

Pilot efficiënte bepaling golven en stroming op rivieren

Denes Beyer (ON), Herman Peters (CIV), Gerrit Burger, Marcel Bottema en Arjan Sieben (WVL),
d.d.13-06-2017

- 1) Beheerdersvraag
- 2) Onderzoeksvraag
- 3) Aanpak pilot golven en stroming op rivieren
- 4) Uitgangspunten informatie behoefte
- 5) Uitgangspunten informatie monitoringstrategie
- 6) Enkele uitgangspunten locatie keuze
- 7) Bijlage Opties voor indirecte bepaling van stroomsnelheden uit het waterstandsoppervlak

1) Beheerdersvraag

Bij inventarisaties van kennishiaten (KPP rivierkunde) zijn door RWS-ON de volgende twee vragen aangedragen. Beiden hebben betrekking op het bepalen en handhaven van hoogwaterveiligheid in rivieren

- i) Hoe verhoudt de berekende doorstroming van uiterwaarden zich tot de werkelijkheid?
- ii) Hoe gedragen windgolven zich op rivieren?

Ad i) wat is de doorstroming van uiterwaarden bij hoogwater?

De doorstroming van uiterwaarden tijdens hoogwater draagt bij aan de afvoercapaciteit. Die capaciteit moet door RWS worden gehandhaafd (zie de programma's *Stroomlijn* en *Ruimte voor de Rivier*). Omdat stroombeelden bij extreme afvoer onbekend zijn steunt dit alles op een modelmatige inschatting van de doorstroming; hoe beter de inschatting, des te effectiever de handhaving van deze doorstroming. De kwaliteit van het rekenmodel is echter onbekend omdat weliswaar waterstanden en takafvoeren zijn gebruikt voor calibratie en verificatie, maar niet de doorstroming van uiterwaarden.

Waarnemingen van die stroming zijn nodig om de kwaliteit van berekende doorstroming vast te stellen en zo nodig te verbeteren. Daarmee verbetert de basis van het beheer van de afvoercapaciteit van uiterwaarden.

Monitoring van de doorstroming van uiterwaarden staat geprogrammeerd in het hoogwatermeetprogramma voor de Rijntakken. Het betreft meting van stroomsnelheden en specifieke afvoeren middels varende ADCP metingen op elke rivierkilometer van een 30 km lang traject in de Midden-Waal. Dit met als doel om rekenmodellen te verifiëren. De metingen zijn in 2011 voor het eerst uitgevoerd bij een hoogwater met piekafvoer bij Lobith 8000 m³/s. Omdat uiterwaarden toen niet doorstroomden moet het meetprogramma bij een hogere afvoer herhaald worden.

Ad ii) Wat zijn de windgolven op rivieren?

De hydraulische belasting op keringen wordt bepaald uit combinaties van rivierwaterstand en (wind) golven. Dit betreft vanwege de stabiliteit van (bekledingen op) taluds van keringen ook combinaties van minder extreme rivierafvoer en extremere wind (11-12 Bft). De bijdrage van golven aan de hydraulische belastingen wordt voorspeld met modellen die niet zijn ontwikkeld voor sterk niet-uniforme stromingen met obstakels en vegetatie in wind en water. Observaties tijdens het hoogwater van 1995 duiden er dan ook op dat golven mogelijk veel minder hoog zijn dan voorspeld met de beschikbare modellen (Seiffert, 1995). In dat geval worden ook hydraulische belastingen door golven overschat. Dat betekent dat

meer inzicht in de grootte van windgolven op rivieren kan leiden tot een verbeterde bepaling van hydraulische belastingniveaus, en daarmee tot een effectiever ontwerp en toetsing van keringen

De bepaling van golfparameters op rivieren betreft vooral kwalitatieve waarnemingen van allerlei achtergrond

- observaties (waterschappen) bij hoogwater (1995 of eerder) tijdens harde wind
 - visueel vanaf hoge locaties: de dijk (met duimstok of bij een peilschaal), bedieningsposten, bruggen, kades, verkeersposten), vanaf het water en uit de lucht
 - uit de lucht (drones, helikopter, vliegtuig:
- veekrandwaarnemingen of rapportages van schade door windgolven na hoogwater
- digitale waterstandsopnamen met laseraltimetrie (bv hoogwater 1998 en mogelijk recenter), radarbeelden (verkeersposten)
- interpretatie van golfpatronen op luchtfoto's tijdens recente hoogwaters (2011)
- analogieën met vergelijkbaar golf-stroom gedrag op ondiep water in bijvoorbeeld stroomgeulen in Waddenzee en ZW Delta voor rivieren

Alle beschikbare observaties voor rivieren zijn waardevol en de moeite van het inventariseren en ontsluiten waard. Vanwege het kwalitatieve karakter is het echter niet voldoende voor het ontwikkelen van kwantitatief inzicht. Dat impliceert dat een nieuwe dataset van golven en stroming tijdens hoogwater op rivieren nodig is.

2) Onderzoeksvraag

Het gedrag van golven op rivieren kan niet goed begrepen worden zonder kennis van (de invloed van) stroming. Omdat waarneming van beide aspecten wellicht efficiënt kan worden gecombineerd, worden beide vragen aan elkaar gekoppeld. Dat betekent dat voor zowel golven als stroming wordt gezocht naar

een aanpak om waarnemingen te doen in een rivierstuk met overstroomde uiterwaarden, zodanig dat een verificatie van stromings- en golfmodellen mogelijk is en zo nodig verbeterd kunnen worden.

Omdat dergelijke waarnemingen ontbreken kunnen de vragen alleen worden beantwoord met nieuwe, nog in te winnen kwantitatieve data van golven en stroming op rivieren. Het inwinnen van data van golven en stroming bij hoogwater op rivieren is gecompliceerd omdat perioden met goed doorstroomde uiterwaarden en stevige wind schaars en kort zijn, doorstroomde uiterwaarden slecht toegankelijk zijn voor varend materieel en een ruime verspreiding van waarnemingen nodig is om inzicht te bieden in het ruimtelijk karakter.

Met de inwinning daarvan bestaat eigenlijk nog geen ervaring, het ontwikkelen van een efficiënte inwinningsmethodiek is dan ook een noodzakelijk onderdeel bij het beantwoorden van bovenstaande vragen.

3) Aanpak pilot golven en stroming op rivieren

Beantwoording van de twee vragen van de beheerder vergt een onderscheid in data-inwinning en data-analyse.

waarneming

1. Wat is de stroming (diepte, snelheids grootte, snelheidsrichting) in doorstroomde begroeide uiterwaarden
2. Wat gebeurt er met de windgolfhoogte, -periode (en -lengte) en -richting in die uiterwaarden

simulatie en interpretatie

3. Hoe goed kunnen deze stroming en golven worden voorspeld
4. Wat betekent die kwaliteit voor het gebruik van voorspelde hoogwaterstanden en hydraulische belastingen?
5. Wat is nodig om de voorspelling van doorstroming, hoogwaterstanden en hydraulische belastingen met de inzichten uit 1-3 verder te verbeteren

Het voorgenomen onderzoek ter beantwoording van deze vragen kent de volgende fasen

Fase 1 definitie waarin wordt gespecificeerd

welke data moet worden ingewonnen (informatiebehoefte)
welk stuk van de rivier geschikt is voor het uitvoeren van een pilot (lokatiekeuze)
hoe de pilot moet worden uitgevoerd (inclusief kwaliteitsborging)
hoe methodieken voor data-inwinning en ingewonnen data moeten worden gerapporteerd
hoe methodieken voor data-inwinning en ingewonnen data zullen worden beoordeeld
welke partijen voor deelname aan de pilot kunnen worden benaderd

Fase 2 voorbereiding waarin

partijen worden uitgenodigd voor deelname aan de pilot
voorstellen worden beoordeeld en gehonoreerd

Fase 3 uitvoering waarin

verschillende methodieken in het veld worden toegepast om de gewenste data in te winnen

Fase 4 beoordelingsfase waarin

toegepaste methodieken en ingewonnen data worden vergeleken en beoordeeld
advies wordt uitgebracht over toekomstige monitoring van golven en stroming op rivieren

Fase 5 analyse fase waarin

ingewonnen data wordt vergeleken met simulaties van huidige voorspelmethode
advies wordt uitgebracht over opties voor verbetering van de huidige voorspelmethode

4) Uitgangspunten informatiebehoefte

Het doel van de in te winnen kwantitatieve data van golven en stroming is het verifiëren en zo nodig verbeteren van de voorspelinstrumenten (hydraulische modellen). De informatiebehoefte die aangeeft waar de nieuwe data (deel I) aan moet voldoen, kan dus worden afgeleid uit de beoogde toepassing (zie deel II van de vorige sectie).

Modellen voor simulatie van golven zijn ontwikkeld en geverifieerd voor grote open wateren. De condities op rivieren wijken daarvan af met een sterk niet-uniforme stroming en korte en gevarieerde strijklengten. Voor die condities is meer inzicht in het gedrag van golven nodig. Stroomsnelheden in uiterwaarden zullen variëren van 0 tot circa 1 m/s en waterdiepten van 0 tot circa 4 m (tot meer dan 10 m in plassen). Bij windkracht 7 (15 m/s)¹ blijven golfhoogten vermoedelijk beperkt tot circa 0.4 – 1.0 m met piekperioden van 2-4 s. Dat kan een factor 2-3 (golfhoogte) of 1.5-2 (piekperiode) kleiner zijn als strijklengten worden onderbroken door stroming en/of vegetatie.

- **Waar?**

Een rivierstuk is geschikt als pilot als waarnemingen daarin nuttig inzicht opleveren in het generieke gedrag van golven en stroming. Hogere golven zijn vooral te verwachten op locaties met een effectieve strijklengte van minstens 1 km. Een rivierstuk is daarom geschikt als pilot als daarin sprake is van een kering, hoofdgeul met uiterwaard met een maximale strijklengte van minstens 1 km in de dominante windrichting met bovendien een factor 2 variatie in strijklengte langs de kering en met zowel stroomvoerende als stroomluwe delen in de uiterwaard. Het interessegebied omvat de gehele strijklengte in de orde van 1 km en de lengte van de kering langs de betrokken uiterwaard. *Omdat een combinatie van harde wind en hoogwater laag frequent is, is een scenario van harde wind in een gebied met niet-uniforme stroming bij lagere afvoer ook relevant.*

- **Wanneer**

Voor een pilot op de sterk stromende lokaties; bij voldoende hoge rivierafvoer (voorspeld vanaf 8000 m³/s bij Lobith) en sterke wind (vanaf windsnelheden voor De Bilt van minimaal 10m/s in de weer/klimaatpluimvoorspelling klimaatpluimvoorspelling²).

- **Wat te bepalen?**

Uitgangspunt is dat geometrie (bodemhoogte) en vegetatie in het interessegebied reeds bekend (bepaald) zijn conform de schematisaties in de relevante stromingsmodellen. De monitoring richt zich dan op hydraulica. De parameters van golven en stroming moeten zodanig worden bepaald en gekwantificeerd dat een goede vergelijking met modelvariabelen tot aan de kering mogelijk is. Het betreft dan waarneming van

- amplitude, lengte, richting, periode/verplaatsingssnelheid van golven
- golfgemiddelde waterstand
- amplitude en richting van golfgemiddelde stroming (snelheden dieptegemiddeld, aan het oppervlak en specifieke afvoer)

Ingewonnen data dient voor wat betreft bijvoorbeeld resolutie (min 5 meetpunten per golflengte) toereikend te zijn om deze variabelen voldoende betrouwbaar te kunnen bepalen. Met golflengten van 3-15 m is de gewenste ruimtelijke resolutie 0.6 – 3 m. Met piekperioden van 2-4 s is een monitoring van circa een half uur tot een uur nodig voor een statistische bepaling van golfparameters.

- **Hoe ?**

Een belangrijk aspect is de ruimtelijke variatie. Om dat te kunnen beschouwen is monitoring in verschillende karakteristieke zones in de baan van de strijklengte door het interessegebied nodig (hoofdgeul, overgang naar de uiterwaard, stroomvoerende/luwe uiterwaarddelen en de zone langs de kering). Met onbekende afvoer en windveld zijn vooraf de gewenste positie van waarnemingen niet goed vast te stellen. Dat betekent dat een strategie van flexibele *remote sensing* technieken aangevuld met enkele *puntmetingen* (ground truth) in potentie efficiënt lijkt te zijn. Zeker als met

¹Bij windsnelheden van 10 m/s zij de golfcondities circa 30% kleiner (golfhoogten van 0.25-0.75 m, piekperioden van circa 1.5-3 seconden en golflengten tussen 3 en 15 m.

² <http://www.knmi.nl/nederland-nu/weer/waarschuwingen-en-verwachtingen/weer-en-klimaatpluim>

de opname van het waterstandsoppervlak een directe bepaling van golfparameters en middels theoretisch modellen een indirecte bepaling van stroming mogelijk is.

5) Uitgangspunten monitoringsstrategie

Doel van een pilot "monitoring golven en stroming op rivieren" is te bepalen hoe dit op rivieren zodanig gemeten kan worden dat verificatie van modellen voor hoogwaterstand en hydraulische golfbelasting mogelijk is.

Een belangrijk aspect daarbij is de sterke ruimtelijke variatie in stroming en in golven. Om die te kunnen beschouwen is monitoring van golven en stroming in verschillende karakteristieke zones van een locatie nodig. De twee uitersten hiervoor zijn

- i) een strategie van volledig directe monitoring middels voldoende puntmetingen in elke karakteristieke zone
- of
- ii) een strategie van overwegend indirecte monitoring van een met *remote sensing* bepaald waterstandsoppervlak dat modelmatig wordt geïnterpreteerd, met slechts enkele *puntmetingen* ter verificatie.

De eerste strategie kan leiden tot een omvangrijke campagne met een groot aantal puntmetingen per locatie. Bovendien ontstaan er risico's als alles enkele dagen voorafgaand aan een hoogwater/storm geplaatst moet worden. Dat maakt het verkennen van de tweede strategie relevant, zeker als met de opname van het waterstandsoppervlak een *directe* bepaling van golfparameters en (middels modelmatige interpretatie) een *indirecte* bepaling van stroming mogelijk is. Een overzicht van relevante inwinningstechnieken:

	A) ruimtelijk (momentopname)	B) puntmetingen
I) windgolven (hoogte, lengte, periode, oriëntatie)	bepaling instantaan waterstandsoppervlak met laseraltimetrie (lidar) radarbeelden stereofotografie video	tijdreeks waterstand (boeien, paalbaak diver op golf-frequenties) verticale adcp met acoustic surface tracking
II) stroming (grootte en richting van snelheid, diepte, waterstand en specifiek debiet)	<i>direct</i> met varende adcp-meting in raaien <i>indirect</i> door interpretatie van het waterstandsoppervlak (Bragg, Bernoulli)	vaste adcp divers voor inzinking (Bernoulli) & stuwdruk
III) wind (grootte en richting snelheid, gemiddeld en standaardafwijking)	Nvt	10 m hoogte
IV) basisinfo	bodemgeometrie uit laser altimetrie ruwheidsparameters uit vegetatie opnamen	-

Opties bepaling stroming en golfvelden.

Voor de strategie van bepaling van golfparameters en een *indirecte* bepaling van stroming op basis van een opname van het waterstandsoppervlak leiden de opties uit de tabel bij wijze van voorbeeld tot twee varianten

- I) directe bepaling van golfparameters en waterstand middels een (mobiele) **UHF-radar** op verschillende posities vanaf de dijk, een indirecte bepaling van stroming middels interpretatie van *Braggs*-golven
- II) directe bepaling van het waterstandsoppervlak en golfparameters middels gevlogen **laseraltimetrie, ultrasound of stereofotografie** gecombineerd met een indirecte bepaling van stroming middels *Bernoulli-principe* toegepast op golfgemiddelde waterstandspatronen

De UHF-radar & Bragg methode is vooral geschikt voor de uniforme delen in het stromings- en windveld, de Bernoulli methode juist voor niet-uniforme delen in het stromingsveld (zie de bijlage). Beiden strategieën dienen ter verificatie te worden aangevuld met op enkele posities een meting van golfhoogte en periode middels boeien en op enkele geschikte raaien varende stroomsnelheidsmetingen

De gewenste ruimtelijke resolutie (zie informatiebehoefte) van de opname van het waterstandsoppervlak bepaalt de afstand van sensor tot wateroppervlak. Voor een voldoende betrouwbare interpretatie kan het bovendien nodig zijn om meerdere opnamen van het

waterstandsoppervlak te maken en gebruiken. Bij instrumenten in het water is bovendien de invloed van stroming rondom het instrument van belang.

6) Enkele uitgangspunten locatie keuze

Zoals eerder beschreven is een rivierstuk geschikt als pilot als waarnemingen daarin nuttig inzicht opleveren in het generieke gedrag van golven en stroming. Een rivierstuk is vanuit dat oogpunt geschikt als pilot als daarin sprake is van

- met een maximale strijklengte van minstens 1 km in de dominante windrichting
- voldoende variërende diepte en stroomsnelheid in de baan van de strijklengte
- met voldoende variatie in strijklengte
- met voldoende variatie in afwijking tussen windrichting en stroomrichting

en met betrekking tot de uiterwaard windopwaarts van de kering

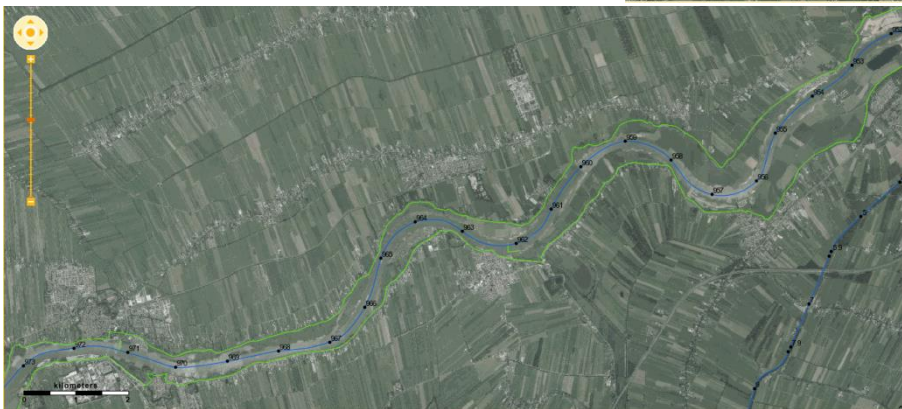
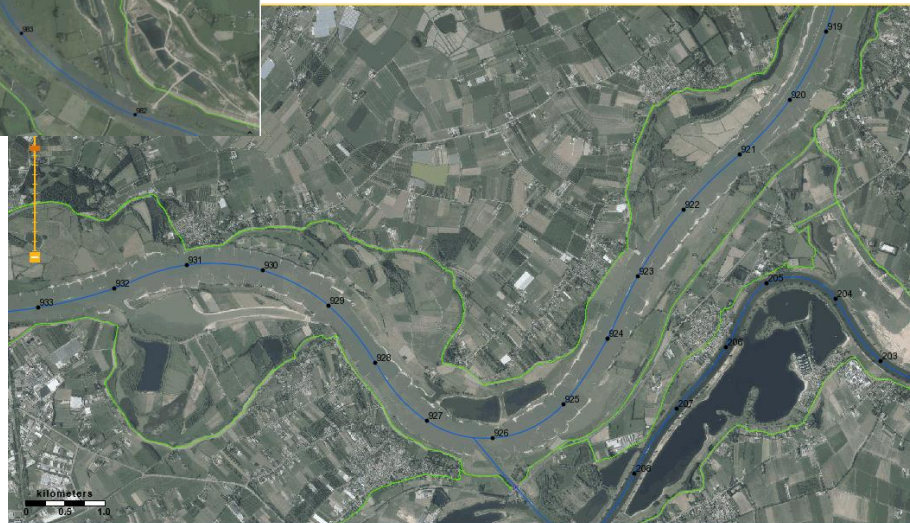
- aanwezigheid van stroomvoerende en stroomluwe delen in de baan van de strijklengte

Met het eerste criterium worden lokaties met potentieel hogere golven geselecteerd. Met de eerste vier criteria is het mogelijk om uitblijven van een hoogwater, bij sterke wind toch een zinnige pilot te kunnen doen. Nb, deze criteria zijn gericht op aanwezigheid van de relevante fysische processen, er zijn meer aspecten voor de locatie keuze (bv eisen vanuit de uitvoering van de monitoring). Een paar opties voor lokaties zijn:

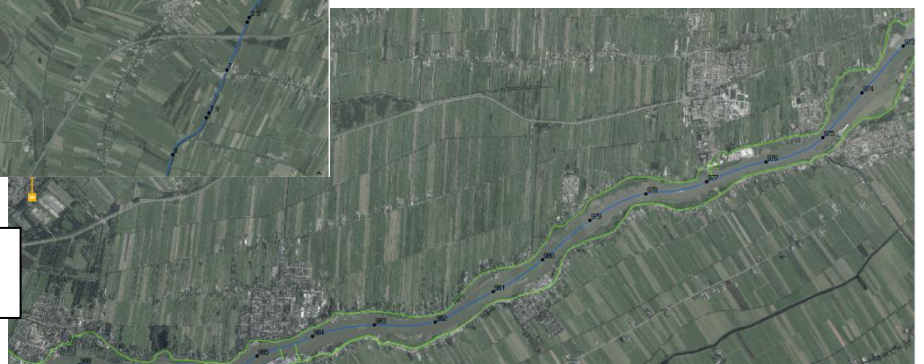


I IJsselbocht bij Zalk en De Zande
km 984-991, beide oevers
ook geschikt bij lage afvoer

II Waalbocht bij St.Andries
mn rechtoever km 920-929
ook geschikt bij lage afvoer



III Lek (Vianen-Lekkerkerk) km 952- km 987
Niet geschikt bij lage rivierafvoer



Bijlage Opties voor indirecte bepaling van stroomsnelheden uit het waterstandsoppervlak

UHF-radar & Bragg methode

De UHF (ultra-high frequency) radar & Bragg methode bestaat uit de volgende stappen, per locatie binnen het bereik van de radarmast.

- A) Bepaling stroomcomponent in de richting van de ontvangende radarmast door
- bepaling van het dopplerspectrum van het ontvangen radarsignaal (met golflengte λ)
 - onderscheid in dit spectrum van twee separate interferentie-pieken (Bragg-golven)
 - interpretatie van deze twee pieken in het spectrum als zijnde veroorzaakt door de Dopplerverschuiving t.g.v. de fasesnelheid van twee vrije watergolven die lopen in de radarkijkrichting met een golflengte ter grootte van $\lambda/2$
 - bepaling in het spectrum van het middelpunt tussen beide pieken
 - interpretatie van dit middelpunt als zijnde veroorzaakt door de Dopplerverschuiving t.g.v. de stroming in de radarkijkrichting die beide Bragg-golven met zich meevoert.
 - berekening van de oppervlaktestroomsnelheid van het water op basis van de gemeten Dopplerverschuiving van het middelpunt tussen beide pieken.
 - bepaling van de lokale waterdiepte met behulp van een actuele waterstand en bodemligging
 - schatting van de lokale hydraulische ruwheid en daarmee de vorm van de lokale snelheidsverticaal
 - bepaling van de dieptegemiddelde snelheid (en/of het specifiek debiet) en de daarbij behorende stromingscomponent in de richting van de ontvangende mast.

Door dit te herhalen met de mast op een andere positie kan voor dezelfde locatie in het meetgebied een tweede stromingscomponent worden bepaald. Met de twee verkregen stromingscomponent kan tenslotte de uiteindelijke grootte en richting van de stroming worden bepaald.

Door de meting vanaf meerdere posities (bv rijdend over de dijk) te doen is het mogelijk om voor elk punt binnen bereik van de radar de grootte en richting van stroming te bepalen.

Bernoulli methode

Overal waar stroming van diepte of ruwheid verandert (zomerkade, drempels, kribben) is er een lokale reactie van het vrije oppervlak. De maat daarvan is een indicatie voor de snelheid en daarmee lokale afvoer (wet van Bernoulli). Als de vervorming van het waterstandsoppervlak voldoende groot is, kan deze met remote sensing technieken worden opgemerkt. Om die vervorming te kunnen onderscheiden van instantane waterstandsgolfjes zijn meerdere waterstandsopnamen nodig zodat een tijdsgemiddeld stationair waterstandsoppervlak kan worden geconstrueerd (*deze instantane waterstandsafwijkingen van het tijdsgemiddeld stationaire oppervlak kunnen worden gedefinieerd als golfparameters.*) Met de grootte van de vervorming en de lokale waterdiepte kan vervolgens met de wet van Bernoulli het specifiek debiet ter plaatse van de vervorming worden bepaald.