

Afvoerrelatie Stuw Amerongen



Afvoerrelatie Stuw Amerongen

Auteur(s)

Sam Majvis

Tom O'Mahoney

Afvoerrelatie Stuw Amerongen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening
Contactpersoon	de heer R. Mansour
Referenties	11205232-005-ZKS-0002 Informatiestrategie Midden-Rivierengebied
Trefwoorden	afvoerrelatie, debietrelatie, stuw, Amerongen, cilinderschuif, vistrap, nivelleerdebiet, waterverplaatsing

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	01-05-2024
Projectnummer	11209225-005
Document ID	11209225-005-ZKS-0004
Pagina's	35
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Sam Majvis	Tom O'Mahoney

Samenvatting

Rijkswaterstaat CIV heeft vurende debietmetingen uitgevoerd bij stuwcomplex Amerongen met het doel om een afvoerrelatie te formuleren en deze relatie op te nemen in het Instrument voor het WaterPeilbeheer (IWP). In dit rapport worden de veldmetingen uitgewerkt tot afvoerrelaties. De aanleiding voor het achterhalen van de afvoerrelaties is om tijdens periodes met lage afvoeren (tot ongeveer 90 m³/s) een beter inzicht te krijgen in de afvoerverdeling door het stuw- en sluiscomplex, zodat daar rekening mee kan worden gehouden wanneer de Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW) actief is. Deze analyse heeft daarom betrekking op objecten die actief zijn bij lage afvoeren, dat wil zeggen de cilinderschuif, vistrap, schutsluis, waterkrachtcentrale, glasaalgoten en lekkage door deze objecten. Voor de objecten die bij hoge afvoeren ingezet worden (vizerstuwen en achtereenvolgens spoelriolen) zijn geen metingen uitgevoerd of relaties afgeleid. Voor elk actief object is een afvoerrelatie afgeleid die uitgebreid in dit rapport wordt besproken. In deze samenvatting worden de afgeleide afvoerrelaties gepresenteerd en worden alleen de belangrijkste kenmerken van de afleiding beschreven. Indien een (gedeelte van de) afvoerrelatie niet goed afgeleid kon worden met de huidige beschikbare informatie, dan is dit expliciet aangegeven.

Cilinderschuif

$$Q_{\text{cilinderschuif}} = \begin{cases} 0 & d_s < 0.008 \\ (1.21d_s^3 - 7.22d_s^2 + 13.83d_s - 0.11)\sqrt{2g\Delta h} & 0.008 < d_s \leq 1.60 \text{ m} \end{cases}$$

De afvoerrelatie voor de cilinderschuif is bepaald met behulp van de kleinste kwadratenmethode met een derdegraads polynoom. Omdat de theoretische relatie tussen afvoercoëfficiënt en doorstroomoppervlak onbekend is voor de cilinderschuif, hebben de fitparameters die volgen uit een dergelijke polynoomfit geen fysische betekenis en is de afgeleide relatie alleen geldig in het gemeten bereik aan cilinderschuifstanden ($0 < d_s \leq 1.60$ m). De resulterende relatie heeft bij een voor stuw Amerongen typisch verval van 3 m en maximale schuifopening 1.6 m een onzekerheid van $2\sigma = \pm 6.71$ m³/s (95% betrouwbaarheidsinterval). Deze onzekerheid geeft enkel aan hoe de afvoerrelatie de gemeten debieten vertegenwoordigd, niet hoe de gemeten debieten de werkelijke debieten in de praktijk representeren. Systematische meetfouten kunnen niet geïsoleerd worden met de huidige beschikbare informatie, waardoor een onder- of overschatting van de werkelijke debieten niet volledig uit te sluiten is.

Vistrap

$$Q_{\text{vistrap}} = 1.075 \cdot \left(C_{sI} C_{D1} \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{5}{2}} \sqrt{\frac{g}{2}} n_I (h_1 - H_b)^{2.5} + C_{sII} C_{DII} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} g 2H_b n_{II} \left(h_1 - \frac{1}{2}H_b\right)^{\frac{3}{2}} + 0.8b_{vs} P \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \right)$$

De afvoerrelatie van de vistrap is bepaald met behulp van de kleinste kwadratenmethode gebaseerd op de theoretische afvoer karakteristiek van het hydraulisch ontwerp en de gemeten debieten. De resulterende relatie heeft bij een voor stuw Amerongen typische bovenwaterstand van +6.1 m NAP een onzekerheid van $2\sigma = \pm 0.52$ m³/s (95% betrouwbaarheidsinterval). Ook hier geldt dat deze onzekerheid niet weergeeft hoe goed de gemeten debieten de werkelijke debieten in de praktijk representeren.

Schutsluis - Nivelleerdebiet

$$Q_{\text{schutsluis}} = \frac{V_{\text{schuttschijf}}}{\Delta t_{\text{nivelleren}}}$$

Voor het nivelleerdebiet zijn geen debietmetingen uitgevoerd omdat het schutverlies direct berekend kan worden op basis van het verval over de sluis en de afmetingen van de (deel)kolk. Op basis van de sluisdeur- en nivelleerschuiwbewegingen kan worden afgeleid welke (deel)kolk is ingezet en kan ook de nivelleertijd bepaald worden om het schutvolume om te rekenen naar een gemiddeld debiet gedurende het nivelleerproces. Voor een voor binnenvaartsluizen typische nivelleertijd van 600 s is de onzekerheid voor de volledige kolk, bovenkolk en benedenkolk respectievelijk gelijk aan $2\sigma = \pm 0.56$, 0.32 en 0.20 m³/s (95% betrouwbaarheidsinterval).

Schutsluis – Waterverplaatsing

$$Q_{\text{waterverplaatsing}} = \frac{W_O}{\Delta t_{\text{invaren}}} - \frac{W_A}{\Delta t_{\text{uitvaren}}}$$

Naast het nivelleerdebiet is er als gevolg van de asymmetrische verhouding tussen op- en afvarende schepen bij sluis Amerongen ook sprake van een netto debiet als gevolg van waterverplaatsing door passerende schepen. Het verplaatste volume hangt af van de eigenschappen van het passerende schip, maar deze eigenschappen zijn niet real-time beschikbaar bij sluis Amerongen. Om toch rekening te houden met het waterverplaatsingsdebiet moet er voor de implementatie in IWP een maatgevend schip, maatgevende verhouding tussen op- en afvarende schepen en een maatgevende in- en uitvaartijd worden gedefinieerd. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van historische IVS data. Wanneer de maatgevende parameters bepaald zijn, kan de afgeleide afvoerrelatie worden toegepast.

Waterkrachtcentrale

$$Q_{\text{WKC}} = Q_{\text{WKC},T_1} + Q_{\text{WKC},T_2} + Q_{\text{WKC},T_3} + Q_{\text{WKC},T_4}$$

Voor de afvoer door de waterkrachtcentrale zijn geen debietmetingen uitgevoerd. In plaats daarvan wordt de afvoer door de vier turbines rechtstreeks berekend door de software van de waterkrachtcentrale. De berekende afvoeren kunnen direct geïmplementeerd worden in het IWP.

Lek- en lokstroomdebiet

$$Q_{\text{glasaalgoten}} + Q_{\text{lek}} = 0$$

Er zijn tijdens de meetcampagne metingen uitgevoerd met een gesloten cilinderschuif om ook een schatting te kunnen maken van het lek- en lokstroomdebiet. Varende akoestische Dopplermeeinstrumenten zijn bij lage stroomsnelheden echter onnauwkeurig en de veldmetingen zijn daardoor niet geschikt gebleken om een betrouwbare schatting te kunnen maken van het lekdebiet en de lokstroom door de glasaalgoten. Het advies is om het lek- en lokstroomdebiet bij implementatie in het IWP gelijk te stellen aan 0 m³/s.

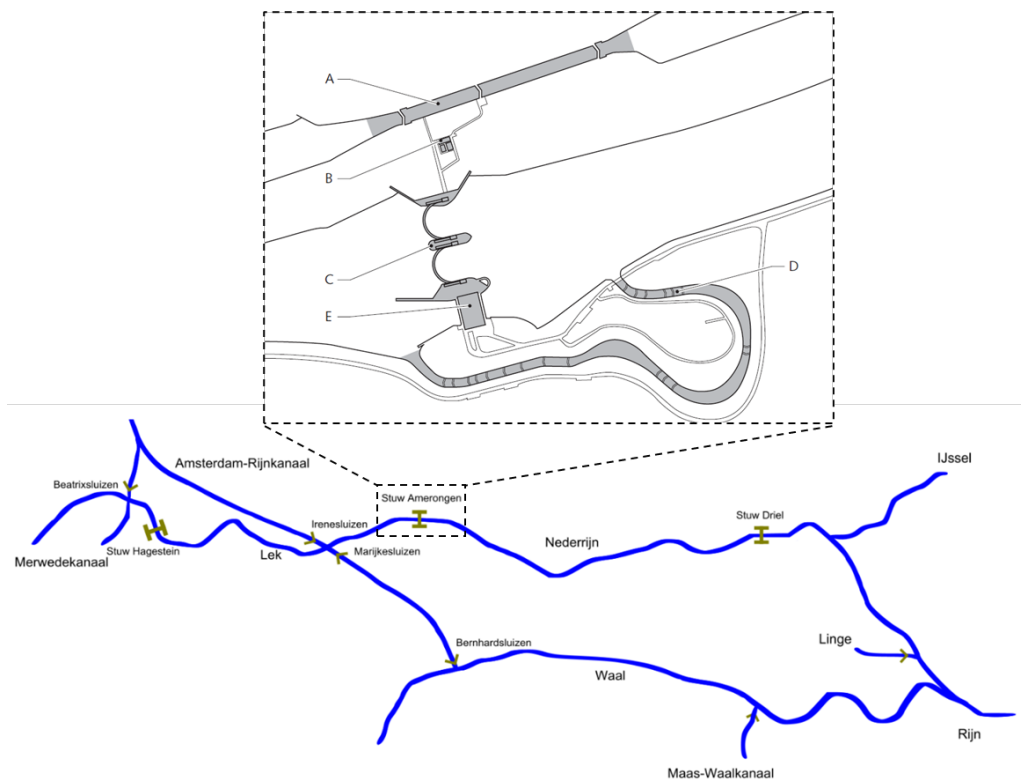
Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Leeswijzer	8
2	Beschikbare data	9
2.1	Debiet	9
2.2	Waterstanden	10
3	Afvoerrelatie	12
3.1	Cilinderschuif	12
3.2	Vistrap	15
3.3	Schutsluis	18
3.3.1	Nivelleerdebiet	18
3.3.2	Waterverplaatsing	20
3.4	Waterkrachtcentrale	22
3.5	Lek- en lokdebiet	22
4	Discussie	24
4.1	Robuustheid	24
4.1.1	Metingen	24
4.1.2	Afvoerrelatie	24
4.2	Aanbevelingen	26
4.2.1	Systematische meetfout bepalen	26
4.2.2	Uitbreiding naar debieten vizierstuwen en spoelriolen	26
4.2.3	Standaardberekening sluisdebieten	26
5	Literatuur	28
A	Onzekerheidsanalyse	29
A.1	Standaarddeviatie van de gemeten debieten	29
A.2	Voortplanting van de onzekerheden	30
A.2.1	Cilinderschuifdebiet	30
A.2.2	Vistrapdebiet	31
A.2.3	Schutdebiet	32
A.2.4	Totaaldebiet	32
B	Beschikbare variabelen in het IWP	33
C	Meetdata van de veldcampagne	34

1 Introductie

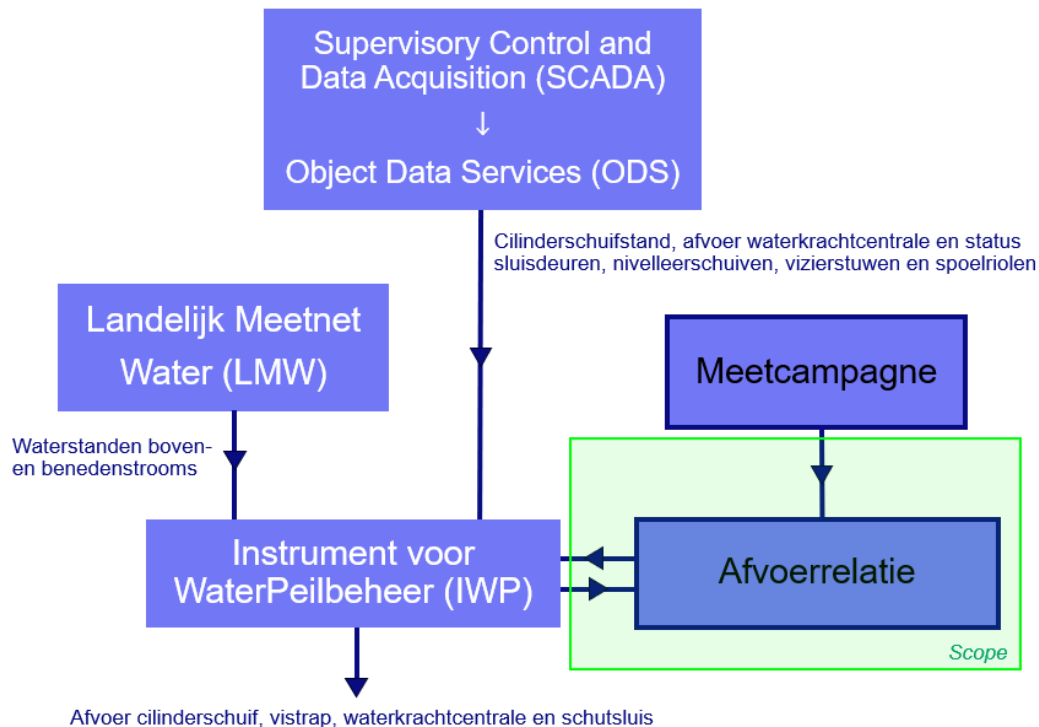
1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat CIV heeft in september 2023 vurende debietmetingen uitgevoerd bij stuwcomplex Amerongen (zie Figuur 1.1) om uiteindelijk een afvoerrelatie te kunnen formuleren en deze op te nemen in het Instrument voor het WaterPeilbeheer (IWP). De aanleiding hiervoor is om tijdens periodes met lage afvoer (tot ongeveer 90 m³/s) een beter inzicht te hebben in de afvoerdeling door het complex en om op basis daarvan beslissingen te kunnen nemen over de waterverdeling. Deltares heeft eerder een meetplan opgesteld ten behoeve van de debietmetingen (Deltares, 2023) en is ook gevraagd de afvoerrelatie af te leiden. In dit rapport wordt de door Rijkswaterstaat CIV verwerkte meetdata uitgewerkt tot een afvoerrelatie.



Figuur 1.1: Overzicht watersysteem Nederrijn-Lek en schematisch bovenaanzicht van stuwcomplex Amerongen met schutsluis (A), bedieningsgebouw (B), stuw (vizierstuwen, cilinderschuif in de middenpijler) (C), vistrap (D) en waterkrachtcentrale (E) (Rijkswaterstaat, 2013).

De scope van het voorliggende rapport is het afleiden van afvoerrelaties voor de objecten die in gebruik kunnen zijn bij lage afvoeren, dat wil zeggen de cilinderschuif, vistrap, schutsluis, waterkrachtcentrale, de glasaalgoten en mogelijke lekkage door deze objecten. De benodigde invoerparameters van deze afvoerrelatie zijn afkomstig uit het Landelijk Meetnet Water (LMW) en, via Object Data Services (ODS), uit Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). Figuur 1.2 geeft de benodigde informatie uit de verschillende bronnen en de scope van het voorliggende rapport schematisch weer.



Figuur 1.2: Schematische weergave van de informatiestroom en de afbakening van de scope van het voorliggende rapport (groen).

1.2 Leeswijzer

In dit rapport wordt in Hoofdstuk 2 eerst een beschrijving gegeven van de gebruikte meetdata en de meetomstandigheden. Vervolgens wordt in Hoofdstuk 3 per object een afvoerrelatie uitgewerkt. Hoofdstuk 4 bevat een discussie over de nauwkeurigheid van de veldmetingen en de uitgewerkte afvoerrelatie(s) en worden enkele suggesties voor vervolgstappen gegeven. De appendices bevatten een uitgebreide onzekerheidsanalyse, de lijst met alle relevante ODS parameters en de resultaten van de uitgevoerde veldmetingen.

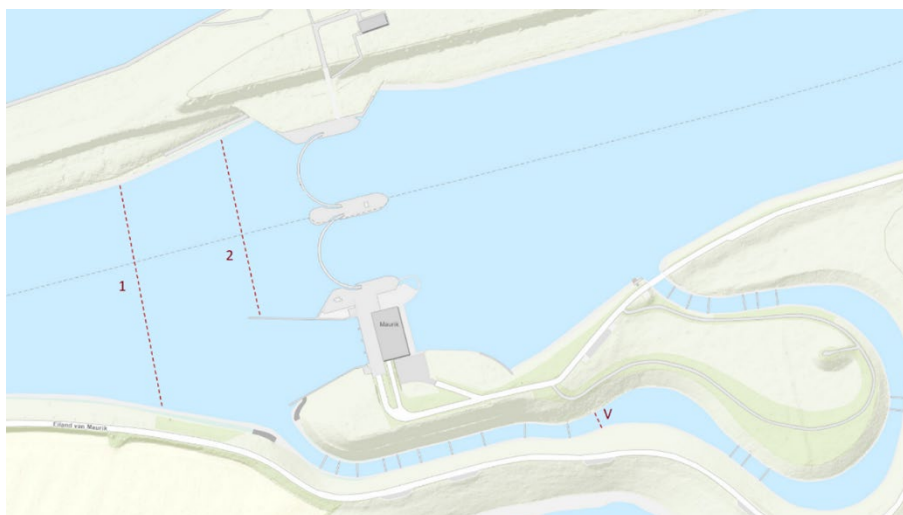
2 Beschikbare data

Bij het bepalen van de afvoerrelaties is gebruikt gemaakt van twee typen metingen: de debietmetingen uitgevoerd door Rijkswaterstaat CIV (afdeling Mobiel Meten) in de periode 11 tot en met 15 september 2023 (Paragraaf 2.1) en de waterstandsmetingen uit het LMW (Paragraaf 2.2). Naast deze meetdata is ook gebruik gemaakt van de theoretische afvoercharacteristiek van de vistrap (WL | Delft Hydraulics, 1998) en scheepvaartregistraties van sluis Amerongen in de periode 11 tot en met 17 september 2023, en zijn de schaalmodelproeven van de middenpijler van stuw Amerongen geraadpleegd (WL | Delft Hydraulics, 1961).

2.1 Debiet

Tijdens de meetcampagne in september 2023 heeft Rijkswaterstaat CIV (afdeling Mobiel Meten) drie meetraaien bij stuw Amerongen meermaals gemeten met een varende ADCP. De door Rijkswaterstaat aangeleverde onnauwkeurigheid in de gemeten debieten bedraagt $\pm 5\%$.¹ De waterkrachtcentrale (WKC) was tijdens de volledige meetcampagne buiten bedrijf. De locatie van meetraaien 1, 2 en V zijn weergegeven in Figuur 2.1:

- Meetraai 1: het totale debiet door het stuwcomplex;
- Meetraai 2: het debiet door de cilinderschuif, de glasaalgoten en het lekdebiet;
- Meetraai V: het debiet door de vistrap.



Figuur 2.1: Meetraaien van de meetcampagne in september 2023.

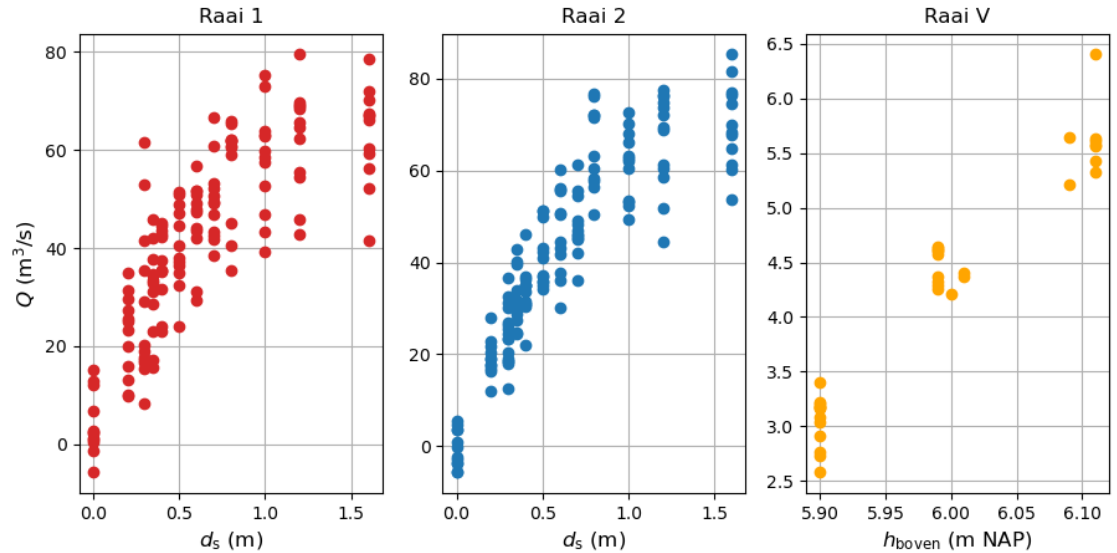
De metingen zijn, afhankelijk van de meetraai, uitgevoerd bij meerdere cilinderschuifstanden of bovenwaterstanden (zie Tabel 2.1). De gemeten debieten zijn gebruikt om de afvoerrelaties van de cilinderschuif en de vistrap te bepalen. De debieten die tijdens individuele overtochten zijn gemeten zijn voor elk van de drie meetraaien weergegeven in Figuur 2.2. De berekende gemiddelden van alle overtochten zijn weergegeven in Tabel C.1. De spreiding in de individuele debietmetingen in Figuur 2.2 is erg groot, in sommige gevallen is het verschil tussen het laagste en hoogste gemeten debiet groter dan $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze spreiding kan zijn veroorzaakt door allerlei omgevingsfactoren, zoals wind en turbulentie. Vanwege de lage afvoeren waarbij gemeten moest worden kan ook de toegepaste meetmethode hier aan deze spreiding

¹ Persoonlijke communicatie Rijkswaterstaat CIV

bijgedragen hebben: voor stroomsnelheden lager dan 0.5 m/s zijn varende ADCP metingen namelijk minder nauwkeurig (STOWA, 2009).

Tabel 2.1: Omstandigheden waaronder de verschillende raaien bemeten zijn.

Raai	Cilinderschuifstanden	Bovenwaterstanden
Raai 1, 2	0 m, 0.20 m, 0.30 m, 0.35 m, 0.40 m, 0.50 m, 0.60 m, 0.70 m, 0.80 m, 1.00 m, 1.20 m, 1.60 m	<i>Afhankelijk van de cilinderschuifstand</i>
Raai V	<i>Afhankelijk van de te bereiken bovenwaterstand</i>	+5.9 m NAP, +6.0 m NAP, +6.1 m NAP

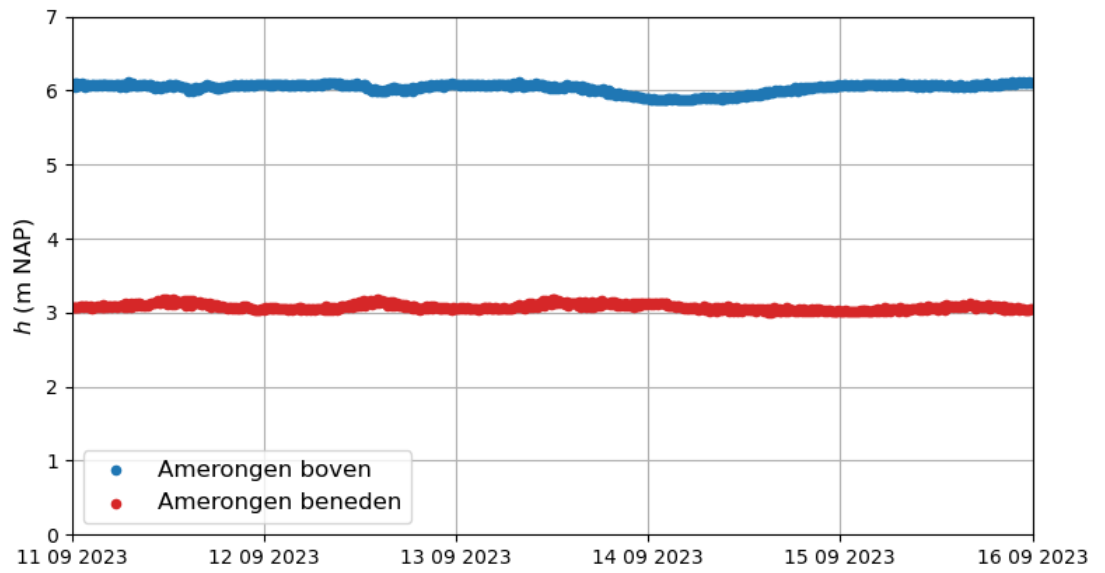


Figuur 2.2: Debieten gemeten tijdens de individuele overtochten van elk van de drie raaien in Figuur 2.1.

2.2 Waterstanden

De waterstanden boven- en benedenstrooms van stuw Amerongen tijdens de meetcampagne zijn verkregen uit het LMW via Rijkswaterstaat Waterinfo² op locaties 'Amerongen boven' (51°58'34.1"N 5°24'43.0"E) en 'Amerongen beneden' (51°58'29.5"N 5°24'16.3"E) (zie Figuur 2.3). De gemeten debieten zijn gekoppeld aan de dichtstbijzijnde 10-minutenwaarde uit de LMW dataset. Het LMW zal ook de uiteindelijke afvoerrelatie voorzien van de benodigde waterstanden (zie Figuur 1.2). De onzekerheid in de gemeten waterstanden bedraagt ± 2.5 cm (Rijkswaterstaat, 2023).

² [Waterhoogte - Rijkswaterstaat Waterinfo \(rws.nl\)](https://www.rws.nl/waterinfo)



Figuur 2.3: Waterstanden boven- en benedenstrooms van stuw Amerongen tijdens de meetcampagne.

3 Afvoerrelatie

De totale afvoer door stuw- en sluiscomplex Amerongen bestaat uit de volgende componenten:

$$Q_{\text{Amerongen}} = Q_{\text{vizierstuwen}} + Q_{\text{spoelriolen}} + Q_{\text{cilinderschuif}} + Q_{\text{vistrap}} + Q_{\text{schutsluis}} + Q_{\text{WKC}} + Q_{\text{glasaalgoten}} + Q_{\text{lek}} \quad (3.1)$$

De scope van het voorliggende rapport is de afvoer door de objecten die in een periode met lage afvoeren mogelijk in gebruik zijn, namelijk de cilinderschuif, vistrap, schutsluis, waterkrachtcentrale, glasaalgoten en eventueel lekdebiet door de stuw. Dit reduceert vergelijking 2.1 tot:

$$Q_{\text{Amerongen}} = Q_{\text{cilinderschuif}} + Q_{\text{vistrap}} + Q_{\text{schutsluis}} + Q_{\text{WKC}} + Q_{\text{glasaalgoten}} + Q_{\text{lek}} \quad (3.2)$$

De totale afvoer $Q_{\text{Amerongen}}$ is afhankelijk van de status van de verschillende objecten en objectonderdelen. De randvoorwaarden waaronder deze afvoerrelatie (vergelijking 3.2) de afvoer door het volledige stuw- en sluiscomplex beschrijft, zijn:

- Beide vizierstuwen zijn gesloten: $Q_{\text{vizierstuwen}} = 0$;
- Alle spoelriolen zijn gesloten: $Q_{\text{spoelriolen}} = 0$;
- De visluiskanalen zijn gesloten;
 - Voor de visluiskanalen geldt dat deze niet meer gebruikt worden en zou in principe altijd aan deze voorwaarde voldaan moeten worden.
- De glasaalgoten zijn geopend.
 - Ondanks dat het lokdebiet $Q_{\text{glasaalgoten}}$ en lekdebiet Q_{lek} niet expliciet gemeten zijn (zie Paragraaf 3.5), zijn deze wel onderdeel van de gemeten cilinderschuifdebieten. Het lekdebiet is hierbij niet exclusief voor de cilinderschuif, maar de volledige stuw.

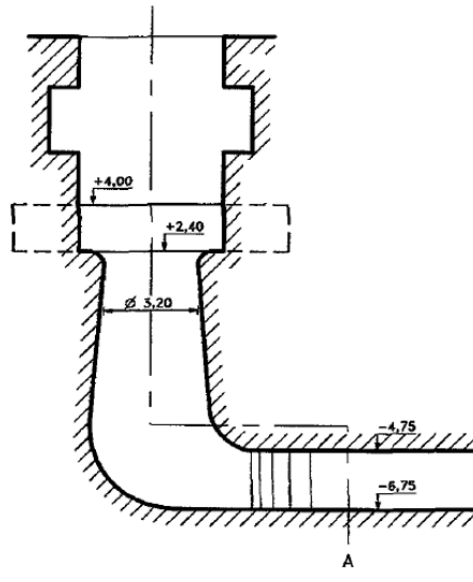
Wanneer niet aan deze randvoorwaarden voldaan wordt, dat wil zeggen de vizierstuwen en/of spoelriolen zijn open, kunnen de afvoerrelaties van de individuele objecten nog wel ingezet worden om informatie te verkrijgen over de afvoer door een specifiek object.

In Paragrafen 3.1 tot en met 3.5 wordt de afvoerrelatie voor elk van de objecten in vergelijking 3.2 afgeleid op basis van de parameters weergegeven in Figuur 1.2. De onzekerheidsanalyse van de uiteindelijke afvoerrelaties wordt in detail beschreven in Appendix A.

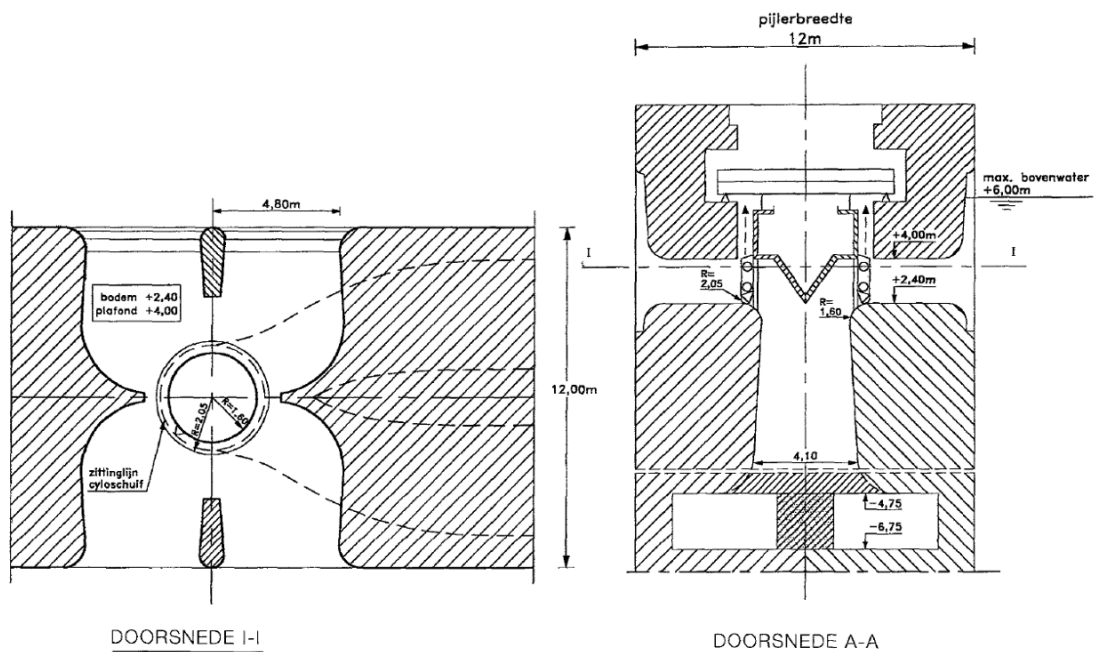
3.1 Cilinderschuif

De cilinderschuif in de middenpijler wordt gebruikt voor de fijnregeling van het debiet door stuwcomplex Amerongen. Water stroomt via beide zijkanten van de middenpijler door de cilinderschuif het fijnregelingsriool in. De cilinderschuifconstructie bestaat uit een holle kern met aan de onderzijde een kegel die de stroomt geleidt, met daaromheen een cilindervormige mantel die op en neer kan bewegen (Kolkman & Jongeling, 1996). De boven- en onderrand van de inlaatopeningen liggen respectievelijk op +4.0 m NAP en +2.4 m NAP (zie Figuur 3.1), terwijl het formele bovenstroomse streefpeil (stuwwand Driel-Amerongen) op +6.0 m NAP ligt.³ De cilinderschuif wordt om die reden als een volledig onderdompelde inlaat beschouwd. De uitstroom aan de benedenstroomse zijde bestaat uit twee kanalen (zie Figuur 3.2).

³ In de praktijk wordt een streefpeil van +6.1 m NAP gehanteerd.



Figuur 3.1: Langsdoorsnede van de middenpijler ter plaatse van de cilinderschuif en het fijnregelingsriool van stuw Amerongen (Kolkman & Jongeling, 1996).



Figuur 3.2: Horizontale- en dwarsdoorsnede van de cilinderschuif in de middenpijler van stuw Amerongen (Kolkman & Jongeling, 1996).

Omdat de cilinderschuif als volledig onderdompelde inlaat kan worden beschouwd is de afvoerrelatie, zoals ook destijds bij de schaalmodelproeven (WL | Delft Hydraulics, 1961), gebaseerd op de volgende relatie tussen debiet Q en verval Δh (Nortier & De Koning, 1996):

$$Q = \mu A \sqrt{2g\Delta h}, \quad (3.1.1)$$

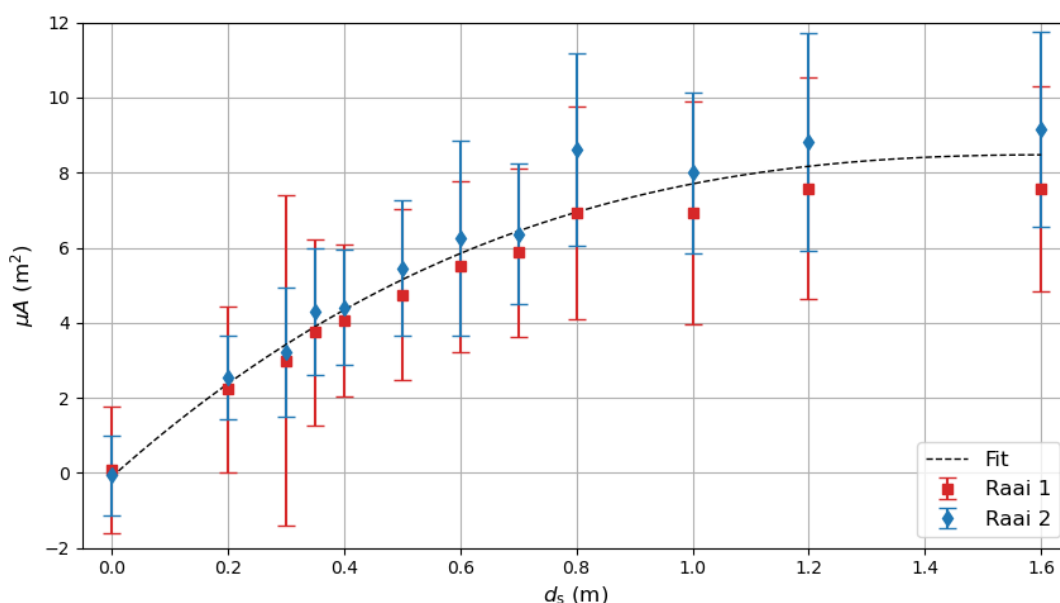
met afvoercoëfficiënt μ , doorstroomoppervlak A en zwaartekrachtversnelling g . Het verval is gedefinieerd als

$$\Delta h = h_{\text{boven}} - h_{\text{beneden}}, \quad (3.1.2)$$

met h_{boven} en h_{beneden} respectievelijk de boven- en benedenstroomse waterstand ten opzichte van stuw Amerongen. Voor elke cilinderschuifopening is de afvoercoëfficiënt constant. Met behulp van de uitgevoerde debietmetingen en de waterstanden kan het voor contractie gecorrigeerde doorstroomoppervlak μA bepaald worden,

$$(\mu A)_{\text{cilinderschuif}} = \frac{Q_{\text{cilinderschuif}}}{\sqrt{2g\Delta h}}, \quad (3.1.3)$$

waarmee vervolgens met behulp van vergelijking 3.1.1 de afhankelijkheid tussen debiet en verval kan worden bepaald voor een bereik aan debieten en vervallen. De waarden van μA zijn voor elke cilinderschuifstand d_s weergegeven in Figuur 3.3 inclusief de onzekerheid $\pm 2\sigma$ (95% betrouwbaarheidsinterval, zie Appendix A). Deze waarden zijn bepaald op basis van de gemeten debieten $Q_{\text{cilinderschuif}}$ zoals beschreven in Paragraaf 2.1. De debietmetingen van raai 1 bevatten vanwege de locatie van deze raai (zie Figuur 2.1 en Figuur C.1) zowel de afvoer door de cilinderschuif als door de vistrap en zijn daarom gecorrigeerd met behulp van de debietrelatie van de vistrap (zie Paragraaf 3.2 en vergelijking 3.2.2).



Figuur 3.3: De relatie tussen de cilinderschuifstand d_s en het product van de afvoercoëfficiënt en het doorstroomoppervlak μA voor raai 1 (rood) en raai 2 (blauw) van de meetcampagne bij stuw Amerongen van september 2023. De foutbalken geven de onzekerheid ($\pm 2\sigma$, 95% betrouwbaarheidsinterval) weer.

De theoretische relatie tussen afvoercoëfficiënt en doorstroomoppervlak is onbekend voor de cilinderschuif. Om die reden is de relatie bepaald met de kleinste kwadratenmethode van een monotoon stijgend derdegraads polynoom.⁴ De fitparameters die volgen uit een dergelijke polynoomfit hebben geen fysische betekenis, waardoor de geldigheid buiten het bereik aan

⁴ Het toepassen van de (onbegrensde) kleinste kwadratenmethode levert een derdegraads polynoom op met een afbuigend karakter in het bereik van cilinderschuifstanden $d_s \geq 1.4$ m. Dit is echter tegenstrijdig met de logische verwachting dat de cilinderschuif wanneer deze steeds verder geopend wordt (groter doorstroomoppervlak, zie vergelijking 3.1.1) een steeds grotere hoeveelheid water afvoert, maar ook dat de cilinderschuif wanneer deze volledig geopend is ($d_s = 1.60$ m) de maximale afvoercapaciteit bereikt heeft. Om die reden is er voor gekozen om de kleinste kwadratenmethode toe te passen op een monotoon stijgend derdegraads polynoom, dat wil zeggen een derdegraads polynoom $p_3(d_s)$ dat voor toenemende waarden van d_s nooit zal dalen.

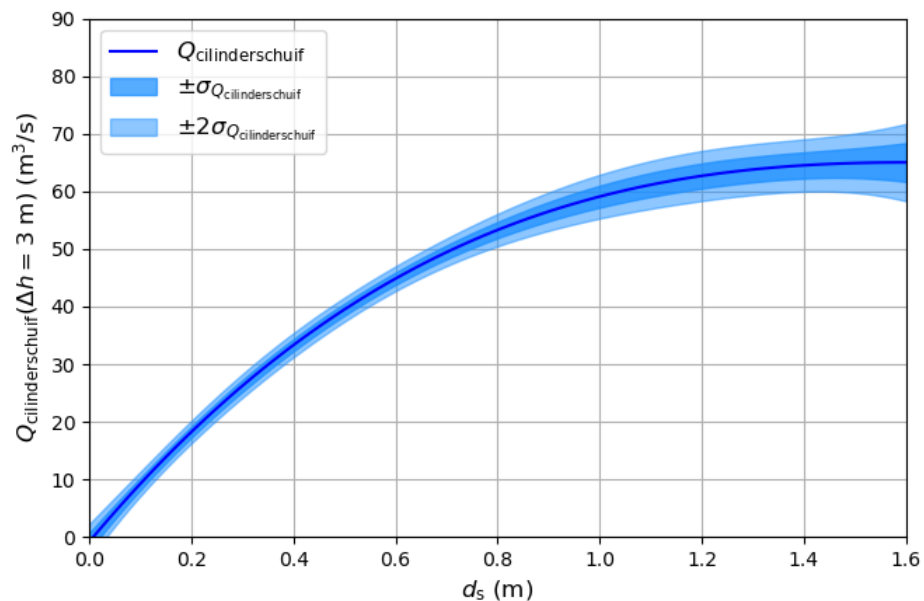
gemeten cilinderschuifstanden ($0 < d_s \leq 1.60$ m) niet kan worden gegarandeerd. Aangezien dit bereik in dit specifieke geval alle mogelijke cilinderschuifstanden bevat, levert dit geen problemen voor de toepassing in het IWP. Uit de kleinste kwadratenmethode volgt de volgende relatie tussen μA en de cilinderschuifstand tijdens de veldmetingen (zie stippellijn in Figuur 3.3):

$$\mu A = 1.21d_s^3 - 7.22d_s^2 + 13.83d_s - 0.11. \quad (3.1.4)$$

In combinatie met de vergelijking voor volledig onderdompelde inlaten (zie vergelijking 3.1.1), resulteert dit in de volgende afvoerrelatie voor de cilinderschuif:

$$Q_{\text{cilinderschuif}} = \begin{cases} 0 & d_s < 0.008 \\ (1.21d_s^3 - 7.22d_s^2 + 13.83d_s - 0.11)\sqrt{2g\Delta h} & 0.008 < d_s \leq 1.60 \text{ m} \end{cases} \quad (3.1.5)$$

Door het gebrek aan fysieke betekenis van de fitparameters leidt het invullen van $d_s = 0$ m in vergelijking 3.1.5 tot een negatief debiet. Dit is echter fysisch onmogelijk bij een gesloten cilinderschuif en om die reden geldt deze relatie niet voor $d_s = 0$ m. De onzekerheid in de berekende debieten op basis van vergelijking 3.1.5 neemt toe met de schuifstand en waterstanden. In Figuur 3.4 wordt de onzekerheid in de cilinderschuifrelatie weergegeven voor 3 m verval als functie van het volledige bereik aan schuifstanden. De onzekerheden in de fitparameters en de gemeten waterstanden werken door in het berekende cilinderschuifdebiet. Doordat de onzekerheid in het berekende debiet afhankelijk is van de schuifstand neemt deze toe bij grotere schuifopeningen. Bij voor stuw Amerongen typische vervallen van 3 m en 3.1 m leidt dit respectievelijk tot maximaal $2\sigma = \pm 6.71$ m³/s en ± 6.82 m³/s. De volledige analyse van de onzekerheden in vergelijking 3.1.5 wordt beschreven in Appendix A.



Figuur 3.4: De 68% ($\pm\sigma$) en 95% ($\pm 2\sigma$) betrouwbaarheidsintervallen van de afvoerrelatie voor de cilinderschuif als functie van de schuifstand bij een verval van 3 m.

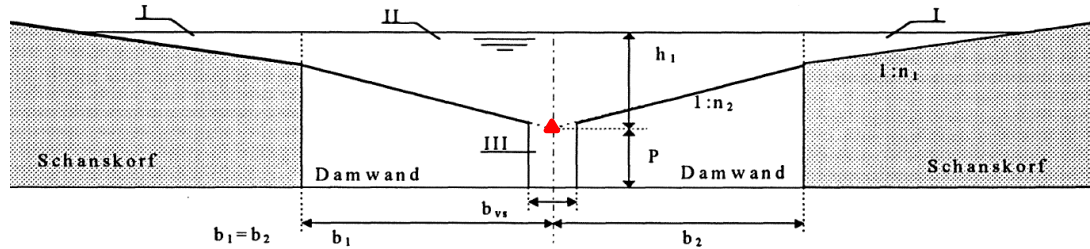
3.2 Vistrap

De vistrap bij stuw Amerongen heeft geen bypass en is daarmee volledig passief. De ontwerpwaarde van de vistrap was 4 m³/s bij +6.0 m NAP (WL | Delft Hydraulics, 1998). Omdat in de praktijk ook waterstanden van ongeveer +6.1 m NAP gehanteerd worden en omdat bij deze waterstand eerder nog geen veldmetingen zijn uitgevoerd (Rijkswaterstaat Waterdienst, 2011) is deze waterstand ook bemeten tijdens de meetcampagne van september 2023. De

theoretische afvoercharacteristiek voor samengestelde overlaten $Q_{\text{vistrap,th}}$, waarop de vistrap ontworpen is (zie Figuur 3.5), wordt gegeven door (WL | Delft Hydraulics, 1998):

$$Q_{\text{vistrap,th}} = C_{sI} C_{D_I} \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{5}{2}} \sqrt{\frac{g}{2}} n_I (h_1 - H_b)^{2.5} + C_{sII} C_{D_{II}} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} g 2 H_b n_{II} \left(h_1 - \frac{1}{2} H_b\right)^{\frac{3}{2}} + 0.8 b_{vs} P \sqrt{2g(h_1 - h_2)}. \quad (3.2.1)$$

De beschrijving en waarden van elk van de parameters in vergelijking 3.2.1 zijn weergegeven in Tabel 3.1. Alle hoogtes in vergelijking 3.2.1 zijn gedefinieerd ten opzichte van de apex (zie Figuur 3.5).



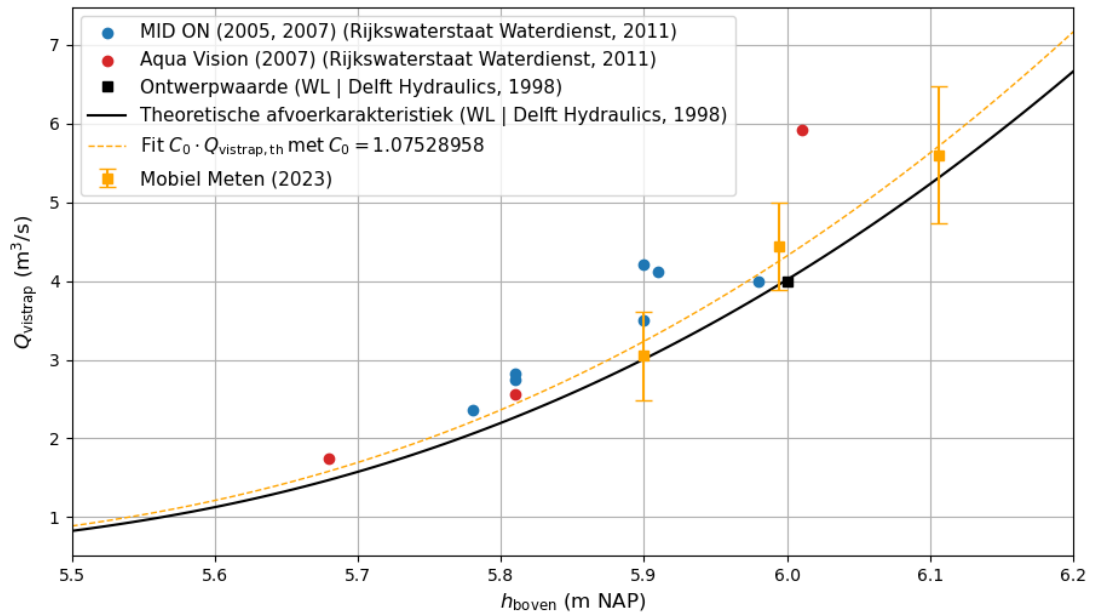
Figuur 3.5: Schematische weergave van de gecombineerde overlaat van de vistrap bij stuw Amerongen. De locatie van de apex is weergegeven met een rode driehoek (WL | Delft Hydraulics, 1998).

Tabel 3.1: Benodigde parameters om de afvoer door de vistrap bij stuw Amerongen te berekenen (WL | Delft Hydraulics, 1998).

Symbol	Waarde	Beschrijving
h_A	+5.06 m NAP	Hoogte van de apex t.o.v. NAP
h_1	$(h_{\text{boven}} - h_A)$ m	Bovenwaterstand t.o.v. de apex
h_2	$(h_1 - 0.16)$ m	Waterstand benedenstrooms van de apex, o.b.v. valval per drempel (0.16 m)
n_I	7	Helling van de schanskorf van de overlaat
n_{II}	3	Helling van de damwand van de overlaat
S	h_2/h_1	Verdrinkingsgraad
C_{sI}	$\sqrt{1 - S^9}$	Reductiecoëfficiënt van de schanskorf van de overlaat
C_{sII}	$\sqrt{1 - S^2}$	Reductiecoëfficiënt van de damwand van de overlaat
C_{D_I}	1.09	Afvoercoëfficiënt van de schanskorf van de overlaat
$C_{D_{II}}$	1.03	Afvoercoëfficiënt van de damwand van de overlaat
b	1.10 m	Horizontale afstand tussen het midden van de verticale doorgang en de overgang tussen schanskorf en damwand
b_{vs}	0.30 m	Breedte van de verticale doorgang
H_b	0.37 m	Hoogte van het overgangspunt tussen schanskorf en damwand (b/n_2)
P	1.00 m	Hoogte van de verticale doorgang
g	9.81 m/s ²	Zwaartekrachtversnelling

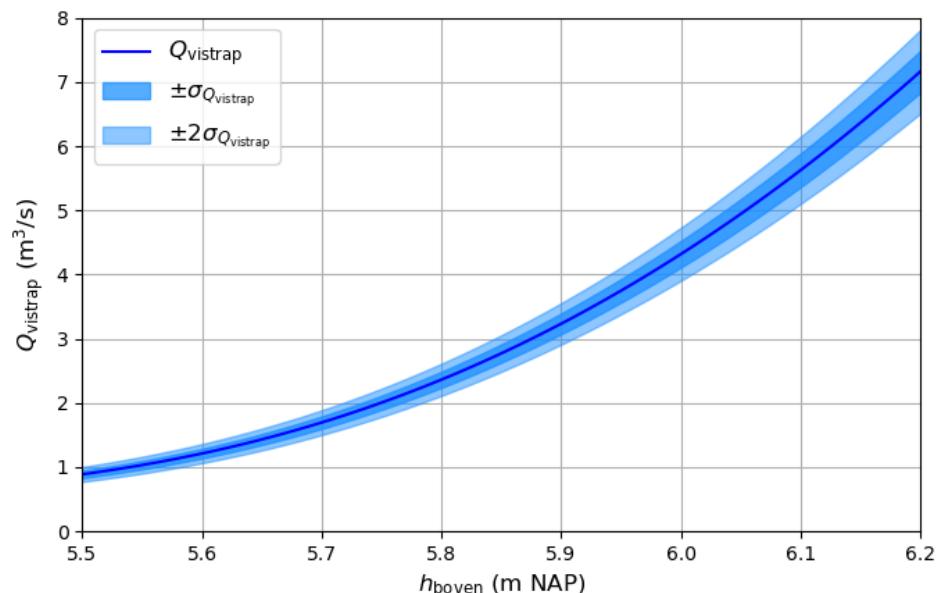
In Figuur 3.6 worden de gemeten debieten door de vistrap bij verschillende bovenwaterstanden weergegeven uit meetcampagnes in 2005 en 2007 (Rijkswaterstaat Waterdienst, 2011), en die van de nieuwste metingen uit september 2023 inclusief meetonzekerheid $\pm 2\sigma$ (95% betrouwbaarheidsinterval, zie Appendix A). De relatie tussen het debiet door de vistrap Q_{vistrap} en de bovenwaterstand h_{boven} (zie stippelijijn in Figuur 3.6) is bepaald met behulp van de theoretische afvoercharacteristiek (zie vergelijking 3.2.1) en de kleinste kwadratenmethode, en is alleen gebaseerd op de veldmetingen uit september 2023:

$$Q_{\text{vistrap}} = 1.075 \cdot Q_{\text{vistrap,th}} \quad (3.2.2)$$



Figuur 3.6: Gemeten debieten en de (theoretische) relaties tussen debiet en bovenwaterstand in de vistrap van stuwcomplex Amerongen. De foutbalken geven de onzekerheid ($\pm 2\sigma$, 95% betrouwbaarheidsinterval) weer.

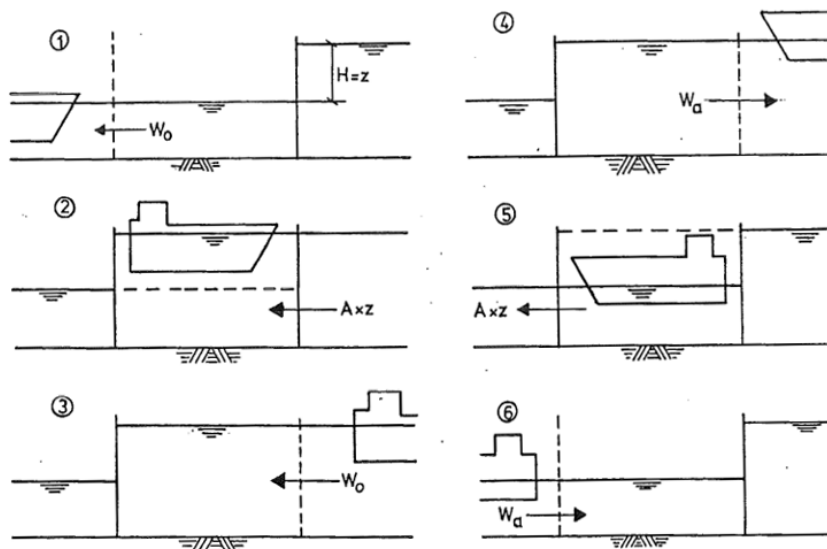
De onzekerheden in de fitparameter en de gemeten waterstanden werken door in het berekende vistrapdebiet. De onzekerheid in vergelijking 3.2.2 is uiteindelijk afhankelijk van de bovenwaterstand (zie Figuur 3.7). Voor de voor stuw Amerongen typische bovenwaterstanden van +6.0 m NAP en +6.1 m NAP is de onzekerheid in het berekende vistrapdebiet respectievelijk gelijk aan $2\sigma = \pm 0.41$ en $\pm 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$. De volledige onzekerheidsanalyse wordt beschreven in Appendix A.



Figuur 3.7: De 68% ($\pm\sigma$) en 95% ($\pm 2\sigma$) betrouwbaarheidsintervallen van de afvoerrelatie voor de vistrap als functie van de bovenwaterstand.

3.3 Schutsluis

Indien de vizierstuwen gesloten zijn moet de scheepvaart stuw- en sluiscomplex Amerongen via de schutsluis passeren. Sluis Amerongen bestaat uit een beneden- en bovenkolk (zie Figuur 1.1). De grootste bijdrage is het nivelleerdebiet (zie Paragraaf 3.3.1) maar er is ook sprake van waterverplaatsing door schepen die de kolk invaren (zie Paragraaf 3.3.2). Beide processen zijn schematisch weergegeven in Figuur 3.8. De aanwezigheid van schepen in de kolk heeft geen invloed op het nivelleerdebiet (Deltares, 2018).



Figuur 3.8: Schematische weergave van de verschillende bijdragen aan het totale schutverlies (Bezuyen, Glerum, Kuijper, Kuiper, & Vrijling, 2000).

3.3.1 Nivelleerdebiet

Als gevolg van het nivelleren van de sluis kolk wordt er tijdelijk extra water afgevoerd. Bij de schutsluis zijn tijdens de meetcampagne geen metingen uitgevoerd omdat het schutverlies direct berekend kan worden op basis van de waterstandsdata uit het LMW en de eigenschappen van de ingezette schutkolk.

De schutschijf $V_{\text{schuttschijf}}$ is gedefinieerd als (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000):

$$V_{\text{schuttschijf}} = L_{\text{kolk}} B_{\text{kolk}} \Delta h, \quad (3.3.1)$$

met $B_{\text{kolk}} = 18$ m de breedte van de sluis kolk, Δh het verval over de kolk bij de start van het nivelleerproces en L_{kolk} de kolk lengte binnen de sluisdeuren, welke afhankelijk van de ingezette deelkolk(en) gelijk is aan:

$$L_{\text{kolk}} = \begin{cases} 260 \text{ m} & \text{Hele kolk} \\ 152.5 \text{ m} & \text{Bovenkolk} \\ 90 \text{ m} & \text{Benedenkolk} \end{cases} \quad (3.3.2)$$

Als gevolg van het schutverlies tijdens een schutcyclus is er tijdelijk een debiet door de schutsluis richting het benedenstroomse stuwpannd (Amerongen-Hagestein). Dit debiet is gedurende het nivelleren gemiddeld gelijk aan:

$$Q_{\text{schutsluis}} = \frac{V_{\text{schuttschijf}}}{\Delta t_{\text{nivelleren}}}, \quad (3.3.3)$$

met $\Delta t_{\text{nivellereen}}$ de nivelleertijd. In Nederland is voor binnenvaartsluizen (en kleine zeesluizen) met deuropeningen en vervallen tussen 2 en 6 m een nivelleertijd van 8 tot 10 minuten gebruikelijk (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000).

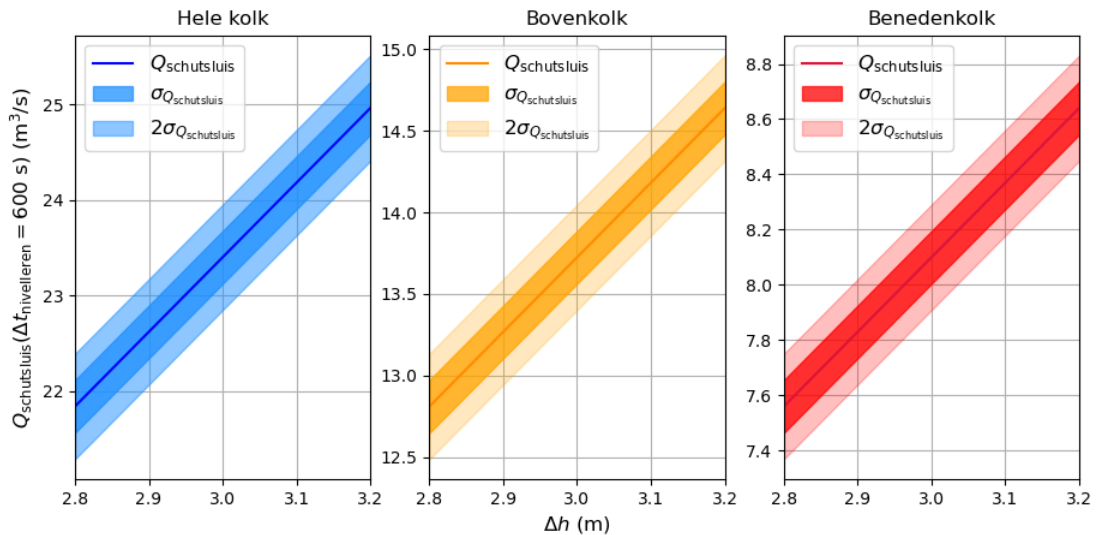
Voor elk van de sluisdeuren en nivelleerschuiven wordt door ODS een status uitgegeven. Omdat het nivelleerdebiet afhankelijk is van de ingezette kolk kan op basis van deze deur- en schuifstanden berekend worden hoe groot de schutscijf is. Tabel 3.2 geeft voor iedere mogelijke waarde van het nivelleerdebiet weer welke combinatie van geopende dan wel gesloten sluisdeuren en nivelleerschuiven daarvoor benodigd is. De nivelleertijd kan worden bepaald op basis van de tijd tussen het signaal 'open' en 'gesloten' van de relevante sluisdeuren en nivelleerschuiven. De status van de sluisdeuren en nivelleerschuiven van het bovenhoofd is niet relevant voor het bepalen van het schutverlies omdat het specifiek om de lozing naar het benedenpand gaat. Er is wel een spuifunctie aanwezig op het bovenhoofd van sluis Amerongen maar deze wordt enkel gebruikt om de sluiskolk ijsvrij te houden en wordt niet ingezet voor watermanagement.⁵

Tabel 3.2: Herleiding van de ingezette (deel)kolk op basis van de status van de sluisdeuren en nivelleerschuiven.

(Deel)kolk	Benedenhoofd		Middenhoofd		Bovenhoofd	
	Deuren	Schuiven	Deuren	Schuiven	Deuren	Schuiven
Niet van toepassing		Gesloten		Gesloten		
Hele kolk		Open	Open			
Bovenkolk	Open			Open		
Benedenkolk		Open	Gesloten			

De onzekerheid in de gemeten waterstanden van ± 2.5 cm werkt door in de berekende schutscijf (zie vergelijking 3.3.1). In Figuur 3.9 zijn de betrouwbaarheidsintervallen van het berekende schutdebiet weergegeven als functie van verval. Om de schutscijf om te rekenen naar schutdebiet is hier gebruik gemaakt van de voor binnenvaartsluizen gebruikelijke nivelleertijd van 10 minuten. De onzekerheid in het berekende schutdebiet is afhankelijk van de lengte van de (deel)kolk, en is voor de hele kolk, bovenkolk en benedenkolk respectievelijk gelijk aan $2\sigma = \pm 0.55 \text{ m}^3/\text{s}$, $\pm 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$ en $\pm 0.19 \text{ m}^3/\text{s}$. De volledige analyse van de onzekerheden wordt beschreven in Appendix A.

⁵ Persoonlijke communicatie Rijkswaterstaat ON



Figuur 3.9: De 68% ($\pm\sigma$) en 95% ($\pm 2\sigma$) betrouwbaarheidsintervallen van de berekende schutdebieten als functie van verval. In de weergegeven berekeningen is gebruik gemaakt van 600 s nivelleertijd.

3.3.2 Waterverplaatsing

Wanneer een schip de sluis kolk in- of uitvaart wordt er water verplaatst tussen de sluis kolk en het stuwpand, waardoor er lokaal bij de schutsluis een gemiddeld netto debiet $Q_{\text{waterverplaatsing}}$ kan ontstaan⁶:

$$Q_{\text{waterverplaatsing}} = \frac{W_O}{\Delta t_{\text{invaren}}} - \frac{W_A}{\Delta t_{\text{uitvaren}}}, \quad (3.3.4)$$

met W_O en W_A respectievelijk het door op- en afvarende schepen verplaatste volume (zie Figuur 3.8), en $\Delta t_{\text{invaren}}$ en $\Delta t_{\text{uitvaren}}$ respectievelijk de totale tijdsduur van het in- en uitvaren. Het verplaatste volume kan worden berekend met behulp van:

$$W = C_B L_{\text{schip}} B_{\text{schip}} z_{\text{schip}} \quad (3.3.5)$$

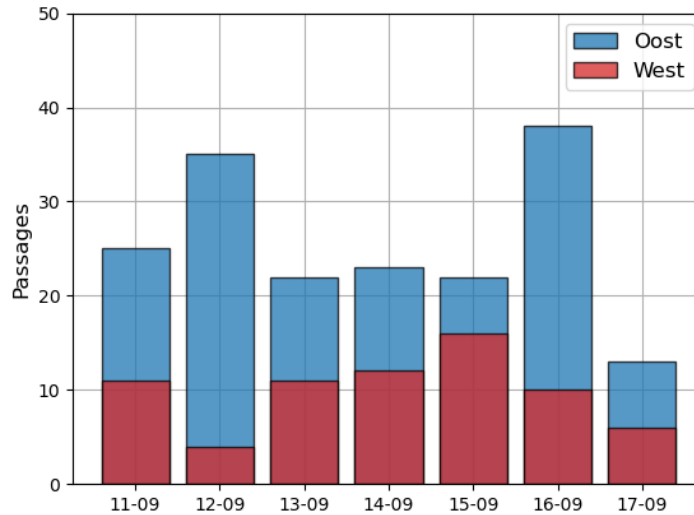
Met L_{schip} , B_{schip} en z_{schip} respectievelijk de lengte, breedte en diepgang van het schip. Blokcoëfficiënt C_B wordt hier toegepast om rekening te houden met de werkelijke (gestroomlijnde) vorm van de schepen (Van Koningsveld, Verheij, Taneja, & de Vriend, 2023). Figuur 3.10 geeft een beeld van het dagelijkse aantal passages van sluis Amerongen tijdens de week van de meetcampagne. Door de beperkte periode zijn eventuele seizoensgebonden trends niet te onderscheiden in deze dataset. Voor de recreatievaart zijn geen lengtematen geregistreerd in het IVS. Om die reden is de waterverplaatsing door recreatievaart zoals weergegeven in Figuur 3.11 bepaald op basis van de maximale afmetingen van een schip van de klasse 'Kleine vaartuigen en recreatievaart'⁷ met lengte 38 m, breedte 5 m, diepgang 1.5 m en $C_B = 0.5$ (RIVM, 2017). Voor de beroepsvaart is gebruik gemaakt van $C_B = 0.85$ (Van Koningsveld, Verheij, Taneja, & de Vriend, 2023).

Waterverplaatsing door op- en afvarende schepen compenseren elkaar (zie vergelijking 3.3.4), waardoor er alleen een netto debiet ontstaat indien de scheepspassages niet symmetrisch zijn.

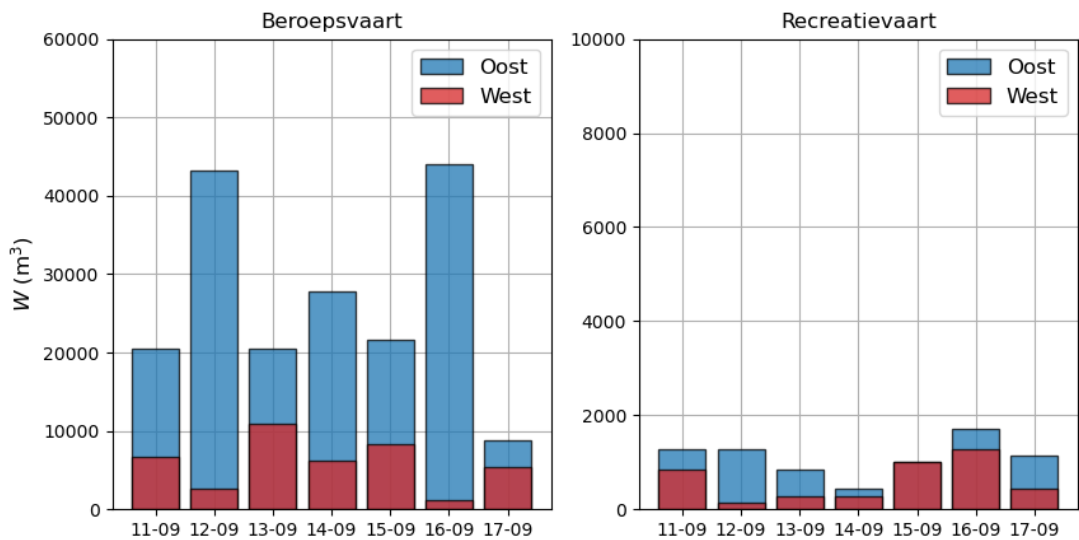
⁶ Waterverplaatsing door schepen zorgt niet voor een verandering van het waterpeil in het stuwpand omdat het schip zelf ook ruimte inneemt. Het debiet ten gevolge van waterverplaatsing is daardoor niet geschikt voor toepassing in de waterbalans of het peilbeheer en geeft enkel een beeld van het gemiddelde, momentane lokale debiet door de schutsluis. Merk hierbij op dat er wel sprake is van peilverandering indien er schepen geladen of gelost zouden worden. Afgezien daarvan is er wel sprake van een volume water dat per tijdseenheid passeert, waardoor de waterverplaatsing een integraal onderdeel is van de definitie van debiet die door Rijkswaterstaat CIV wordt gehanteerd.

⁷ [Kleine vaartuigen en recreatievaart | CBS](#)

Uit IVS data van sluis Amerongen tijdens de periode van de meetcampagne blijkt dat de passeerfrequentie in oostelijke richting aanzienlijk groter is (zie Figuur 3.10), bijvoorbeeld vanwege de keuze voor een andere vaarroute bij terugkomst. Bovendien verplaatsen de schepen in oostelijke richting gemiddeld een groter volume dan in westelijke richting, bijvoorbeeld door grotere diepgang als gevolg van zwaardere belading (zie Figuur 3.11). De waterverplaatsing door op- en afvarende schepen kan in dit geval dus niet verwaarloosd worden op basis van symmetrie en zal leiden tot een netto debiet door sluis Amerongen.



Figuur 3.10: Passeerfrequentie van sluis Amerongen tussen 11 en 17 september op basis van IVS data.



Figuur 3.11: Dagelijkse waterverplaatsing door beroepsvaart (links) en recreatievaart (rechts) tussen 11 en 17 september bij sluis Amerongen op basis van IVS data.

Niet alle informatie die nodig is om de waterverplaatsing van de schepen in de sluis kolk te bepalen is beschikbaar in het SCADA systeem (Deltares, 2020). SCADA beschikt wel over in- en uitvaarsignalen voor de scheepvaart, maar niet over de eigenschappen (vaarrichting, (deel)kolk, lengte, breedte en diepgang) van de passerende schepen. Deze gegevens zijn wel beschikbaar in het IVS maar van deze koppeling is op moment van schrijven van dit rapport geen sprake.

Om het waterverplaatsingsdebiet zonder koppeling met IVS te implementeren in het IWP moeten maatgevende afmetingen van op- en afvarende schepen, een maatgevende verhouding tussen de hoeveelheid op- en afvarende schepen en een maatgevende in- en uitvaartijd worden gedefinieerd (zie vergelijking 3.3.4). Deze maatgevende parameters kunnen bijvoorbeeld gedefinieerd worden op basis van historische IVS datareeksen. Het advies is om hiervoor een lange datareeks te gebruiken zodanig dat eventuele seizoensgebonden scheepvaarttrends uitgemiddeld kunnen worden. Alternatief kan er, indien er significante seizoensgebonden trends blijken te bestaan, ook juist voor gekozen worden om de maatgevende parameters te definiëren per seizoen. Omdat vanuit de ontsloten parameters (zie Figuur 1.2 en Appendix B) niet afgeleid kan worden of er schepen ingevaren zijn moet het berekende waterverplaatsingsdebiet op een vast moment in de schutcyclus uitgegeven worden, bijvoorbeeld aan het einde van het nivelleerproces. Tot slot dient opgemerkt te worden dat het gebruik van maatgevende parameters in plaats van de werkelijke scheepvaartgegevens er voor zal zorgen dat er de ene keer een overschatting en de andere keer een onderschatting zal zijn van de waterverplaatsing.

3.4 Waterkrachtcentrale

De afvoer door de WKC van stuwcomplex Amerongen wordt berekend door de software van de WKC en kan daardoor rechtstreeks worden toegepast in de afvoerrelatie. De totale afvoer door de WKC Q_{WKC} is gelijk aan:

$$Q_{WKC} = Q_{WKC,T_1} + Q_{WKC,T_2} + Q_{WKC,T_3} + Q_{WKC,T_4}, \quad (3.4.1)$$

met Q_{WKC,T_i} de afvoer door één van de vier turbines ($i = 1, 2, 3$ of 4). Het bereik van elk van de turbines ligt tussen 0 en 100 m³/s en als geheel kan de WKC daardoor maximaal 400 m³/s afvoeren. Wanneer de WKC in bedrijf is zou het zo kunnen zijn dat de aanstroming ter plaatse van de cilinderschuif wordt beïnvloed. Er zijn echter geen metingen uitgevoerd waarbij zowel de cilinderschuif als de WKC in bedrijf waren, waardoor deze invloed niet is bevestigd en als gevolg ook buiten beschouwing gelaten is in de afgeleide afvoerrelaties.

3.5 Lek- en lokdebiet

De klimgoten voor de glasaal voeren een kleine lokstroom af en zijn in de praktijk het hele jaar in bedrijf. Ook is er sprake van lekkage door het stuwcomplex als geheel. Deze twee posten konden niet afzonderlijk van elkaar of van het debiet door de cilinderschuif gemeten worden (vanwege hun locatie en de mogelijke meetraaien en -instrumenten). Tijdens de meetcampagne zijn metingen verricht bij een gesloten cilinderschuif ($d_s = 0$ m, zie ook Figuur 3.3) om een poging te kunnen doen om het lekdebiet te schatten. Tijdens de metingen met een gesloten cilinderschuif is gemiddeld 0.14 m³/s gemeten. Deze metingen hebben slechts bij één verval plaatsgevonden (3 m). Varende akoestische Doppler-meetinstrumenten, zoals de varende ADCP, zijn bij lage stroomsnelheden echter onnauwkeurig (STOWA, 2009) en daardoor in de regel niet geschikt om een schatting te kunnen maken van het lekdebiet. De enorme spreiding in de meetresultaten, inclusief negatieve debieten als gevolg van translatiegolven, heeft bevestigd dat deze benadering niet sluitend is.

Bij stuw Driel was vóór de renovatie onder laagwateromstandigheden sprake van een lekdebiet van ongeveer 5% (orde 1 m³/s) van de volledige afvoer door de stuw, na de renovatie is dit percentage naar verwachting afgenomen (HydroLogic, 2022). De verwachting dat na de renovatie sprake is van minder dan 1 m³/s lekdebiet stemt overeen met de (onbetrouwbare) waarneming van 0.14 m³/s bij stuw Amerongen, maar daarbij moet wel worden opgemerkt dat stuw Driel, in tegenstelling tot stuw Amerongen, niet over glasaalgoten (en de daarbij horende lokstroom) of een WKC (potentieel extra lekoppervlak) beschikt.

Vanwege bovenstaande redenen is in deze analyse geen betrouwbare schatting van het lek- en lokdebiet gemaakt.

4 Discussie

Dit hoofdstuk bestaat uit een discussie over de robuustheid van de debietmetingen en de afgeleide debietrelaties (Paragraaf 4.1) en tenslotte worden enkele aanbevelingen en mogelijke vervolgstappen benoemd (Paragraaf 4.2).

4.1 Robuustheid

4.1.1 Metingen

Varende ADCP metingen bevatten tot wel twintig individuele foutbronnen (Hauet, 2020), waaronder beperkingen in de nauwkeurigheid van het meetinstrument: bij stroomsnelheden lager dan 0.5 m/s, die optraden tijdens de meetcampagne, zijn varende ADCP metingen namelijk minder nauwkeurig (STOWA, 2009). Naast de nauwkeurigheid van het meetinstrument zijn ook de schatting van het ongemeten debiet ('blanking'), omgevingsfactoren en operatorfouten foutbronnen (Hauet, 2020). Hierdoor is het bepalen van de onzekerheid in ADCP metingen erg complex. De aangeleverde onnauwkeurigheid van $\pm 5\%$ ¹ houdt bijvoorbeeld geen rekening met de afname in de nauwkeurigheid van het meetinstrument naarmate de stroomsnelheid lager wordt.

De spreiding in de individuele veldmetingen is erg groot, in sommige gevallen zelfs groter dan 40 m³/s (zie Figuur 2.2). De onzekerheden zijn bepaald op basis van de spreiding van ongeveer tien individuele veldmetingen per schuifstand en per meetraai, en de aangeleverde $\pm 5\%$ (zie Paragraaf A.1).

4.1.2 Afvoerrelatie

Omdat de veldmetingen alleen stochastische ruis bevatten (en dus onbekende systematische afwijkingen), is het logisch dat de onzekerheid in de debietrelatie kleiner is dan de onzekerheid in de afzonderlijke gemiddelde debieten. De berekende onzekerheden in de afgeleide afvoerrelaties (zie Appendix A) geven daardoor aan hoe goed de bepaalde afvoerrelaties de gemeten debieten representeren, niet hoe goed de werkelijke debieten in de praktijk vertegenwoordigd worden door de afvoerrelaties. De onzekerheden in de verschillende afvoerrelaties zijn samengevat in Tabel 4.1. Merk op dat de onzekerheden afhankelijk kunnen zijn van de waarde van meerdere parameters, waardoor de gegeven onzekerheid alleen voor de beschreven specifieke omstandigheid (combinaties van bijvoorbeeld schuifstand, verval en/of ingezette deelkolk) geldt.

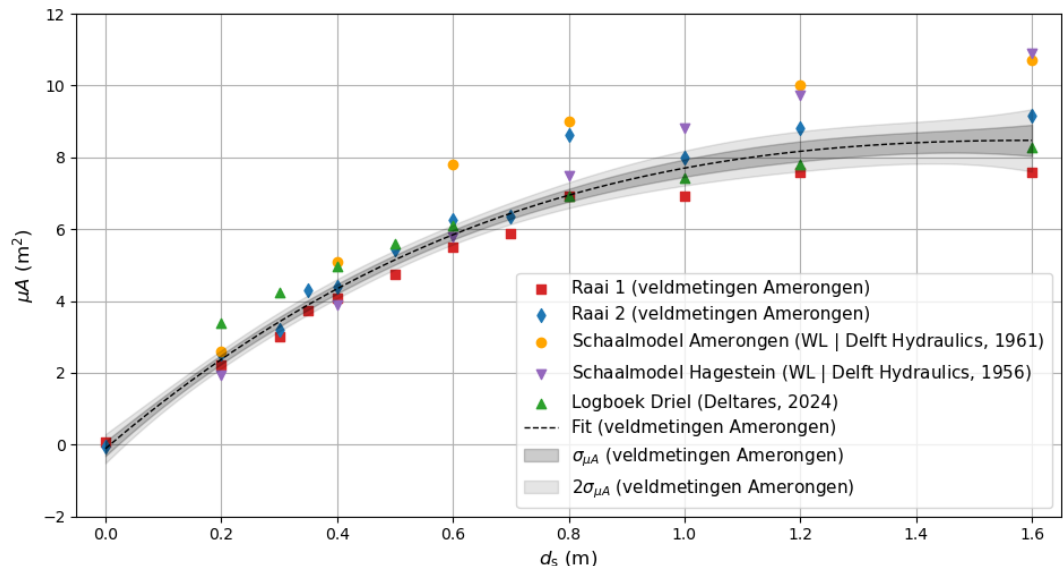
Tabel 4.1: Samenvatting van de onzekerheden in de afgeleide afvoerrelaties onder specifieke condities (zoals schuifstand, verval of ingezette deelkolk). Eventuele systematische meetonnauwkeurigheid is hierin niet beschouwd.

	Δh	d_s	σ	2σ
Cilinderschuif Q : vgl. 3.1.5 σ_Q^2 : vgl. A.9	2.9 m	1.6 m	$\pm 3.30 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 6.60 \text{ m}^3/\text{s}$
	3.0 m		$\pm 3.35 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 6.71 \text{ m}^3/\text{s}$
	3.1 m		$\pm 3.41 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 6.82 \text{ m}^3/\text{s}$
Vistrap Q : vgl. 3.2.2 σ_Q^2 : vgl. A.13	h_{boven}		σ	2σ
	5.9 m NAP		$\pm 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$
	6.0 m NAP		$\pm 0.21 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 0.41 \text{ m}^3/\text{s}$
	6.1 m NAP		$\pm 0.26 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$
Schutsluis Q : vgl. 3.3.3 σ_Q^2 : vgl. A.18	(Deel)kolk	$\Delta t_{\text{nivelleren}}$	σ	2σ
	Volledige kolk	600 s	$\pm 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 0.55 \text{ m}^3/\text{s}$
	Bovenkolk		$\pm 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$
	Benedenkolk		$\pm 0.10 \text{ m}^3/\text{s}$	$\pm 0.19 \text{ m}^3/\text{s}$

Ten behoeve van de robuustheid van de afvoerrelatie zou het debiet idealiter bij een groter bereik van verschillende mate van verval moeten worden gemeten. Binnen de gegeven randvoorwaarden kon in de praktijk slechts een beperkte variatie in het verval worden gerealiseerd. Ook is het niet mogelijk gebleken om een betrouwbare inschatting te maken van het lekdebiet vanwege de beperkte nauwkeurigheid van de gekozen meetmethode bij lage stroomsnelheden.

Om toch een beeld te krijgen van de geloofwaardigheid van de afvoerrelatie van de cilinderschuif zijn ter vergelijking in Figuur 4.1 de resultaten van enkele studies naar de stuwcomplexen in de Nederrijn uit het verleden weergegeven in combinatie met de resultaten uit Figuur 3.3. Naast de resultaten van de schaalmodellen van de middenpijlers van stuw Amerongen (WL | Delft Hydraulics, 1961) en stuw Hagestein (WL | Delft Hydraulics, 1956) heeft Deltares in 2024 ook een studie gedaan naar de afvoerrelaties van de verschillende objecten van stuw- en sluiscomplex Driel (Deltares, 2024). Deze studie is gebaseerd op logboeken met (handmatige) registraties van objectinformatie van stuw Driel en debietmetingen⁸, en was met name gericht op situaties met lage debieten. Ondanks de grote spreiding in de meetresultaten suggereert een vergelijking met de historische objectdata van stuw Driel (Deltares, 2024) dat de afgeleide relatie plausibel is (zie Figuur 4.1). Omdat niet vastgelegd is of de uiteindelijke stuw gebaseerd zijn op precies hetzelfde ontwerp als de schaalmodellen, geeft de afwijking van de schaalmodelresultaten geen directe aanleiding om aan de afvoerrelatie te twijfelen.

⁸ [Driel boven - Rijkswaterstaat Waterinfo \(rws.nl\)](https://www.rws.nl/driel-boven)



Figuur 4.1: De relatie tussen de cilinderschuifstand d_s en het product van de afvoercoëfficiënt en het doorstroomoppervlak μ_A voor de veldmetingen uit 2023, de schaalmodelmetingen bij stuw Amerongen (WL | Delft Hydraulics, 1961) en stuw Hagestein (WL | Delft Hydraulics, 1956) en waarnemingen uit het logboek van stuw Driel (Deltares, 2024). De 68% en 95%-betrouwbaarheidsintervallen van de fit (vergelijking 3.1.4) zijn grijs gearceerd.

4.2 Aanbevelingen

4.2.1 Systematische meetfout bepalen

Systematische afwijkingen, dat wil zeggen afwijkingen die onder een bepaalde omstandigheid altijd dezelfde grootte en richting hebben, kunnen niet uitgesloten worden met de gebruikte meetmethode. Het is daardoor niet duidelijk of er een systematische onder- of overschatting in de meetdata verscholen zit. Het wordt daarom aanbevolen om het debiet onder dezelfde omstandigheden met een andere, onafhankelijke methode te meten om te beoordelen of de uitgevoerde ADCP metingen systematische afwijkingen bevatten.

4.2.2 Uitbreiding naar debieten vizierstuwen en spoelriolen

Een beperking van de (totale) afgeleide afvoerrelatie is dat deze niet de volledige situatie beschrijft op het moment dat de vizierstuwen en/of spoelriolen geopend zijn. In een eventuele vervolgstudie kunnen ook de afvoerrelaties van deze objecten worden bepaald zodat het IWP kan worden uitgerust met een alomvattende relatie. Voor dit doeleinde zou ook voor de vizierstuwen en spoelriolen een meetcampagne uitgevoerd kunnen worden. In de studie naar de afvoerrelaties van de verschillende componenten van stuw Driel zijn ook voor deze objecten afvoerrelaties afgeleid op basis van logboekregistraties (Deltares, 2024).

4.2.3 Standaardberekening sluisdebieten

Voor de sluisdebieten is tijdens deze studie door Rijkswaterstaat de behoefte geuit om de sluisdebieten te bepalen met behulp van een uniforme 'standaardberekening'.⁹ De zeesluisformulering¹⁰ (ZSF) kan mogelijk in deze behoefte voorzien. In de ZSF wordt, ten behoeve van de berekening van de zoutfluxen door schutsluizen, ook het nivelleerdebiet berekend (Deltares, 2018). Om de situatie bij sluis Amerongen te beschrijven kunnen de randvoorwaarden voor het zoutgehalte gelijk gesteld worden aan 0, en kan de ZSF ingezet worden om ook daar het nivelleerdebiet te bepalen. Dit kan cyclusgemiddeld (een gemiddeld

⁹ Persoonlijke communicatie Rijkswaterstaat CIV

¹⁰ [libzsf documentation](#) - a Deltares tool to calculate salt intrusion through shipping locks

aantal schutcycli per dag uitgesmeerd over 24 uur) of fasegewijs (op basis van individuele registraties van deur- en nivelleerschuiwbewegingen uit SCADA). Voor enkele sluizen (in IJmuiden en Terneuzen) is de ZSF, weliswaar voor zoutbeheer, al fasegewijs toegepast in het IWP.

Waterverplaatsing door schepen kan op basis van de maatgevende parameters zoals beschreven in Paragraaf 3.3.2 ook worden toegepast in de ZSF (Deltares, 2018). Ook bij een eventuele toekomstige koppeling met het IVS kan de ZSF toegepast worden. Een aandachtspunt bij een eventuele toekomstige koppeling met het IVS is het gebrek aan registratie van lengtematen voor de recreatievaart.

5 Literatuur

- Bezuyen, K., Glerum, A., Kuijper, H., Kuiper, W., & Vrijling, J. (2000). *Constructieve Waterbouwkunde - Deel B Schutsluizen*. TU Delft Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Deltares. (2018). *Zeesluisformulering, implementatie document*. 11200741-000-HYE-0004-v2.
- Deltares. (2020). *KPP Waterverdeling en Verzilting: Werkplan deelproject Registratie schuttingen*. 11205272-010-ZWS-0001.
- Deltares. (2023). *Meetplan debietbepaling stuwcomplex Amerongen (memo)*. 11209225-005-ZKS-0002.
- Deltares. (2024). *Afvoerrelatie stuw Driel bij lage debieten*. 11209225-007-ZKS-0001.
- Hauet, A. (2020). *Uncertainty of discharge measurement methods: a literature review*. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).
- HydroLogic. (2022). *Evaluatie stuwprogramma Driel*. P1342.
- Kolkman, P., & Jongeling, T. (1996). *Dynamisch gedrag van waterbouwkundige constructies deel A: Constructies in stroming*. Delft: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Mueller, D., Wagner, C., Rehm, M., Oberg, K., & Rainville, F. (2013). Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. *Chapter 22 of Section A: Surface-Water Techniques in Book 3: Applications of Hydraulics*.
- Muste, M., Yu, K., & Spasojevic, M. (2004). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 1-16.
- Nortier, I., & De Koning, P. (1996). *Toegepaste Vloeistofmechanica: Hydraulica voor Waterbouwkundigen*.
- Oberg, K., & Mueller, D. (2007). Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), 1421-1432.
- Rijkswaterstaat. (2013). *Handboek Neder-Rijn en Lek - Bediening stuw-/sluiscomplexen*.
- Rijkswaterstaat. (2023). *Programma van Eisen Waterkwantiteit en LMW*. Versie 9.0.
- Rijkswaterstaat Bouwdienst. (2000). *Ontwerp van Schutsluizen I*.
- Rijkswaterstaat Waterdienst. (2011). *Hydraulische metingen vispassages Nederrijn-Lek. Resultaten 2002-2007*.
- RIVM. (2017). *Wetted surface area of recreational boats*. RIVM Report 2017-0116.
- STOWA. (2009). *Handboek Debietmeten in Open Waterlopen*. Rapportnummer 2009-41.
- Taylor, J. (1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. Sausalito, California: University Science Books.
- Van Koningsveld, M., Verheij, H., Taneja, P., & de Vriend, H. (2023). *Ports and Waterways: Navigating the changing world*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, Hydraulic engineering, Ports and Waterways.
- WL | Delft Hydraulics. (1956). *Stuw Hagestein cylinderschuif, rapport modelonderzoek M232*.
- WL | Delft Hydraulics. (1961). *Stuw Amerongen cylinderschuif, rapport modelonderzoek M678*.
- WL | Delft Hydraulics. (1998). *Samengestelde overlaten, vispassages Driel, Amerongen en Hagestein, bureaustudie Q2393*.

A Onzekerheidsanalyse

De debietmetingen langs de meetraaien zijn meerdere malen herhaald en op basis daarvan is per cilinderschuifstand (in het geval van raai 1 en 2) of bovenwaterstand (in het geval van de vistrap) het rekenkundig gemiddelde debiet \bar{Q} bepaald. Bij het bepalen van de debietrelaties (met behulp van de kleinste kwadratenmethode) is rekening gehouden met de onzekerheid in deze metingen. In deze appendix wordt beschreven hoe de onzekerheden berekend zijn. De onzekerheid in de gemeten waterstanden is gelijk aan ± 2.5 cm (Rijkswaterstaat, 2023). Onzekerheid in de ingestelde cilinderschuifstand is in deze analyse verwaarloosd.

A.1 Standaarddeviatie van de gemeten debieten

Het rekenkundig gemiddelde \bar{Q} van de gemeten debieten is gelijk aan

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (\text{A.1})$$

met N het aantal herhaalmetingen (gevaren raaien). Om de onzekerheid in de metingen te bepalen moet eerst het verschil tussen het rekenkundig gemiddelde en de individuele metingen Q_i worden bepaald:

$$\Delta Q_i = Q_i - \bar{Q}. \quad (\text{A.2})$$

Vervolgens kan de variantie σ_Q^2 in de metingen worden bepaald door het gemiddelde te bepalen van het kwadraat van vergelijking A.2:

$$\sigma_Q^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta Q_i^2. \quad (\text{A.3})$$

De standaarddeviatie σ_Q is ten slotte gelijk aan:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta Q_i^2}. \quad (\text{A.4a})$$

Op verzoek van Rijkswaterstaat is naast de spreiding in de meetseries ook de door hen aangeleverde $\pm 5\%$ onnauwkeurigheid in de gemeten debieten als onafhankelijke onzekerheid meegenomen in de totale standaarddeviatie $\sigma_{Q_{\text{tot}}}$, dat wil zeggen:

$$\sigma_{Q_{\text{tot}}} = \sqrt{\sigma_Q^2 + (0.05 \cdot \bar{Q})^2}. \quad (\text{A.4b})$$

Afhankelijke onzekerheden mogen niet gecombineerd worden zoals in vergelijking A.4b. Strikt genomen is vergelijking A.4b hierdoor niet van toepassing omdat deze onzekerheden in werkelijkheid niet onafhankelijk zijn – de bijdrage van de aangeleverde $\pm 5\%$ onnauwkeurigheid in de gemeten debieten is ook onderdeel van de spreiding zoals berekend met vergelijking A.4a, waardoor de exacte grootte van deze bijdrage niet kan worden geïsoleerd met de huidige beschikbare informatie. Rijkswaterstaat wil een conservatieve aanname doen in de berekening van de onzekerheden en daar is deze aanpak wel geschikt voor. Indien in de toekomst wel een onafhankelijke onzekerheid bepaald wordt, kan deze alsnog toegepast worden met behulp van

vergelijking A.4b. Een kanttekening bij het toepassen van dit percentage is dat omdat de gegeven onnauwkeurigheid een alomvattend percentage betreft, de absolute onzekerheid bij lage debieten veel kleiner is dan bij hoge debieten. De bijdrage van de $\pm 5\%$ onnauwkeurigheid is daardoor dominant bij hogere debieten, wat tegenstrijdig is met het feit dat ADCP metingen onnauwkeuriger zijn bij lage stroomsnelheden (Mueller, Wagner, Rehmel, Oberg, & Rainville, 2013). Er wordt daarom aanbevolen om de geldigheid van dit percentage voor deze specifieke meetomstandigheden (lage stroomsnelheden) nader te onderzoeken.

A.2 Voortplanting van de onzekerheden

In algemene vorm kan de voortplanting van onderling afhankelijke (covariante) onzekerheden in een functie met twee variabelen $f(x, y)$ berekend worden aan de hand van (Taylor, 1997):

$$\sigma_f^2 = \sigma_x^2 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y^2 \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 + 2\sigma_{xy} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right). \quad (\text{A.5})$$

De laatste term beschrijft de afhankelijkheid tussen de onzekerheden in x en y , waarbij de covarianties $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ symmetrisch zijn. Wanneer de variabelen onafhankelijk van elkaar zijn vervalt deze covariantieterm. Indien er meer dan twee afhankelijke variabelen zijn, moet voor ieder paar afhankelijke variabelen een extra covariantieterm worden toegevoegd.

A.2.1 Cilinderschuifdebiet

Bij het bepalen van de onzekerheid in μA moet rekening worden gehouden met de onzekerheid in de gemeten debieten en waterstanden. Deze onzekerheden zijn onafhankelijk van elkaar. Voor de cilinderschuifrelatie (vergelijking 3.1.3), betekent dat dat de variantie gelijk is aan

$$\sigma_{\mu A}^2 = \sigma_{Q_{\text{tot}}}^2 \left(\frac{\partial(\mu A)}{\partial Q} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{boven}}}^2 \left(\frac{\partial(\mu A)}{\partial h_{\text{boven}}} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{beneden}}}^2 \left(\frac{\partial(\mu A)}{\partial h_{\text{beneden}}} \right)^2, \quad (\text{A.6})$$

wat ten slotte resulteert in de volgende variantie $\sigma_{\mu A}^2$:

$$\sigma_{\mu A}^2 = \sigma_{Q_{\text{tot}}}^2 \left(\frac{1}{\sqrt{2g\Delta h}} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{boven}}}^2 \left(\frac{Qg}{\sqrt{2g\Delta h}} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{beneden}}}^2 \left(\frac{-Qg}{\sqrt{2g\Delta h}} \right)^2. \quad (\text{A.7})$$

Met behulp van de standaarddeviatie en de kleinste kwadratenmethode is vervolgens een relatie bepaald tussen μA en cilinderschuifstand d_s . De onzekerheden van de fitparameters, schuifstand en waterstanden planten zich voort in het uiteindelijke berekende debiet, waarbij de onzekerheden in de fitparameters c_i onderling afhankelijk van elkaar zijn. Toegepast op vergelijking 3.1.5 levert dit de volgende uitdrukking voor de variantie van het berekende debiet:

$$\begin{aligned} \sigma_{Q_{\text{cilinderschuif}}}^2 &= \sigma_{c_0}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial c_0} \right)^2 + \sigma_{c_1}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial c_1} \right)^2 + \sigma_{c_2}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial c_2} \right)^2 + \sigma_{c_3}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial c_3} \right)^2 + 2\sigma_{c_0 c_1} \left(\frac{\partial Q}{\partial c_0} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial c_1} \right) \\ &+ 2\sigma_{c_0 c_2} \left(\frac{\partial Q}{\partial c_0} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial c_2} \right) + 2\sigma_{c_0 c_3} \left(\frac{\partial Q}{\partial c_0} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial c_3} \right) + 2\sigma_{c_1 c_2} \left(\frac{\partial Q}{\partial c_1} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial c_2} \right) \\ &+ 2\sigma_{c_1 c_3} \left(\frac{\partial Q}{\partial c_1} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial c_3} \right) + 2\sigma_{c_2 c_3} \left(\frac{\partial Q}{\partial c_2} \right) \left(\frac{\partial Q}{\partial c_3} \right) \\ &+ \sigma_{d_s}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial d_s} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{boven}}}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial h_{\text{boven}}} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{beneden}}}^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial h_{\text{beneden}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{Q_{\text{cilinderschuif}}}^2 = & \sigma_{c_0}^2 (d_s^3 \sqrt{2g\Delta h})^2 + \sigma_{c_1}^2 (d_s^2 \sqrt{2g\Delta h})^2 + \sigma_{c_2}^2 (d_s \sqrt{2g\Delta h})^2 + \sigma_{c_3}^2 (\sqrt{2g\Delta h})^2 \\
& + 2\sigma_{c_0 c_1} (d_s^3 \sqrt{2g\Delta h})(d_s^2 \sqrt{2g\Delta h}) + 2\sigma_{c_0 c_2} (d_s^3 \sqrt{2g\Delta h})(d_s \sqrt{2g\Delta h}) \\
& + 2\sigma_{c_0 c_3} (d_s^3 \sqrt{2g\Delta h})(\sqrt{2g\Delta h}) + 2\sigma_{c_1 c_2} (d_s^2 \sqrt{2g\Delta h})(d_s \sqrt{2g\Delta h}) \\
& + 2\sigma_{c_1 c_3} (d_s^2 \sqrt{2g\Delta h})(\sqrt{2g\Delta h}) + 2\sigma_{c_2 c_3} (d_s \sqrt{2g\Delta h})(\sqrt{2g\Delta h}) \\
& + \sigma_{d_s}^2 \left((3c_0 d_s^2 + 2c_1 d_s + c_2) \sqrt{2g\Delta h} \right)^2 \\
& + \sigma_{h_{\text{boven}}}^2 \left((c_0 d_s^3 + c_1 d_s^2 + c_2 d_s + c_3) \left(\frac{g}{\sqrt{2g\Delta h}} \right) \right)^2 \\
& + \sigma_{h_{\text{beneden}}}^2 \left((c_0 d_s^3 + c_1 d_s^2 + c_2 d_s + c_3) \left(\frac{-g}{\sqrt{2g\Delta h}} \right) \right)^2
\end{aligned} \tag{A.9}$$

De resulterende vergelijking is afhankelijk van de waterstanden en de schuifstand waardoor de onzekerheid in het berekende debiet toeneemt met een toename in deze variabelen. De variantie-covariantiematrix van het derdegraads polynoom (zie vergelijking 3.1.4) van de vorm

$$p_3(d_s) = c_0 d_s^3 + c_1 d_s^2 + c_2 d_s + c_3 \tag{A.10}$$

is berekend met behulp van de optimalisatie toolbox uit Python library SciPy¹¹ en is gelijk aan:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{c_0}^2 & \dots & \sigma_{c_0 c_3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{c_0 c_3} & \dots & \sigma_{c_3}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0854 & -2.38393 & 1.20623 & -0.0923928 \\ -2.38393 & 5.43394 & -2.91987 & 0.253254 \\ 1.20623 & -2.91987 & 1.76507 & -0.19636 \\ -0.0923928 & 0.253254 & -0.19636 & 0.0407619 \end{pmatrix}. \tag{A.11}$$

A.2.2 Vistrapdebiet

De afvoerrelatie voor de vistrap (zie vergelijking 3.2.2) heeft onzekerheden in de bepaalde fitparameter C_0 en in de gemeten bovenwaterstand. Deze onzekerheden zijn onafhankelijk van elkaar, waardoor vergelijking A.5 leidt tot de volgende relatie:

$$\sigma_{Q_{\text{vistrap}}}^2 = \sigma_{C_0}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{vistrap}}}{\partial C_0} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{boven}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{vistrap}}}{\partial h_{\text{boven}}} \right)^2 \tag{A.12}$$

Door vergelijking 3.2.1, $h_1(h_{\text{boven}})$ en $h_2(h_{\text{boven}})$ (zie Tabel 3.1) in te vullen in vergelijking A.12 volgt een uitdrukking voor de variantie in het berekende debiet door de vistrap:

$$\begin{aligned}
\sigma_{Q_{\text{vistrap}}}^2 = & \sigma_{C_0}^2 Q_{\text{vistrap,th}}^2 + \\
\sigma_{h_{\text{boven}}}^2 C_0 \left(& 2.5 C_{sI} C_{D1} \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{5}{2}} \sqrt{\frac{g}{2}} n_I (h_1 - H_b)^{1.5} + 1.5 C_{sII} C_{DII} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} g 2H_b n_{II} \sqrt{h_1 - \frac{1}{2} H_b} \right)^2
\end{aligned} \tag{A.13}$$

waarbij de variantie in fitparameter C_0 gelijk is aan:

$$\sigma_{C_0}^2 = 0.00213103. \tag{A.14}$$

De resulterende vergelijking is afhankelijk van de bovenwaterstand (zie vergelijking A.13 met $h_1(h_{\text{boven}})$ en $h_2(h_{\text{boven}})$), waardoor de onzekerheid in het berekende debiet toeneemt met toenemende bovenwaterstand.

¹¹ [scipy.optimize.curve_fit — SciPy v1.12.0 Manual](#) – Open-source software for mathematics, science and engineering

A.2.3 Schutdebiet

De onzekerheid in de berekende schuttschijf is afhankelijk van de onnauwkeurigheid van de waterstandsmetingen. Voor zowel de boven- als de benedenwaterstand bedraagt de onnauwkeurigheid ± 2.5 cm (Rijkswaterstaat, 2023). Deze onzekerheden zijn onafhankelijk van elkaar, waardoor toepassing van vergelijking A.5 leidt tot de volgende relatie:

$$\sigma_{V_{\text{schuttschijf}}}^2 = \sigma_{h_{\text{boven}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{schuttsluis}}}{\partial h_{\text{boven}}} \right)^2 + \sigma_{h_{\text{beneden}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{schuttsluis}}}{\partial h_{\text{beneden}}} \right)^2. \quad (\text{A.15})$$

Door vergelijkingen 3.1.2 en 3.3.1 in te vullen in vergelijking A.15 volgt een uitdrukking voor de variantie in het berekende schutverlies:

$$\sigma_{V_{\text{schuttschijf}}}^2 = \sigma_{h_{\text{boven}}}^2 (L_{\text{kolk}} B_{\text{kolk}})^2 + \sigma_{h_{\text{beneden}}}^2 (-L_{\text{kolk}} B_{\text{kolk}})^2. \quad (\text{A.16})$$

Door de afhankelijkheid van L_{kolk} (zie vergelijking A.16) is de onzekerheid het grootst bij inzet van de volledige sluis kolk. Uit vergelijking A.5 volgt dat de variantie in het schutdebiet kan worden bepaald aan de hand van

$$\sigma_{Q_{\text{schuttsluis}}}^2 = \sigma_{V_{\text{schuttschijf}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{schuttsluis}}}{\partial V_{\text{schuttschijf}}} \right)^2, \quad (\text{A.17})$$

wat bij invullen van vergelijking 3.3.3 ten slotte resulteert in

$$\sigma_{Q_{\text{schuttsluis}}}^2 = \sigma_{V_{\text{schuttschijf}}}^2 \left(\frac{1}{\Delta t_{\text{nivelleren}}} \right)^2. \quad (\text{A.18})$$

A.2.4 Totaaldebiet

De totale onzekerheid in de afvoerrelatie van alle componenten waarvoor een afvoerrelatie bepaald is (zie vergelijking 3.2 en Paragrafen 3.1 tot en met 3.4), kan ook met behulp van vergelijking A.5 worden berekend:

$$\begin{aligned} \sigma_{Q_{\text{Amerongen}}}^2 &= \sigma_{Q_{\text{cilinderschuif}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{Amerongen}}}{\partial Q_{\text{cilinderschuif}}} \right)^2 + \sigma_{Q_{\text{vistrap}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{Amerongen}}}{\partial Q_{\text{vistrap}}} \right)^2 \\ &+ \sigma_{Q_{\text{schuttsluis}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{Amerongen}}}{\partial Q_{\text{schuttsluis}}} \right)^2 + \sigma_{Q_{\text{WKC}}}^2 \left(\frac{\partial Q_{\text{Amerongen}}}{\partial Q_{\text{WKC}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

Invullen van alle individuele afvoerrelaties resulteert uiteindelijk in

$$\sigma_{Q_{\text{Amerongen}}}^2 = \sigma_{Q_{\text{cilinderschuif}}}^2 + \sigma_{Q_{\text{vistrap}}}^2 + \sigma_{Q_{\text{schuttsluis}}}^2 + \sigma_{Q_{\text{WKC}}}^2. \quad (\text{A.20})$$

B Beschikbare variabelen in het IWP

Tabel B.1 geeft een overzicht weer van de parameters die vanuit ODS en LMW ontsloten worden in het IWP. De sluisdeuren en nivelleerschuiven hebben een status die overeenkomt met ongeldig (-1), open (1), tussenstand (2), wacht (3), dicht (4) en gestopt (5).

Tabel B.1: Parameters uit ODS en LMW met beschrijving, eenheid en indien van toepassing de variabele.

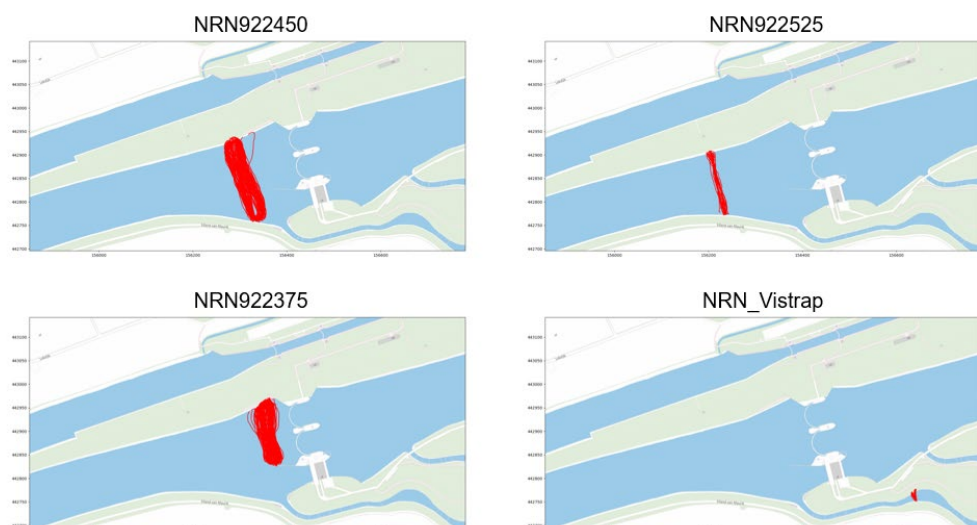
Tag (ODS)	Beschrijving en eenheid	Variabele in H3
AME.AM_ST_LF_WKCE_WKCE_01 .variabelen.turbine1_debiet	Debiet door turbine 1 [m ³ /s]	$Q_{WKC_{T_1}}$
AME.AM_ST_LF_WKCE_WKCE_01 .variabelen.turbine2_debiet	Debiet door turbine 2 [m ³ /s]	$Q_{WKC_{T_2}}$
AME.AM_ST_LF_WKCE_WKCE_01 .variabelen.turbine3_debiet	Debiet door turbine 3 [m ³ /s]	$Q_{WKC_{T_3}}$
AME.AM_ST_LF_WKCE_WKCE_01 .variabelen.turbine4_debiet	Debiet door turbine 4 [m ³ /s]	$Q_{WKC_{T_4}}$
AME.AM_ST_LF_SPRI_LANO_01 .variabelen.stand	Status spoelriool landhoofd noord [-]	
AME.AM_ST_LF_SPRI_LAZU_01 .variabelen.stand	Status spoelriool landhoofd zuid [-]	
AME.AM_ST_LF_SPRI_MINO_01 .variabelen.stand	Status spoelriool middenpijler noord [-]	
AME.AM_ST_LF_SPRI_MIZU_01 .variabelen.stand	Status spoelriool middenpijler zuid [-]	
AME.AM_ST_LF_VSCH_STNO_01 .variabelen.actuele_positie	Stand vizierstuw noord [cm]	
AME.AM_ST_LF_VSCH_STZU_01 .variabelen.actuele_positie	Stand vizierstuw zuid [cm]	
AME.AM_ST_LF_CSCH_CILS_01 .variabelen.hoogte	Cilinderschuifstand [cm]	d_s
AME.AM_SL_LF_SLDR_BEHN_01 .variabelen.stand_schuiven	Status nivelleerschuiven sluisdeur benedenhoofd noord [-]	
AME.AM_SL_BF_SLHD_BEHF_01 .variabelen.stand_deuren	Status sluisdeuren benedenhoofd [-]	
AME.AM_SL_LF_SLDR_BEHZ_01 .variabelen.stand_schuiven	Status nivelleerschuiven sluisdeur benedenhoofd zuid [-]	
AME.AM_SL_LF_SLDR_BOHN_01 .variabelen.stand_schuiven	Status nivelleerschuiven sluisdeur bovenhoofd noord [-]	
AME.AM_SL_BF_SLHD_BOHF_01 .variabelen.stand_deuren	Status sluisdeuren bovenhoofd [-]	
AME.AM_SL_LF_SLDR_BOHZ_01 .variabelen.stand_schuiven	Status nivelleerschuiven sluisdeur bovenhoofd zuid [-]	
AME.AM_SL_LF_SLDR_MIHN_01 .variabelen.stand_schuiven	Status nivelleerschuiven sluisdeur middenhoofd noord [-]	
AME.AM_SL_BF_SLHD_MIHF_01 .variabelen.stand_deuren	Status sluisdeuren middenhoofd [-]	
AME.AM_SL_LF_SLDR_MIHZ_01 .variabelen.stand_schuiven	Status nivelleerschuiven sluisdeur middenhoofd zuid [-]	
Tag (LMW)	Beschrijving en eenheid	Variabele in H3
AMRB	Waterstand bovenstrooms [cm + NAP]	h_{boven}
AMRO	Waterstand benedenstrooms [cm + NAP]	h_{beneden}

C Meetdata van de veldcampagne

Tabel C.1 geeft de gemiddelde gemeten debieten van de meetcampagne weer voor iedere raai en cilinderschuifstand of bovenwaterstand. De locaties van de gevaren raaien en de daarbij horende identificatienummers zijn weergegeven in Figuur C.1.

Tabel C.1: Resultaten van de meetcampagne van september 2023.

ID	\bar{Q}	Cilinderschuifstand d_c [m]	Raai
NRN922375_230914_RWS_ABB_0.0m	-0.4928	0.0	2
NRN922375_230913_RWS_ABB_0.2m	19.228	0.2	2
NRN922375_230911_RWS_ABB_0.3m	24.230	0.3	2
NRN922375_230914_RWS_ABB_0.35m	32.042	0.35	2
NRN922375_230913_RWS_ABB_0.4m	33.666	0.4	2
NRN922375_230913_RWS_ABB_0.5m	41.167	0.5	2
NRN922375_230912_RWS_ABB_0.6m	46.862	0.6	2
NRN922375_230913_RWS_ABB_0.7m	47.974	0.7	2
NRN922375_230911_RWS_ABB_0.8m	64.965	0.8	2
NRN922375_230913_RWS_ABB_1.0m	61.116	1.0	2
NRN922375_230911_RWS_ABB_1.2m	66.586	1.2	2
NRN922375_230912_RWS_ABB_1.6m	70.020	1.6	2
NRN922450_230914_RWS_ABB_0.0m	4.1935	0.0	1
NRN922450_230913_RWS_ABB_0.2m	22.169	0.2	1
NRN922525_230911_RWS_ABB_0.3m	27.965	0.3	1
NRN922450_230914_RWS_ABB_0.35m	31.372	0.35	1
NRN922450_230913_RWS_ABB_0.4m	36.727	0.4	1
NRN922450_230913_RWS_ABB_0.5m	40.550	0.5	1
NRN922450_230912_RWS_ABB_0.6m	45.461	0.6	1
NRN922450_230913_RWS_ABB_0.7m	49.555	0.7	1
NRN922450_230911_RWS_ABB_0.8m	56.708	0.8	1
NRN922450_230913_RWS_ABB_1.0m	57.957	1.0	1
NRN922525_230911_RWS_ABB_1.2m	62.210	1.2	1
NRN922450_230912_RWS_ABB_1.6m	63.121	1.6	1
ID	\bar{Q}	Bovenwaterstand [m NAP]	Raai
NRN_Vistrap_AMER_230914_RWS_ABB_5.9	3.0459	5.9	V
NRN_Vistrap_AMER_230912_RWS_ABB_6.0	4.4411	6.0	V
NRN_Vistrap_AMER_230912_RWS_ABB_6.1	5.6013	6.1	V



Figuur C.1: De locaties van de gevaren raaien.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl