting worden gegeven over stromingsgeïnduceerde trillingen in waterbouwkundige constructies. Voor een verdere verbreding en uitdieping wordt verwezen naar de kennisbronnen genoemd in Paragraaf 2.4.

2.2 Enige basisbegrippen betreffende de dynamica van constructies in water

In deze paragraaf worden enkele basisbegrippen uit de dynamica van constructies in water toegelicht aan de hand van een lineair, enkelvoudig massaveersysteem met één graad van bewegingsvrijheid (Figuur 2.1). De bewegingsvergelijking van dit systeem luidt als volgt:

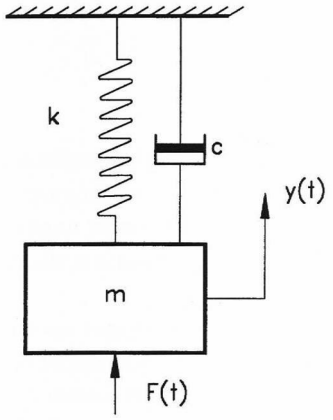
$$m.\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c.\frac{\partial y}{\partial t} + k.y = F(t) \qquad \text{[N]}$$

met:
m = massa (kg)
c = demping (kg/s = Ns/m)
k = veerstijfheid (N/m)
y = verplaatsing (m)
F = uitwendige belasting (N)

Wanneer het massaveersysteem is ondergedompeld in water ontstaan er bij bewegen van het systeem extra krachten, die op de massa inwerken. Deze extra krachten worden, afhankelijk van de faserelatie die ze hebben met het bewegende systeem, veelal aangeduid met hydrodynamische stijfheidskracht, hydrodynamische dempingskracht en hydrodynamische massatraagheidskracht. In de meest eenvoudige, gelineairiseerde vorm ziet de bewegingsvergelijking van het enkelvoudige massaveersysteem, ondergedompeld in water, er dan als volgt uit:

$$(m+m_w).\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}+(c+c_w).\frac{\partial y}{\partial t}+(k+k_w).y=F_w(t) \qquad \text{[N]}$$

met:
m_w = hydrodynamische massa (kg)
c_w = hydrodynamische demping (kg/s = Ns/m)
k_w = hydrodynamische veerstijfheid (N/m)
y = verplaatsing (m)
F_w = uitwendige belasting niet gekoppeld met de beweging van het systeem (N)



Figuur 2.1 Enkelvoudig massaveersysteem

De eigenfrequentie f_n van dit systeem volgt uit:

$$f_n=\frac{\omega_n}{2\pi}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k+k_w}{m+m_w}} \qquad \text{[1/s]}$$

De term $m_w.\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ levert, wanneer wordt gedeeld door de versnelling, een hoeveelheid mee-bewegende watermassa m_w op, gewoonlijk aangeduid met de term toegevoegde massa. Deze massa is in zekere zin te beschouwen als een virtuele massa, omdat het hier gaat om een traagheidseffect. Het resultaat van deze massa is een verlaging van de eigenfrequentie van het in water ondergedompelde systeem. Door de eigenfrequenties van het systeem in lucht en in water (f_{droog} *en* f_{nat}) met elkaar te vergelijken kan de toegevoegde massa worden afgeleid. Voor het enkelvoudige massaveersysteem geldt dan (geen hydrodynamische stijfheid):

$$\frac{m+m_w}{m}=\left(\frac{f_{droog}}{f_{nat}}\right)^2$$

De toegevoegde massa m_w kan bij waterbouwkundige constructies een veelvoud zijn van de constructiemassa m; met name geldt dit voor plaatvormige constructies (zoals een schuif) die loodrecht op hun vlak bewegen. Bij een trillende plaat in oneindig water bijvoorbeeld bedraagt de toegevoegde massa: $m_w = \pi\rho D^2/4$ per eenheid van lengte (D = hoogte van de plaat, ρ = soortelijke massa water). De hydrodynamische massa neemt toe wanneer zich een wand of een ander gesloten vlak in de nabijheid van de trillende constructie bevindt.

Een vrije waterspiegel is eveneens van invloed, omdat zich nu uitstralende oppervlaktegolven (een vorm van demping) kunnen ontwikkelen. De toegevoegde massa wordt hierdoor sterk frequentie-afhankelijk in het gebied met lage excitatiefrequentie ω (gekarakteriseerd door $\omega^2 h/g < 10$, met h = waterdiepte, g = zwaartekrachtsversnelling). In dit gebied is de golfdruk tot diep in het water merkbaar. Bij hogere excitatiefrequentie ω blijft de invloed van de opgewekte golfjes beperkt tot een kleine diepte onder het wateroppervlak en gaat m_w naar een constante waarde toe.

De demping van het enkelvoudige massaveersysteem bepaalt bij een gegeven excitatie-frequentie $\omega = 2\pi f$ hoe groot de responsie is bij een harmonische belasting (ofwel hoe groot de versterkingsfactor A is). De harmonische belasting F(t) en de daardoor eveneens harmonische responsie y(t) zijn gegeven door:

$$F = F_0 \sin(\omega t)$$
$$y = y_0 \sin(\omega t - \Phi)$$

met:
F_0 = amplitude harmonische belasting [N]
y_0 = amplitude harmonische responsie [m]
Φ = fasehoek tussen belasting en responsie [rad]

De versterkingsfactor A, gedefinieerd als de optredende kracht in het veersysteem $k.y_0$ bij maximale uitwijking gedeeld door de amplitude F_0 van de belasting, is een functie van de relatieve demping γ:

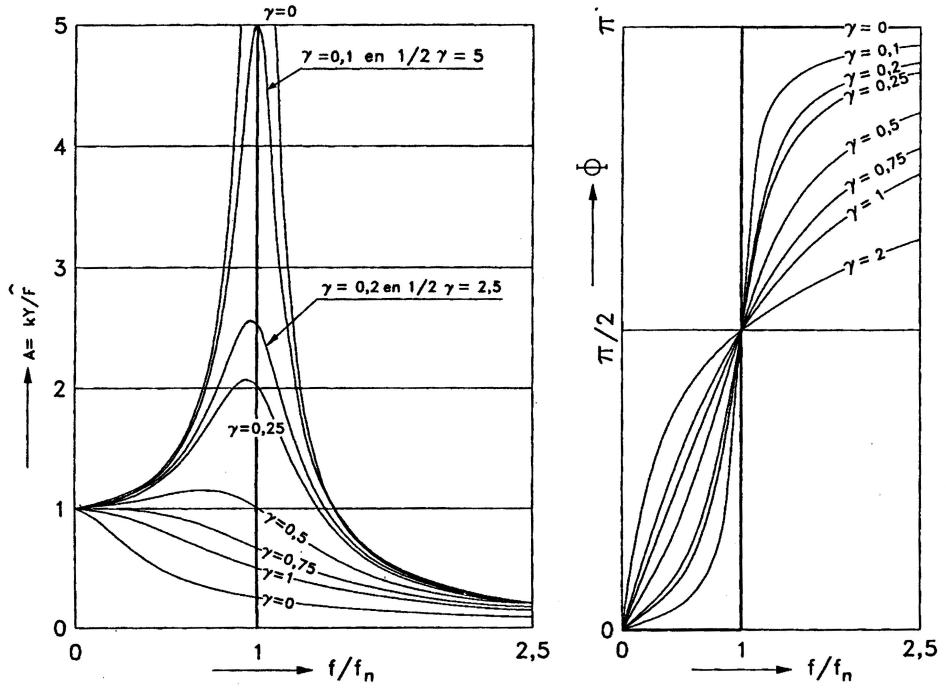
$$A = \frac{k.y_0}{F_0} = \frac{1}{2\gamma} \qquad [-]$$

De relatieve demping γ is gedefinieerd als:

$$\gamma = \frac{c}{c_{crit}} = \frac{c}{2\sqrt{k.m}} = \frac{c}{2m.\omega_n} \qquad [-]$$

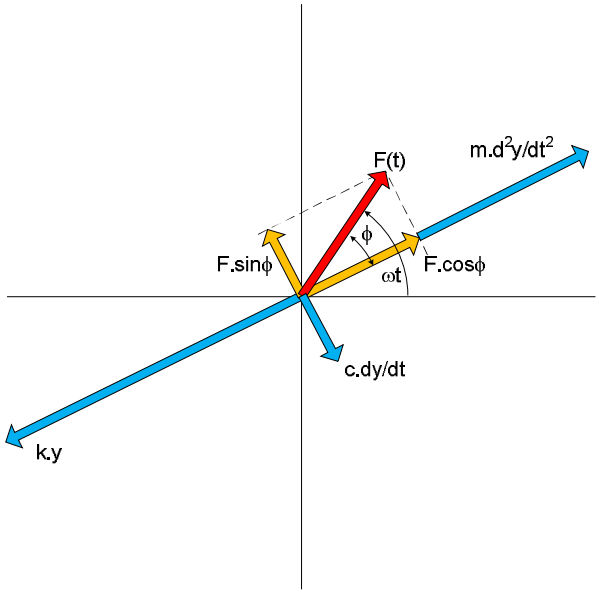
met:
c_{crit} = kritische demping [kg/s = Ns/m]
ω_n = eigenfrequentie = $2\pi f_n$ [rad/s]

De versterkingsfactor A wordt in onderstaande Figuur 2.2 als functie van f/f_n (excitatie-frequentie / eigenfrequentie) getoond, evenals de fasehoek Φ. De sterkste responsie ontstaat bij $f/f_n \approx 1$ (resonantie). De fasehoek Φ tussen de harmonische belasting F en de harmonische responsie y is in dat geval gelijk aan $\pi/2$ radialen; dit betekent dat de verplaatsing y 90° achter loopt op de belasting F, maar de snelheid dy/dt is precies in fase met de belasting. De overdracht van energie per periode $T = 2\pi/\omega$ is dan optimaal. De fasehoek Φ tussen de harmonische belasting F en de responsie y blijkt dus van belang te zijn voor de mate van energieoverdracht naar het massaveersysteem.



Figuur 2.2 *Responsie van een enkelvoudig massaveersysteem en faseverschil bij harmonische excitatie*

In navolgend fasediagram is voor de situatie dat zich een evenwicht-trillingsamplitude heeft ingesteld, te zien dat *op ieder moment t* evenwicht bestaat tussen *F*.cos*Φ*, de massatraagheidskracht *m.ÿ*, en de veerkracht *k.y*. Evenzo bestaat er *op ieder moment t* evenwicht tussen *F*.sin*Φ* (de component van *F* die in fase is met de snelheid *dy/dt* en energie toevoert) en de dempingskracht *c.dy/dt*. Bij het doorlopen van het fasediagram over de tijd $0 < t < T$, ofwel over de hoek $0 < \omega t < 2\pi$, verandert de amplitude van de verschillende krachtcomponenten, maar de componenten blijven steeds evenwicht maken. Het fasediagram laat ook zien dat de kracht *F* de grootste hoeveelheid energie overdraagt naar het massaveersysteem wanneer $\Phi = 90^{o}$.



Figuur 2.3 *Fasediagram enkelvoudig massaveersysteem bij harmonische excitatie*

De overdracht van energie per periode $T = 2\pi/\omega$ volgt uit de integraal:

$$E = \int_0^T F(t).dy = \int_0^T F(t).\dot{y}.dt \qquad \text{[Nm]}$$

Met $\Phi = \pi/2$ ontstaat:

$$y = y_0 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = -y_0 \cos(\omega t) \;\Rightarrow\; \dot{y} = y_0 \omega \sin(\omega t)$$

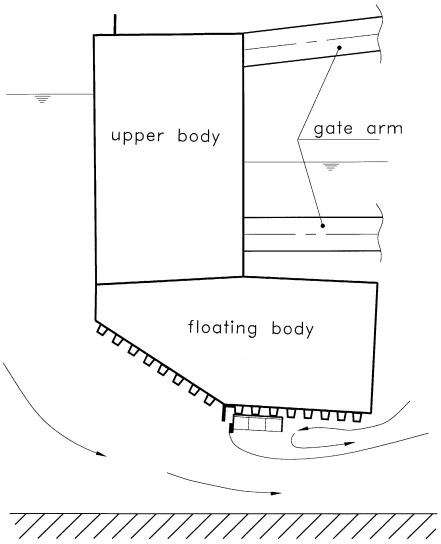
$$E = \int_0^T F_0 y_0 \omega . \sin^2(\omega t) dt = F_0 y_0 . \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega t) d(\omega t) = \pi F_0 y_0$$

In het algemene geval met $\Phi \neq \pi/2$ levert de integraal over de periode T de waarde:

$$E = \pi F_0 y_0 . \sin\Phi .$$

Constructies in water zijn veelal sterk gedempt, hetgeen een voordeel is omdat de responsie op een dynamische belasting daardoor beperkt kan blijven. De hydrodynamische demping c_w ontstaat zoals gezegd door uitstralende golven, maar ook door viskeuze wrijving. Daarnaast kan stroming een zeer sterke demping geven. Een stroming kan echter ook energie toevoeren aan de constructie; hierdoor kan een in gang gezette trillingsbeweging sterker worden in plaats van uitdempen. Hier wordt in volgende paragrafen op ingegaan.

De hydrodynamische stijfheid k_w speelt voornamelijk bij drijvende constructies een rol en is dan recht evenredig met de waterdoorsnijdende doorsnede. Een voorbeeld hiervan is de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg (Figuur 2.4): de hydrodynamische stijfheid is hoog wanneer de brede ballastkisten bij invaren in de rivier door de waterlijn steken, maar neemt sterk af wanneer – tijdens afzinken – alleen de smallere bovenbouw, die bovendien deels aan zeezijde geperforeerd is, door de waterlijn steekt.



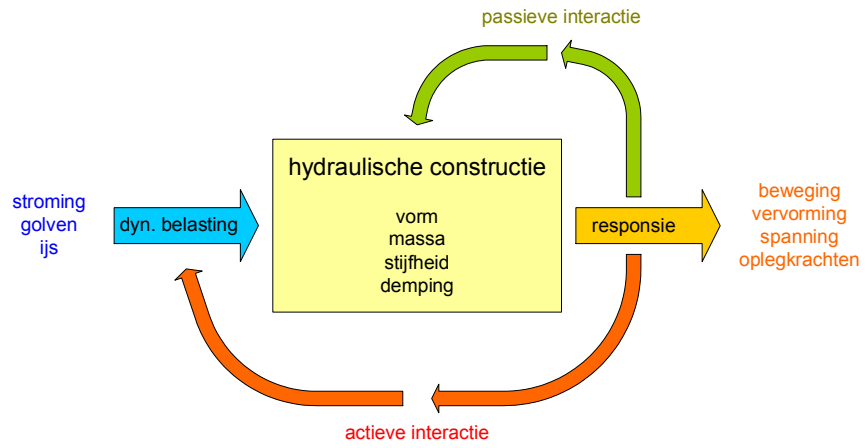
Figuur 2.4 Verticale doorsnede over sectordeur kering Nieuwe Waterweg (Maeslant Kering)

Elastische constructies zoals schuiven hebben meerdere graden van vrijheid en kennen dus meerdere eigentrillingsvormen (combinaties van doorbuiging, torsie, verplaatsing en rotatie in de drie hoofdrichtingen). In zo'n continu systeem zorgt het omringende water voor een extra koppeling tussen de verschillende responsiemodes. Wanneer in een eindige-elementen berekening een schuif wordt gediscretiseerd met behulp van staaf-, plaat- en balkelementen zullen de hydrodynamische massamatrix M_w, -dempingmatrix C_w en -stijfheidmatrix K_w termen buiten de hoofddiagonaal bevatten; dit zijn de termen die de koppeling tussen de eigenbewegingen tot stand brengen. Het stelsel bewegingsvergelijkingen van een gediscretiseerde constructie die (deels) ondergedompeld is in water, heeft dan de algemene vorm:

$$\left(M + M_w\right).\underline{\ddot{x}} + \left(C + C_w\right).\underline{\dot{x}} + \left(K + K_w\right).\underline{x} = \underline{F}$$

met:
$\underline{x}$ = vector met vrijheidsgraden [m]
$\underline{F}$ = vector met belastingcomponenten [N]

In Figuur 2.5 is in schemavorm het verband tussen excitatie, responsie en interactiekrachten weergegeven. De passieve interactiekrachten zijn de krachten zoals hierboven besproken.



Figuur 2.5 *Constructie en water vormen een gekoppeld systeem*

Een actieve terugkoppeling kan ontstaan wanneer door de trillingsbeweging van de constructie een zodanige invloed op het stroombeeld rond de constructie wordt uitgeoefend dat de met dit stroombeeld samenhangende excitatiekrachten veranderen. De meest bijzondere terugkoppeling ontstaat wanneer een aanvankelijk kleine beweging van de constructie aanleiding geeft tot een proces, waarbij de beweging en de excitatiekracht elkaar door terugkoppeling wederzijds steeds meer versterken (opslingering). Deze vorm van excitatie wordt zelf-excitatie genoemd en is berucht vanwege de soms desastreuze gevolgen voor de constructie (overschrijding van toelaatbare spanningen, bezwijken van onderdelen, of zelfs bezwijken van de gehele constructie).

2.3 Oorzaken van stromingsgeïnduceerde trillingen

Trillingen in constructies ontstaan doordat het langsstromende water een in de tijd variërende belasting uitoefent. De bronnen van deze dynamische belasting zijn:

- Excitatie door turbulentie in het water

- Excitatie door loslatende wervels en instabiele afstroming
- Zelf-excitatie
- Excitatie door vloeistofoscillatie in een bekken
- Excitatie door vloeistofoscillatie gekoppeld met constructiebewegingen.

In kort bestek zullen deze excitatiebronnen worden besproken.

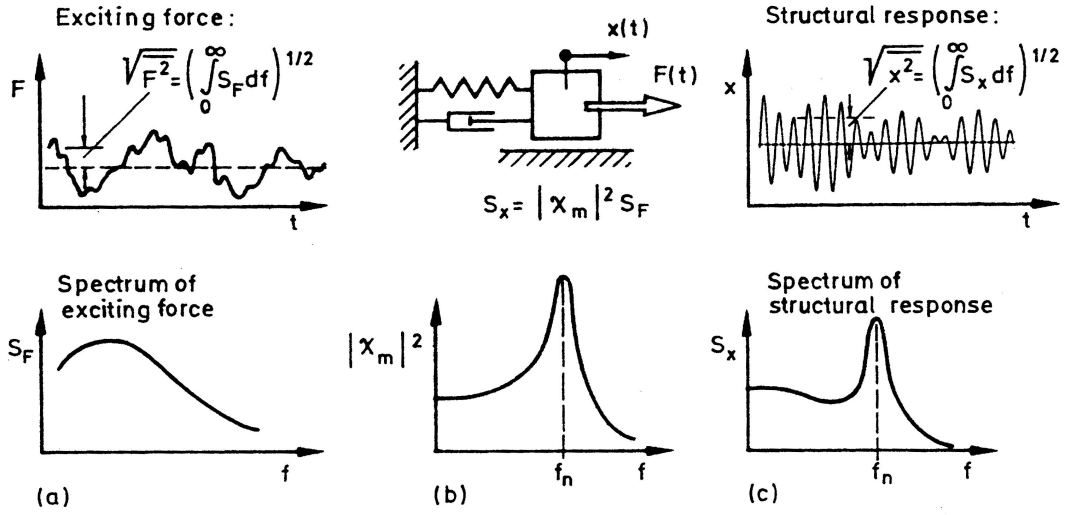
2.3.1 Excitatie door turbulentie in het water

In stromend water ontstaat turbulentie voornamelijk door viskeuze wrijving tussen waterdeeltjes onderling en tussen waterdeeltjes en grensvlakken en obstakels, zoals bodem, oevers, kribben, pijlers, damwanden en andere constructies. Een constructie in water genereert dus zelf turbulentie, vooral in het zog aan benedenstroomse zijde. In een turbulente stroming varieert de snelheid en de druk op chaotische wijze. De turbulente energie is verdeeld over een brede frequentieband, maar de meeste energie is te vinden bij de lage frequenties, in een gebied tot ca. 5 Hz. De turbulentie-intensiteit van een stroming, dit wil zeggen de standaardafwijking σ_u van de snelheid gedeeld door de gemiddelde snelheid u, is gewoonlijk kleiner dan 10%.

Uitgaande van een lineair systeem kan de responsie van een constructie op een turbulente excitatiebron worden bepaald door het variantiespectrum van de excitatie $S_F(f)$ te vermenigvuldigen met de overdrachtgrootheid $|X(f)|^2$:

$$S_F(f).|X(f)|^2 = S_x(f)$$

De grootheid $|X(f)|^2$ is onderdeel van de overdrachtsfunctie $H(f)$ en bevat amplitude-informatie; de grootheid $\Phi(f)$ van de overdrachtsfunctie bevat fase-informatie. De overdrachtsfunctie kan door middel van excitatieproeven ('doorfluiten') in een schaalmodel of in situ worden bepaald; berekening door middel van een numeriek model is in principe mogelijk maar dan moet wel de hydrodynamische interactie worden meegenomen (vooralsnog moeilijk). In onderstaande Figuur 2.6 is het gebruik van de overdrachtsfunctie schematisch weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat de responsie sterker is bij excitatie rond een eigenfrequentie (f_n).



Figuur 2.6 Schema toepassing overdrachtsfunctie (uit: 'Flow-induced vibrations' [Naudascher (1994)])

Als gevolg van turbulentie zullen elastische constructies in stromend water nooit geheel trillingsvrij zijn, maar het niveau is als regel laag, zeker wanneer zich geen eigenfrequenties in het dominante deel van het excitatiespectrum bevinden. Turbulente excitatie zal op zich nooit tot een gevaarlijke opslingering kunnen leiden, omdat frequenties en amplitudes van de belasting sterk in de tijd en ook in ruimtelijke zin variëren.

2.3.2 Excitatie door loslatende wervels en instabiele afstroming

De kracht die door stromend water op een constructie wordt uitgeoefend is sterk afhankelijk van de vorm van de constructie. Een goed gestroomlijnde constructie geleidt het water tot aan het meest benedenstroomse punt en heeft daarmee een geringe stromingsweerstand (bijvoorbeeld een duikboot). Waterbouwkundige constructies hebben echter niet altijd een goede stroomlijning, enerzijds vanwege constructie-technische redenen maar ook omdat constructies juist bedoeld kunnen zijn om weerstand te creëren. Bij spuisluizen en turbinegangen, waar het gaat om een zo groot mogelijke waterdoorvoer, wordt wel veel moeite gedaan om de weerstand zo klein mogelijk te maken (o.a. door toepassing van een venturi-vorm).

Normaal zal achter een omstroomde constructie een zog ontstaan, waarvan de breedte afhankelijk is van de plaats waar de stroming van de constructie loslaat. In het algemeen geldt: hoe breder het zog, hoe groter de weerstand en hoe groter de stromingskracht. Op de begrenzing van stromend water en het rustige water in de ‘schaduw’ van de constructie vormen zich door het snelheidsverschil wervels. Dit proces van wervelvorming begint zodra de stroming losgelaten heeft van de constructie en kan als een vorm van stromingsinstabiliteit worden gezien.
De vorming van wervels vanaf het loslaatpunt vindt bij stationaire stroming plaats met een tamelijk vaste frequentie f_w. Deze frequentie wordt grotendeels bepaald door de aanstroomsnelheid v_0 en de geometrie van de constructie waar het water geforceerd door of omheen moet stromen. Het dimensieloze Strouhal-getal S geeft het verband tussen deze grootheden:

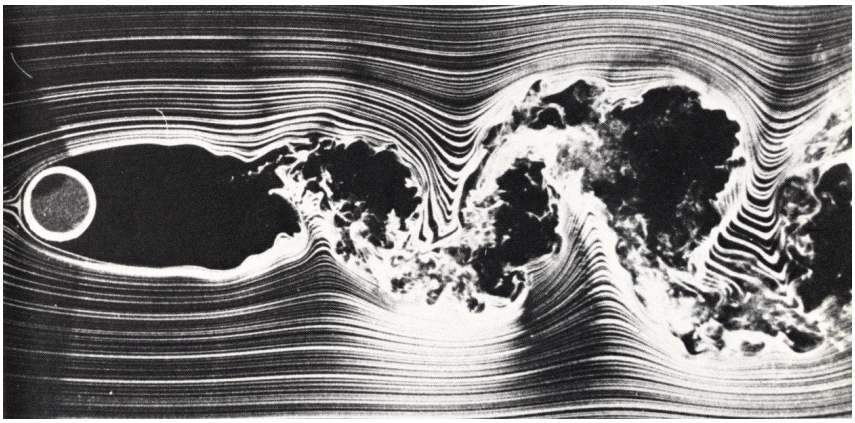
$$S = \frac{f_w . L}{v_o} \qquad [-]$$

met:
f_w = wervelloslaatfrequentie [1/s]
L = een karakteristieke geometrische maat [m]
v_o = aanstroomsnelheid [m/s]

Bij een hefschuif met onderdoorstroming wordt veelal de horizontale breedtemaat b van de onderrand of de verticale schuifopening δ als karakteristieke lengtemaat gekozen. Bij omstroomde constructies wordt de maat dwars op de aanstroming genomen.
Voor tal van vormen is het Strouhal-getal S experimenteel bepaald. Hierdoor kan voor een gegeven constructie een eerste afschatting van een dominante excitatie-frequentie worden gemaakt en kan worden geprobeerd de laagste eigenfrequentie ruim boven deze frequentie te houden (ter beperking van de responsie, zie hierna).

In tegenstelling tot schuiven hebben omstroomde constructies aan beide zijden een grenslaag waarop zich wervels vormen. Bij slankere constructies zoals pijlers, meerpalen of staven van vakwerkconstructies liggen beide grenslagen zo dicht bij elkaar dat de vorming van wervels gesynchroniseerd verloopt. In Figuur 2.7 wordt ter illustratie het wervelpatroon

achter een cilindrische staaf getoond. Bij deze staaf vindt afwisselend aan de ene zijde en de andere zijde wervelvorming plaats. Het loslaatpunt van de stroming schuift daarbij langs het cilinderoppervlak heen en weer.

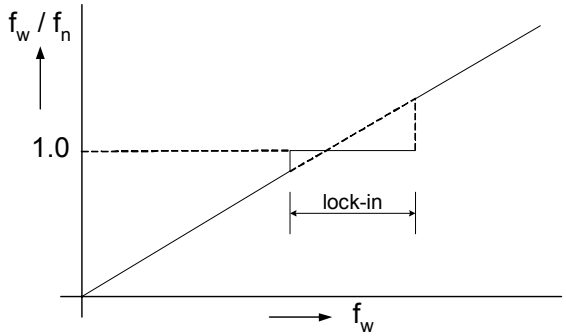


Figuur 2.7 Wervelvorming vanaf een staaf

Het proces van wervelvorming gaat gepaard met druk- en stroomsnelheidfluctuaties in een omvangrijk gebied nabij de staaf. De drukfluctuaties zorgen voor een alternerende kracht op de staaf die zowel in stroomrichting als ook in de richting loodrecht daarop werkt. De excitatiefrequentie is in het eerste geval gelijk aan de wervelloslaatfrequentie f_w, in het tweede geval gelijk aan $2f_w$. Bij lage stroomsnelheid kunnen zich ook paarsgewijs wervels vormen; dit kan leiden tot een alternerende kracht die werkt in stroomrichting met een frequentie f_w.

Wanneer de cylindrische staaf elastisch is of verend is bevestigd reageert de staaf op deze krachtswisselingen en gaat – geforceerd – een trillingsbeweging maken (met dezelfde frequentie als de excitatiekracht). Het gevolg hiervan kan zijn dat het proces van wervelvorming over de lengte van de staaf wordt gesynchroniseerd, waardoor de excitatie sterker wordt.

Wanneer de eigenfrequentie f_n van de staaf in de buurt ligt van de wervelloslaatfrequentie f_w kan zich een "lock-in" effect voordoen (Figuur 2.8). Dit houdt in dat het proces van wervelloslating wordt beïnvloed door de voorkeur van de constructie voor bewegen in de eigenfrequentie. De wervelloslaatfrequentie f_w schuift naar de eigenfrequentie f_n toe en het resultaat hiervan is dat zowel de excitatie als de responsie worden versterkt (terugkoppeling).



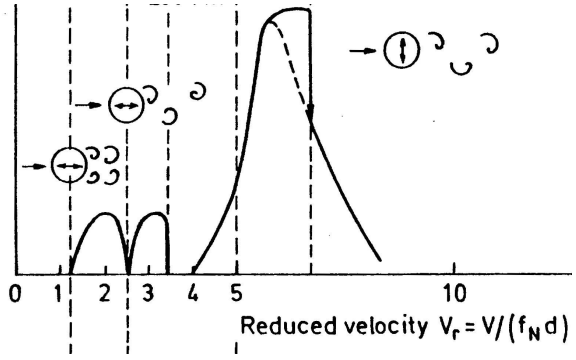
Figuur 2.8 Lock-in effect

Het Strouhal-getal heeft betrekking op de excitatie door loslatende wervels. Bij trillende elastische constructies wordt meestal de zogenaamde gereduceerde snelheid V_r als kental gehanteerd. Dit dimensieloze kental is gedefinieerd als:

$$V_r = \frac{v_o}{f.L} \qquad [-]$$

f = trillingsfrequentie [1/s]
L = een karakteristieke geometrische maat [m]
v_o = aanstroomsnelheid [m/s]

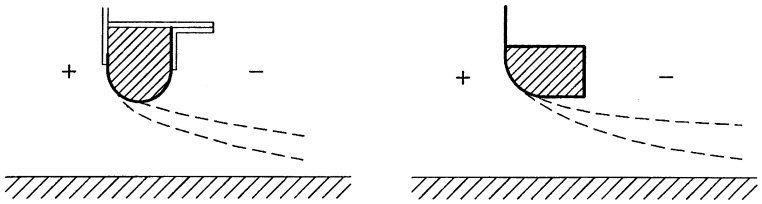
Omdat stromingsgeïnduceerde regelmatige trillingen (regelmatig qua frequentie en amplitude) veelal in een eigenfrequentie plaats vinden biedt het kental V_r de mogelijkheid om – wanneer de eigenfrequentie in water bekend is – te voorspellen bij welke stroomsnelheid trillingen kunnen gaan optreden. Als voorbeeld geeft Figuur 2.9 voor een cirkelcilindrische staaf de stromingsgebieden aan waar zich trillingen kunnen voordoen. Langs de horizontale as is V_r uitgezet (dus bij bekende diameter d van de cilinder en bekende eigenfrequentie f_n staat hier de stoomsnelheid v), langs de verticale as is de sterkte van de trilling uitgezet.



Figuur 2.9 *Trillingsgebieden cirkelcilindrische staaf; bron: [Naudascher (1994)]*

Het linkse gebied en het middelste gebied hebben betrekking op trillingen in stroomrichting (in-line vibration), het rechtse gebied op trillingen dwars op de stroming (cross-flow vibration). Bij het linkse gebied laten wervels paarsgewijs los van de cilinder. De twee andere gebieden betreffen trillingen bij alternerende wervelloslating. Wanneer de stroomsnelheid toeneemt wordt de grafiek van links naar rechts doorlopen en zullen dus eerst in-line trillingen optreden en daarna de zwaardere cross-flow trillingen.

Stromingsinstabiliteit doet zich niet alleen in de vorm van wervelvorming op de vrije grenslaag voor. Wanneer de stroming loslaat van een afgeronde rand ligt het loslaatpunt niet goed vast en kan dit punt heen en weer bewegen, zie de voorbeelden van schuifonderranden in Figuur 2.10. Dit gaat in de voorbeelden gepaard met een op en neer bewegen van de vrije grenslaag (waarbij de stroming afwisselend tegen een benedenstrooms deel van de constructie kan gaan aanliggen).



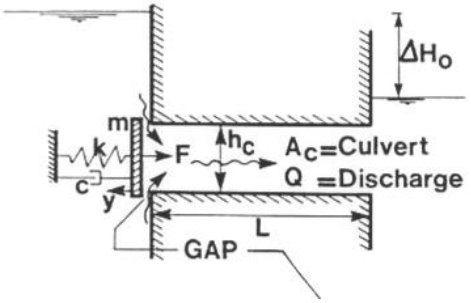
Figuur 2.10 Instabiliteit bij afstromen van een gebogen oppervlak

Ook kan – bijvoorbeeld bij stroming over een drempel – een straal beurtelings naar beneden duiken af afbuigen naar het vrije waterspiegeloppervlak. In vrijwel alle gevallen geeft dit soort stromingsinstabiliteit aanleiding tot een sterke periodieke excitatie, waarbij terugkoppelingen tussen responsie en excitatie eerder regel dan uitzondering zijn.
Excitatie door stromingsinstabiliteit kan zich voordoen bij over- of onderstroomde schuiven, bij diffusors, sponningen, schachten, drempels, palen enz. Steeds wanneer de stroming loslaat van de constructie en een vrije grenslaag vormt kan zich een instabiele afstroming ontwikkelen, die in veel gevallen oorzaak is van krachtsfluctuaties op de constructie. De beste remedie is om de constructie zodanig vorm te geven dat de stroming pas op het meest benedenstroomse punt loslaat. Of trillingen daadwerkelijk zullen optreden hangt overigens ook van de demping van de constructie af.

2.3.3 Zelf-excitatie

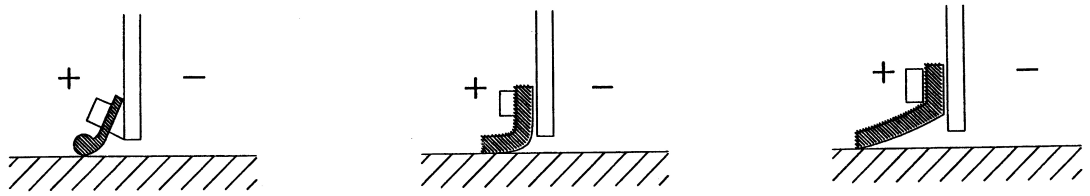
Sommige constructies zijn zo gevormd dat ten gevolge van een initieel kleine beweging stroombeeld- en drukveranderingen in het langsstromende water ontstaan die deze beweging versterken. Er kan dan een opslingeringsproces tot stand komen waarbij de excitatiekracht steeds sterker wordt en daarmee ook weer de beweging van de constructie. Dit is een inherent gevaarlijk proces, omdat grote bewegingsamplitudes en dus ook grote spannings-amplitudes kunnen ontstaan. Bezwijken van de constructie is dan niet uitgesloten. Het proces wordt ook wel aangeduid met negatieve demping, omdat als gevolg van de beweging van de constructie energietoevoer vanuit het water plaats vindt in plaats van energiedissipatie. Zelf-exciterende trillingen vinden steeds in een eigenfrequentie van de constructie plaats.

Een bekend voorbeeld van zelf-excitatie is een schuif die aan bovenstroomse zijde van een afvoerkoker is geplaatst (Figuur 2.11). Wanneer een kleine lekspleet aanwezig is en de schuif verend is ondersteund (of zelf voldoende elastisch is), zal een kleine trillingsbeweging van de schuif een variatie in de spleet tot gevolg hebben. Dit leidt bij lagere trillingsfrequenties tot een variatie in het lekdebiet en er ontstaan fluctuerende traagheidsdrukken in het water, met name in de koker, doordat water wordt afgeremd en versneld. De lengte en doorsnede van de koker zijn daarbij in sterke mate bepalend voor de grootte van de traagheidskracht. Met de resulterende kracht in fase met de bewegende schuif wordt er energie toegevoerd, en de schuif geraakt in een steeds sterkere trilling. Dit type zelf-exciterende trilling wordt ook wel aangeduid met badstop-trilling. De excitatiekracht die ontstaat wanneer een badstop tot vlak boven een afvoeropening wordt gebracht, kan gemakkelijk met de hand worden waargenomen.



Figuur 2.11 Schuif bovenstrooms van koker met lekspleet; bron: [Kolkman en Jongeling (1996)]

Berucht zijn ook rubber afdichtingsprofielen. Afdichtingsprofielen worden toegepast bij schuiven of deuren om lek tegen te gaan. Doordat ze flexibel zijn kunnen ze zodanig worden vorm gegeven dat ze onder de vervaldruk zelf afsluiten (Figuur 2.12).



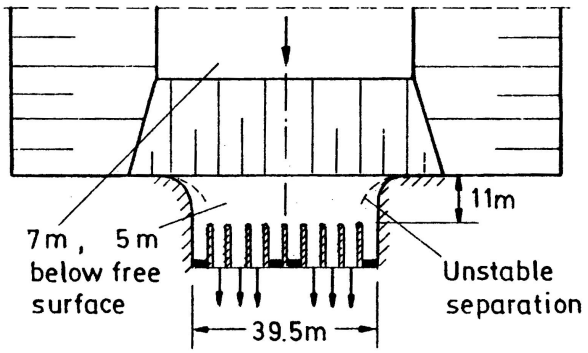
Figuur 2.12 Zelfdichtende rubber profielen

Wanneer echter een restspleet open blijft kunnen zich zware trillingen voordoen, vergelijkbaar met de hiervoor beschreven badstop-trilling.

2.3.4 Excitatie door vloeistofoscillatie in een bekken

Het water in bekkens, schachten en dergelijke kan in resonantie komen wanneer het water door lange golven, stroombeeldvariaties of debietfluctuaties periodiek wordt aangestoten. De geometrische voorwaarde is dat zich staande golfbewegingen in het bekken kunnen ontwikkelen. De in het water aanwezige constructies worden daarbij periodiek belast.

Een voorbeeld hiervan is een spuisluis die bij WL | Delft Hydraulics in een schaalmodel werd onderzocht [Heijdra (1982)]. Deze spuisluis had een groot aantal naast elkaar gelegen spuikokers, zie Figuur 2.13.

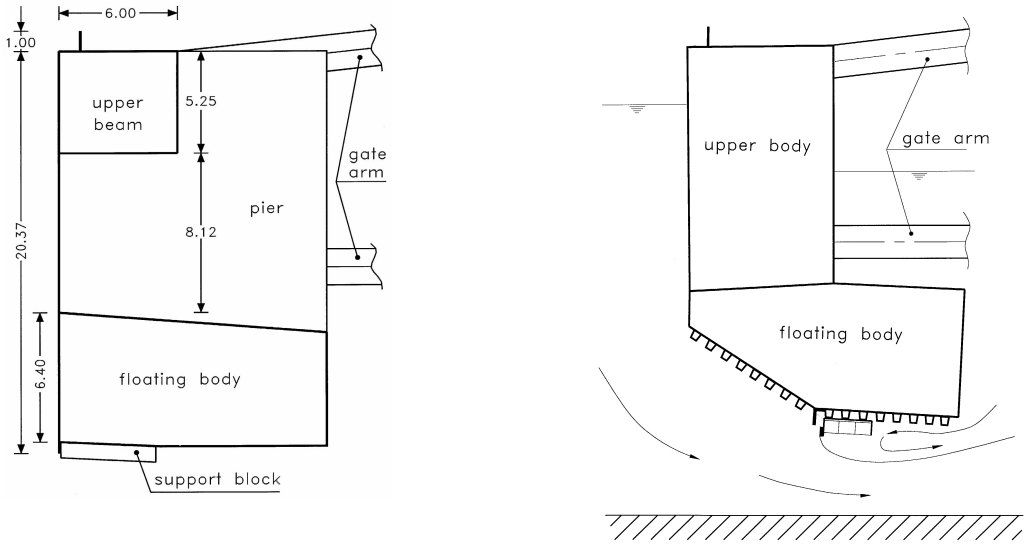


Figuur 2.13 Instabiele vloeistofoscillatie bij een spuisluis; bron [Heijdra (1982)]

Wanneer enkele spuikokers (waaronder de buitenste kokers, zie Figuur 2.13) gesloten werden bleek er bovenstrooms van de sluis een staande golfbeweging overdwars in het bekken te kunnen ontstaan. Daarbij ontstonden ook in de kokers sterke golfbewegingen. De oorzaak van dit verschijnsel lag in dit geval bij het niet stabiel loslaten van de stroming van de afgeronde zijwanden ter plaatse van de instroming, mogelijk in combinatie met locale stromingseffecten rond de koppen van de tussenpijlers. Heen en weer bewegen van de toeleidende stroming in de eigenfrequentie van het bekken was daardoor mogelijk; dit proces werd versterkt door een debietvariatie in de openstaande kokers van de sluis. De tussenpijlers werden hierbij zwaar belast.

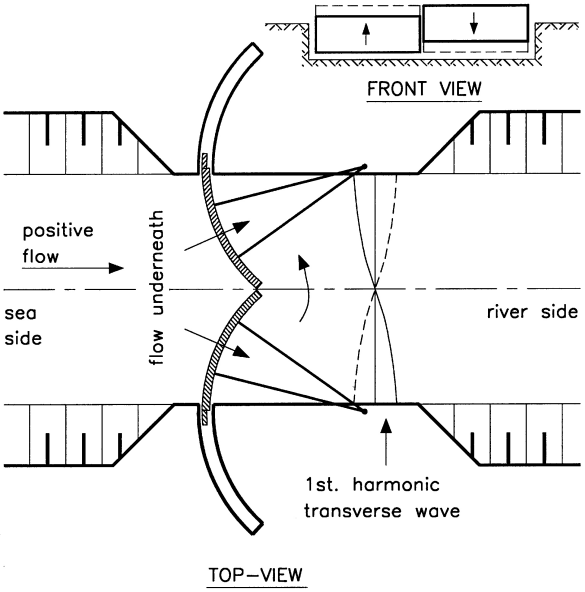
2.3.5 Excitatie door vloeistofoscillatie gekoppeld met constructiebewegingen

Het opslingeringsproces van een vloeistofbekken wordt ingewikkelder wanneer daartoe ook een beweging van de constructie nodig is. Een dergelijk resonantieprobleem is bij WL | Delft Hydraulics uitvoerig in een schaalmodel onderzocht. Het betrof hier een nog niet definitief ontwerp van de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg [Jongeling en van Huijstee (1990)]. De stormvloedkering wordt gevormd door twee sectordeuren. Deze deuren worden – nadat ze vanuit de dokken in de landhoofden drijvend de rivier in gebracht zijn – door vullen van de laaggelegen ballasttanks op een drempel afgezonken. Een dwarsdoorsnede van de deur (voorontwerp en definitief ontwerp) is te zien in Figuur 2.14.



Figuur 2.14 Doorsnede sectordeur Maeslant Kering (links: voorontwerp, rechts: definitief ontwerp)

Bij afzinken in stromend water van de deuren in het voorontwerp bleek aan de benedenstroomse zijde bij zekere stromingscondities een staande golf overdwars tussen de landhoofden te kunnen ontstaan, waarop de deuren (tegengesteld aan elkaar) meebewogen. Het verschijnsel is schematisch in Figuur 2.15 weergegeven.



Figuur 2.15 Gekoppelde vloeistof- en deurbewegingen Maeslant Kering

In dit geval was het verticaal meebewegen van de deuren een noodzakelijke voorwaarde voor het laten ontstaan en in stand houden van de dwarsgolf. De verklaring hiervoor is als volgt. Doordat de deuren op en neer bewegen varieert de doorstroomopening onder de deuren en daarmee ook het debiet. Deze debietvariatie vormt de aandrijvende kracht voor de golfbeweging achter de deuren: steeds op het juiste moment is er een debietpuls, die de golfbeweging versterkt. Bij het hoger worden van de golf wordt ook de deurbeweging sterker en daarmee ook weer de debietfluctuatie onder de deuren. Er ontstaat hierdoor een gesloten systeem van elkaar versterkende verschijnselen.

Het resonantieverschijnsel kon worden tegengegaan door de vorm van de onderkant van de deuren te wijzigen (Figuur 2.14, rechts), waardoor het stroombeeld onder de deuren en de debietrelaties zodanig veranderden dat de terugkoppelingen werden doorbroken in het relevante hydraulische randvoorwaardengebied [Jongeling (1991)].

2.4 Kennisbronnen stromingsgeïnduceerde trillingen in waterbouwkundige constructies

In het verleden is bij WL | Delft Hydraulics in opdracht van diverse partijen voor tal van hydraulische constructies experimenteel onderzoek uitgevoerd naar dynamische stroom- en golfbelastingen en de responsie van de constructies op deze belastingen. Ook zijn er in het kader van speurwerk en Toegepast Onderzoek Waterstaat (TOW) meerdere, meer diepgaande studies uitgevoerd naar de oorzaak van specifieke trillingen. Trillingsmetingen zijn verricht aan diverse grote en kleine kunstwerken in Nederland. Door al dit onderzoek is veel kennis van de responsie van dynamisch belaste elastische constructies verkregen.
In deze paragraaf worden de bronnen genoemd waarnaar de lezer wordt verwezen voor naslag en voor een verdere verbreding en verdieping van de kennis aangaande dynamisch belaste hydraulische constructies en stromingsgeïnduceerde trillingen.

Binnen Deltares zijn dat allereerst de vele onderzoeksrapporten die in de loop der jaren zijn uitgebracht. In [Kolkman & Jongeling (1996)] wordt een uitgebreide behandeling van de

trillingsproblematiek geboden. Dit handboek biedt tevens een complete lijst van bij WL | Delft Hydraulics uitgevoerde onderzoeken tot 1996, tot en met het werk dat is uitgevoerd voor de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg. Op de resultaten en bevindingen van de belangrijkste onderzoeken wordt uitvoerig ingegaan. Voor de periode na 1996 is met name het onderzoek dat bij WL | Delft Hydraulics is uitgevoerd voor de balgkeringen te Kampen (niet gerealiseerd) en Ramspol van belang. Uitgebreide informatie over de dynamica van balgen is te vinden in [Jongeling en Vrijburcht (2005)].

Buiten Deltares zijn de handboeken van o.a. Naudascher [Naudascher (1991)], Naudascher en Rockwell [Naudascher and Rockwell (1994)], Blevins [Blevins (1990)], Païdoussis [Païdoussis (1998)], en Anagnostopoulos [Anagnostopoulos (2002)] goede naslagwerken. Voor meer praktisch gerichte kennis van schuiven en kleppen kan worden verwezen naar het boek van Lewin [Lewin (2001)]. Een zeer goed toegankelijk boek over de mechanica en dynamica van constructies is het handboek 'Mechanical Vibrations' van Den Hartog [Hartog (1956)].

Er bestaan veel tijdschriften die gericht zijn op de dynamica van vloeistoffen en gassen in combinatie met constructies. De volgende lijst geeft een overzicht van de belangrijkste titels:

J. of Fluids and Structures
J. of Hydraulic Research
J. of Hydraulic Engineering
J. of Fluid Mechanics

J. of Sound and Vibration
J. of Vibration and Acoustics – ASME
J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

J. of Structural Engineering – ASCE
J. of Applied Mechanics – ASME
J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering – ASME
Coastal Engineering
J. of Ship Research

Opgemerkt zij dat de bibliotheek van Deltares uitstekende mogelijkheden biedt via het abonnement op ScienceDirect om volledige artikelen uit deze tijdschriften als digitaal document te downloaden.

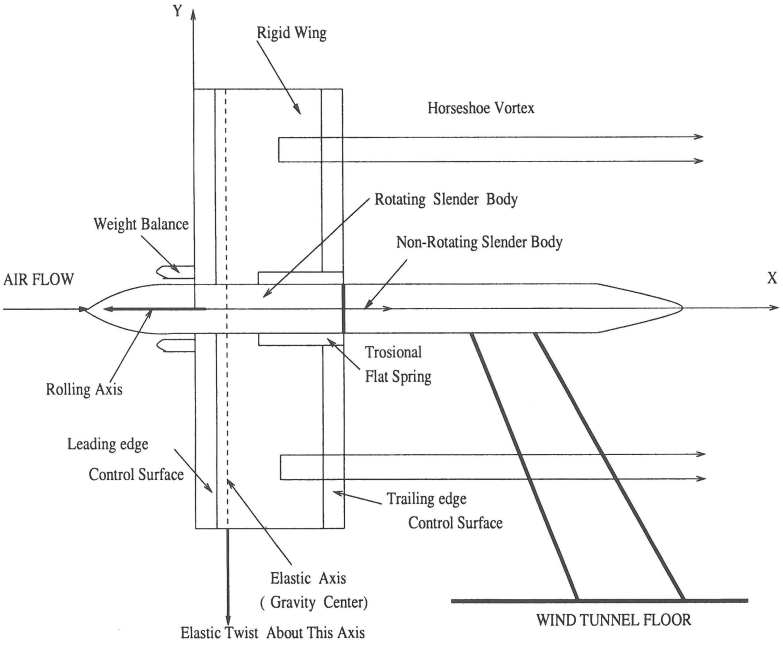
3 Literatuuronderzoek: beïnvloeding stroming, stromings-krachten en responsie van constructies

3.1 Literatuuronderzoek door middel van quick scan

Door middel van een quick scan is in de literatuur nagegaan of er in recente jaren, vanaf ca. 2000, onderzoek is gedaan gericht op het manipuleren van de stroming nabij constructies, met als doel om stromingskrachten op een gewenste wijze te beïnvloeden (manipulatie van loslaatpunten, beïnvloeding van zogbreedte, ventilatie van onderdrukzones, toepassing van verstelbare vinnen of kleppen, etc.). Tevens is gezocht naar onderzoek gericht op mogelijkheden om stromingsgeïnduceerde trillingen te onderdrukken (door verandering van stijfheid, toepassing van een secundaire massa, toepassing van dempers, onderdrukking van het effect van wervels, etc.). Het tijdschrift 'Journal of Fluids and Structures' is intensief doorzocht en van daaruit zijn enige kruisreferenties doorgelopen. Enkele resultaten van deze quick scan die representatief zijn voor het onderzoek dat in de breedte is uitgevoerd, worden in Paragraaf 3.2 besproken. De aandacht is daarbij vooral gericht op de ideeën achter het onderzoek en op de modeltechniek.

3.2 Beïnvloeding van stroming, stromingskrachten en responsie: resultaten quick scan

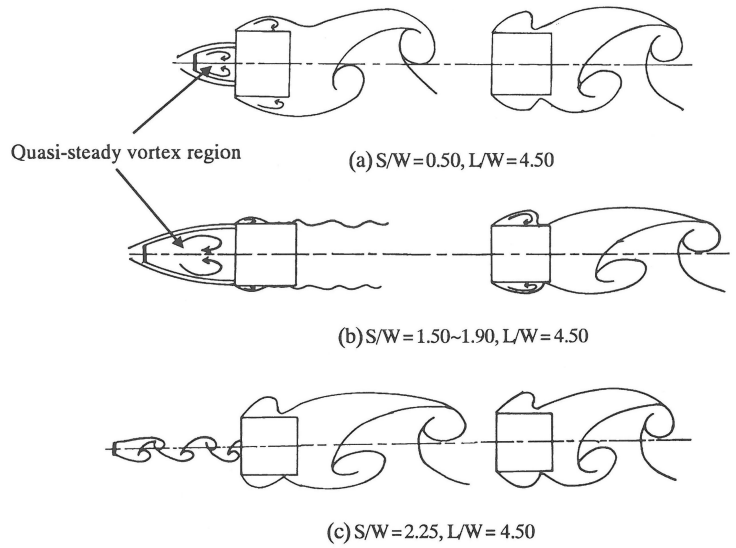
Artikel: 'Transient response study on rolling effectiveness of multiple control surfaces'
Auteurs: D. Tang, A. Li, E.H. Dowell
Onderzoek: Het experimentele onderzoek richt zich op het verbeteren van het rolgedrag van vliegtuigen (om de langsas). Figuur 3.1 geeft een beeld van de modelopstelling in een windtunnel.



Figuur 3.1 Opstelling van vliegtuigmodel in een windtunnel

De stromingskrachten op de vleugels kunnen worden beïnvloed door middel van roteerbare, plaatvormige delen langs voor- en achtervleugel. De dynamische eigenschappen van de vleugels kunnen worden gevarieerd door middel van een instelbare torsieveer in de verbinding van de vleugels met de romp. De vleugels zelf zijn stijf. Het deel van de romp waaraan de vleugels zijn bevestigd kan om een langsas draaien, waardoor onbalans en roterend responsiegedrag van het vliegtuig kunnen worden vastgesteld.

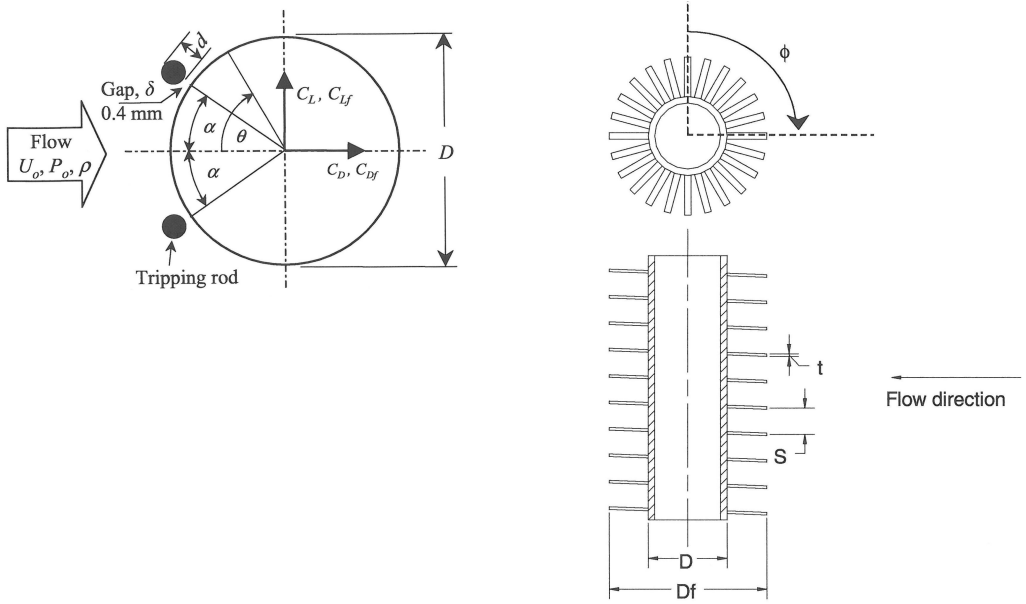
Artikel: 'Suppression of fluid forces acting on two square prisms in a tandem arrangement by passive control of flow'
Auteurs: MD. Mahbub Alam, M. Moriya, K. Takai, H. Sakamoto
Onderzoek: Het experimentele onderzoek richt zich op het effect van een plaat, geplaatst aan bovenstroomse zijde van een tweetal vierkante palen (met zijde *W*), op stromingskrachten en wervelloslating. Het model is geplaatst in een windtunnel. De afstand *S* van de plaat tot de eerste paal kan worden gevarieerd, evenals de afstand *L* tussen de twee palen. Stromingspatronen langs het oppervlak van de palen worden zichtbaar gemaakt met behulp van 'surface oil flim technique' en digitale camera. Figuur 3.2 toont de modelopstelling en enkele resultaten.



Figuur 3.2 Effect van een plaat bovenstrooms van een 'tandem array' van vierkante palen

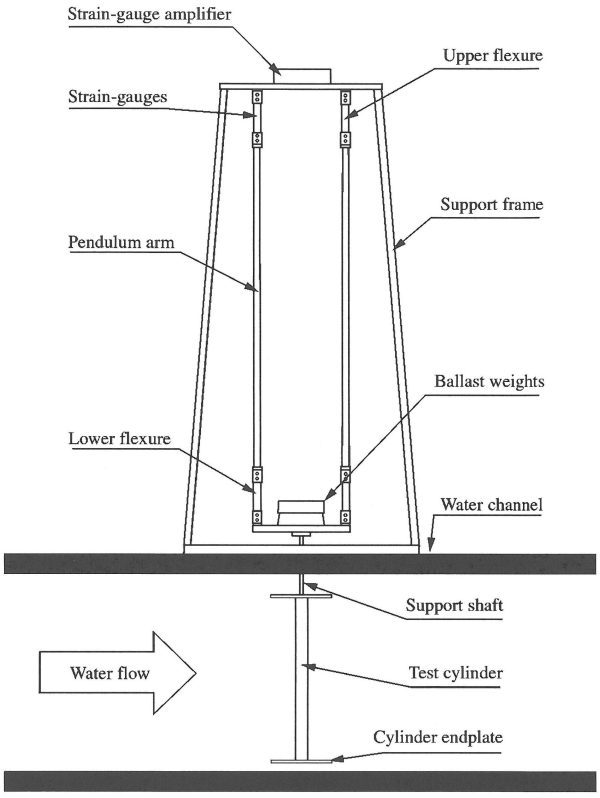
Met name het resultaat bij *S/W* tussen 1,5 – 1,9 is interessant: de plaat verandert het stroombeeld zodanig dat de stroming langs beide zijvlakken van de eerste paal aanligt en wervelvorming vanaf deze paal met corresponderend breed zog grotendeels wordt onderdrukt. Daarmee wordt een reductie verkregen van weerstandskracht ('drag force') en van wisselende componenten van weerstandskracht en liftkracht ('lift force').

Soortgelijke onderzoeken zijn ook uitgevoerd met bijvoorbeeld staafjes die naast een cilinder worden aangebracht (Figuur 3.3; linker plaatje; bron: 'Reduction of fluid forces acting on a single circular cylinder and two circular cylinders by using tripping rods', MD Mahbub Alama et al) of vinnen die spiraalsgewijs op de cilinder mantel worden aangebracht (Figuur 3.3; rechter plaatje; bron: 'The effect of fins on vortex shedding from a cylinder in cross-flow', S. Ziada et al).



Figuur 3.3 Modelopstellingen voor studie van het effect van 'tripping rods' en spiraalsgewijze vinnen

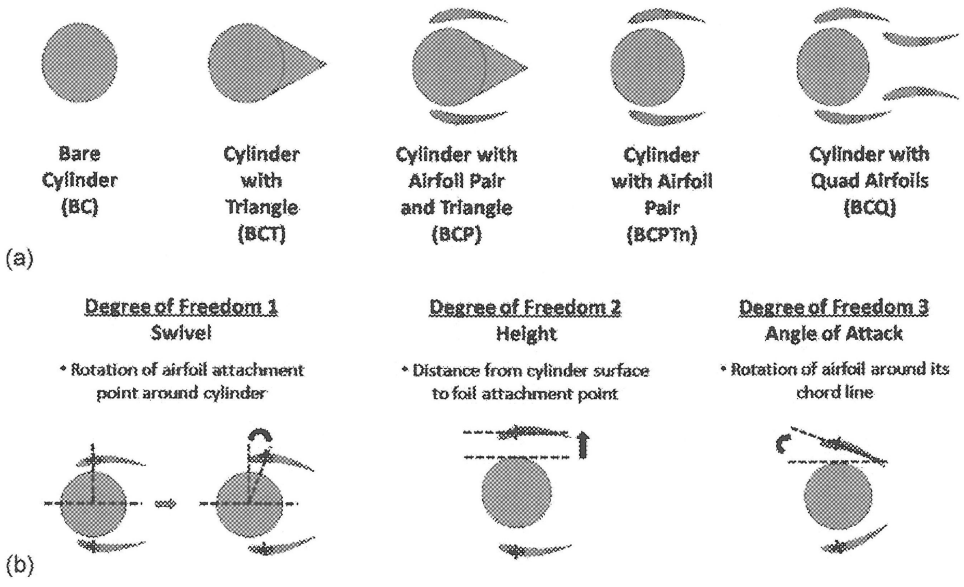
Artikel: 'Passive control of VIV with drag reduction'
Auteurs: J.C. Owen, A.A Szewczyk
Onderzoek: Het experimentele onderzoek richt zich op de weerstandskracht en de responsie van cilinders op vortex-excitatie (VIV: vortex-induced vibration). De cilinders hebben verschillende vormen en een aantal cilinders is voorzien van bobbels ('bumps') op het cilinderoppervlak. Het model is geplaatst in een stroomgoot, zie Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Modelopstelling in stroomgoot met cilinder opgehangen aan schommelconstructie

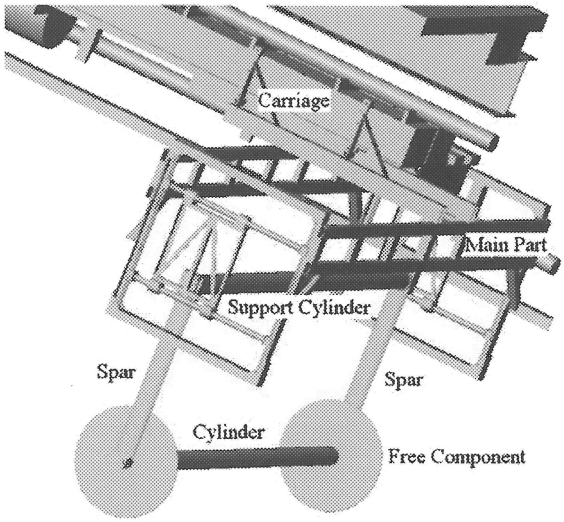
De cilinder is opgehangen aan een schommelconstructie met twee horizontale graden van bewegingsvrijheid: één in stroomrichting en één loodrecht op de stroomrichting. Door plaatsing van ballastblokken op de 'pendulum' kan de eigenfrequentie worden verlaagd en de zogenaamde mass ratio $m^* = m_{system} / m_{water}$ worden gevarieerd. De ophanging van de schommel aan buigslappe plaatveren ('flexures') maakt dat de demping van het ophangsysteem gering is. In een horizontaal vlak loodrecht op de as van de cilinder wordt met PIV techniek het tijdsafhankelijke stroombeeld gemeten.
Het artikel geeft als conclusie dat een reductie in drag force en vortex-induced excitation kan worden verkregen bij toepassing van zekere cilindervormen of cilinders voorzien van 'bumps'. De verklaring hiervoor is dat de afstromingsprocessen niet meer uniform zijn over de cilinderlengte.

Artikel: 'Flow control in flow-structure interaction'
Auteurs: R. Galvao, E. Lee, D. Farrell, F. Hover, M. Triantafyllou, N. Kitney, P. Beyet
Onderzoek: Het experimentele onderzoek richt zich op het effect van hydrofoils op vortex-induced vibrations van cilinders. De op zich stijve en vormvaste hydrofoils (vervaardigd van epoxy-coated foam) kunnen op verschillende posities rond de cilinder worden geplaatst, zie Figuur 3.5 voor configuraties en positionering. De aluminium cilinder wordt in een eerste onderzoeksfase met behulp van een 6-assig krachtmeetsysteem verticaal opgehangen aan een wagen; de wagen rijdt over een goot (sleeptank proeven). In deze verkennende fase wordt onderzoek uitgevoerd naar geschikte locaties voor plaatsing van de hydrofoils; daarbij worden krachten gemeten in het inklempunt van de cilinder en wordt met PIV techniek het stroombeeld vastgelegd in een horizontaal vlak loodrecht op de cilinder.



Figuur 3.5 Onderzochte cilinder-hydrofoil combinaties (a), en positionering van hydrofoils (b)

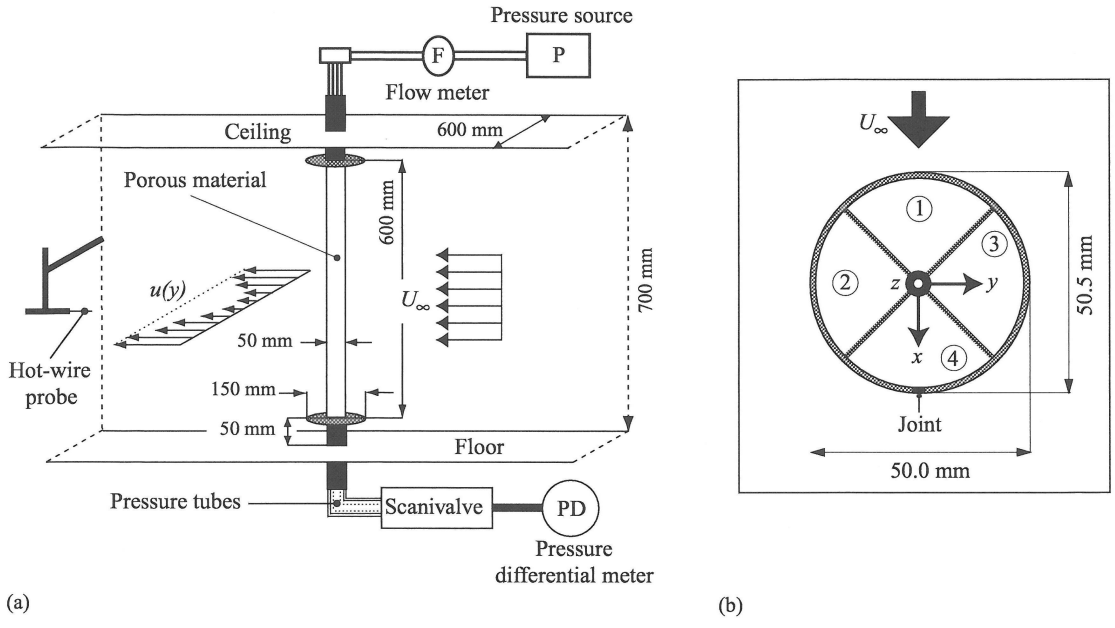
In een tweede fase worden voor twee geselecteerde configuraties van cilinder met hydrofoils sleepproeven gedaan. De cilinder is nu horizontaal opgehangen in een systeem dat beweging toestaat in twee onderling loodrechte richtingen (verticaal, loodrecht op rijrichting wagen, en horizontaal, in rijrichting wagen). Daarbij wordt gebruik gemaakt van lineaire roloplegginen in combinatie met lineaire servo-motoren, die worden gestuurd door de snelheid van bewegen van de cilinder (aparte meting). Het systeem is weergegeven in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 *Ophangsysteem cilinder met twee graden van vrijheid ondersteund door servo motoren*

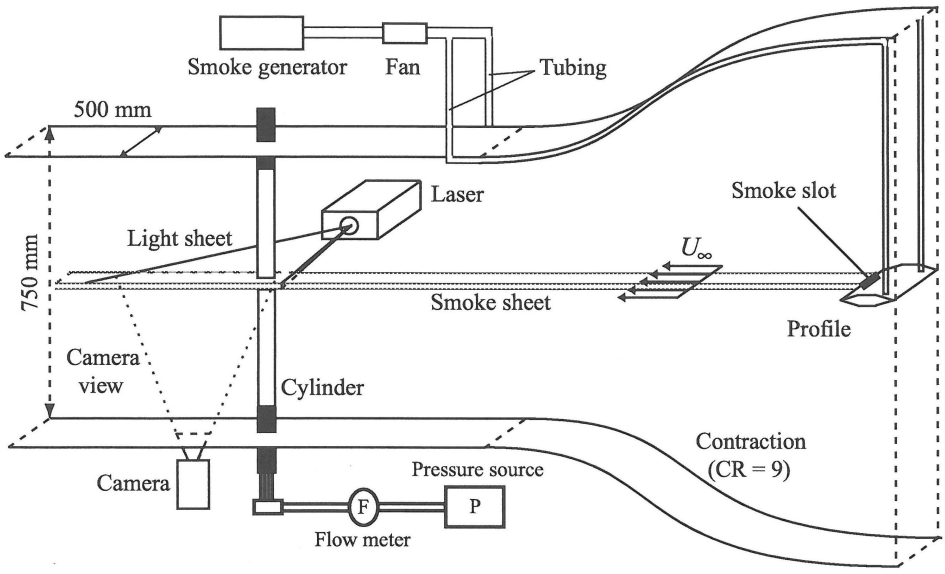
Uit het onderzoek blijkt dat de hydrofoils, mits goed geplaatst, leiden tot een reductie van 'drag forces' op de cilinder en tot een gedeeltelijke onderdrukking van vortex excitatie. Het beste resultaat lijkt te worden verkregen wanneer de omstroming met behulp van de hydrofoils wordt omgevormd naar een stroombeeld zoals dat in de potentiaalstromingsleer zou ontstaan.

Artikel: 'Flow around a porous cylinder subject to continuous suction or blowing'
Auteurs: J.H.M. Fransson, P. Konieczny, P.H. Alfredsson
Onderzoek: Het experimentele onderzoek richt zich op het effect van lucht inblazen of afzuigen door poriën in de wand van een cilinder op het stroombeeld rond de cilinder. Het model van de cilinder is opgesteld in een luchttunnel, zie Figuur 3.7.



Figuur 3.7 *Modelopstelling in luchttunnel met poreuze cilinder (a), en compartimenten voor luchttoevoer (b)*

Lucht kan gecontroleerd via vier afzonderlijk kamers in de cilinder worden ingeblazen of afgezogen. Drukaansluitingen ('pressure taps') zijn spiraalsgewijs in de cilindermantel aangebracht; hierdoor kunnen lokale drukverschillen langs de cilindermantel worden gemeten. De stroomsnelheid benedenstrooms van de cilinder in een lijn dwars op de tunnel wordt gemeten met een hittedraad ('hot wire anemometry'). Re ≈ 10^4.

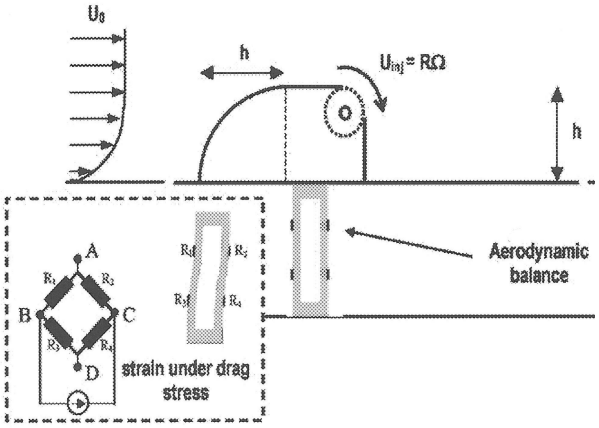


Figuur 3.8 Toegepaste 'smoke-visualization technque'

De omstroming wordt in een tweede fase gevisualiseerd door middel van rookinjectie vanuit een vleugelprofiel bovenstrooms van de cilinder, zie Figuur 3.8. Met behulp van een 'laser sheet' wordt het stroombeeld uitgelicht en opgenomen met een videocamera (20 beeldjes per seconde). In het artikel wordt aangegeven dat inblazen van lucht leidt tot een eerder loslaten van de stroming vanaf de cilinder; dit gaat gepaard met een breder zog, waardoor een hogere weerstandskracht ontstaat Tegelijkertijd neemt de waarde van het Stouhalgetal af (wat betekent dat de wervelloslaatfrequentie afneemt). Bij afzuigen van lucht doen zich de omgekeerde effecten voor.

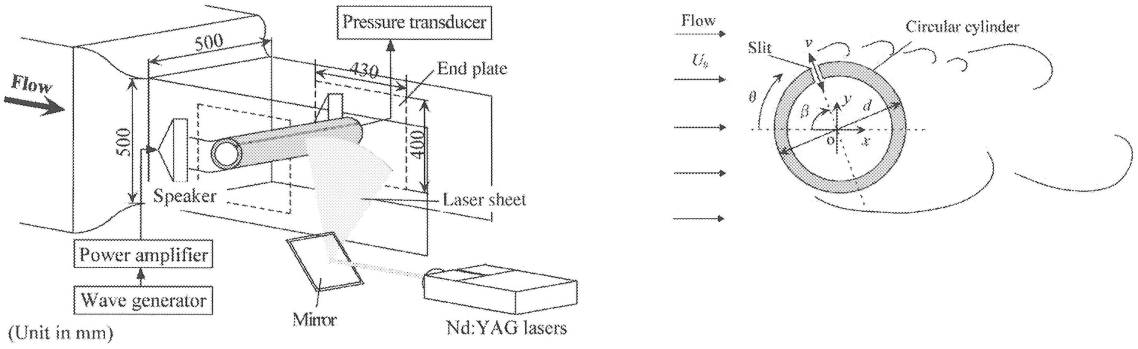
Artikel: 'Bluff-body drag reduction by extremum-seeking control'
Auteurs: J.F. Beaudoin, O. Cadot, J.L. Aider, J.E. Wesfreid
Onderzoek: Het experimentele onderzoek richt zich op het effect van een roterende cilinder op de stroming rond een 'backward facing step'. De cilinder bevindt zich op het benedenstroomse hoekpunt en buigt de stroming in neerwaartse richting af. De opstelling van het model in een windtunnel is weergegeven in Figuur 3.9. De aanstroomsnelheid wordt met behulp van een hittedraad gemeten. Het effect van de draaiende cilinder vertaalt zich in een reductie van de weerstandskracht (drag force); deze wordt als functie van de rotatiesnelheid van de cilinder gemeten door middel van een aerodynamic balance.

Uit het onderzoek blijkt dat de lage-druk zone achter de drempel wordt gereduceerd evenals de drag force. Gezocht is naar een optimale verhouding tussen enerzijds het energieverbruik van de actuator (als functie van het toerental) en anderzijds de winst in het 'energieverbruik' van de drempel (bij kleinere drag force ontstaat minder energieverlies in de omstroming).



Figuur 3.9 Modelopstelling met roterende cilinder voor beïnvloeding afstroming

Artikel: 'Flow control around a circular cylinder by internal acoustic excittaion'
Auteurs: N. Fujisawa, G. Takeda
Onderzoek: Het onderzoek richt zich op het effect van akoestische excitatie op de omstroming rond een cilinder. De lucht in een cilinder word door middel van een luidspreker geëxciteerd en de trillende lucht geeft zijn energie via een spleet in de cilinder af op de stroming rond de cilinder. De modelopstelling is weergegeven in Figuur 3.10. Het stroombeeld en het snelheidsveld rond de cilinder worden in een vlak dwars op de cilinder in kaart gebracht met behulp van PIV. Als tracer wordt rook gebruikt. Het snelheidsveld wordt berekend met behulp van kruiscorrelatie technieken. De cilinder is draaibaar om zijn lengteas zodat de positie van de spleet in de cilinder kan worden gevarieerd ten opzichte van de aanstroomrichting.

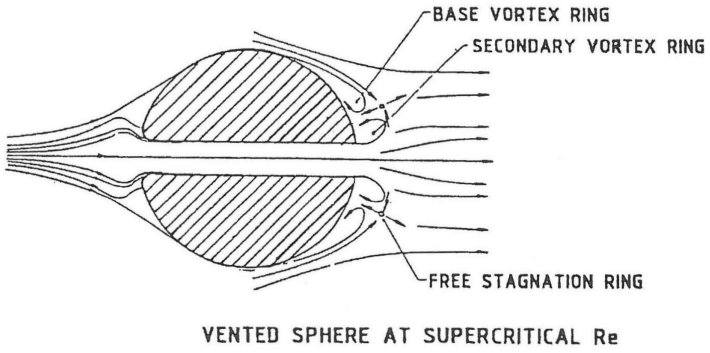


Figuur 3.10 Modelopstelling met cilinder en noise generator (links); cilinder met spleet (rechts)

Uit het onderzoek blijkt dat de drag force bij zekere condities van aanstroming en frequentie van de geluidsexcitatie kan worden gereduceerd. Hierbij was de spleet juist benedenstrooms van het loslaatpunt van de stroming geplaatst.

Artikel: 'Research at DLR Göttingen on bluff body aerodynamics, drag reduction by wake ventilation and active flow control'
Auteurs: F.R. Grosche, G.E.A. Meier
Onderzoek: Het artikel beschrijft onderzoek dat gedurende een reeks van jaren is uitgevoerd in de luchttunnel van het Institute of Aerodynamics and Flow Technology in Göttingen. Hier wordt het onderzoek aangehaald waarbij een reductie van de drag force is nagestreefd met

behulp van passieve ventilatie. Een voorbeeld hiervan is een bolvormig element, dat doorboord is zodat er een verbinding bestaat tussen bovenstroomse hogedruk-zone en benedenstroomse lagedruk-zone. Door deze verbinding wordt de lagedruk-zone op passieve wijze geventileerd, zie Figuur 3.11. De doorsnede van het verbindingskanaal is ca. 3% van de doorsnede van de bol.



Figuur 3.11 Modelopstelling met geperforeerde bol en passieve ventilatie

Uit het onderzoek blijkt dat de ventilatiestroming twee effecten heeft: de druk in het zog achter de bol wordt hoger, en de jet flow zorgt voor een aanzuiging van de vrije omstroming naar het centrum. Dit leidt er toe dat de stroming stabieler wordt, de drag force afneemt, en ook de dynamische krachten afnemen. Het effect is vooral duidelijk in het superkritische Reynoldsgebied.

3.3 Resumé van mogelijke maatregelen om stroming en responsie te beïnvloeden

Geïnspireerd door de hiervoor beschreven experimenten kunnen de volgende groepen van maatregelen worden gedefinieerd om de omstroming en de responsie van een constructie op een gewenste wijze te beïnvloeden:

Veranderen van de vorm van de constructie
Bij vliegtuigen worden kleppen gebruikt om de kromming van de vleugels aan te passen aan de vliegcondities (opstijgen, kruisvlucht, landen). Het gaat hierbij vooral om de liftkracht. Bij hydraulische constructies, en met name bij schuiven en afzinkbare constructies, zouden drag force en lift force ook met behulp van uitzetbare kleppen, hydrofoils e.d. kunnen worden beïnvloed.

Directe beïnvloeding van de stroming langs het constructieoppervlak
Het gaat hierbij om het op een zodanige manier beïnvloeden van de stroming langs het constructieoppervlak dat stromingsloslating eerder of later optreedt. Te denken valt aan aanpassen van de ruwheid van het oppervlak, aanbrengen van ribben of vinnen op het oppervlak, aanbrengen van roosterstructuren e.d. op het oppervlak, aanzuigen van water of inblazen van water langs het oppervlak, inblazen van luchtbellen, verhitten van het oppervlak, het laten trillen van het oppervlak, het ronddraaien van delen van het oppervlak, en het perforeren van delen van het oppervlak.

Beïnvloeding van toestroming en omstroming
Gedacht kan worden aan het plaatsen van elementen in de stroming, zodanig dat een betere algehele stroomlijning ontstaat met minder breed zog en lagere weerstand. Andere

mogelijkheden zijn het ventileren van onderdrukzones in de ‘schaduw’ van de constructie en het verhogen van de turbulentie-intensiteit van de aanstroming.

Beïnvloeding van de responsie van de constructie
De responsie van een constructie op een dynamische stromingsbelasting is sterk afhankelijk van dynamische eigenschappen als stijfheid, massa en demping. Afgezien daarvan is natuurlijk ook de vorm van de constructie belangrijk, omdat deze grotendeels bepalend is voor de grootte van de dynamische stromingsbelasting en de plaats waar deze belasting aangrijpt.

De stijfheid kan o.a. worden aangepast door de voorspanning in een constructie te vergroten (bij een met water of lucht gevulde balgstuw bijvoorbeeld zou dat betekenen dat de druk in de balg wordt vergroot of verkleind; daarmee wordt overigens ook de vorm beïnvloed). Door vergroting van de stijfheid kan de eigenfrequentie van de constructie uit het gebied met dominante excitatiefrequenties worden verschoven.

De demping is te vergroten door toepassing van mechanische dempers of wrijvings-elementen in bijvoorbeeld ophangpunten. Maar ook door roosters, platen e.d. aan te brengen op de constructie, zodanig dat ze bij het bewegen van de constructie door het water heen bewegen. Daarbij moet er op worden gelet dat deze roosters etc. geen vlakken voor excitatie gaan vormen.

Er zouden voorts secundaire massa’s kunnen worden aangebracht met een geheel andere eigenfrequentie dan de eigenfrequentie van de constructie; deze werken verstorend en energie-dissiperend op de hoofdbeweging van de constructie.

Bij drijvende objecten kunnen ballasttanks / luchttanks worden ingezet, bijvoorbeeld nabij de uiteinden van een langwerpig caisson, met als doel om het massatraagheidsmoment te vergroten of te verkleinen en zo de eigenfrequentie te veranderen. Luchttanks kunnen daarbij ook worden ingezet om buigende momenten in de constructie te verkleinen.

4 Opzet van een schaalmodelopstelling voor experimenteel onderzoek aan een onderstroomde hefschuif

4.1 Onderstroomde hefschuif

In het huidige onderzoek richten we ons op de mogelijkheden om de stroming rond hefschuiven op een gewenste wijze te beïnvloeden en de trillingen die in deze schuiven optreden te beheersen. Dit onderzoek kan daarmee worden gezien als een vervolg op de eerdere, meer fundamenteel getinte onderzoeken voor hefschuiven bij WL | Delft Hydraulics (zie o.a.: [Kolkman (1976)], [Vrijer (1977)], [Uwland (1979)] en [Jongeling (1986)]). Buiten Deltares zijn het o.a. [Hardwick (1974)], [Ishiii and Knisely (1990)], [Naudascher and Rockwell (1994)], en [Billiter and Staubli (2000)] die hebben gerapporteerd over onderzoek aan hefschuiven.

Hefschuiven zijn bedoeld om af te sluiten maar ook om water op een gecontroleerde wijze af te laten stromen. Als regel beweegt de schuif met behulp van wielstellen of glijdopleggingen over aanslagen in de zijsponningen. De horizontale belastingen worden naar deze aanslagen afgedragen. Veelal bestaat het hefsysteem uit met olie gevulde hydraulische cilinders. De stijfheid van deze cilinders is betrekkelijk laag, reden waarom de verticale eigenfrequenties van de hefschuif relatief laag kunnen zijn, hetgeen de schuif gevoelig voor verticale trillingen kan maken. Het optreden van verticale maar ook horizontale trillingen hangt daarbij sterk af van de vormgeving van de onderrand.

In het huidige onderzoek kiezen we hefschuiven met rechthoekige onderrand als startpunt voor de experimenten. De trillingsgevaarlijke gebieden van deze schuiven zijn goed bekend. In het onderzoek kan de aandacht daarom vooral gaan naar mogelijkheden om de stromingskrachten op een gewenste wijze te beïnvloeden en naar mogelijkheden om de optredende trillingen te beheersen.
Wanneer het mogelijk is om de stromingsbelasting op een schuif actief te ‘sturen’ zou dit van belang kunnen zijn voor de wijze van aandrijven van een hefschuif. Ook zou dit van belang kunnen zijn bij het ontwerpen van bijvoorbeeld drijvende en / of afzinkbare (niet opgehangen) constructies, die op gecontroleerde wijze in stromend water moeten kunnen functioneren (zoals de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg).

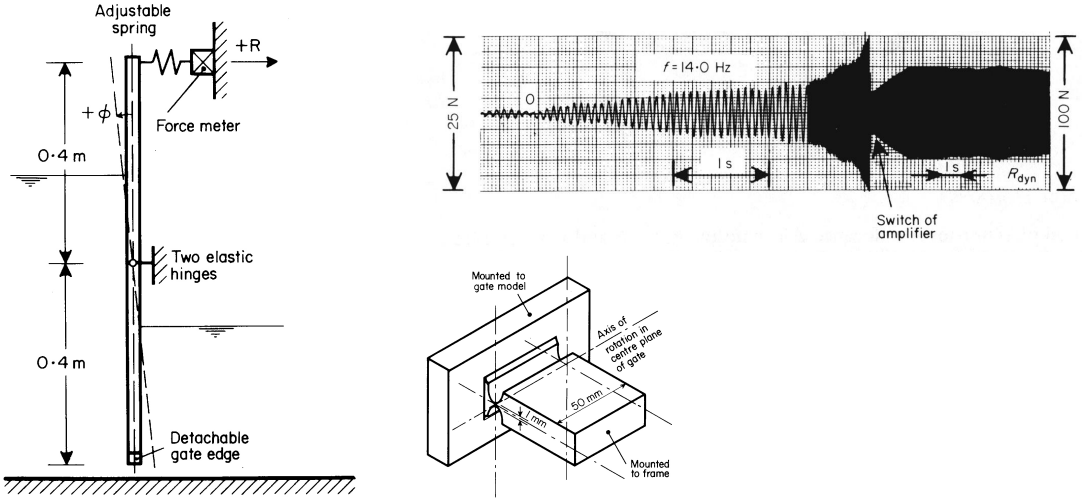
4.2 Trillingsgebieden hefschuiven met rechthoekige onderrand

Schuiven met rechthoekige onderrand zijn vooral gevoelig voor trillingen wanneer slechts een kleine doorstroomopening onder de hefschuif is ingesteld, uniform over de breedte van de schuif, in het gebied van 0,5 à 2 maal de dikte van de onderrand. Er kunnen zich dan zowel horizontale trillingen als verticale trillingen ontwikkelen; beide typen trillingen zijn zelfexciterende trillingen. Bij dezelfde en grotere openingen kunnen zich ook andere typen verticale trillingen ontwikkelen, die door andere fenomenen worden veroorzaakt. Hieronder wordt kort op de verschillende typen trillingen ingegaan.

4.2.1 Trillingen van schuiven bij horizontale graad van bewegingsvrijheid

Bij een schuif met rechthoekige schuifonderrand en een schuifopening (lekspleet) *s* ter grootte van de dikte *b* van de schuifrand kunnen zich zware horizontale trillingen ontwikkelen.

Dit type trilling met relatief hoge frequentie is onderzocht in een schaalmodel [Jongeling (1986)]). Het op zich stijve model van een schuif was zodanig verend in een meetframe opgehangen dat de onderrand een horizontale beweging (in stroomrichting) kon maken. In Figuur 4.1 is de modelopstelling weergegeven; de horizontale beweging ontstaat door rotatie om een scharnierlijn halverwege de schuifhoogte. Een detail van de toegepaste elastische scharnieren wordt in Figuur 4.1 getoond. Van belang is dat de lekspleet zelf niet van grootte verandert tijdens horizontaal trillen (dit in tegenstelling tot verticaal trillen, waarbij de grootte van de opening varieert).



Figuur 4.1 Model van schuif met rechthoekige onderrand en kleine opening; detail van elastisch scharnier; registratie van een zich ontwikkelende trilling; bron: [Jongeling (1986)]

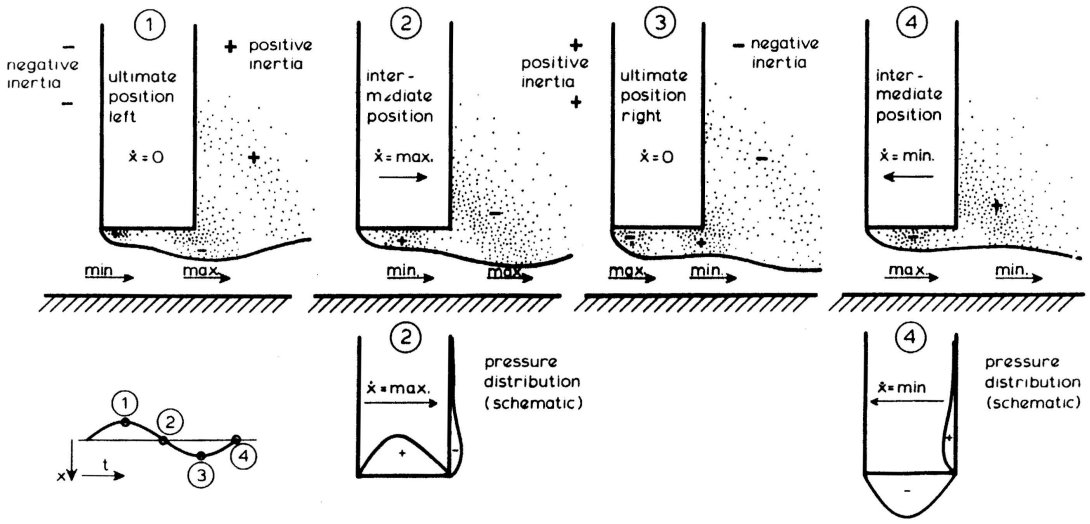
In Figuur 4.1 wordt ook een registratie getoond van de kracht die is gemeten in het bovensteunpunt bij zekere verval- en stromingscondities; deze registratie laat de snelle ontwikkeling van een zelf-exciterende trilling zien. De trillingsfrequentie bedraagt 14.0 Hz; deze frequentie werd ook gemeten in de druk rond de onderrand van de schuif en in de stroomsnelheid onder de schuif.

De trilling ontstaat hier doordat een initieel kleine beweging van de schuifrand tot een verstoring aanleiding geeft in de vrije grenslaag onder de schuifrand, die zich in stroomafwaartse richting voortplant. Bij deze verstoring horen ook een meelopend lokaal snelheidsveld en drukveld. Bij de juiste voortplantingssnelheid van het drukgolfje (gerelateerd aan de stroomsnelheid onder de schuif en dus aan het verval over de schuif) veroorzaakt dit golfje een kracht tegen de achterkant van de schuif die precies met de beweging van de schuif meewerkt. Hierdoor ontstaan in een proces van opslingering steeds grotere schuifbewegingen en steeds sterkere drukgolfjes, totdat een evenwichtssituatie wordt bereikt. Het trillingsproces in de evenwichtssituatie is in onderstaande Figuur 4.2 schematisch weergegeven voor vier achtereenvolgende tijdstippen van een trillingsbeweging.

De stroomsnelheid onder de schuif is dus van belang maar ook de dikte b van de schuifrand en de tijd T=1/f die de schuif nodig heeft voor het maken van een heen- en weergaande beweging. Omdat het hier gaat om zelf-excitatie is de trillingsfrequentie f gelijk aan de eigenfrequentie f_n van de schuif. Deze grootheden komen samen in het dimensieloze kental V_{rb} (gereduceerde snelheid betrokken op de dikte b van de onderrand):

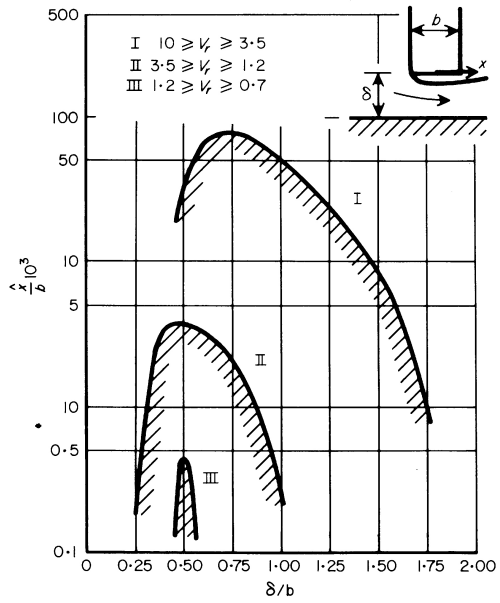
$V_{rb} = \frac{\sqrt{2g\Delta h}}{f.b}$ [-], met Δh = verval over de schuif, en $v = \sqrt{2g\Delta h}$ = stroomsnelheid in spleet.

Wordt de schuif vastgehouden dan is de afstroming stabiel; wervelvorming op de vrije grenslaag vindt op afstand plaats en de daarbij optredende drukfluctuaties hebben in deze situatie met kleine spleet geen effect op de schuif.



Figuur 4.2 Fluctuaties in grenslaag door horizontaal trillende schuif en verplaatsing drukvelden

De in het onderzoek gevonden gebieden met trillingen zijn in Figuur 4.3 als functie van V_r en de verhouding *s*/*b* weergegeven (opm.: de spleetgrootte *s* wordt in de figuur aangegeven met δ). Langs de verticale as is de sterkte van de trilling uitgezet weergegeven als de verhouding van de trillingsamplitude $\hat{x}$ en de schuifdikte *b*. De onderscheiden trillingsgebieden I, II en III hangen samen met het aantal golfjes dat op de schuifdikte *b* past (zie voor nadere uitleg [Jongeling (1986)]: hoe meer golfjes, hoe zwakker de trilling.



Figuur 4.3 Trillingsgebieden horizontale trillingen in schuif

Horizontale trillingen zijn in het onderzoek niet meer geconstateerd bij schuifopeningen groter dan 2*b*. Dit komt doordat de vrije grenslaag dan te ver weg buigt van de schuifrand; drukgolfjes worden daarbij te zwak om voor excitatie te kunnen zorgen.

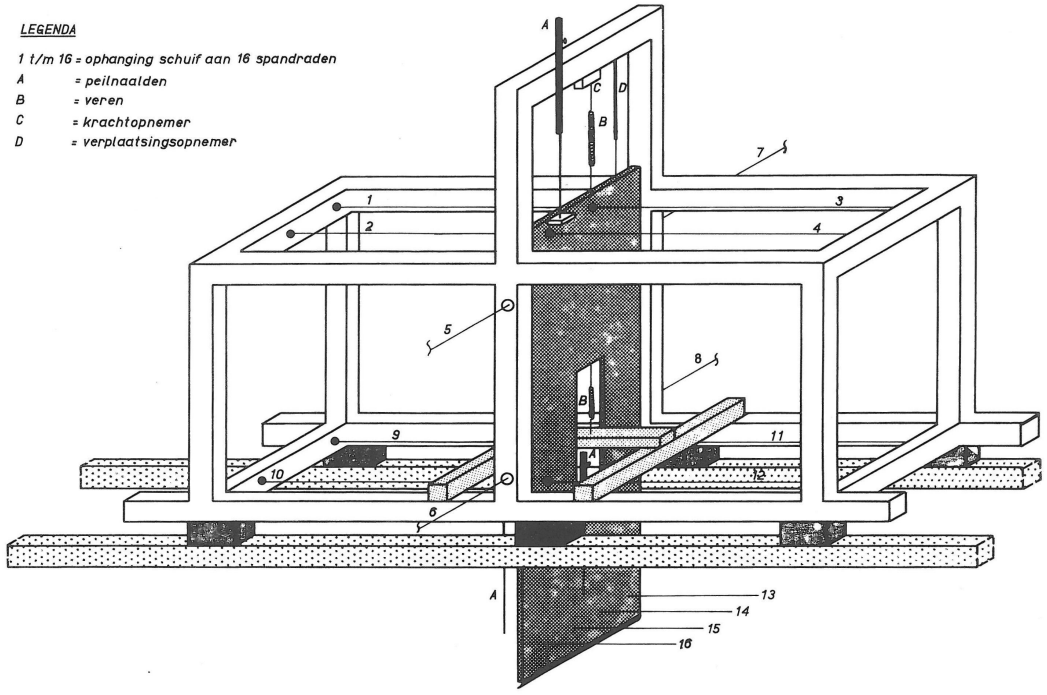
4.2.2 Trillingen van schuiven bij verticale graad van bewegingsvrijheid

Bij een verticale graad van bewegingsvrijheid en kleine schuifopening kunnen zich soortgelijke verschijnselen voordoen als hierboven is beschreven voor trillingen met horizontale graad van bewegingsvrijheid. Verschil is dat de verstoring in de grenslaag nu wordt veroorzaakt door een op- en neergaande beweging van de schuif en dat de weglopende drukgolfjes nu tegen de onderzijde van de schuif een periodieke excitatiekracht veroorzaken. Omdat de plaats van excitatie dichter bij het loslaatpunt op het bovenstroomse hoekpunt ligt, geldt er een andere verhouding van trillingstijd *T* en loopsnelheid van het drukgolfje, waarbij deze relatief hoogfrequente trillingen optreden. Hardwick [Hardwick (1974)] geeft voor dit type verticale trillingen aan dat ze optreden in het gebied $2{,}0 < V_{rb} < 3{,}5$, met sterkste trillingen rond $V_{rb} = 3{,}0$ bij een relatieve opening $s/b = 0{,}7$.

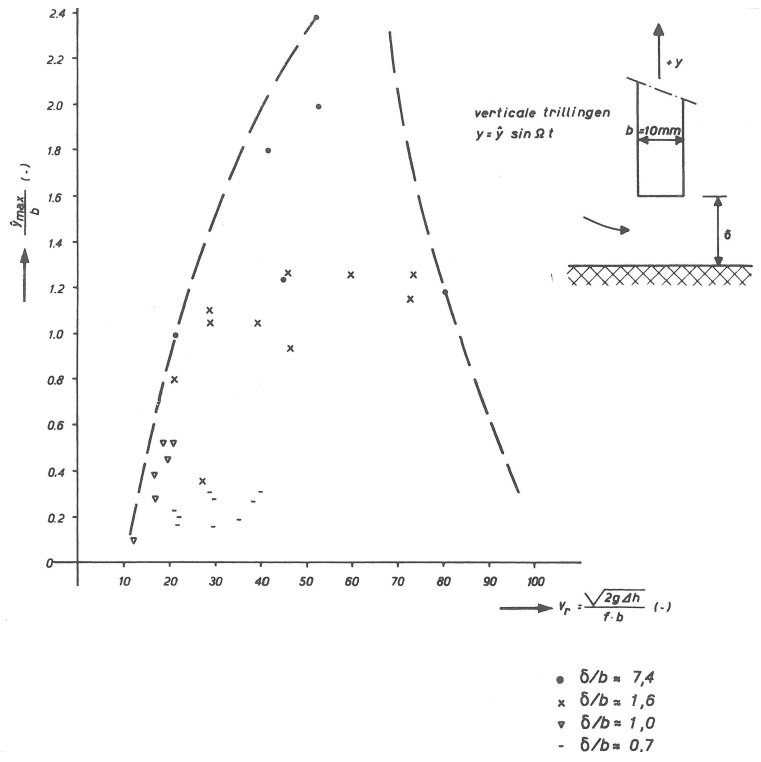
Een belangrijk verschil met horizontale trillingen is dat de doorstroomopening onder de schuif varieert bij verticaal trillen. Wanneer de trillingsfrequentie hoog genoeg is en de trillingsamplitude voldoende klein (zoals bij de hiervoor beschreven trillingen), zal het debiet – door toedoen van de traagheid van het stromende water – constant kunnen blijven.
Bij laagfrequente bewegingen ligt dit anders: bij periodieke verandering van de doorstroomopening zal het debiet in meer of mindere mate fluctueren. Wanneer het debiet door een verticale beweging van de schuif wordt afgeknepen ontstaat lokaal bij de onderrand, samenhangend met de vertraging van het water, een hogere druk aan bovenstroomse zijde van de schuif en een lagere druk aan benedenstroomse zijde. Bij vergroting van de opening en toename van het debiet gebeurt het omgekeerde. Omdat het loslaatpunt van de stroming op het bovenstroomse hoekpunt ligt, zal de druk onder de schuifrand ongeveer in fase met de druk aan benedenstroomse zijde veranderen. Wanneer nu de druk onder de schuif (deels) in fase met de snelheid van de bewegende schuif varieert, wordt er energie overgedragen en zal zich een trilling ontwikkelen. Karakteristiek aan dit type trilling is de grote amplitude en de relatief lage frequentie.

Door Vrijer [Vrijer (1977)] en Uwland [Uwland (1979)] is in een schaalmodel onderzoek verricht aan dit type trilling. De modelopstelling wordt in Figuur 4.4 getoond. De lichtgewicht schuif was bij dit onderzoek horziontaal ingespannen met behulp van een groot aantal spandraden en slappe veren; in vertical zin was de schuif door middel van verwisselbare veren opgehangen aan het stijve meetframe. Het meetframe was op de gootrand geplaatst zodat zich, afgezien van enkele afspandraden, geen onderdelen van het frame onder water bevonden. De verticale ophangkracht en de verticale verplaatsing werden gemeten. Bij het onderzoek werd de ophangveerstijfheid gevarieerd.
Er zijn metingen verricht bij schuifopeningen $s/b \approx 0{,}7$, 1,0 en 1,6 en ook bij de grote opening $s/b \approx 7{,}4$. Daarbij zijn bij bepaalde vervalcondities forse trillingen gemeten. In Figuur 4.5 wordt daarvan een overzicht gegeven (opm.: de spleetgrootte *s* wordt in de figuur aangeduid met δ). Langs de verticale as staat de relatieve amplitude $\hat{y}_{\max}/b$, langs de horizontale as de gereduceerde snelheid V_{rb} (betrokken op de dikte *b* van de onderrand). De resultaten bij verschillende schuifopeningen zijn met verschillende symbolen aangegeven. Merk op dat de relatieve amplitude van deze trillingen zo'n factor 20 groter is dan die van de horizontale trillingen in Figuur 4.3, en dat de doorstroomverandering bij kleine opening zeer groot kan

zijn. De trillingen liggen in de range 10 < V_{rb} < 80. Als verklaring voor de trillingen wordt genoemd de variatie van de druk onder de schuif die samenhangt met aan de schuif-beweging gekoppelde debietvariaties.



Figuur 4.4 Meetframe en schuifophanging in model M1322/M1490

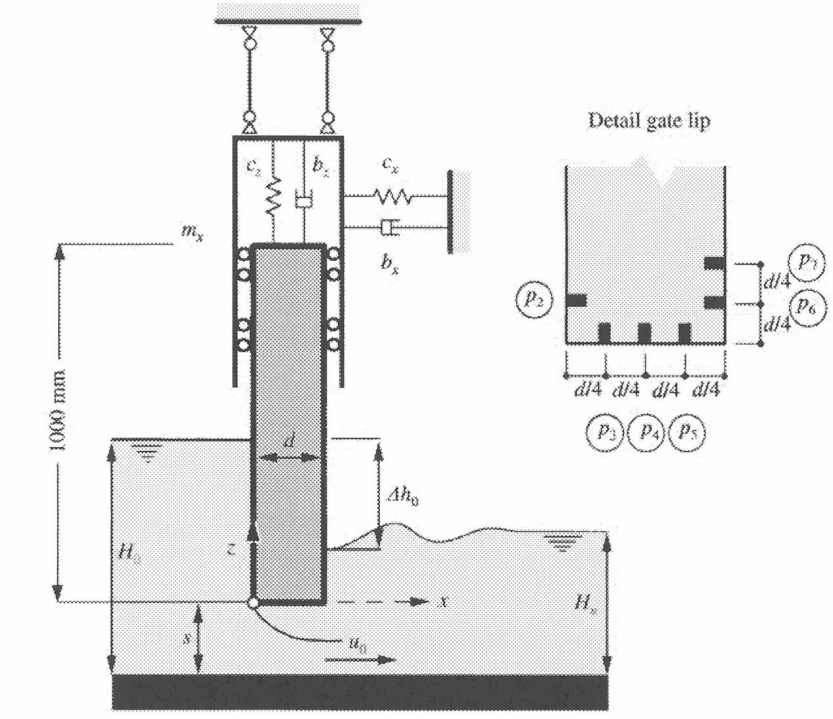


Figuur 4.5 Verticale trillingen in schuif gevonden in onderzoek M1322/M1490

Bij grote schuifopening is een debietvariatie als gevolg van een dan betrekkelijk kleine variatie van de doorstroomopening echter niet goed mogelijk. Wel kan dan een ander verschijnsel een dominante rol spelen, namelijk het verschijnsel waarbij de vrije grenslaag na loslaten van de stroming vanaf het bovenstroomse hoekpunt en samenhangend met het op en neer bewegen van de schuif, een wapperende, op- en neergaande beweging maakt. Lokaal bij de schuifonderrand verandert daarbij de kromming van de grenslaag. Omdat een sterkere dan wel flauwere kromming leidt tot een grotere dan wel lagere onderdruk op de schuifrand, ontstaan hierdoor wisselende krachten, die bij de juiste faserelatie energie toevoeren aan de schuif. Dit stromingsverschijnsel is een relatief laagfrequent verschijnsel dat een vrij groot gebied benedenstrooms van de schuif beslaat (de golflengte van het verschijnsel is groot ten opzichte van de dikte *b* van de schuifonderrand). Naudascher en Thang [Naudascher and Thang (1983)] duiden dit type trilling aan met galloping-type vibrations.

4.2.3 Trillingen van schuiven bij horizontale en verticale graad van bewegingsvrijheid

In de praktijk hebben hefschuiven meerdere graden van bewegingsvrijheid, waardoor vaak combinaties van translatie-, rotatie, doorbuiging- en torsiebewegingen ontstaan. Met name wanneer eigenfrequenties in verticale en horizontale zin dicht bij elkaar liggen zou ten behoeve van trillingsonderzoek een schaalmodel moeten worden gebouwd dat een elastisch-gelijkvormige weergave is van de prototype schuif. Zo'n model is evenwel kostbaar. Een minder kostbaar, geschematiseerd massa-veermodel met bijvoorbeeld twee graden van vrijheid, zou dan soelaas kunnen bieden.
Een voorbeeld van zo'n onderzoek met een geschematiseerd model, met onafhankelijk van elkaar instelbare horizontale en verticale graad van beweginsgvrijheid, is het onderzoek van Billiter en Staubli [Billiter and Staubli (2000)]. De modelopstelling is in Figuur 4.6 weergegeven.



Figuur 4.6 Model hefschuif met verticale en horizontale graad van bewegingsvrijheid [Billiter et al (2000)]

Interessant is dat dit onderzoek laat zien dat er bij twee graden van vrijheid veelal roterende bewegingen ontstaan, maar dat de oorzaken van de trillingen toch grotendeels overeenkomen met hetgeen door middel van onderzoek in een model met alleen een horizontale of alleen een verticale graad van bewegingsvrijheid is gevonden.

Bij bovengenoemde onderzoeken gaat het om een opstelling van een hefschuif boven een vlakke bodem. In de praktijk komen deze schuiven voor in riolen van bijvoorbeeld schutsluizen, in watertunnels van stuwdammen, als sluitingsmiddelen in stormvloedkeringen, etc.. Wanneer hefschuiven worden toegepast om een doorstroomopening in bijvoorbeeld een deur te kunnen afsluiten, zal de toestroming anders zijn dan in het geval van plaatsing boven een vlakke bodem. Dit zal dan een effect hebben op de omstroming van de schuifrand en mogelijk ook op de ligging van trillingsgevaarlijke gebieden.

4.3 Schaalmodel: te simuleren fysische processen en te modelleren schuifeigenschappen

4.3.1 Eisen te stellen aan het model

In het schaalmodel zal een verticaal beweegbare hefschuif worden gemodelleerd. Een optie is om het model zo in te richten dat de schuif kan worden omgebouwd tot een vrij drijvende schuif die met behulp van ballast(water) kan worden afgezonken.
De schaal van het model is nog vrij te kiezen, maar belangrijke constructiedetails en dynamische eigenschappen van de schuif alsmede de operationele hydraulische condities moeten bij de gekozen schaal op correcte wijze kunnen worden gesimuleerd. Wanneer – om voor de hand liggende redenen – in het schaalmodel water wordt toegepast (dus geen schaling van vloeistofeigenschappen zoals dichtheid, viscositeit en oppervlaktespanning) is het vooral de viscositeit die aandacht behoeft. Met name gaat het dan om het effect van viscositeit op kleinschalige turbulentie in de aanstroming en op grenslaagvorming en stromingsloslating. Echter in geval van hoekige constructies zijn loslaatpunten goed gedefinieerd en zijn de effecten als gevolg van het niet schalen van de viscositeit beperkt.

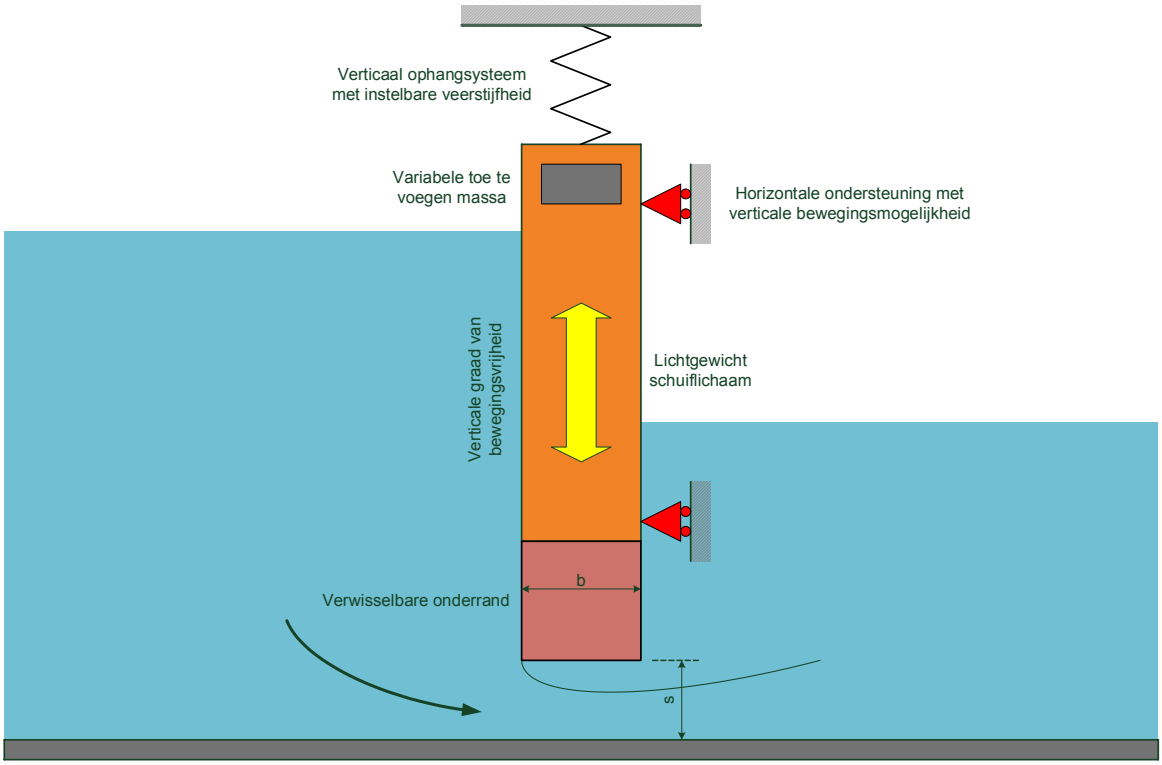
In het schaalmodel dienen de volgende processen en schuifeigenschappen goed te worden weergegeven en modelkarakteristieken te worden gerealiseerd:

- De verticale ophanging en verticale positionering van de hefschuif (en, optie, de verticale positionering van een afzinkbare schuif)
- De horizontale ondersteuning van de schuif en afdracht van de stromingsbelasting
- De dynamische eigenschappen van de hefschuif (en, optie, de dynamische eigenschappen van een vrij drijvende, afzinkbare schuif)
- De detailvorm van de schuif, met name de onderrand waarlangs het water stroomt
- Mogelijkheden voor aanpassen en beïnvloeden van stroming, schuifvorm en dynamische eigenschappen
- Adequate meetvoorzieningen zodanig dat de dynamische processen goed worden gemeten maar niet worden verstoord
- Waterstanden, stroming en stromingsrichting (stroming omkeerbaar of model omkeerbaar); het turbulentieniveau in de aanstroming
- Zichtbaarheid van de stroming onder de schuif (doorzichtige wanden en / of bodem)

- Hanteerbaarheid van het model (model niet te zwaar en gemakkelijk benaderbaar / bereikbaar)

In het bijzonder de punten ‘benaderbaarheid’, ‘zichtbaarheid’ en hanteerbaarheid’ maken dat een opstelling van het model in een stroomgoot met glazen zijwanden het meest aantrekkelijk is. Het basisidee voor zo’n opstelling is in Figuur 4.7 weergegeven.

In deze opstelling hoeft niet een volledige schuif te worden gemodelleerd, maar kan worden volstaan met een sectie van de schuif. Voor dynamisch onderzoek behoeft dat geen bezwaar te zijn omdat bijvoorbeeld doorbuigings bewegingen van de schuif in het verticale vlak van de schuif kunnen worden gemodelleerd als verticale translatiebewegingen. Het sectiemodel wordt daarbij volledig stijf uitgevoerd (hetgeen als groot voordeel heeft dat geen kostbaar, volledig elastisch geschaald model nodig is) en de buigstijfheid wordt dan vertaald in translatiestijfheid en gecombineerd met de ophangstijfheid van het hefsysteem. De daaruit resulterende ophangstijfheid kan zo worden gekozen dat bijvoorbeeld de verplaatsing in het midden van de schuifoverspanning bij een statische belasting wordt gereproduceerd.



Figuur 4.7 Basisidee voor een modelopstelling van een schuif met verticale bewegingsvrijheidsgraad

Dynamisch gezien is het evenwel belangrijker dat de dominante eigenfrequentie van de hefschuif in water goed wordt weergegeven, omdat het ontstaan van trillingen hier veelal mee samenhangt. Daarbij geldt dat – bij gelijke eigenfrequentie en stromingscondities – een schuif met geringe massa en lage stijfhid gemakkelijker in beweging is te brengen dan een schuif met grote massa en hoge stijfheid. Voor het onderzoek is het daarom een goed uitgangspunt om een zo licht mogelijk schuifmodel te bouwen. Het effect van een grotere massa kan zonodig worden nagegaan door ballast toe te voegen aan het model. Tegelijkertijd is het gewenst om ook de resulterende ophangstijfheid te kunnen variëren, opdat een flink breed eigenfrequentiegebied kan worden onderzocht.

4.3.2 Dynamische eigenschappen van het model

Bij hefschuiven met rechthoekige onderrand kunnen ruwweg twee gebieden met verticale trillingen worden onderscheiden (zie Paragraaf 4.2):

- relatief hoogfrequente trillingen in het gebied $2 < V_{rb} < 3{,}5$ (drukgolfjes op grenslaag)
- relatief laagfrequente trilingen in het gebied $10 < V_{rb} < 80$ (debietvariatie, wapperende grenslaag)

Gaan we uit van plaatsing van het model in een stroomgoot met verval over de schuif tot maximaal ca. 0,5 m (stroomsnelheid onder schuif tot maximaal ca. 3 m/s), een dikte *b* van de onderrand van ca. 0,02 m, dan vinden we als range van trillingsfrequenties 2 Hz < *f* < 75 Hz. Omdat de trillingen in een eigenfrequentie plaats vinden is dit ook de range van eigenfrequenties. Een eigenfrequentie van 75 Hz stelt hoge eisen aan het model wat betreft stijfheid en verplaatsingsvrijheidsgraad. Mogelijk zal daarom het onderzoeksgebied van trillingen om praktische redenen beperkt moeten blijven tot een lagere frequentie en / of een kleiner maximaal verval.

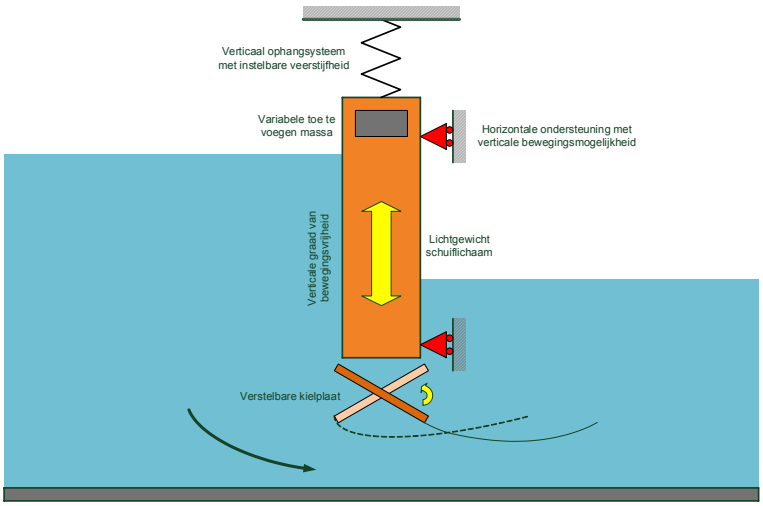
Het model zal licht en stijf worden uitgevoerd (buig- en torsietrillingen mogen zich niet voordoen in het relevante frequentiegebied). Vooralsnog lijkt een aluminium frame met dunne beplating en schuimplaatvulling (waterdichte cellenstructuur) een goede keuze te zijn. De stijfheid van de ophangveer dient zodanig ingesteld te kunnen worden, dat samen met een eventueel aan te brengen gering ballastgewicht de hoogste en laagste gewenste eigenfrequentie in water kan worden gerealiseerd.

Bij verticaal trillen van de schuif dient de demping vanuit het systeem van horizontale afspanning / oplegging zo gering mogelijk te zijn. Het systeem van afspanning / oplegging dient voorts zodanig te zijn dat geen extra veerstijfheidskrachten worden gemobiliseerd bij verticaal trillen, en rotatie van het stijve model om de hoofdassen wordt voorkomen.

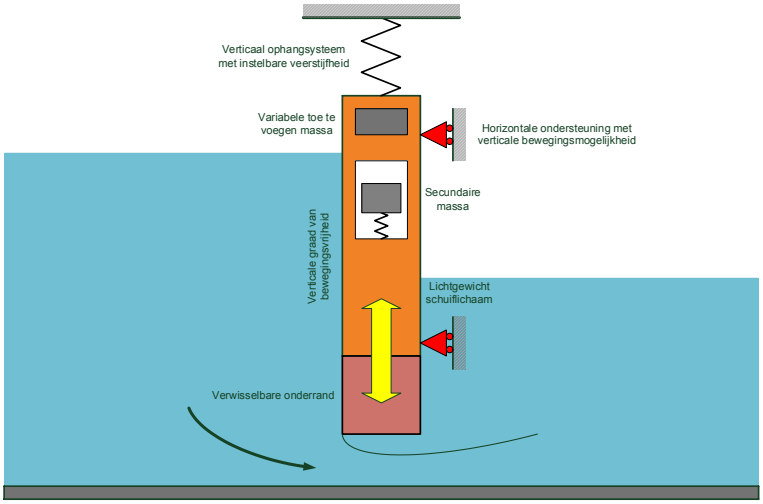
4.4 Te onderzoeken opties voor beïnvloeding van stromingskrachten en responsie

In onderstaande figuren worden enkele opties getoond voor beïnvloeding van de stromingsbelasting en responsie van het hefschuifmodel. In zijn algemeenheid zullen de opties kunnen variëren van het aanpassen van de vormgeving, het plaatsen van verstelbare kleppen, platen of hydrofoils, het aanpassen van stijfheid, massa of demping, het toepassen van secundaire massa's, het ventileren van de onderdrukzone onder de schuif, het inblazen van water of afzuigen van water, het inblazen van lucht, en het beïnvloeden van de aanstroming en het turbulentieniveau van de aanstroming. Daarbij kan ook gedacht worden aan zelfregulerende maatregelen die bij het bereiken van bijvoorbeeld een zeker verval over de schuif (automatisch) in werking treden.

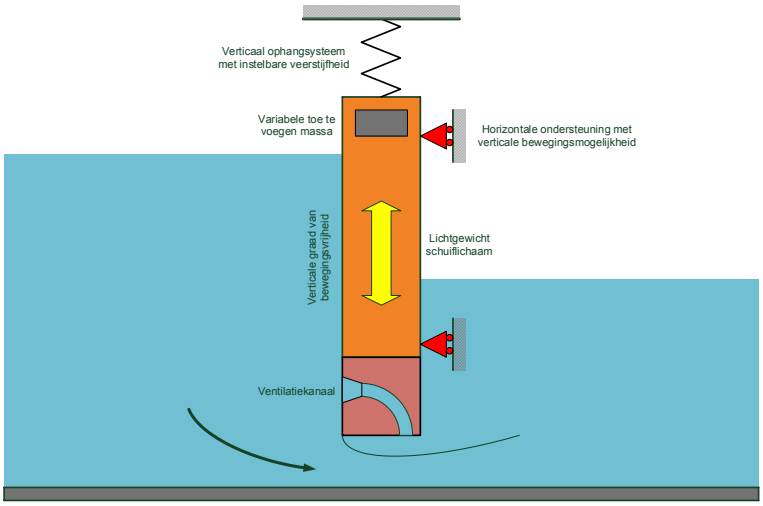
In de ontwerpfase zullen verschillende opties nader worden uitgewerkt.



Figuur 4.8 *Model met verstelbare kleppen*



Figuur 4.9 *Model met secundaire massa*



Figuur 4.10 *Model met ventilatie van onderdrukzone onder de schuif*

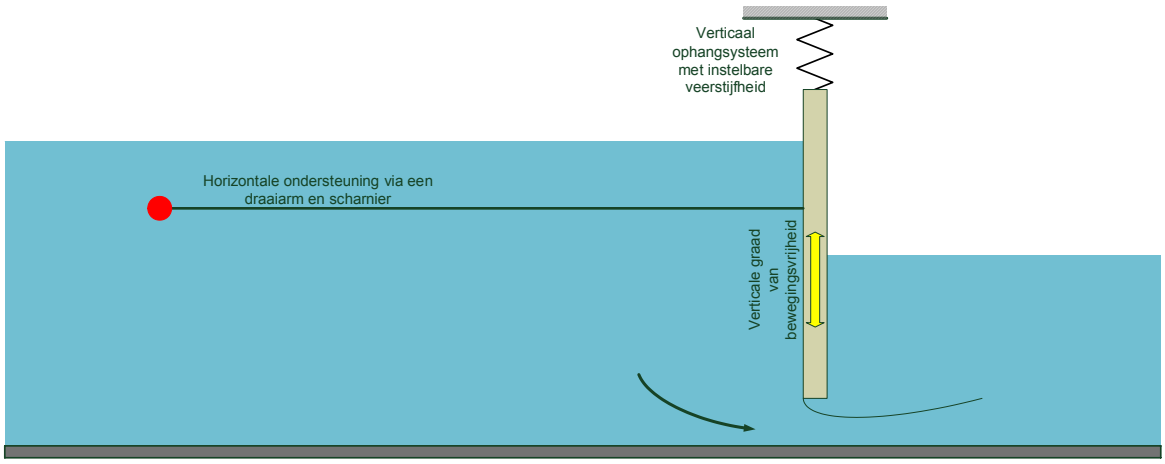
4.5 Het meetframe

Bij het onderzoek zullen verschillende fasen kunnen worden onderscheiden. Er kan bijvoorbeeld worden gedacht aan:

- een fase waarbij het schuifmodel stijf is opgehangen en de aandacht is gericht op de stromingsbelasting
- een fase waarbij met het verend opgehangen schuifmodel een verkenning wordt uitgevoerd naar het responsiegedrag als functie van hydraulische condities en eigenfrequenties
- een fase waarbij voor enkele geselecteerde trillingssituaties het trillingsgedrag en de optredende fenomenen nauwkeurig in kaart worden gebracht
- een fase waarbij geselecteerde opties voor beïnvloeding van stromingsbelasting en responsie worden doorgemeten
- een fase waarin een vrij-drijvend schuifmodel met ballastsysteem wordt onderzocht
- etc.

In al die fasen dient het schuifmodel gemakkelijk te positioneren te zijn en de krachtsafdracht naar de vaste wereld, via een meetframe, goed worden verzorgd. Daarbij dient de verticale ophanging en de horizontale afspanning / oplegging in een meetframe zodanig te zijn dat bij verticale positionering van de schuif geen verandering optreedt in de algehele krachtswerking en krachtsafdracht naar de vaste wereld (bijvoorbeeld: de voorspanning in afspandraden mag niet veranderen bij het verticaal positioneren van de hefschuif).

Bij onderzoeken in het verleden zijn diverse frames toegepast, al naargelang het doel van het onderzoek en de meetbehoeften. In Figuur 4.1 is de opstelling voor metingen aan horizontale trillingen weergegeven (onderzoek M1906). Het meetframe was zeer stijf en steunde op de bovenrand van de goot. Verticale positionering was beperkt mogelijk en vond plaats door vulblokken aan te brengen tussen de gootrand en het frame. Het stijve schuifmodel was met elastische scharnieren aan het frame bevestigd.
Een scharnierende ondersteuning levert, vertaald naar een schuifmodel met verticale graad van bewegingsvrijheid, noodzakelijkerwijs een lange arm op, zoals in Figuur 4.11 schematisch is aangegeven.

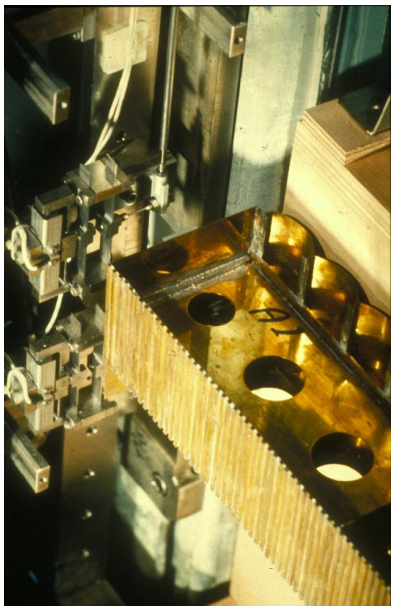


Figuur 4.11 Horizontale krachtafdracht via een lange arm naar een scharnier

Deze constructie heeft het voordeel van eenvoud en gemak van instellen, maar een ernstig nadeel is dat de resultante van de vervalbelasting niet door het scharnierpunt gaat. Dit levert een stationair rotatiemoment op (waarvoor zou kunnen worden gecompenseerd) maar er ontstaan in geval van fluctuerende drukken rond de onderrand ook ongewenste excitatie momentkrachten. Dit kan worden voorkomen door de beplating cirkelvormig te maken; echter bij variatie van de vorm van de schuifonderrand kunnen weer gemakkelijk nieuwe niet-gewenste excitatiekrachten ontstaan. Deze opstelling is daarom niet geschikt.

Het frame zoals is toegepast in onderzoeken M1322/M1490 (zie Figuur 4.4) maakt gebruik van horizontale spandraden. Het frame zelf is op de gootrand geplaatst, waardoor de spandraden (deels met voorspanveren) zich hoog boven water bevinden. Dit is een groot voordeel gezien vanuit de handelbaarheid van het model. Echter, vanwege de grote excentriciteit van de vervalbelasting op de schuif, ontstaan er relatief grote krachten in de spandraden. Om hier enigszins het hoofd aan te bieden zijn onder water, nabij de onderrand, extra draden toegepast. Hiermee gaat het voordeel van de goede handelbaarheid weer deels verloren. Het grote aantal spandraden is ook een nadeel van deze opstelling, omdat veel tijd nodig is voor het nauwkeurig inspannen en afstellen van het schuifmodel. Dit is ongewenst bij een modelonderzoek waar regelmatig aanpassingen in bijvoorbeeld de vorm van de onderrand zullen worden doorgevoerd. Verticale positionering van de schuif vindt bij deze opstelling plaats door middel van vulblokken tussen frame en gootrand.

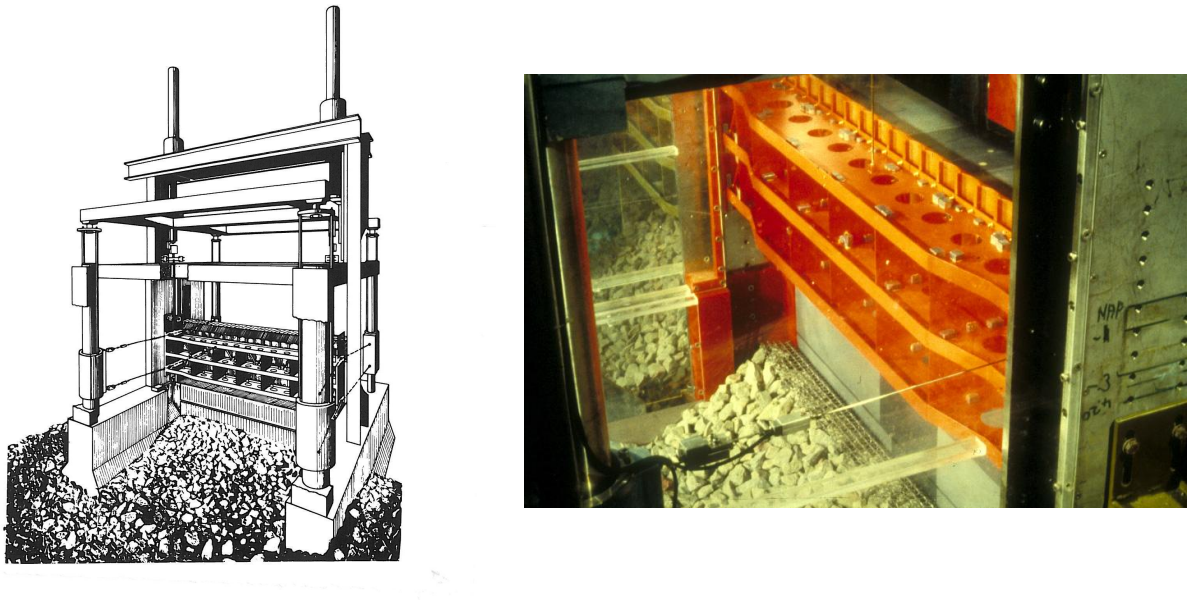
Bij het vooronderzoek M1424/M1494 voor de schuiven van de stormvloedkering in de Oosterschelde werden stijve schuifmodellen opgehangen in een frame, dat met behulp van een takel traploos omhoog en omlaag bewogen kon worden. Het frame werd na verticale positionering vastgeklemd tegen de zijkant van een sponning in de gootwand. Het schuifmodel kon zowel in horizontale zin als in verticale zin verend worden bevestigd (niet gelijktijdig in beide richtingen); in de andere richting werd het model dan scharnierend, met behulp van pendelstaafjes (verticaal) of met behulp van scharnierende plaatveren (horizontaal) opgehangen. Figuur 4.12 geeft een beeld van een ingehangen lage schuif met verende horizontale ondersteuning (instelbare bladveren met krachtmeters) en verticale ophanging aan pendelstaafjes.



Figuur 4.12 Meetframe en schuifophanging in model M1424

Het frame met hijsinstallatie bestaat nog en zou na aanpassing wellicht kunnen worden gebruikt voor het huidige onderzoek. Nadeel van dit frame is evenwel dat een afklemming op een sponning in de gootwand noodzakelijk is. Dit belemmert in belangrijke mate het zicht op de stromingsverschijnselen onder de schuif. Ook is een verhoogde bodem nodig vanwege een laag aangebracht dwarsverband in het frame.

Een meer geavanceerd frame is toegepast bij het onderzoek in een elastisch gelijkvormig model van schuiven en betonbalken van de Oosterschelde stormvloedkering. De elastisch gelijkvormige schuif werd met spandraden en voorspanveren horizontaal afgespannen (horizontale oplegstijfheid geschaald), en verticaal nabij beide schuifeinden opgehangen aan instelbare veren. In beide richtingen werden de oplegreacties gemeten met krachtmeters. Figuur 4.13 geeft een beeld van het frame met schuifinspanning.



Figuur 4.13 Meetframe en schuifophanging in model M1561/M1648

Het bovendeel van het frame kon traploos, met behulp van twee motoren, in verticale richting worden bewogen; daarbij werd gebruik gemaakt van een viertal glijdbussen die bewogen over staanders op de hoekpunten van het frame. Veel tijd werd besteed aan een wrijvingsarme gelijkloop van de vier bussen. Dit was nodig omdat de spandraden van de schuif aan de bussen waren bevestigd en verticaal positioneren van de schuif moest kunnen plaats vinden zonder dat de voorspankrachten in de draden zouden veranderen.
Een dergelijk meetframe is voor het huidige onderzoek ook geschikt, maar is vanwege de hoge kosten niet realiseerbaar.

Uit bovengenoemde voorbeelden volgt dat in de ontwerpfase ruim aandacht zal moeten worden besteed aan het meetframe. Daarbij lijkt de verticale positionering van de modelschuif het eenvoudigste te kunnen worden gerealiseerd door het meetframe samen met het ingespannen schuifmodel in hoogte te verstellen. Voor een zo goed mogelijke bereikbaarheid van het schuifmodel met zijn ondersteuning zou het frame bij voorkeur boven op de gootrand moeten worden geplaatst.
De horizontale ondersteuning zou kunnen worden gerealiseerd met behulp van spandraden, brede, buigslappe plaatveren of pendelstaafjes. Een optie zou ook kunnen zijn om de

horizontale ondersteuning te realiseren door middel van wielen die over een zijgeleiding lopen (zie ook Figuur 4.6). Andere opties zijn om de horizontale ondersteuning te realiseren door middel van hydrostatische glijdlagers of door middel van elektro-magnetische zijlagers. Deze beide opties zijn vanwege de relatieve onbekendheid, de hoge kosten en de mogelijkheid van disfunctioneren overigens niet erg aantrekkelijk.

In de keuze van het ondersteuningssysteem speelt ook het te onderzoek frequentiegebied een rol. Bij lage frequenties zijn trillingsamplitudes relatief groot en zou aan een wieloplegging kunnen worden gedacht. Bij hoge frequenties en relatief geringe trillingsamplitude kan gedacht worden aan scharnierende pendelstaafjes of elastische scharnieren. Een combinatie van de twee is wellicht aantrekkelijk, ook omdat een wielondersteuning mogelijkheden biedt voor onderzoek aan een vrij drijvende constructie.

Op hoofdlijnen dient de modelopstelling zodanig te zijn dat:

- inspannen van het schuifmodel gemakkelijk is
- vorm-, stijfheids- en massaveranderingen in het schuifmodel gemakkelijk kunnen worden doorgevoerd
- positionering van het schuifmodel in hoogterichting kan plaats vinden zonder dat de krachtsafdracht en de spanningstoestand in de schuif met ondersteuningen worden beïnvloed
- meetinstrumenten kunnen worden bevestigd en desgewenst kunnen worden meebewogen met het schuifmodel
- meetinstrumenten geen verstorende invloed hebben op stroming en responsie
- de lekstroom langs de zijranden van het schuifmodel effectief kan worden beperkt en resterende lekstromen geen oorzaak zijn van trillingen
- de zichtbaarheid van de stromingsverschijnselen onder de schuif is gewaarborgd
- de stromingsrichting kan worden omgedraaid door omdraaiing van het meetframe met schuifmodel
- het meetframe met schuifmodel kan worden verplaatst van bijvoorbeeld de 0,5 m brede Kolkmangoot naar de 1,0 m brede Scheldegoot

4.6 Te meten grootheden

De metingen hebben tot doel om inzicht te verkrijgen in de optredende stromingskrachten (stationair en dynamisch), in de responsie van de hefschuif bij variërende hydraulische condities, vormgeving, en dynamische eigenschappen, en in de interactieverschijnselen die bestaan tussen stroming en responsie. In een gefaseerde aanpak zal er onderscheid worden gemaakt tussen verkennende metingen en gedetailleerde metingen. Tot de verkennende metingen behoren bijvoorbeeld:

- meting van de schuifpositie
- meting van de verticale beweging (verplaatsing of versnelling) en ophangkracht van het schuifmodel
- meting van de waterstanden en het debiet
- visualisering van het stationaire stroombeeld

Meer gedetailleerde metingen kunnen bestaan uit::

- meting van de tijdsafhankelijke drukken rond de schuifonderrand en op de bodem
- meting van de tijdsafhankelijk stroomsnelheid nabij de schuifonderrand (bijv. met behulp van laser)
- meting van het tijdsafhankelijke stroombeeld (PIV)

Voor alle metingen geldt dat meetsignalen in de tijd moeten worden ingewonnen. Er moet daarbij een voldoende hoge samplefrequentie worden gekozen (minimaal 2x zo hoog als de hoogste relevante excitatiefrequentie). Alle signalen moeten gekoppeld in de tijd worden vastgelegd in verband met de te onderzoeken fase-relaties.

5 Samenvatting

In 2009 is in het kader van strategisch onderzoek (SO) Waterbouw een aanzet tot een experimenteel onderzoek gegeven, dat gericht zal zijn op de stromingsbelasting en het responsiegedrag van een onderstroomde hefschuif, en op de mogelijkheden van een (actieve) beïnvloeding van belasting en responsie.

Ter introductie in de dynamica van constructies en stromingsgeïnduceerde trillingen is voor lezers van dit rapport een korte inleiding opgenomen. Voorts zijn de resultaten van een beknopt literatuuronderzoek opgenomen, dat was gericht op experimentele studies met een vergelijkbare onderzoeksdoelstelling. De aandacht bij het literatuuronderzoek was daarbij met name ook gericht op de opzet en inrichting van de toegepaste meetopstelling.

Hefschuiven met rechthoekige onderrand zullen het startpunt vormen bij het experimentele onderzoek. Aan de hand van resultaten van vroegere onderzoeken zijn de trillingsgevaarlijke gebieden van hefschuiven met rechthoekige onderrand aangegeven. Het onderzoeksgebied wat betreft trillingsfrequenties en hydraulische condities is daaraan gerelateerd. Op basis hiervan en rekening houdend met opties voor wijziging van vorm en dynamische eigenschappen van de hefschuif zijn de functie-eisen voor het schaalmodel geformuleerd. In de ontwerpfase zal met name aan de uitwerking van het meetframe met schuifophanging aandacht moeten worden besteed.

In de literatuur is daarnaast nagegaan wat de stand van zaken is met betrekking tot het *numerieke rekenen* aan de stroming rond constructies en de interacties van de stroming met de constructie; de resultaten hiervan worden in Bijlage A gepresenteerd.

In 2010 zal het project worden voortgezet. Plan is om een tot in detail uitgewerkt ontwerp te maken voor de schaalmodelopstelling van een hefschuif en om het schaalmodel te bouwen. Afhankelijk van het beschikbare budget zal ook al een begin kunnen worden gemaakt met het uitvoeren van experimenten.

In 2010 zal tevens, in het kader van kennisoverdracht, worden meegewerkt aan een onder auspiciën van CUR te realiseren cursus met syllabus gericht op stroomsluizen, stuwen en hoogwaterkeringen.

Referenties

Anagnostopoulos, A., editor, (2002); 'Flow-induced vibration in engineering practice'; Advances in fluid mechanics; uitgave: WIT press

Billiter, P., Staubli, T. (2000); 'Flow-induced multiple-mode vibrations of gates with submerged discharge'; J. of Fluids and Structures, Vol. 14, pp 323-338

Blevins, R.D. (1990); 'Flow-induced vibration'; uitgave: Van Nostrand Reinhold (2nd edition)

Deltacommissie (2008); 'Samenwerken met water'; bevindingen van de Deltacommissie 2008

Erdbrink, C.D. and Jongeling, T.H.G. (2008); 'Computations of the turbulent flow about square and round piers with a granular bed protection – 3D flow computations with CFX'; Deltares report Q4386/Q4593.

Erdbrink, C.D. (2009); 'Ontwerpmethodiek granulaire bodemverdediging met CFX ongestructureerd'; Deltares report 1200257-003.

Hardwick, J.D. (1974); 'Flow-induced vibrations of vertical-lift gate'; ASCE J. of Hydraulics Division, Vol. 100, pp 631-644

Hartog, J.P. den (1956); 'Mechanical vibrations'; uitgave: McGraw-Hill Book Company

Heijdra, G. (1982); 'Lozingsmiddel Zoommeer; verificatie en aanpassing ontwerp, bepaling afvoerkarakteristieken, rekenmodel spuisluis met vrije waterspiegel' WL | Delft Hydraulics rapport M1711

Ishii, N., Knisely, C.W. (1990); 'Shear layer behaviour under a streamwise vibrating gate and its significance to gate vibration'; JSME International Journal (series III), Vol. 33, pp 131-138

Jong, R. de (1978); 'Stormvloedkering Oosterschelde, krachten en trillingen bij de hefschuiven in de pijlerdam; vooronderzoek met sectiemodel'; WL | Delft Hydraulics rapport M1424

Jongeling, T.H.G. (1986); 'Onderzoek in een hydraulisch model naar het ontstaan van in-flow trillingen in schuifranden'; WL | Delft Hydraulics rapport Q190 / M1906

Jongeling, T.H.G. (1991); 'Maeslant Kering, additioneel onderzoek voor de sectordeuren in een overzichtsmodel'; WL | Delft Hydraulics rapport Q1278

Jongeling, T.H.G., Huijstee, J.J.A. van (1990); 'Maeslant Kering, vervolgonderzoek naar het responsiegedrag van de sectordeuren in een overzichtsmodel'; WL | Delft Hydraulics rapport Q1140

Jongeling, T.H.G., Perdijk, H.W.R. (1981); 'Stormvloedkering Oosterschelde, pijleroplossing; onderzoek naar trillingsgedrag van plaatliggerschuiven en balken met behulp van een elastisch gelijkvormig model'; WL | Delft Hydraulics rapport M1561

Jongeling, T.H.G, Vrijburcht, A. (2005); 'Hydraulische aspecten van balgstuwen en balgkeringen'; uitgave: Bouwdienst-RWS en WL | Delft Hydraulics

Kolkman, P.A. (1976); 'Flow-induced gate vibrations'; WL | Delft Hydraulics publication no 164

Kolkman, P.A., Jongeling, T.H.G. (1996); 'Dynamisch gedrag van waterbouwkundige constructies (delen A, B en C)'; uitgave RWS-DWW, november 1996 (ook in Engelse vertaling in de bibliotheek van Deltares: 'Dynamic behaviour of hydraulic structures')

Lewin, J. (2001); 'Hydraulic gates and valves'; uitgave Thomas Telford, 2001, 2nd edition

Naudascher, E. (1991); 'Hydrodynamic Forces'; Hydraulic Structures Design Manual no 3, uitgave A.A. Balkema, 1991

Naudascher, E., Rockwell, D. (1994); 'Flow-induced Vibrations'; Hydraulic Structures Design Manual no 7, uitgave A.A. Balkema, 1994

Naudascher, E., Thang N.D (1983); 'Galloping-type vibrations of underflow gates'; XX IAHR Congress, Moscow, September 1983

Paidoussis, M.P. (1998); 'Fluid-structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow (Vol. 1)'; uitgave Academic Press, 1998

Schwanenberg, D. and Jagers, H.R.A. (2003); 'CFD for Hydraulic Structures'; WL | Delft Hydraulics report Q3429

Schwanenberg, D. (2006); '3D Non-hydrostatic Flow – Flow simulation for hydraulic structures'; WL | Delft Hydraulics report Q3429.

Uwland, J. (1979); 'Stabiliteitsgedrag van schuiven met diverse onderrandvormen bij een verticale bewegingsmogelijkheid'; WL | Delft Hydraulics rapport M1490

Vrijer, A. (1977); 'Toegevoegde watermassa en instabiele trillingen van schuiven met een verticale bewegingsmogelijkheid'; WL | Delft Hydraulics rapport M1322

A Literatuuronderzoek: numerieke berekening van stroming rond constructies

A.1 Introduction

A.1.1 Background

In view of the planned experimental study on flow-induced vibrations of a vertical lifting gate it is useful to have an up-to-date knowledge about recent developments in the field of Computational Fluid Dynamics (CFD) for hydraulic structures.

In 2003, Schwanenberg and Jagers provided 'a basic overview of the current state and trends in CFD modeling' [Schwanenberg, Jagers (2003)]. The report treated the terminology (about grids, turbulence modeling, wall treatment and free-surface techniques) and reviewed the most important software products for their applicability to flow around hydraulic structures. As a continuation of this work, a practical guideline for using 3D numerical flow models regarding flow around structures in both research and consulting activities was given in [Schwanenberg (2006)]. In this report, the question is answered what models (and software) are applicable for different areas of application, such as 'hydraulic structures with 3D flow fields, sub-critical flow, and combined free-surface and pipe flow'.

The present literature study does not aim to revise or renew these two reports. Although developments in the world of numerical computation are fast, the main findings of these reports are still accurate and therefore adequate. The aim of this study, in complement to the two reports mentioned, is to supply a concise overview of current research on numerical computations of flow around structures as available in literature.

A.1.2 Interests

The main interest in CFD modeling originates from the desire in Deltares to attain knowledge on the computation of the dynamic flow load on structural elements such as bridge piers, or the flow forces that cause gate vibrations. In a broader view, interests in Fluid-Structure Interaction (FSI) exist within Deltares in several fields (for example fluid dynamics and mechanical systems, fluid dynamics and soil erosion). There are open questions on the detailed hydrodynamic modeling of for example the inflow of pumping stations, the flow around hydraulic structures, vibration of pipes due to internal flows, and the loads on offshore pipe lines which lie on the bottom of the ocean.

A.1.3 Approach and structure

Starting point and main source of articles is the digital (online) edition of the Journal of Fluids and Structures. All articles of this journal are available (fully and unabridged) to Deltares using the ScienceDirect connection. The focus was on volumes in the period 2000 to present. Considering the brevity of this study, there is no claim that this subject has exhaustedly been searched. The approach relies primarily on searches of articles from one journal. Although the opportunity exists to proceed to (cross-)referenced articles of related journals, the accessibility to other journals is somewhat limited by the validity of the online subscription. Nevertheless it is believed that a representative cross section of the active areas of research of numerical studies concerning flow around structures has been searched.

For the purpose of supplying a useful if not extensive source of articles, the references are grouped by topic. At the end, a few internal references are given in addition. These serve as complementary reading. The publications that were consulted for this study will be referenced in the following form:

title
author(s)
institute(s)
journal
volume, issue, date, (pages)
keywords [if available]

This inventory is structured according to the (sub)branches within the research topic of numerical computation of flow around structures, as opposed to inventory by numerical method or by area of application.

A.2 Categorization

A.2.1 Introduction

Categorizing research is an intrinsically tricky business. To a certain extent the inventory gives the state of research at a given moment in time. A point of attention is the yet uncertain impact of recent research. One article, even though containing rightful and meaningful results, can for whatever reason be in little demand and its ideas may turn out to be a dead end; while another contains results or scientific 'inventions' (such as novel analytical models or modeling concepts) which are immediately adopted by other authors. In more elaborate literature studies it is possible to look at (the number of) references to a certain article as a measure for its impact and scientific value.

Apart from this, there is an obvious difficulty of describing studies that defy categorization and studies that have overlap with numerous fields. The task thus requires a number of subjective choices. For the topics here included, some appropriate search criteria and restrictions will be mentioned to create some idea of a dividing line ('afbakening') of the field of interest.

A.2.2 Notions and research frameworks

In view of a clear appreciation of research articles and their contexts, it is wise to discuss a few common notions, which are sometimes so widely used that their specific meaning is lost. Conversely, descriptions of research topics in article abstracts (or in added lists of 'keywords') may be written in too much detail and lack terms that connect its content to a wider scope. Let us briefly look at a few frameworks that come into play when browsing through work on numerical models of flow around structures. Additional explanation of terms is found in the subsections of Section A.2.4.

Practical versus theoretical

Of course research articles (and other research publications) have a mostly theoretical aim. However, often there are practical motivations behind them; such as industrial applications (for example flow problems of a heat exchanger). In some cases, research studies on numerical flow lose some of their universal value (sometimes even too much) when they are too specifically focused on the intended application.
As a first criterion of differences between practice and theory, the Reynolds number (*Re*) of the study is a good guideline. To give a crude indication: DNS models of flow past a cylinder may nowadays typically deal with *Re*=1.000 while practical cases start at, say, *Re*=500.000.

Dynamics of fluids

Both air and water can be referred to as a 'fluid'; more generally it is remarked that all gases are fluids and most (but not all) liquids are fluids. The Navier-Stokes equations principally indeed apply for the motion of all fluids. The major distinction, also the point where modeling

approaches take separate routes, is the compressibility property of air. If fluid compressibility is an explicit assumption, the research is of little value to the hydraulic engineer. When considering research concerning 'incompressible fluid' without further specifications, it is found that it usually is a useful piece of research. Specifications of the Reynolds number then suffice to describe the flow situation.
Another notable distinction with turbulent studies of air around structures such as wings ('airfoils'), is that these usually deal with flow past smooth surfaces (walls), whereas hydraulic (civil) engineering applications almost exclusively deal with rough wall structures.

Hydraulics
'Hydraulic (engineering)' or 'hydraulics' are risky terms to use in unspecified contexts. Within the field of civil engineering (inland waters, coastal and offshore problems, etcetera) it is immediately clear that it refers to (large-scale) water-control works. As a general designation, however, 'hydraulics' refers to the study of mechanical properties of liquids. Used in this way, it can cause confusion as it may describe different fields of engineering dealing with hydraulic cylinders, pumps, turbines, etcetera. Some confusion can be avoided by using the term 'free surface hydraulics' or 'open channel hydraulics'.

Other fields
It is recognized that flow around structures is an important topic for studying local scour and morphology, both experimentally and numerically. Although closely related, this falls outside the current literature survey. The same holds for modeling of the interaction between flow and ships (navigation).

A.2.3 Bluff bodies

A central theme in research on flow around structures is the flow around so-called 'bluff bodies'. A bluff body can be defined as a rough, not-streamlined solid body or object that simply forms an obstacle in the flow. This notion is so commonly used in aerodynamics and hydrodynamics, that it has become such a household name that it is hard to find an article which gives a definition; using "bluff bodies" as a search criterion gives too many hits. This implies that further specification is necessary.
In most studies, regular, basic slender shapes are used as bluff body, which are often called 'cylinders' (see Section A.3.1). In this study a distinction is applied between 'circular cylinders' and other bluff bodies. The latter group will be called 'sharp-cornered bluff bodies'. Common examples of sharp-cornered bluff bodies are 'square cylinders' (see again Section A.3.1) and flat plates held transverse to the flow direction.

An 'airfoil' (American English) or 'aerofoil' (British English) is a good example of a streamlined body (i.e. 'non-bluff body'). In practice these have the shape of a wing or blade (of a propeller, rotor or turbine) or sail as seen in cross-section. An airfoil-shaped body moved through a fluid, or similarly a fluid flowing past such a body, produces a force perpendicular to the motion called lift. Foils of similar function designed with water as the working fluid are called 'hydrofoils'.

Most theoretical (and many practical) studies of flow around or near structures are sufficiently described as being 'flow around bluff bodies'. Indeed, as remarked by Monkewitz and Nguyen (ref. 3 of Section A.3.7):

> The wake behind bluff bodies has been the object of study for a very long time, both because of its eminent practical importance and of the kaleidoscope of problems it offers to researchers.

Flow around a circular cylinder is a classic hydrodynamic flow case. The literature survey proves that it is still a popular test case for new numerical models. It is reported, for instance by Dong and Karniadakis (Ref 1 of Section A.3.1), that cylinder flow at Reynolds number Re=3900 has become a canonical test case for LES. Remarkably, a trend can be deduced in which flow around cylinders is used as a 'numerical playground' rather than an object of study in physics. There are two main reasons why this makes flow around a circular cylinder an ideal test situation for numerical flow models.
Firstly, the physics constitute a complex, multi-faceted phenomenon and thus a suitable challenge for numerical models. The wake flow behind the cylinder is characterized by high shear stress gradients, as a result exhibiting a wide range of turbulent features (both 2D and 3D, both large scale and small scale, etc.). For different Reynolds numbers, the wake flow is organized in different ways, the most typical being the highly unsteady Von Kármán vortex street. Moreover, in contrast with flow around a square cylinder, for a circular cylinder the locations of the points of flow separation are not easily determined; these vary with Reynolds number and cylinder roughness. These and other flow dynamics make for highly dynamic forces on the structure. Secondly, the fact that flow around circular cylinders has frequently been studied has the advantage that a lot of experimental data is available (historical as well as recent) that can be used for comparison with numerical results.

Practical engineering problems related to flow around a circular cylinder include:

- stability of slender civil engineering structures in water, offshore platforms or bridge piers in rivers
- marine cables or marine (drilling) risers
- flow around (oil) pipes
- heat exchangers

…… and many more.

A.2.4 Search criteria

Clearly, an appropriate and up-to-date knowledge of relevant (combinations of) terms and abbreviations is imperative to have successful searches. A list of search criteria that were used:

"flow around structures", "CFD", "numerical model/method"
"gate (flow)", "flow under gate"
"added water mass"
"LES", "DES", "DNS"
"rough walls", "wall roughness"
"FSI", "FIV", "VIV"
"circular cylinder"

Not included are studies including frequent use of the following terms (search criteria):

"pipe flow", "concentric annular (pipe) flow", "industrial flow"
"bluff body buffeting", "airfoil", "aerofoils", "Mach numbers", "acoustic effects"
"heat exchanger", "tube arrays"
"vessels", "ships", "floating structures"
"wave(s)", "wave interaction", "wave-induced separation"

Note that it is often more fruitful to search by using specific terms, such as 'flow-induced vibration (FIV)' or 'vortex-induced vibration (VIV)' instead of more general terms such as "flow around structures" or "3D flow". This is a consequence of the level of detail of most publications and hence of the keywords describing them.

A.3 Overview of current research

Based on the results of the online search efforts, it was decided not to categorize by type of numerical method or model, but to group similar research topics. The frequency of occurence of the software products treated by Schwanenberg and Jagers [Schwanenberg, Jagers (2003)] was nevertheless checked, see Section A.3.8.

A.3.1 Flow around circular cylinder

The definition of a 'cylinder' used in literature is not intuitively clear. While in everyday speech a cylinder always has a perfect circle as a ground face, in the research literature at hand a cylinder is the spatial form extruded from any basic shape (i.e. not necessarily a circle). The somewhat odd term 'circular cylinder' is therefore used in many article titles to distinguish from a 'square cylinder' and a 'rectangular cylinder'. Basically, every object which has a constant cross-section in one of the three Cartesian dimensions can (apparently) be called a cylinder. In most flow cases in research this is the vertical direction (often indicated by independent variable z or x_1). Naturally, in two-dimensional models, the 'circular cylinder' reduces to a circle, the 'square cylinder' reduces to a square, and so on. In the following, this nomenclature will be adopted.

A survey of articles on numerical studies of flow around a circular cylinder learns that for the greatest part either Direct Numerical Simulation (DNS) or Large Eddy Simulation (LES) are applied. In a limited number of studies, alternative modeling approaches are studied. A popular method that is not based on finite volumes is the Lattice-Boltzmann Method (LBM), see Dupuis et al. [Ref. 4 of this Section A.3.1]. Basic principle of this approach is the fluid particles and the forces (of collision) between them. LBM is a completely separate branch of CFD. This is discussed in Section A.4.
In some of the publications listed below, a structural response is taken into account to some degree. Sections A.3.4 and A.3.5 expand on this.

The figure below shows the meshes used in a 3D flow study by Dong and Karniadakis (Ref 1 of Section A.3.1) using DNS. The domain size "extends from -20D at the inlet to 50D at the outlet, and from -20D to 20D in the cross-flow direction. The spanwise dimension of the domain L_z is chosen to be $L_z/D=\pi$." Here, D is the cylinder's diameter.

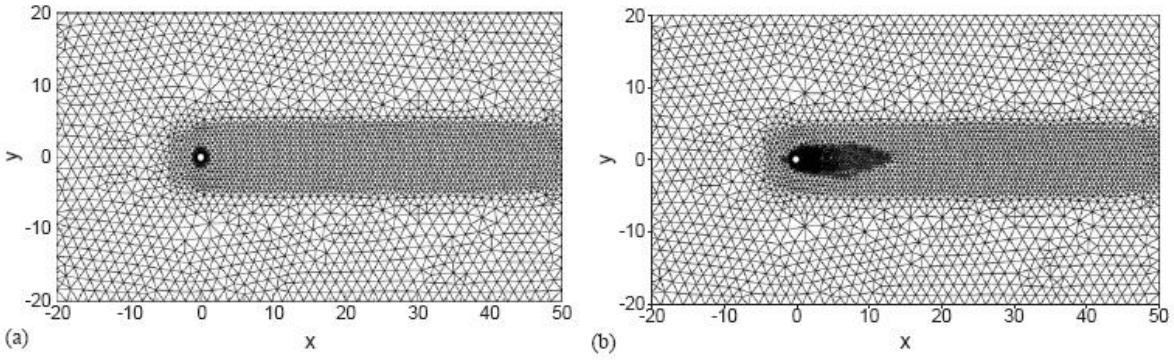


Figure 5.1 *2-D slice of mesh in x-y planes (..): (a) low-resolution mesh consisting of 6272 triangular spectral elements; (b) high-resolution mesh consisting of 9272 triangular spectral elements.*

References of numerical modeling of flow around circular cylinder:

1.
DNS of flow past a stationary and oscillating cylinder at Re=10000
S. Dong and G.E. Karniadakis
Division of Applied Mathematics, Center for Fluid Mechanics, Brown University
Journal of Fluids and Structures
Volume 20, Issue 4, May 2005, Pages 519-531
Keywords: Bluff-Body/Flow Interactions

2.
Numerical and modeling influences on large eddy simulations for the flow past a circular cylinder
Michael Breuer
Institute of Fluid Mechanics, University of Erlangen-Nürnberg
International Journal of Heat and Fluid Flow
Volume 19, Issue 5, October 1998, Pages 512-521

3.
Solving Navier–Stokes equation for flow past cylinders using single-block structured and overset grids
Tapan K. Sengupta, V.K. Suman and Neelu Singh
Department of Aerospace Engineering, IIT Kanpur
Journal of Computational Physics
Volume 229, Issue 1, 1 January 2010, Pages 178-199

4.
An immersed boundary–lattice-Boltzmann method for the simulation of the flow past an impulsively started cylinder
Alexandre Dupuis, Philippe Chatelain and Petros Koumoutsakos
Computational Science, ETH Zurich
Journal of Computational Physics
Volume 227, Issue 9, 20 April 2008, Pages 4486-4498
Keywords: Immersed boundary; Lattice-Boltzmann; Impulsively started cylinder; Bluff body flows

5.
Floquet stability analysis of the flow around an oscillating cylinder
R.S. Gioria[a,] , P.J.S. Jabardo[a], B.S. Carmo[b] and J.R. Meneghini[a]
[a]NDF, POLI, University of São Paulo, Brazil
[b]Department of Aeronautics, Imperial College, London, UK
Journal of Fluids and Structures
Volume 25, Issue 4, May 2009, Pages 676-686
Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations (BBVIV-5)
Keywords: Secondary wake transition; Floquet analysis; Oscillating cylinder

6.
A numerical investigation of the near-wake structure in the variable frequency forced oscillation of a circular cylinder
S. Atluri, V.K. Rao and C. Dalton
Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Texas, USA
Journal of Fluids and Structures
Volume 25, Issue 2, February 2009, Pages 229-244
Keywords: Computational Fluid Dynamics; Vortex-induced vibration; Forced oscillations; Wake mode response; Variable frequency; Variable Reynolds number; Large eddy simulation

A.3.2 Variations of flow around circular cylinder

Simulations are listed here that were found in one or more instance. It is not in all cases clear if these form separate, organized areas of study. There is a clear overlap with the previous and the next section. These studies include slightly adapted circular cylinders (with the aim of influencing interactions of the structure with the flow), domains with more than one cylinder

and placement of a cylinder close to a wall (called 'cylinder in ground effect'). All of these variations have strong links with applications.
The two figures below give an example of a model set-up of a cylinder near to a bottom.

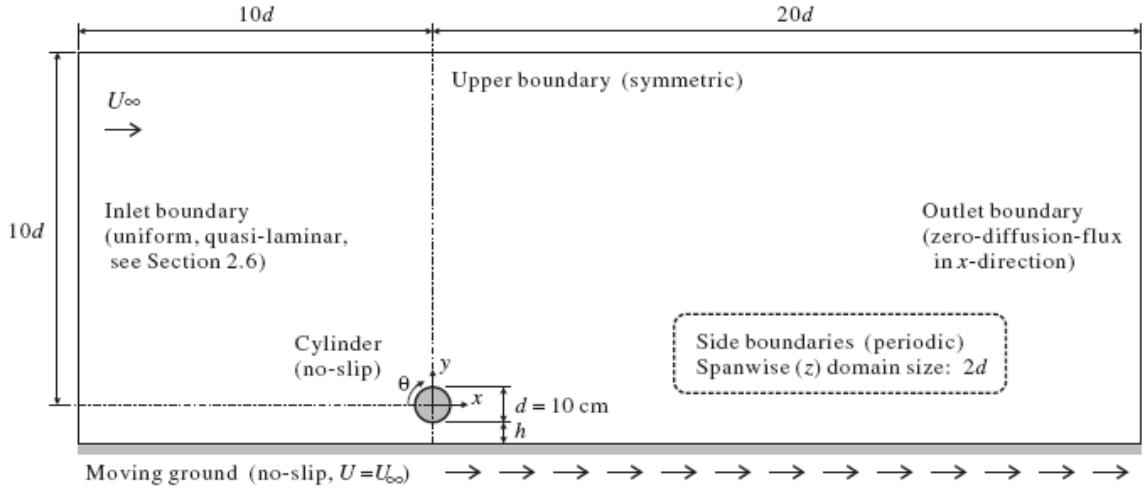


Figure 5.2 *Computational domain and boundary conditions used by [Nishino et al.(2008)]. These computations were done using Fluent6 software.*

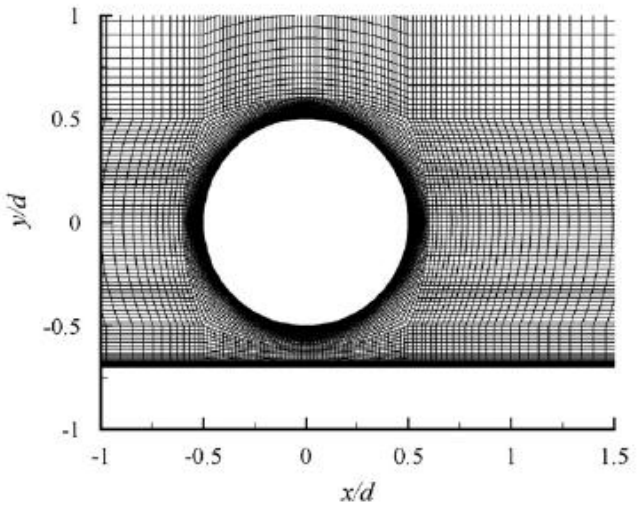


Figure 5.3 *Example of multi-block structured computational grid used in DES model by [Nishino et al.(2008)] of a cylinder close to the ground. In this picture the cylinder is located at 0.2d above the ground (d is diameter of cylinder).*

References of numerical modeling of flow around circular cylinders:

1.
DNS and experiments of flow past a wired cylinder at low Reynolds number
S. Sirisup[a], G.E. Karniadakis[a], N. Saelimb, D. Rockwell[b]
[a] Division of Applied Mathematics, Brown University
[b] Department of Mechanical Engineering, Lehigh University
European Journal of Mechanics - B/Fluids
Volume 23, Issue 1, January-February 2004, Pages 181-188
Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations

2.
Large eddy simulation of cross-flow through a staggered tube bundle at subcritical Reynolds number
C. Liang and G. Papadakis
Experimental and Computational Laboratory for the Analysis of Turbulence, Department of Mechanical Engineering, King's College London
Journal of Fluids and Structures
Volume 23, Issue 8, November 2007, Pages 1215-1230

3.
Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect
T. Nishino[a], G.T. Roberts[a] and X. Zhang[a]
[a]School of Engineering Sciences, University of Southampton,
Journal of Fluids and Structures
Volume 24, Issue 1, January 2008, Pages 18-33
Keywords: Unsteady RANS (URANS); Detached-eddy simulation (DES); Circular cylinder; Ground effect; Vortex shedding; Wake instability

4.
Vortex dynamics of a cylinder wake in proximity to a wall
S. Sarkar and Sudipto Sarkar
Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India

5.
Numerical simulation of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration
K. Lam[a], W.Q. Gong[b] and R.M.C. So[a]
[a]Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong
[b]Xi'an Jiaotong University, Xi'an, PR China
Journal of Fluids and Structures
Volume 24, Issue 1, January 2008, Pages 34-57
Keywords: Four cylinders; Flow pattern; Fluctuating pressure; Three-dimensionality

6.
Wake flow pattern modified by small control cylinders at low Reynolds number
C.-H. Kuo[a], L.-C. Chiou[a] and C.-C. Chen[a]
[a]Department of Mechanical Engineering, National Chung Hsing University, No. 250 Kuo-Kuang Road, Taichung 40227, Taiwan
Journal of Fluids and Structures
Volume 23, Issue 6, August 2007, Pages 938-956
Keywords: Passive wake control; Circular cylinder; Unsteady lift; Drag reduction; Vortex street

A.3.3 Flow around sharp-cornered bluff bodies

For flow around sharp-cornered bluff bodies, the location of the separation points is independent of the Reynolds number. Study of bluff bodies in aerodynamics often comprises determining the drag of the body in flow, which is needed to calculate the pressure and hence force exerted by the fluid on the body (the object's flow resistance).
Below are three figures illustrating the model set-up of Bunge et al [Ref.1 of this section A.3.3].

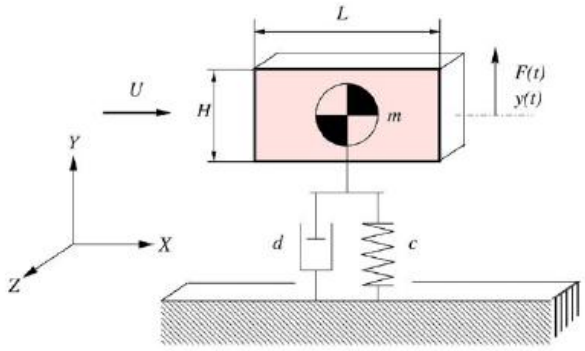


Figure 5.4 *Body and bearing of mechanical model, [Bunge et al.(2003)], to model oscillation of rectangular cylinder.*

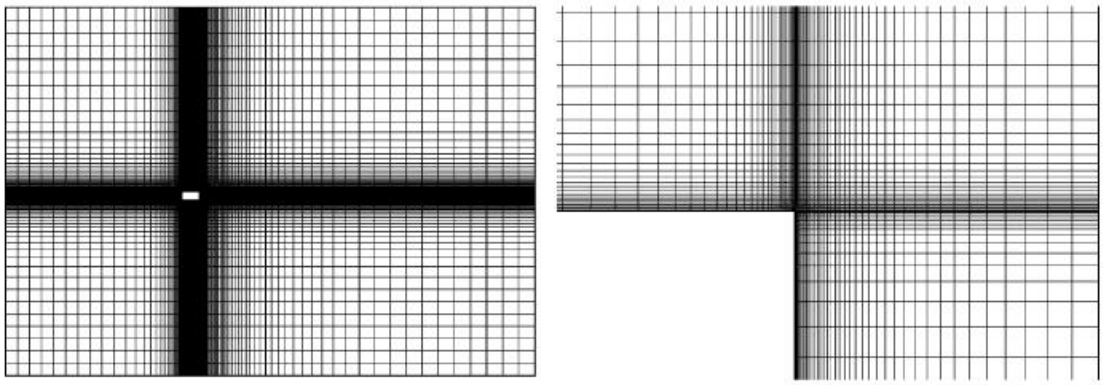


Figure 5.5 *Grids around rectangular cylinder by [Bunge et al.(2003)], right picture is detail.*

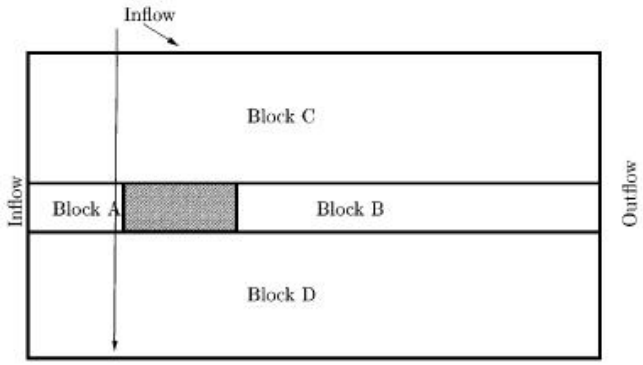


Figure 5.6 *The 2D-grid was divided into four blocks: block structure and boundary conditions by [Bunge et al.(2003)] are shown. Total number of cells varied between 15,000 and 46,000.*

References of numerical modeling of flow around bluff bodies:

1.
Numerical aspects of simulating the flow-induced oscillations of a rectangular bluff body
U. Bunge, A. Gurr and F. Thiele
Department of Transport and Applied Mechanics, Technische Universität Berlin, Hermann-Föttinger-Institute of Fluid Mechanics,
Journal of Fluids and Structures
Volume 18, Issues 3-4, September-October 2003, Pages 405-424
Bluff-body/Flow interactions

2.
Numerical solutions of a viscous uniform approachflow past square and diamond cylinders
C. Dalton[a], W. Zheng[b]
a Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Houston
[b] Consultant, Houston, TX, USA
Journal of Fluids and Structures
Volume 18, Issues 3-4, September-October 2003, Pages 455-465
Keywords: Bluff-body/Flow interactions

3.
Numerical simulation of flow around a square cylinder in uniform-shear flow
M. Cheng[a], D.S. Whyte[a] and J. Lou[a]
[a]Institute of High Performance Computing, Singapore
Journal of Fluids and Structures
Volume 23, Issue 2, February 2007, Pages 207-226
Keywords: Shear flow; Square cylinder; Vortex street; Lattice Boltzmann method

4.
Numerical investigation of laminar vortex-shedding flow past a square cylinder oscillating in line with the mean flow
S. Minewitsch, R. Franke and W. Rodi
Moscow Aviation Institute, Russia
SWAG-Energie- und Wasserversorgung AG, Nürnberg, Germany
University of Karlsruhe
Journal of Fluids and Structures
Volume 8, Issue 7, 1994, Pages 787-802

5.
2D LES of vortex shedding from a square cylinder
D. Bouris and G. Bergeles
Laboratory of Aerodynamics, Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
Volume 80, Issues 1-2, 1 March 1999, Pages 31-46
Keywords: Large eddy simulation; Turbulence; Vortex shedding; Square cylinder

6.
Anisotropic Organised Eddy Simulation for the prediction of non-equilibrium turbulent flows around bodies
R. Bourguet[a], M. Braza[a], G. Harran[a] and R. El Akoury[a]
[a]Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

7.
Hysteresis phenomenon in the galloping oscillation of a square cylinder
S. C. Luo, Y. T. Chew and Y. T. Ng
Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore
Journal of Fluids and Structures
Volume 18, Issue 1, August 2003, Pages 103-118

8.
Numerical study of vortex shedding from different shaped bluff bodies
A.K. El Wahed[a], M.W. Johnson[a] and J.L. Sproston[a]
[a]Department of Mechanical Engineering, University of Liverpool
Flow Measurement and Instrumentation
Volume 4, Issue 4, October 1993, Pages 233-240
Keywords: vortex shedding; bluff bodies; simulation

9.
Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders: Side ratio effects
A. Sohankar
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
Volume 96, Issue 5, May 2008, Pages 640-655
Keywords: Rectangular cylinders; Side ratio; Large eddy simulation; Reynolds number

A.3.4 Fluid-Structure Interaction (FSI)

Definition and references
A descriptive definition of FSI is found in De Boer (2008) [Ref. 3 of this Section A.3.4)]:

> The multidisciplinary field of fluid-structure interaction (FSI) concerns the interaction between a flow and a deformable structure and combines the two monodisciplinary fields Computational Fluid Dynamics (CFD) and Computational Structure Dynamics (CSD). (...) Two of the main interest areas in FSI research are aeronautical and biomechanical applications, but there are also other examples like parachute dynamics, airbag deployment and industrial applications. In FSI computations not only the two fields have to be coupled, but the flow solver also has to adapt its mesh to the deforming domain caused by the deformation of the structure. When the structure is flexible enough, these deformations can become very large.

Despite – or thanks to – the multidisciplinary and application-oriented nature of this field, publications having FSI as their central topic constitute a separate subfield (branch) in their own right. This branch of research is presently in rapid growth and their seems no end in sight to the development of meshing techniques and associated numerical techniques. Note that in this study, the use of FSI implies that there is a full coupling between simulation of fluid flow and structure response and that mesh deformation is included. In Section A.3.5 different simpler (more primitive) modeling forms of structural response are given.

References of FSI:

1.
Grid movement techniques and their influence on laminar fluid–structure interaction computations
S. Yigit, M. Schäfer[a] and M. Heck[a]
[a]Department of Numerical Methods in Mechanical Engineering, Technische Universität Darmstadt
Journal of Fluids and Structures
Volume 24, Issue 6, August 2008, Pages 819-832

2.
Reduced order modeling method via proper orthogonal decomposition (POD) for flow around an oscillating cylinder
E. Liberge and A. Hamdouni
LEPTIAB Université de la Rochelle
Journal of Fluids and Structures
[Article in Press]

3.
De Boer, A. (2008), Computational Fluid-Structure Interaction – Spatial coupling, coupling shell and mesh deformation. PhD thesis TU Delft.

4.
Partitioned strong coupling algorithms for fluid–structure interaction
Hermann G. Matthies and Jan Steindorf
Institute of Scientific Computing, Technische Universitat Braunschweig, Germany
Computers and Structures
Volume 81, Number 8, May 2003 , pp. 805-812(8)
Keywords: Fluid-structure interaction; Partitioned methods; Strong coupling; Block-Newton methods

FSI in ANSYS CFX v12
As predicted by Schwanenberg and Jagers [Schwanenberg, Jagers (2003)], the merging of the CFD-software CFX into the software company ANSYS has resulted in the coupling of non-hydrostatic fluid flow computations in 'ANSYS CFX' with mechanical response computations in the finite element analysis (FEA) package 'ANSYS'. *Both one-way coupling and two-way 'bi-coupling' between fluid physics and solid physics are possible.*

These applications require an additional license for ANSYS, in addition to the existing license for ANSYS CFX. FSI-modeling in CFX has not been tested yet by Deltares.

A.3.5 Numerical modeling of vortex-induced vibrations (VIV)

An important distinction in flow-structure numerical modeling exists between periodic forced (or controlled) oscillation of a cylindrical (slender) structure in flow and a self-excited oscillation. Forced oscillations do not have a feed back between structure response and fluid excitation force, while self-excited oscillations always have a feed back, to name a difference. For the reader it is recommended to pay close attention to the true scope of a numerical study. The fact is that most if not all numerical simulations of flow past cylinders make crude assumptions on the nature of the response of the structure. This is illustrated in the diagram below.

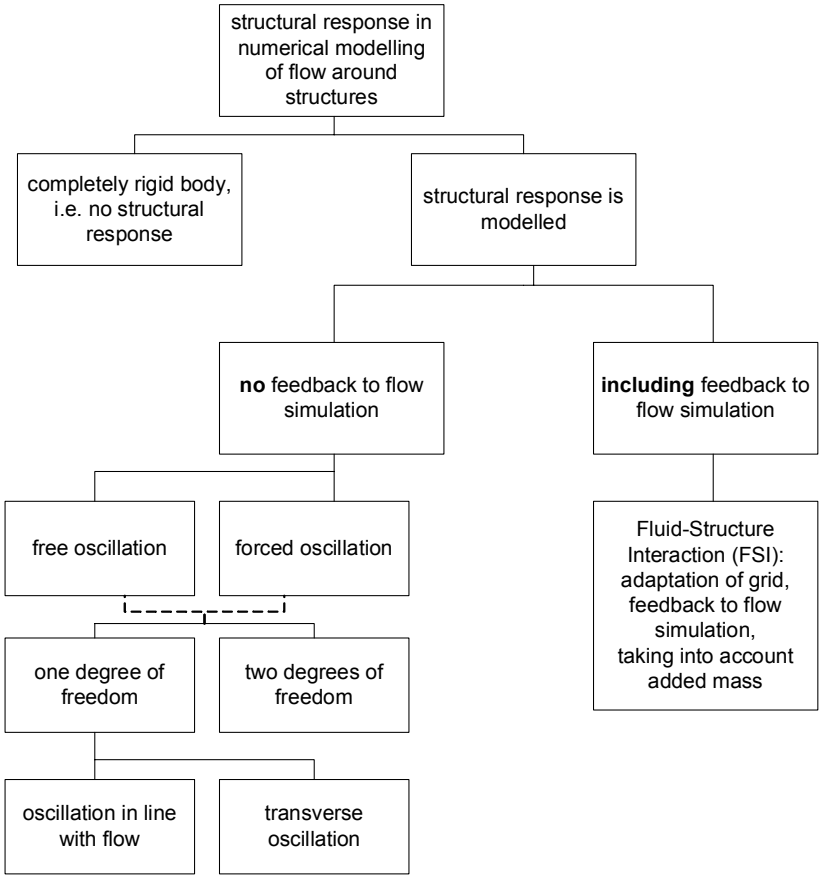


Figure 5.7 Assumed and simplified tree diagram of numerical flow models with various levels of modeled structural response.

An elaborate review of experimental and numerical vortex-induced vibration studies is given by Sarpkaya (2004) [Ref. 4 of this Section A.3.5]; it is recommended reading this review for a thorough understanding of numerical approaches in VIV. An excerpt of this review is given in Section A.4.6. Next figure presents an example of computed and measured VIV.

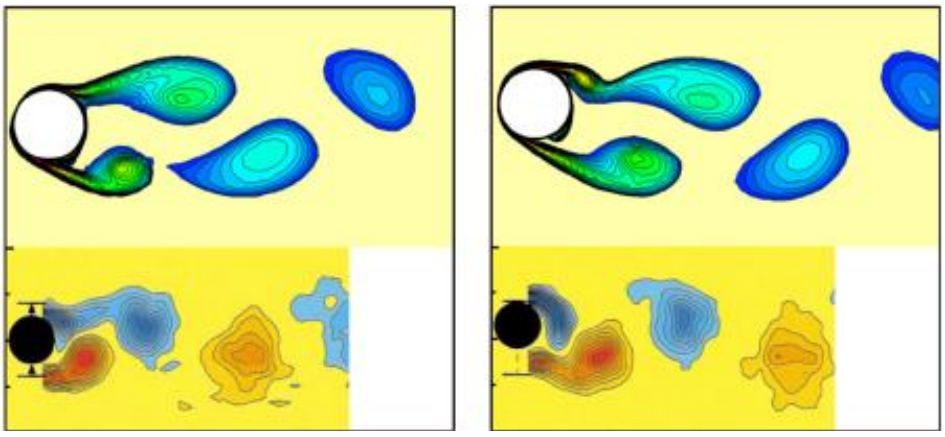


Figure 5.8 *Comparison of numerical results by [Pan et al.(2007)] of flow past transverse cylinder oscillation with PIV data.*

References on vortex-induced vibration without feedback to the flow simulation:

1.
Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder at low mass-damping using RANS code
Z.Y. Pan[a], W.C. Cui[b,] and Q.M. Miao[b]
[a]State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, China
[b]China Ship Scientific Research Center, China
Journal of Fluids and Structures
Volume 23, Issue 1, January 2007, Pages 23-37

2.
Parametric study of a two degree-of-freedom cylinder subject to vortex-induced vibrations
D. Lucor[a] and M.S. Triantafyllou[b]
[a]Institut Jean le Rond d'Alembert, UPMC Univ Paris, France
[b]Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology
Journal of Fluids and Structures
Volume 24, Issue 8, November 2008, Pages 1284-1293

3.
Computational and experimental study on flow around a rotationally oscillating circular cylinder in a uniform flow
N. Fujisawa[a], Y. Asano[b], C. Arakawa[b] and T. Hashimoto[a]
[a]Department of Mechanical Engineering, Niigata University, Japan
[b]Department of Mechanical Engineering, University of Tokyo, Japan
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
Volume 93, Issue 2, February 2005, Pages 137-153

4.
A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations
T. Sarpkaya
Department of Mechanical and Astronautical Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, USA
Journal of Fluids and Structures
Volume 19, Issue 4, May 2004, Pages 389-447

A.3.6 Other numerical flow studies involving structures

A few examples of studies that fall into other categories than covered so far, for different reasons. These articles are interesting because they make a beginning with new modeling approaches.

References of more general numerical flow studies involving structures:

1.
Prediction of turbulence-induced forces on structures from full numerical solutions of the Navier-Stokes equations
R.J. Hansen, R.A. Handler, R.I. Leighton and S.A. Orszag
Naval Research Laboratory, Washington, D.C, U.S.A.
Princeton University, Princeton, N.J., U.S.A.
Journal of Fluids and Structures
Volume 1, Issue 4, October 1987, Pages 431-443

2.
A novel method for identifying vortical structures
R.J. Pemberton[a], S. R. Turnock[a], T. J. Dodd[b] and E. Rogers[b]
[a] School of Engineering Sciences, University of Southampton, U.K
[b] Department of Electronics & Computer Science, University of Southampton, U.K
Journal of Fluids and Structures
Volume 16, Issue 8, December 2002, Pages 1051-1057

3.
A hybrid vortex method for flows over a bluff body
M. Cheng, Y. T. Chew, S. C. Luo
Department of Mechanical and Production Engineering, National University of Singapore
International Journal for Numerical Methods in Fluids
Volume 24 Issue 3, Dec 1998, Pages 253 - 274
Keywords: bluff body, hybrid vortex method

A.3.7 Non-numerical studies on flow around structures

A few extra articles are listed here concerning relevant studies that are *not* based on numerical computations.

Classic references (before 1990)

1.
On the wake and drag of bluff bodies
Roshko, A.
Journal of Aeronautical Sciences
Volume 22, 1955, Pages 124–135

2.
The existence of two stages in the transition to three-dimensionality of a cylinder wake
Williamson, C. H. K.
Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology
Physics of Fluids
Volume 31, Issue 11, November 1988

3.
Absolute instability in the near-wake of two-dimensional bluff bodies
P.A. Monkewitz and L.N. Nguyen
Journal of Fluids and Structures
Volume 1, Issue 2, April 1987, Pages 165-184
Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, University of California

4.
Flow-induced streamwise vibrations of structures
E. Naudascher
Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
Journal of Fluids and Structures
Volume 1, Issue 3, July 1987, Pages 265-298

5.
A simple scheme for calculating the added mass of hydraulic gates
P.A. Kolkman
Department of Rivers, Navigation and Structures, Delft Hydraulics, and Department of Civil Engineering, Technical University Delft, Delft
Journal of Fluids and Structures
Volume 2, Issue 4, July 1988, Pages 339-353

6.
Flow-induced self-excited in-flow vibrations of gate plates
T.H.G. Jongeling
Delft Hydraulics, Emmeloord
Journal of Fluids and Structures
Volume 2, Issue 6, November 1988, Pages 541-566

References of flow around circular cylinder(s) "piercing the surface" or "semi-submerged"

1.
Flow about semi-submerged cylinders of finite length
Hay., A.D.
Princeton University Report, Princeton, NJ
1947

2.
Steady flow past a vertical surface-piercing circular cylinder
J. R. Chaplin[a] and P. Teigen[b]
[a] Department of Civil and Environmental Engineering, University of Southampton, UK
[b] Statoil Research Centre, Postuttak, Trondheim, Norway
Journal of Fluids and Structures
Volume 18, Issues 3-4, September-October 2003, Pages 271-285

Recent experimental and analytical studies

1.
Unsteady free surface wave-induced separation: Vortical structures and instabilities
M. Kandasamy, T. Xing and F. Stern
Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa
Journal of Fluids and Structures
Volume 25, Issue 2, February 2009, Pages 343-363

2.
Flow-induced vibration of long-span gates part I: Model development
N. Ishii
Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, Japan
Journal of Fluids and Structures
Volume 6, Issue 5, September 1992, Pages 539-562

3.
Flow-induced vibration of shell-type long-span gates
N. Ishii and C. W. Knisely
Osaka Electro-Communications University, 18-8 Hatsu-cho, Neyagawa-city, Osaka 527, Japan
Mechanical Engineering Department, Bucknell University, Lewisburg, PA 17837, U.S.A.
Journal of Fluids and Structures
Volume 6, Issue 6, November 1992, Pages 681-703

4.
Vortex-induced vibrations of a circular cylinder in laminar and turbulent flows
S. Pastò
Civil and Environmental Engineering Department, University of Florence, Italy
Journal of Fluids and Structures

Volume 24, Issue 7, October 2008, Pages 977-993
Keywords: Lock-in; Vortex-induced vibrations; Across-wind oscillations; Vortex capture; Vortex shedding

5.
A brief review of recent results in vortex-induced vibrations
C.H.K. Williamson[a] and R. Govardhan[b]
[a]Fluid Dynamics Research Laboratories, Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, USA
[b]Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
Volume 96, Issues 6-7, June-July 2008, Pages 713-735
5th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications

A.3.8 Hydraulic software packages used in research studies

Schwanenberg and Jagers [Schwanenberg, Jagers (2003)] identified the numerical software packages most relevant for computing flow around structures. With the exception of SSIIM, these are all commercial models. The models Finel-3D/FinLab and ComFlow (even though the latter is not primarily used for flow modeling) were added to this list and subsequently used as search criteria in the Journal of Fluids and Structures. Next table presents the results of this search.

Software	Result of search ScienceDirect
ADH	no relevant hits
CFX	1 hit: [Pemberton et al.(2002)] used CFX 4.3, see section 2.5, ref 2.
Comet / STAR-CD	several hits, none of which related to hydraulic engineering applications. Two examples:
	[Schröder & Gelbe (1999)] on FIV excitation in tube bundles (Chemical Eng. and Processing Vol.38, Iss. 4-6).
	[Li et al.(2009)] on thermal environment of air-conditioned building (Building and Environment Vol 44, Iss.7).
ComFLOW	no hits
Delft3D(-Flow)	several hits on (coastal and river) morphology studies and density flows. No hits on flow around structures.
Finel3D / FinLab	no relevant hits
Flow-3D / Flow3D	no relevant hits; mostly articles on air flow. Software name makes searching quite hard.
Fluent	no relevant hits; mostly CFD studies about heat transfer and gas flow.
SSIIM	no relevant hits; SSIIM is mostly used in ecological studies.
Telemac-3D	no hits on flow around structures; mostly used for "quasi-3D shallow water equations".

A.4 Backgrounds on numerical models

A number of paragraphs from the references given in the last chapter, are cited here in order to give some explanation and background on some relevant numerical notions that were not covered by Schwanenberg and Jagers [Schwanenberg, Jagers (2003)]. For details on the cross-references contained in these citations, see the original articles.

A.4.1 URANS

Extract from [Nishino et al.(2008)], see Section A.3.2, Ref.3:

> The concept of URANS is based on the triple decomposition of time-dependent variables (Hussain and Reynolds, 1970), where each instantaneous variable, such as velocity and pressure, is decomposed into long-time-averaged, periodic, and turbulent (or stochastic/random) components. The sum of the first two is often referred to as a coherent (or ensemble-averaged) component, for which the Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations are derived and solved by using some turbulence closure models. It should be noted, however, that most closure models of today, including the S–A and LS k–ε models

used in this study, are basically adjusted to reproduce the spreading rate of mixing layers in *steady* RANS simulations, i.e., the Reynolds stresses predicted by the models implicitly contain contributions not only from the turbulent or random motions but also from the coherent motions of the flow (Spalart, 2000), and therefore, in general, the models are 'overly dissipative' (Menter et al., 2003) when used in URANS simulations. It should also be noted that, in most real flows, including the cylinder wakes studied here, the turbulent and coherent motions cannot be explicitly distinguished as the scales of the two motions do not differ enough in nature.

A.4.2 LES

Extract from [Sohankar (2007)], see Section A.3.3, Ref.9:

The Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) approach often fails to predict flows associated with massive separation, streamline curvature, transition from laminar to turbulent flow, re-circulation, vortex shedding, and the existence of inherent three-dimensional (3D) flow structures [Rodi et al. (1997)]. In contrast, LES can correctly capture large-scale turbulence [Rodi et al. (1997)]; [Sohankar et al. (1999)] and [Sohankar et al. (2000)]).
In LES, all scales larger than a selected size (grid size) are computed with an accuracy that depends on numerical and modeling errors. Small scales tend to be more dissipative, isotropic, short-lived, homogeneous, random, universal, and less affected by the boundary conditions than the larger ones, and the effect of small scales of turbulence in LES is modelled. The LES governing equations are accomplished using a general spatial filtering of the instantaneous equations, e.g. a box filter, to limit the range of scales in the flow field. In this procedure, a general variable is decomposed into large-scale and a subgrid-scale components, e.g. (...)
The influence of small scales on large (resolved) scales takes place through the subgrid-scale stress (SGS). The subgrid stresses in LES are only a fraction of the total stresses; thus, it is expected that the modeling error should not affect the overall accuracy of results as much as in the RANS approach. Details of LES formulation are found in [Sagaut (2001)].
(...)
Most of the subgrid models are based on the eddy-viscosity model. They use the Boussinesq hypothesis, which expresses a direct proportionality between the deviatoric part of the turbulent stress and the velocity gradients, i.e. $\tau_{ij}^{a} \equiv \tau_{ij} - \delta_{ij}\tau_{kk}/3 = -\nu_t(\tilde{u}_{i,j} + \tilde{u}_{j,i})$.
The most widely used SGS model is the *S-Model* [Smagorinsky (1993)]. Dynamic models, which are capable of removing some of the drawbacks of the S-Model, are a suitable alternative. The first attempt to introduce a dynamic SGS eddy-viscosity model was developed by [Germano et al. (1991)].

A.4.3 Detached-Eddy Simulations (DES)

Extracts from the Ansys CFX User Manual (Release 11.0):

Introduction to DES
In an attempt to improve the predictive capabilities of turbulence models in highly separated regions, [Spalart (2001)] proposed a hybrid approach, which combines features of classical RANS formulations with elements of Large Eddy Simulations (LES) methods. The concept has been termed Detached Eddy Simulation (DES) and is based on the idea of covering the boundary layer by a RANS model and switching the model to a LES mode in detached regions. Ideally, DES would predict the separation line from the underlying RANS model, but capture the unsteady dynamics of the separated shear layer by resolution of the developing turbulent structures. Compared to classical LES methods, DES saves orders of magnitude of computing power for high Reynolds number flows. Though this is due to the moderate costs of the RANS model in the boundary layer region, DES still offers some of the advantages of an LES method in separated regions.

When to use DES
It is well known that RANS models does not accurately predict all flow details in massively separated flow regions. In addition, the RANS formulation does not provide any information on turbulent flow structures and spectral distribution, which might be of importance to predict

flow-induced noise or vibrations. In these cases, DES can provide valuable details far exceeding RANS simulations. Typical examples of DES simulations are:

- Flow around non-aerodynamic obstacles (buildings, bridges, etc.)
- Flow around ground transport vehicles with massively separated regions (cars, trains, trucks)
- Flow around noise generating obstacles (car side-mirror, etc.)
- Massively separated flow around stalled wings

On the other hand, DES is a computer intensive method because large (detached) turbulent structures need to be resolved in space and time. While the grid resolution requirements are not significantly higher than RANS for simulations, the time resolution imposes high CPU demands. In ANSYS CFX, steady-state solutions can typically be obtained within 100-200 iterations. A typical DES simulation requires several thousands timesteps using three coefficient loops each. DES is therefore at least one order of magnitude more computer intensive than RANS models. DES does not allow the use of symmetry conditions, as turbulent structures are usually not symmetric. Two-dimensional and axisymmetric simulations are not feasible, as turbulent structures are always three-dimensional. Hence, you should carefully weigh the need for additional information against the required resources.

The Scale-Adaptive Simulation (SAS)
The Detached Eddy Simulation is a combination of RANS and LES methods. In an alternative approach, Menter et al and Menter and Egorov have investigated the development of improved URANS methods, which can provide a LES-like behavior in detached flow regions. The Scale-Adaptive Simulation (SAS) concept is based on the introduction of the von Karman length-scale into the turbulence scale equation. The information provided by the von Karman length-scale allows SAS models to dynamically adjust to resolved structures in a URANS simulation, which results in a LES-like behavior in unsteady regions of the flow field. At the same time, the model provides standard RANS capabilities in stable flow regions.

SAS versus DES
While SAS and DES provide a similar functionality in principle, there are important practical differences between the two formulations. SAS is essentially an improved URANS formulation, which allows the resolution of the turbulent spectrum in unstable flow conditions. DES on the other hand is the combination of RANS and LES methods. The switch between both is achieved by the comparison of the modeled turbulent length scale and the grid spacing. As the grid spacing enters the DES equations explicitly, DES has a significantly stronger mesh sensitivity than SAS. The main practical problems with DES are that certain requirements have to be satisfied in the switching zone between RANS and LES.

Extract from [Nishino et al.(2008)], see section A.3.2 Ref.3:

The main feature of the DES performed in this study is that a single turbulence model (a slightly modified version of the S–A model) serves as a statistical model (i.e., URANS mode) in near-wall regions, and also serves as a subgrid-scale model (i.e., LES mode) in far-wall regions. Specifically, the nearest-wall-distance n that governs the eddy viscosity in the original S–A model is replaced in the DES by a new length scale $\tilde{n}$ defined as (1)
$\tilde{n} = \min\ [n, 0.65\Delta_{\max}], \quad \Delta_{\max} = \max\ [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$, where Δx, Δy and Δz denote the size of a control volume (or the grid spacing) in each direction. This simple formulation of the DES, however, raises an issue concerning the physical interpretation of the 'grey area' ($n \approx 0.65\Delta_{max}$), where the operation mode is switched between URANS and LES, and the justification of this switch solely relies on the disparity in the scales between the attached- and detached-eddies (Spalart, 2001). In practice, the switch between the URANS and LES modes can take place inside the boundary layers when using excessively fine computational grids, and this often causes a premature or grid-induced separation (Menter et al., 2003). It follows that the grid spacing in DES should be carefully decided so that the boundary layers are analysed in the URANS mode rather than in the LES mode.

A.4.4 Lattice-Boltzmann Method (LBM or LB)

The term Lattice Boltzmann methods (LBM) refers to a class of CFD methods. Instead of solving the Navier–Stokes equations, the discrete Boltzmann equation is solved to simulate the fluid flow by using so-called 'collision models'. By simulating streaming and collision processes across a limited number of particles, the computed particle interactions result in viscous flow behavior applicable across the greater mass. Unlike the traditional CFD methods, which solve the conservation equations of macroscopic properties (mass, momentum, etcetera) numerically, LBM models work from small to large dimensions. This is done by assuming the fluid to consist of fictive particles, such particles subsequently perform consecutive propagation and collision processes over a discrete lattice mesh. Due to its particle-oriented nature and local dynamics, LBM has several advantages over more conventional CFD methods, such as dealing with complex boundaries and parallelization of the algorithm.

Extract from [Dupuis et al.(2008)], see Section A.3.1, Ref.4:

> A number of important flow phenomena in science and engineering, ranging for example from hemodynamics [3] and fish swimming [35] to robotic insects [11] and prosthetic heart valves [29], involve flows past complex geometries. The computational study of these flows requires the development of numerical techniques capable of handling complex unsteady geometries. A number of computational methods, such as finite elements, finite volume and unstructured mesh finite differences (see [23, and references therein]) have been developed that can handle complex geometries for systems such as blood flow past endovascular devices [5] or multiphase turbulent flows in realistic combustors [26]. More recently, lattice-Boltzmann methods [34] have been advocated as effective computational tools for the simulation of complex flows ranging from car aerodynamics to flows in porous media. The results of these simulations may depend however on the grid distribution, while intensive meshing requirements may adversely affect the efficiency of the simulations for flows with time dependent, complex geometries. In the early 1970s motivated by problems in biological flows, Peskin [28,30] pioneered the use of immersed boundary methods that require a cartesian grid and a suitable modification of the governing equations to take into account the effects of the boundaries. The simplicity in meshing and the relative ease of implementation of these techniques has led to intensive research efforts (see [24, and references therein]) making the IB technique a potent alternative for simulations of flows with complex, unsteady geometries.
> In this work, we present the coupling of immersed boundary (IB) and lattice-Boltzmann (LB) methods. LB models [34] solve the Navier–Stokes equations of incompressible fluids by following the evolution of distribution functions on a lattice. Boundaries are approximated on the regular lattice in a staircase fashion making them suitable for simulations of flows past grid conforming geometries. The accuracy of the method depends on the detail of the boundary representation and efficiency requirements dictate the local refinement of the lattice [12].
> The coupling of LB and IB requires a procedure to enable the communication of the effect of the body force between the Eulerian grids and the surface of the body. In the present paper, we investigate two variants: a direct forcing (DF) and an interpolated forcing (IF) approach. The DF aims at distributing, on the lattice, forces known along the boundary from Eq. (9). In turn, the IF determines velocities at lattice nodes close to the boundary by using a second-order interpolation scheme and by applying accordingly a forcing term. In the following we use lower-case and upper-case variables to represent value defined on the Eulerian lattice and on the Lagrangian boundary, respectively.

Extract from [Cheng et al.()], see Section A.3.3, Ref.3.:

> The lattice Boltzmann method (LBM) is an alternative to conventional computational fluid dynamics methods for solving Navier–Stokes equations (Higuera and Jimenez, 1989; Higuera et al., 1989; Benzi et al., 1992; Chen and Doolen, 1998). It is based on microscopic models and a mesoscopic kinetic equation for the particle distribution function. Unlike traditional numerical methods which solve the macroscopic variables such as velocity and density directly, these variables are obtained in LBM by moment integrations of the particle distribution function. Therefore, the LBM has several computational advantages, i.e., higher precision, simplicity of programming, intrinsic parallelism of the algorithm and data structure.

> Additionally, traditional CFD solvers typically require a velocity–pressure correction step (for mass conservation) involving the global solution of the Poisson equation. For LBM, there is no requirement to solve this Poisson equation, and the pressure is a local variable (Rossi et al., 2005).
> The Boltzmann equation with the Bhatnagar–Gross–Krook (BGK) approximation for the particle collision operator (Bhatnagar et al., 1954) is based on the premise that a particle distribution will relax to a final state given by the Maxwell–Boltzmann equilibrium distribution at a rate inversely proportional to the relaxation time, $\tilde{\tau}$. (...)
> The LBM belongs to a class of the pseudo-compressible solvers of the Navier–Stokes equations for incompressible flow. In order to correctly simulate the incompressible flow in practice, one must ensure that the Mach number, $M = \tilde{U}_c / \tilde{c}_s \ll 1$. Since $\tilde{c}_s$is a constant in the LBM, the restriction on *M* requires that the velocity $\tilde{U}_c$be sufficiently small. In order to maintain the Mach number and Knudsen number in the suitable ranges ($M \ll 1$ and Kn<0.01) it is necessary to limit the velocity $\tilde{U}_c$to between 0.01 and 0.04. As the viscosity of the fluid is specified to be the Reynolds number range for the present study is 50–200.

Extract from Wikipedia on Boltzmann equation:

> The Boltzmann equation, also often known as the Boltzmann transport equation, devised by Ludwig Boltzmann, describes the statistical distribution of one particle in a fluid. It is one of the most important equations of non-equilibrium statistical mechanics, the area of statistical mechanics that deals with systems far from thermodynamic equilibrium; for instance, when there is an applied temperature gradient or electric field. The Boltzmann equation is used to study how a fluid transports physical quantities such as heat and charge, and thus to derive transport properties such as electrical conductivity, Hall conductivity, viscosity, and thermal conductivity.

A.4.5 Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH)

Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH) is a mesh-free Lagrangian CFD method in which the coordinates move with the fluid. The method is based on a division of the fluid into a set of discrete elements (called ‘particles’). These particles have a spatial distance over which their properties are ‘smoothed’. SPH inherently guarantees the conservation of mass because the particles themselves represent mass. This also makes it much easier to calculate pressures on structures. Another distinct advantage of the lack of grid-structures in the SPH technique is the determination of the free surface (and its changes in time) between two phases.

A.4.6 Forced and free vibrations in VIV-studies

Extract from [Sarpkaya (2004)], see Section A.3.5, Ref.4:

> Limitations of forced and free vibrations (general discussion)
> The motivation of this section is not to assess how the forced oscillations can be used to predict the free VIVs under otherwise similar conditions, but rather to examine in depth their similarities, differences, and limitations. Obviously, the two cases are not identical: one is driven internally by the wake at an average frequency fex (dictated by the past and the prevailing state of the motion and the periodic forcing arising from it) as the Reynolds number increases with mincreasing U in U/fwtrD as in K–W (1999) and G–W (2000). Furthermore, some or all of the Reynolds numbers in the synchronization range may not necessarily be larger than Resl, making the response dependent on both Re (i.e., on the state of the shear layers) and U/fwtrD. Forced oscillations are driven externally at an exact frequency fex at a desired amplitude A=D and Reynolds number throughout the range of fex/fst or Vr=U/fexD. One is limited largely by the lockin regions and the other to a large range of reduced velocities and amplitudes. Forced oscillations help to regularize and idealize almost every aspect of the vortex-induced oscillations, leading to nearly pure sinusoidal oscillations, forces, and almost repeatable wake states. Thus, one has an exact knowledge of the frequency of motion and of the magnitude and shape of the displacement (and hence, of the velocity and acceleration). Even then, however, one expects and finds differences in the structure of the

wake from cycle to cycle, for example due to changes in the motion of the separation points and the coherence length.
The bodies undergoing VIV in nature are neither constrained (except by their supports) nor forced to oscillate at a constant amplitude and frequency. Their reduced amplitude (A=D) and Reynolds number vary with the reduced velocity and the accurate determination of their individual effects on the remaining governing parameters in general and on the lock-in phenomenon in particular becomes difficult particularly when some or all Re values are below Resl. The extraction and interpretation of reliable force information from free oscillations are more difficult. This is particularly true when the body responds very rapidly to changes in reduced velocity as in Feng's (1968) or in Brika and Laneville's (1993) experiments in certain ranges of their reduced velocity Vrb=(Vr/2p)=U/(2pfexD). Thus, neither the instantaneous center of gravity nor the cycle-averaged value of the virtual mass, nor the force acting on the body, nor the acceleration of the body is known, except for the fact that the virtual mass, the force, and the acceleration are nonlinearly related. This is analogous to deducing information from F=(virtual mass)x(acceleration) *without knowing any one of the three elements of the most fundamental equation of motion*. In spite of this, it should be the ultimate objective of the VIV research to predict, to the extent possible, the kinematics and dynamics of self-excited vibrations from forced vibration (physical/numerical) experiments and, equally important, the dynamics of forced oscillations (say, e.g., drag, lift, and inertia coefficients and the phase angle) from the physical/numerical experiments with self-excited oscillations.

A.4.7 Sheared inflow

Extract from [Cheng et al. (2007)], see Section A.3.3, Ref.3:

The study of uniform flow past a cylindrical obstacle has fascinated researchers for a long time, and detailed information is available in the literature. However, many practical cases exist where the flow approaching a body is sheared rather than uniform. For example, cylindrical structures submerged in wind, tides or currents are always exposed to a nonuniform free stream. When the oncoming free stream is a linear flow, a constant vorticity is embedded in the free stream. This may lead to a complicated interaction with the boundary layers that separate from the body which results in a different type of vortex shedding structure. Vortex shedding has often been the cause of flow-induced structure failure. It is important to know the effects of the approaching shear flow on the mechanism of vortex shedding. Such a study would lead to better understanding of the vortex-induced vibration, its subsequent suppression and control (Zhou et al., 2005).
Although a large number of studies with a uniform flow stream exist, there has been relatively little work carried out to investigate the shear flow problem. Only a few experimental and numerical studies on shear flow past a circular cylinder have been conducted in the past. Kiya et al. (1980) experimentally investigated vortex shedding frequency of a circular cylinder in a linear shear flow and the flow patterns around the cylinder. The Reynolds number (defined in terms of the cylinder diameter and the approaching velocity at its centre) ranged from 35 to 1500. The shear parameter *K* (the transverse velocity gradient of the shear flow nondimensionalized by the cylinder diameter and the approaching velocity at its centre) was varied from 0 to 0.25. They found that the critical Reynolds number for the onset of vortex shedding from the cylinder is higher for shear flow than that for a uniform stream.

A.4.8 Passive wake control

Extract from [Kuo et al.(2007)], see Section A.3.2, Ref.6:

Because of the practical importance of bluff bodies in uniform flow, a large number of numerical and experimental investigations have been performed for a wide range of Reynolds numbers (Griffin, 1995; Hoerner, 1957; Kim and Lee, 2001; Roshko, 1955; Suryanarayana et al., 1993). Details on the subject of a circular cylinder in uniform flow can also be found in the book of Zdravkovich (1997). Within a wide range of Reynolds numbers ($46<Re_D<2\times10^5$), wake flow patterns are complicated by factors such as turbulence intensity, aspect ratio, blockage ratio, end effects, wall proximity, etc. Although the Reynolds number is usually high in most practical situations, wake flows are also important at low Reynolds numbers for microsystem applications. Three important goals to modify the wake flows at low Reynolds numbers are: (i) reducing the form drag (Huner and Hussey, 1977; Suryanarayana et al.,

1993), (ii) suppressing the vortex shedding (Bearman, 1965; Berger, 1967; Blevins, 1985; Strykowski and Sreenivasan, 1990), and (iii) changing the heat transfer characteristics (Lange et al., 1998).
Active and passive wake controls are usually employed in the literature. For the former, acoustics excitations (Blevins, 1985), heating the cylinder (Lecordier et al., 1991), oscillating the cylinder at an appropriate frequency or frequency-modulation (Berger, 1967; Nakano and Rockwell, 1991; Tokumaru and Dimotakis, 1991; Suryanarayana et al., 1993), blowing and suction (Bearman, 1965), and recently electromagnetic force control (Kim and Lee, 2001) are typical examples. For the latter, typical examples are surface protrusions (Nigim and Batill, 1997) to change the flow separation location, shrouds to affect the fluid entrainment (Zdravkovich, 1997), the rear-wake stabilizer to minimize the mutual interactions of separated shear layers (Bearman, 1965; Eisenlohr and Eckelmann, 1989), and recently use of a very small control cylinder to efficiently suppress the wake behind the main cylinder (Strykowski and Sreenivasan, 1990).

A.4.9 Vortex method

Extract from Wikipedia on CFD:

The Vortex method is a grid-free technique for the simulation of turbulent flows. It uses vortices as the computational elements, mimicking the physical structures in turbulence. Vortex methods were developed as a grid-free methodology that would not be limited by the fundamental smoothing effects associated with grid-based methods. To be practical, however, vortex methods require means for rapidly computing velocities from the vortex elements – in other words they require the solution to a particular form of the N-body problem (in which the motion of N objects is tied to their mutual influences). A long-sought breakthrough came in the late 1980's with the development of the Fast Multiple Method (FMM), an algorithm that has been heralded as one of the top ten advances in numerical science of the 20th century. This breakthrough paved the way to practical computation of the velocities from the vortex elements and is the basis of successful algorithms.
Software based on the Vortex method offer the engineer a new means for solving tough fluid dynamics problems with minimal user intervention. All that is required is specification of problem geometry and setting of boundary and initial conditions. Among the significant advantages of this modern technology;
- It is practically grid-free, thus eliminating numerous iterations associated with RANS and LES.
- All problems are treated identically. No modeling or calibration inputs are required.
- Time-series simulations, which are crucial for correct analysis of acoustics, are possible.
- The small scale and large scale are accurately simulated at the same time.

Extract from [Cheng et al.(1998)], see Section A.3.5, Ref.3:

A hybrid vortex method was developed to simulate the two-dimensional viscous incompressible flows over a bluff body numerically. It is based on a combination of the diffusion-vortex method and the vortex-in-cell method by dividing the flow field into two regions. In the region near the body surface the diffusion-vortex method is used to solve the Navier-Stokes equations, while the vortex-in-cell method is used in the exterior domain. Comparison with results obtained by the finite difference method, other vortex methods and experiments shows that the present method is well adapted to calculate two-dimensional external flows at high Reynolds number. It is capable of calculating not only the global characteristics of the separated flow but also the evolution of the fine structure of the flow field with time precisely. The influence of the grid system and region decomposition on the results will also be discussed.

A.4.10 Coupling conditions in FSI

Extract from [Matthies & Steindorf (2003)], see Section A.3.4, Ref.4:

Fluid–structure interaction problems often show strong interplay between the fluid and the structure [1], be it in the design of aircraft [2 and 3], helicopters [4 and 5], in the consideration of sloshing in tanks [6], or be it in biomechanical applications [7]. Some examples are shown

in [14]. The coupling conditions have been spelled out by a number of groups, e.g. [11, 13, 14 and 18], sometimes even including surface tension [17]—this effect will be neglected in what follows.
One possibility is to develop new software and solution methods for each of these coupled applications, as undoubtably will happen in some areas. This is referred to as a *monolithical* approach [8], or sometimes also as the *direct* method [15]. On the other hand, we shall assume here that the methods and software systems which have been developed for either fluid or structural applications will continue to be used. Therefore we consider *partitioned* methods [9, 10, 11, 13, 14, 18 and 19]—sometimes also called the *iterative* method [11 and 17], for fluid–structure interaction, i.e. separate solvers are used for the fluid and the structure [16 and 20]. For stability reasons, often a fully implicit formulation has to be used [6 and 15].
In this approach, we have to solve a large system of nonlinear equations with the use of the (iterative) solvers for the subsystems. Commonly this is performed with block-Jacobi, block-Gauss–Seidel or related relaxation methods [16, 17 and 21]. These simple methods do not always converge [22, 23, 24, 25, 26 and 27]. We will introduce here a superior approximative block-Newton method [24, 25, 26, 27 and 28].

A.5 Conclusions

General
As one can expect, the publications in a scientific journal are mostly theoretically orientated. However, it is remarkable that this short literature survey has demonstrated that numerical models of flow around structures are still largely in a fundamental stage of development. Numerical simulation of flow around square and circular cylinders has become a standard case for elaborating on numerical techniques rather than for improving our understanding of physics. It cannot be taken for granted that flow simulations which do include structural response provide a full feedback to the flow computation. Convincing numerical modeling of the interaction forces related to vibrating hydraulic gates have not been found in literature, for example. Development of flow models with the type of Fluid-Structure Interaction required for this seems at present to be in a quite mathematically technical stage that is of little use to the civil hydraulic engineer.

Model applicability
Validating new numerical models of flow around a circular cylinder using laboratory data (nowadays often detailed PIV data are used) are a good start to test these models as flow around a circular cylinder is a complex, multi-faceted flow case. These models are, however, far away from an applicable model that can be used in more practical situations that play a role during consultancy. Apparently, the transition to usable models that work well enough for engineering applications is not so much captured in scientific literature, but rather taking place in a more commercially protected context. As a result, it is unclear how good current numerical models (commercial or otherwise) are with respect to flow-induced gate vibrations.

Numerical versus experimental
Not many numerical studies on flow-induced vibrations were found. It can be concluded that two separated types of research coexist: the majority of applicable studies on flow-induced vibrations for design purposes remain experimental or analytical, while numerical studies of flow around structures are theoretical and quite diverse. There seems at present to be little convergence in the different directions that numerical modeling of flow around structures studies have taken: different types of models (e.g. LES, DNS, URANS, LBM) are developed with different goals; each of which has advantages and disadvantages in modeling of specific aspects of the physics. For the practical engineer, this is bad news: it makes the choice of model more difficult.

Conclusions of Schwanenberg [Schwanenberg (2006)]
Let us here revisit the conclusions from the numerical model survey by Schwanenberg [Schwanenberg (2006)]:

> (i). The simulation of 3D non-hydrostatic flow around hydraulic structures including fluid-solid interaction is a promising field of research and has the potential to complete or replace physical scale modeling in the mid-term future.
> (ii). It is not recommended to develop our own CFX-like software for general 3D non-hydrostatic applications. Research in this field will mainly rely on commercial 3D codes such as CFX or Flow3D and/or cooperation with universities and research institutes.
> (iii). Becoming a state-of-the-art key player in this field will require a significant start-up investment, mostly for building up a team and supplying budgets for continuous research over an initial period of several years.

ad (i).
This is still true, but it remains unlikely that practical FSI models suitable for hydraulic engineering applications will soon (in a few years) replace physical scale modeling.
ad (ii).
The latest CFX version (version 12) has a great number of modeling options including many turbulence models, LES, DES and FSI options. The development of non-hydrostatic modules in Delft3D is encouraged, but competing with CFX for near-field flow-structure applications would be a far-fetched task (and probably not achievable in the short run). It is recommended to keep using CFX and to invest time to make sure there is a small but steady team of users at Deltares that are capable of using CFX to its full potential. Furthermore, alternative CFD approaches such as the Lattice-Boltzmann Method, though interesting (and appealing especially from a fluid mechanics viewpoint), are at present not considered to be directly usable for engineering applications.
ad (iii).
It requires persistent devotion to pursue research in the field of flow around structures in a meaningful way. This is emphasized by recent modeling efforts with CFX by [Erdbrink en Jongeling (2008)] and [Erdbrink (2009)].