

# **Debietberekening bij gemalen**

**14 maart 2012**



## Debietberekening bij gemalen

Het opstellen van debietformules bij pompgemalen





## Verantwoording

<b>Titel</b>	Debietberekening bij gemalen
<b>Opdrachtgever</b>	Waterschap Brabantse Delta (ir. R. van Ouwkerk) Waterschap Rijn en IJssel (G.J. van den Houten) Waterschap Reest en Wieden (J. Schadenberg)
<b>Projectleider</b>	ing. P. (Paul) Heuseveldt
<b>Auteur(s)</b>	ing. P. (Paul) Heuseveldt
<b>Tweede lezer</b>	ing. C.J.M. (Kees) Rommens
<b>Projectnummer</b>	4818706
<b>Aantal pagina's</b>	28 (exclusief bijlagen)
<b>Datum</b>	14 maart 2012
<b>Handtekening</b>	Ontbreekt in verband met digitale verwerking; dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven

## Colofon

Tauw bv  
Business Unit Water  
Handelskade 11  
Postbus 133  
7400 AC Deventer  
Telefoon +31 57 06 99 91 1  
Fax +31 57 06 99 66 6

Dit document is eigendom van de opdrachtgever en mag door hem worden gebruikt voor het doel waarvoor het is vervaardigd met inachtneming van de rechten die voortvloeien uit de wetgeving op het gebied van het intellectuele eigendom. De auteursrechten van dit document blijven berusten bij Tauw. Kwaliteit en verbetering van product en proces hebben bij Tauw hoge prioriteit. Tauw hanteert daartoe een managementsysteem dat is gecertificeerd dan wel geaccrediteerd volgens:

- NEN-EN-ISO 9001

Kenmerk R001-4818706PHU-wga-V02-NL

---

## Inhoud

<b>Verantwoording en colofon .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding.....</b>	<b>9</b>
1.1 Problematiek .....	9
1.2 Doelstelling.....	9
1.3 Leeswijzer .....	10
<b>2 Achtergronden debietmeting .....</b>	<b>11</b>
2.1 Algemeen .....	11
2.2 Uitleg parameters debietmeting gemalen.....	11
2.2.1 Overzicht parameters .....	11
2.2.2 Stroomsnelheid, debiet.....	12
2.2.3 Opvoerhoogte.....	13
2.2.4 Toerental .....	13
2.2.5 Vermogen (optioneel).....	13
2.3 Opstellen pompcurve .....	15
<b>3 Werkwijze debietberekening .....</b>	<b>17</b>
3.1 Beschrijving op hoofdlijnen.....	17
3.2 Uitwerking werkwijze debietberekening.....	17
3.2.1 Inventariseren Q-H-relatie pomp .....	17
3.2.2 Vaststellen polynoom .....	17
3.2.3 Achtergrond verschalen QH-gegevens .....	18
3.2.4 Vaststellen debietberekeningsformule .....	20
3.2.5 Foutieve werkwijzen verschalen uit de praktijk .....	22
3.3 Haalbare nauwkeurigheid debietberekening .....	23
3.3.1 Algemeen .....	23
3.3.2 Nauwkeurigheid herkomst pompegegevens .....	23
3.3.3 Nauwkeurigheid debietberekening door verschalen .....	24
3.3.4 Nauwkeurigheid meting variabelen .....	24
3.3.5 Totale onnauwkeurigheid debietberekening.....	25
3.3.6 Oorzaken onnauwkeurigheid debietberekening door externe factoren .....	25
3.4 Kosten van het onderzoek.....	26
3.4.1 Kosten scenario 1.....	26
3.4.2 Kosten scenario 2.....	26
3.5 Conclusies.....	27

**Bijlage(n)**

1. Berekening meetonnauwkeurigheid debiet
2. Berekening meetonnauwkeurigheid statische opvoerhoogte



## 1 Inleiding

**In deze rapportage wordt stapsgewijs aangegeven hoe een debietberekening van eenemaal tot stand komt. Verder wordt ingegaan op de herkomst van de gegevens die daarvoor gebruikt kunnen worden en welke voor- en nadelen deze hebben.**

### 1.1 Problematiek

De waterschappen zijn verantwoordelijk voor onder andere het peilbeheer in hun beheersgebied. De gewenste waterpeilen van de verschillende peilvakken zijn vastgelegd in peilbesluiten. Om deze peilen te handhaven worden de poldergemalen ingeschakeld waarbij in eerste instantie gestuurd wordt op de waterpeilen (middels telemetrie).

De poldergemalen lozen een bepaald debiet op het volgende peilvak, boezem of rivier. Het debiet van deze lozing wordt in de huidige situatie op basis van draaiuren berekend aan de hand van een ontwerpdebiet (fabriekswaarde). Bij frequentiegerregelde pompen is het debiet echter niet alleen afhankelijk van de opvoerhoogte maar ook van het toerental. Indien een waterschap hier geen rekening mee houdt, zijn de berekende debietwaarden onjuist danwel met een (grote) onnauwkeurigheid.

Deze onnauwkeurigheid vertaalt zich door in de waterbalansen welke per gebied worden opgesteld. Aangezien op basis van waterbalansen belangrijke keuzes worden gemaakt, zoals peilbesluiten, is het van belang deze onnauwkeurigheid te minimaliseren tot acceptabele waarden.

Deze rapportage heeft betrekking op gemalen die zijn uitgerust met pompen; vijzelgemalen worden niet in beschouwing genomen.

### 1.2 Doelstelling

Waterschappen streven naar een verfijning van de beschikbare data, waaronder de debietgegevens van de poldergemalen. Voor gemalen die een grote invloed hebben op de waterbalans van een gebied ligt het voor de hand om een grotere nauwkeurigheid na te streven. Voor gemalen met een lagere importantie kan men kiezen voor een eenvoudiger scenario. Beide scenario's zullen in deze rapportage aan de orde komen.

De doelstelling van deze rapportage is het beschrijven van de methodiek voor debietberekening bij pompgemalen. Gerelateerde zaken als onnauwkeurigheden en kosten passeren daarbij eveneens de revue.

### **1.3 Leeswijzer**

In deze rapportage worden de volgende onderwerpen aangehaald:

- Hoofdstuk 2: Beschrijving achtergronden debietmeting poldergemaal
- Hoofdstuk 3: Beschrijving werkwijze debietberekening poldergemaal, met nadere uitleg omtrent:
  - Maximale onnauwkeurigheid
  - Kosten van onderzoek voor twee nauwkeurigheidsscenario's

## 2 Achtergronden debietmeting

**Dit hoofdstuk geeft de achtergronden weer met betrekking tot het debietmeten bij een gemaal. Dit wordt toegelicht door de werkwijze van het meten bij een gemaal te beschrijven aan de hand van de belangrijkste parameters.**

### 2.1 Algemeen

Indien men het debiet van een gemaal onder variërende omstandigheden (toerental, opvoerhoogte) wil berekenen, moet men beschikken over betrouwbare basisgegevens van het betreffende gemaal. Dat vereist in een aantal gevallen dat er een debietmeting per pomp wordt uitgevoerd, aan de hand waarvan er zo nauwkeurig mogelijk de Q-H-relatie wordt vastgelegd bij een gedefinieerd toerental. Voordat wordt overgegaan tot het onderwerp debietberekening, wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de achtergronden van het verkrijgen van betrouwbare gegevens voor deze berekening.

Voor de goede orde: de in dit rapport beschreven werkwijze heeft betrekking op veldmetingen op locatie van het gemaal, dus niet op een proefstand in een fabriek.

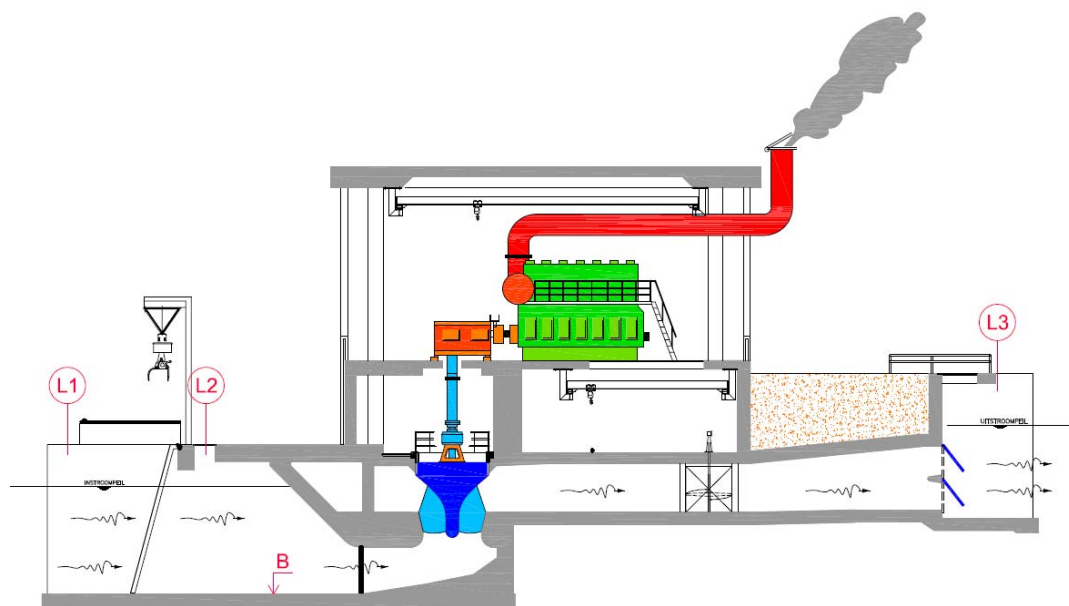
### 2.2 Uitleg parameters debietmeting gemalen

#### 2.2.1 Overzicht parameters

Tijdens een debietmeting worden de volgende parameters vastgelegd:

- Stroomsnelheid [m/s], welke resulteert in een debiet
- Peilen in- en uitstroomzijde [ $m^1$ ] (L1, L2 en L3)
- Pomp- en/of aandrijfstoerental [omw/min]
- Vermogen pompaandrijving [kW] (optioneel)

Hiernavolgend zal het meten van bovengenoemde parameters worden toegelicht aan de hand van figuur 2.1. Het betreft de langsdoorsnede over een gemaal. Met nadruk wordt erop gewezen dat, gezien de grote variatie aan bouwvormen van gemalen, de werkwijze van het meten van geval tot geval kan verschillen. De gekozen langsdoorsnede is een opstelling die veel gelijkenis vertoont met in de praktijk voorkomende situaties.



**Figuur 2.1** Langsdoorsnede pompemaal (met verbrandingsmotor)

### 2.2.2 Stroomsnelheid, debiet

De algemene werkwijze bij debietmetingen is door in het gehele dwarsprofiel (op meerdere plaatsen) de stroomsnelheden te meten met geijkte meetinstrumenten. Op elk punt van een bekend meetraster wordt zodoende de stroomsnelheid bepaald. Door elk deelopervlak van het meetraster te vermenigvuldigen met de stroomsnelheid verkrijgt men een debiet (snelheid x oppervlak). Door alle deeldebieten te totaliseren verkrijgt men een totaal debiet. Hiervoor bestaan meerdere wiskundige methodes welke uitvoerig worden beschreven in het 'Handboek Debietmeten in open waterlopen', STOWA-publicatie 2009-41; voor poldergemalen leent zich de in hoofdstuk 5.1 (van het Handboek) beschreven Velocity-Area methode het beste.

In de voorbereiding van een debietmeting dient men een zo goed mogelijke meetlocatie te selecteren, omdat de meetnauwkeurigheid in hoge mate afhankelijk is van de meetcondities ter plekke; turbulentie dient zoveel mogelijk te worden vermeden. De metingen vinden plaats voor elke pomp afzonderlijk. Omdat op locatie L2 (figuur 2.1) de stroming over voldoende lengte langs de zijwanden wordt geleid, doet zich daar de beste meetlocatie voor. Uiteraard moet er wel de mogelijkheid zijn om bij L2 een volledig dwarsprofiel te meten; bij veel gemalen bevindt zich hier een opening in de kroosvloer ten behoeve van het plaatsen van inspectieschotten. Is dat niet het geval dan wordt in de regel op locatie L1 een dwarsprofiel gekozen.

### 2.2.3 Opvoerhoogte

Er zijn gemalen waarbij de opvoerhoogte vrijwel constant blijft, maar ook gemalen met sterk wisselende opvoerhoogtes (uitmalend op een rivier of getijdengebied). In het algemeen geldt dat het pompdebiet varieert met de opvoerhoogte, zodat het belangrijk is om de pompprestaties te relateren aan de opvoerhoogte. De (statische) opvoerhoogte is gedefinieerd door het peilverschil tussen uit- en instroomzijde van het gemaal, hetgeen in figuur 2.1 wordt geïllustreerd door respectievelijk L3 en L1.

N.B.: door bij de statische opvoerhoogte de weerstandshoogte van het 'hydraulische pad' van de pomp (tussen L1 en L3) op te tellen, verkrijgt men de manometrische opvoerhoogte. Dit is echter een theoretische waarde welke in de dagelijkse praktijk weinig bruikbaar is; voor ontwerpdoeleinden (pompsselectie tijdens ontwerp sessies) wordt de manometrische opvoerhoogte wel veel gebruikt.

### 2.2.4 Toerental

Het (pomp-)toerental is een belangrijke parameter, zeker bij toerengeregelde pompen. Het toerental kan men uitdrukken in de volgende grootheden:

- Elektrische (net-)frequentie (bij elektrische aandrijvingen), in Hz of  $s^{-1}$
- Motortoerental, in omw/min
- Pomptoerental, in omw/min

Pompaandrijvingen zijn veelvuldig voorzien van een tandwielkast tussen motor en pomp. De reden voor de keuze van een tandwielkast is het (tegen relatief lage kosten) kunnen realiseren van een laag pomptoerental, hetgeen in veel gevallen niet met een standaard elektromotor kan worden gerealiseerd. Daarentegen worden de laatste jaren bij nieuwbouw en renovatie steeds vaker tandwielkasten achterwege gelaten. Dit komt door de recente opkomst van betaalbare elektromotoren met een laag toerental. Deze motoren drijven rechtstreeks de pomp aan.

Tijdens een meting heeft het de voorkeur om in het mechanische deel van de aandrijflijn het toerental te meten (en dus niet in het elektrische deel). In de elektromotor vindt namelijk slip plaats waardoor de meting van de frequentie niet geheel het werkelijke toerental benadert. Omdat de reductie van een eventuele tandwielkast een bekend vast gegeven is, doet het niet terzake of het motortoerental of het pomptoerental wordt gemeten; met de reductiewaarde van de tandwielkast als omrekenfactor kan op eenvoudige wijze omrekening plaatsvinden. Een toerentalmeting heeft van zichzelf een hoge nauwkeurigheid; als men de keuze heeft, verdient het de voorkeur om op een sneldraaiende (motor-)as te meten, aangezien dit laatste de hoogste nauwkeurigheid oplevert.

### 2.2.5 Vermogen (optioneel)

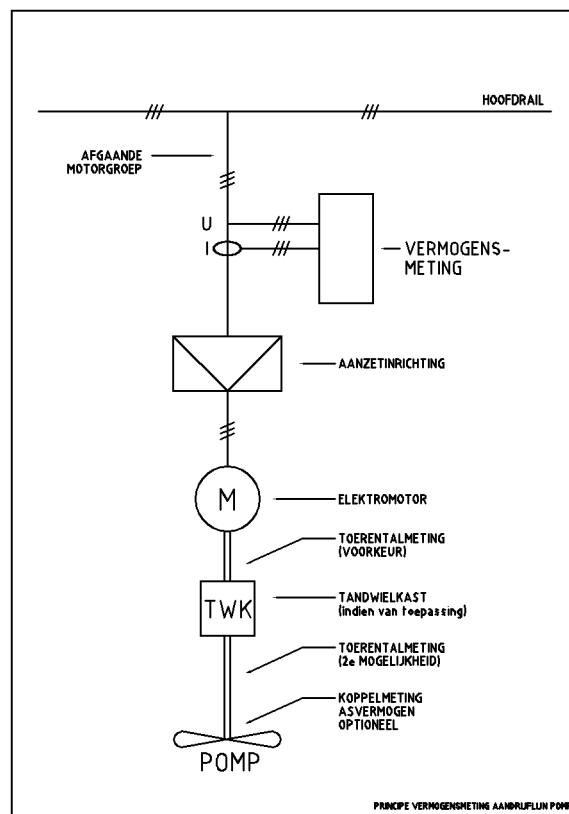
Voor het uitvoeren van een debietmeting is het niet noodzakelijk om een vermogensmeting uit te voeren; dus ook voor de debietberekening is dit niet relevant. Alleen in die gevallen dat men

inzicht in het energieverbruik wenst (bijvoorbeeld bij garantiemetingen) wordt simultaan aan de debietmeting een vermogensmeting uitgevoerd.

De pomp wordt voortbewogen door een aandrijflijn. Daarin bestaan meerdere mogelijkheden. De meest voorkomende zijn:

- Elektromotor met aanzetinrichting (frequentie-omvormer of softstarter)
- Verbrandingsmotor (diesel, gas), meestal in combinatie met tandwielkast

In geval van een elektrische aandrijving is er in vrijwel alle gevallen sprake van een aanzetinrichting <sup>1</sup> in de vorm van een frequentie-omvormer of een softstarter. Het (elektrische) vermogen wordt in de meeste gevallen dan netzijdig gemeten, zodat de verliezen van de aanzetvoorziening zijn inbegrepen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 2.2.



**Figuur 2.2** Principeschema vermogensmeting pomp

<sup>1</sup> Een aanzetinrichting is een elektrische voorziening welke piekstromen tijdens het aanlopen van een elektromotor beperkt. Het doel hiervan is om het elektriciteitsnet minder te belasten. Meestal past men daarvoor een frequentie-omvormer of een softstarter toe. Een frequentie-omvormer biedt als bijkomend voordeel dat tijdens pompbedrijf het toerental regelbaar is, hetgeen met een softstarter niet het geval is.

Verder bestaat de mogelijkheid om het vermogen te meten aan de pompas. Het resultaat van deze meting is het door de pomp gevraagde (as-)vermogen. Dit type meting dient op een vrij stuk as plaats te vinden, waar een zogenaamd rekstrookje op wordt bevestigd. Een rekstrookje bestaat uit een folie met een elektrische geleider welke op de as wordt geplakt. Wanneer een belasting op de as wordt uitgeoefend, vervormt de as en daarmee het opgeplakte rekstrookje. Deze vervorming leidt tot een verandering van de elektrische weerstand in de geleider. Deze elektrische weerstand is een maat voor de belasting c.q. het koppel. Het koppel (T) wordt vervolgens omgerekend naar de eenheid vermogen (P) met de volgende formule (1):

$$P = T \cdot \omega = T \cdot 2\pi \cdot n \quad (1)$$

waarbij:

- P : vermogen in W
- T : koppel in N.m<sup>1</sup>
- $\omega$  : hoeksnelheid in rad/sec
- n : toerental in omw/sec

Voor vermogensmetingen bij verbrandingsmotoren wordt er vrijwel altijd een koppelmeter uitgevoerd aan hetzij de motor-as, hetzij de pomp-as.

### 2.3 Opstellen pompcurve

In paragraaf 2.2 zijn de achtergronden uitgelegd van het debietmeten met de bijbehorende parameters. De basis van een debietmeting is het vastleggen van de relatie tussen het debiet met de bijbehorende opvoerhoogte én (pomp)toerental. Hiervan wordt een pompcurve opgesteld. In hoofdlijnen gaat deze werkwijze als volgt:

Voor de bepaling van het debiet zijn de volgende gegevens nodig:

- Stroomsnelheden in het gemeten dwarsprofiel (natte oppervlak)
- Maatvoering van het meetraster (locatie van de meetpunten)

Door in het meetraster elk deeloppervlak te vermenigvuldigen met de stroomsnelheid verkrijgt men het bijbehorende debiet. Alle deeldebieten getotaliseerd leiden tot een totaal debiet (veel gebruikte eenheden zijn m<sup>3</sup>/sec of m<sup>3</sup>/min).

Voor de bijbehorende opvoerhoogte zijn de volgende gegevens nodig:

- Peil aan instroomzijde van het gemaal (L1 in figuur 2.1)
- Peil aan uitstroomzijde van het gemaal (L3 in figuur 2.1)

Door L3 – L1 berekent men de statische opvoerhoogte over het gemaal (in m<sup>1</sup>).

Bij dit alles wordt tevens het (pomp)toerental gemeten (meestal in de eenheid omw/min).

Kenmerk R001-4818706PHU-wga-V02-NL

---



## 3 Werkwijze debietberekening

**Stapsgewijs wordt beschreven hoe de debietberekening van een pomp tot stand komt. Tevens wordt ingegaan op de nauwkeurigheid van de gegevens die voor de debietberekening noodzakelijk zijn.**

### 3.1 Beschrijving op hoofdlijnen

De volgende stappen leiden tot de afleiding van de debietformule van de pompen van een gemaal:

- Inventariseren Q-H-relatie pompen
- Vaststellen (2<sup>e</sup>-graads) polynoom van de Q-H-relatie
- Vaststellen debietberekenningsformule

### 3.2 Uitwerking werkwijze debietberekening

#### 3.2.1 Inventariseren Q-H-relatie pomp

De benodigde gegevens van de Q-H-relatie van de pomp kunnen op meerdere manieren worden verkregen. De bronnen waarop deze relatie gebaseerd wordt kunnen als volgt zijn:

- Documentatie, zoals fabrieksgegevens
- Meetgegevens

Afhankelijk van de importantie die wordt gegeven aan het eindresultaat kan al dan niet worden besloten om een ijking uit te voeren van de pompen van een gemaal. Het voordeel van een ijking is dat dit de nauwkeurigheid van de debietberekening verhoogt.

#### 3.2.2 Vaststellen polynoom

Om het debiet te kunnen berekenen dient als eerste stap de QH-relatie in formulevorm te worden gevat. Voor pompen is de QH-relatie een 2<sup>e</sup>-graad polynoom (formule 2). Aan de hand van de beschikbare Q-H-gegevens stellen we de polynoom vast. Voor een voorbeeld van een grafiek met polynoom zie figuur 3.1. De polynoom heeft de volgende vorm:

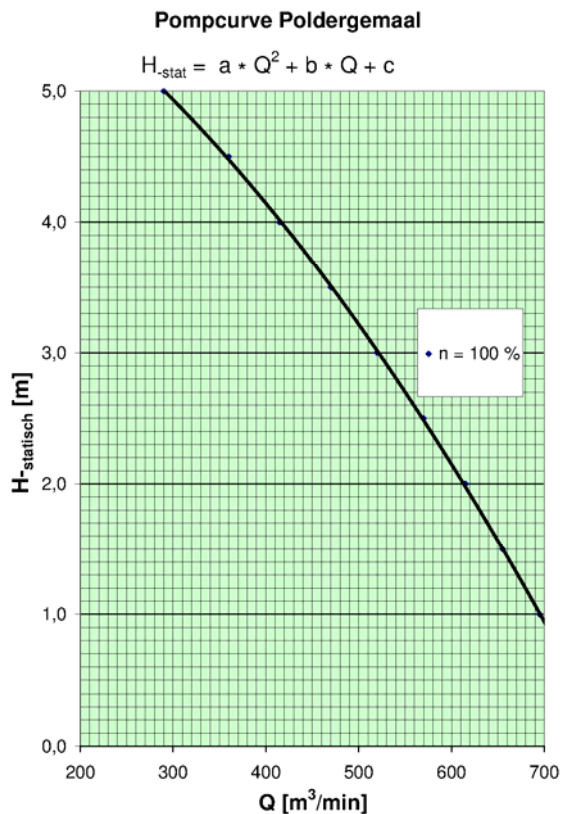
$$H_{st} = a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c \quad (2)$$

In deze formule is de betekenis van de variabelen en parameters als volgt:

- H<sub>st</sub> : statische opvoerhoogte [m<sup>1</sup>]
- Q : capaciteit [m<sup>3</sup>/sec]
- a, b en c : parameters [-]

De waardes van a, b en c worden bepaald uit de 'best fit' van de pompgrafiek.

De zo verkregen relatie geldt voor het toerental  $n=100\%$ . Hoe deze verschaald <sup>2</sup> moet worden naar een ander toerental wordt in de volgende paragrafen toegelicht.



**Figuur 3.1** Pompcurve met 2<sup>e</sup> graad polynoom

### 3.2.3 Achtergrond verscalen QH-gegevens

1. Om het werkpunt van een pomp te verscalen naar een ander toerental dient men te werk te gaan volgens de verscalingswetten. De twee belangrijkste verscalingswetten <sup>3</sup> luiden:

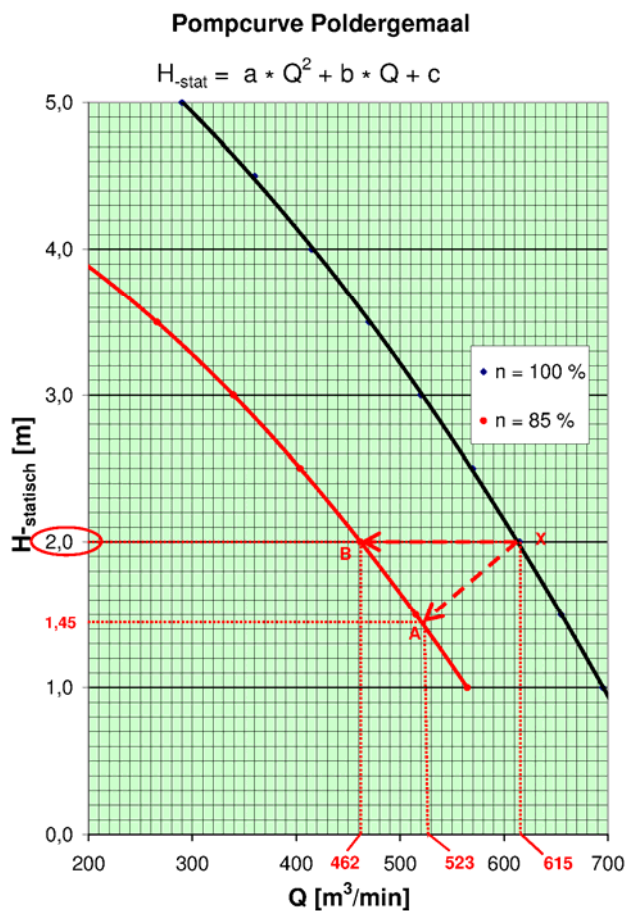
$$Q_2 = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^1 \cdot Q_1 \quad (3)$$

<sup>2</sup> Verscalen is het transformeren (vergroten of verkleinen) van een waarde met een schaalfactor

<sup>3</sup> De verscalingswetten zijn in principe van toepassing op de manometrische opvoerhoogte (de term  $H$ ). De statische opvoerhoogte bedraagt  $H_{\text{man}} - H_w$ . De waarde  $H_w$  ( $\Sigma$  systeemverliezen) is de som van alle hydraulische verliezen in het systeem. Aangezien nagenoeg alle optredende verliezen een kwadratische verhouding hebben ten opzichte van de stroomsnelheid mag de formule voor zowel de statische als de manometrische opvoerhoogte worden toegepast.

$$H_2 = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cdot H_1 \quad (4)$$

De formules 3 en 4 zijn gelijktijdig van toepassing bij verscaling, waarmee bedoeld wordt dat zowel de capaciteit als de opvoerhoogte wijzigt door het wijzigen van het toerental (de schaalfactor is hier de verhouding van het nieuwe toerental  $n_2$  tot het oorspronkelijke toerental  $n_1$ ). Doordat de opvoerhoogte eveneens verandert met de schaalfactor (en dit bovendien kwadratisch doet), blijkt dat de capaciteit niet lineair afhankelijk is van de schaalfactor. Dit wordt geïllustreerd in figuur 3.2.



**Figuur 3.2** Verscaling van een werkpunt X bij toerentalverandering van 100 naar 85 %

Uit de verschalingswetten volgt dat het werkpunt X transformeert naar werkpunt A. Omdat bij een poldergemeal de statische opvoerhoogte niet gelijktijdig mee verandert, wil men deze constant houden. Daarom is het nodig om bij debietberekening zowel het toerental als de opvoerhoogte

vast te kunnen leggen in een formule. Hierdoor komt men in werkpunt B uit (zie figuur 3.2). Hoe men tot een dergelijke formule komt, wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

### 3.2.4 Vaststellen debietberekeningsformule

Om tot een bruikbare debietberekeningsformule te komen is nog het volgende nodig:

- De polynoom (formule 2) moet worden opgelost met de wortel- of abc-formule 5. Het betreft de in de algebra toegepaste oplossingsmethode voor vierkantsvergelijkingen. Daarbij wordt een 2<sup>e</sup>-graads polynoom opgelost met de discriminant-methode (zie hiervoor ook <http://nl.wikipedia.org/wiki/Vierkantsvergelijking>)

$$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c \quad (5)$$

Hierin is:

- D : discriminant (de oplossing van de vierkantsvergelijking)
  - a, b en c : parameters [-]
- De met de "abc-formule" gevonden oplossing is nog niet bruikbaar om voor elk gewenst toerental een uitkomst van het debiet te verkrijgen. Daarom wordt de gevonden formule gesubstitueerd met de verschalingswetten voor pompen. Deze verschalingswetten zijn al eerder genoemd, maar zijn voor de duidelijkheid hier nogmaals weergegeven:

$$Q_2 = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^1 \cdot Q_1$$

$$H_2 = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cdot H_1$$

Het resultaat van bovengenoemde werkwijze is:

$$Q_2 = \frac{-b \cdot n_2 - \sqrt{\left( \frac{b \cdot n_2}{n_1} \right)^2 - 4 \cdot a \cdot \left( \frac{c \cdot n_2^2}{n_1^2} - H_{st} \right)}}{2 \cdot a} \quad (6)$$

De variabelen in formule (6) zijn:

- $n_1$  (oorspronkelijk toerental bij 100 %, in omw/min)
- $n_2$  (gewijzigd toerental bij x %, in omw/min)
- $H_{st}$  (statische opvoerhoogte in m<sup>1</sup>)

De coëfficiënten a, b en c zijn identiek aan die van formules 2 en 5.

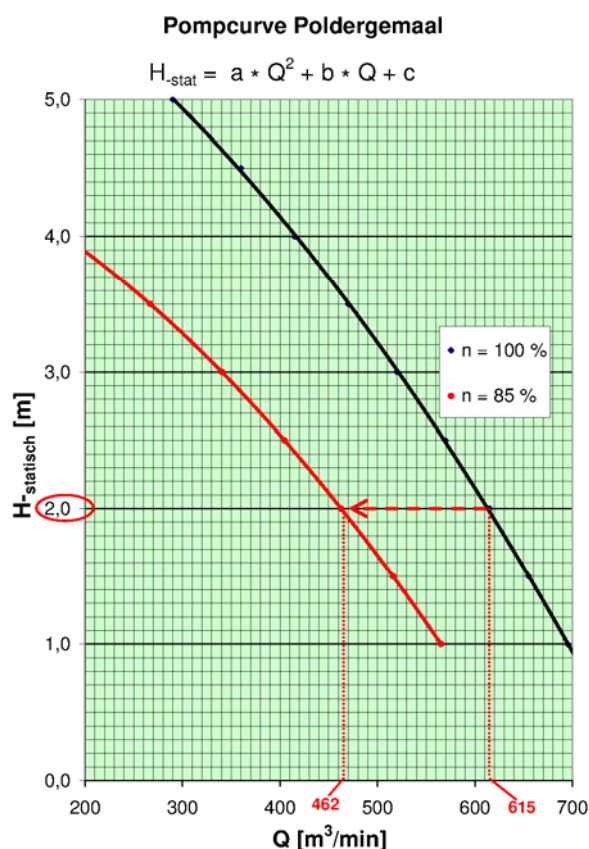
Het eerder vermelde pompcurve is opnieuw weergegeven in figuur 3.3 voor het volgende rekenvoorbeeld. Stel bij een poldergemaal is de situatie als volgt:

- Opvoerhoogte (Hstat) : 2,0 m
- Toerental  $n_1$  : 100 %
- Debiet  $Q_1$  : 615 m<sup>3</sup>/min

De parameters a,b en c behorende bij de polynoom zijn:

- a :  $-7,0 \cdot 10^{-6}$
- b : -0,003
- c : 6,4669

Vervolgens gaat men het toerental verlagen naar 85 % ( $n_2$ ), waarbij de opvoerhoogte niet verandert. Het nieuwe debiet  $Q_2$  berekent men vervolgens met formule 6. De uitkomst bedraagt: 462 m<sup>3</sup>/min.



**Figuur 3.3 Voorbeeld debietberekening bij n=85 %**

### 3.2.5 Foutieve werkwijzen verscalen uit de praktijk

In de praktijk blijken de volgende foutieve werkwijzen te worden gevolgd, welke tot onjuiste berekende debieten leiden:

- Toepassen van een lineaire schaalfactor van het toerental (in voorgaande paragrafen is uitgebreid toegelicht dat het verscalen van het debiet geen lineaire functie is)
- Gebruiken van niet-representatieve parameters

#### *Niet-representatieve parameters*

Tot deze categorie behoort bijvoorbeeld het gebruik van de grootheid 'ampèrage' (stroomsterkte, A) om daarmee het debiet te verscalen. Dit kan tot onjuiste uitkomsten leiden, omdat:

- Het ampèrage niet lineair is bij verscaling van het toerental (namelijk een 3<sup>e</sup> macht), zie formule 7 hieronder. Hierbij moet men bedenken dat de stroomsterkte evenredig is met het elektrisch vermogen, zie formule 8
- Bij toerentalverandering het vermogen eveneens onderhevig is aan veranderingen in het getotaliseerde rendement  $\eta$  van de aandrijflijn én de pomp, zie formule 7
- Bij toerentalverandering het opgenomen vermogen eveneens onderhevig is aan veranderingen de  $\cos\varphi$ , zie formule 8
- Bij verscaling van het toerental hebben meerdere factoren gelijktijdig invloed op het nieuwe werkpunt; in paragraaf 3.2.3 is toegelicht dat bij toerentalverandering de opvoerhoogte eveneens wijzigt

De verschalingswet voor het vermogen (P) luidt:

$$P_2 = P_1 \cdot \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3 \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (7)$$

Tevens is bij een elektromotor de relatie tussen elektrisch vermogen en stroomsterkte als volgt:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3} \quad (8)$$

In bovenstaande formules is de betekenis van de variabelen als volgt:

- P : vermogen (in W)
- n : toerental (in omw/min of omw/sec)
- $\eta$  : rendement (-)
- U : spanning (in Volt)
- I : stroomsterkte (in Ampère)
- $\cos\varphi$  : spreek uit: kosinusfi, waarbij  $\varphi$  (in graden) de fasehoek is tussen U en I. De  $\cos\varphi$  varieert tussen 0 en 1
- $\sqrt{3}$  : (-)

### 3.3 Haalbare nauwkeurigheid debietberekening

#### 3.3.1 Algemeen

De nauwkeurigheid van de uitkomsten van de debietberekening is van meerdere factoren afhankelijk. Deze luiden:

- Nauwkeurigheid herkomst pompgegevens
- Nauwkeurigheid verschalen met formule debietberekening (zie formule 6)
- Nauwkeurigheid meting variabelen (peilen en toerental)

In feite spreekt men van de *on*nauwkeurigheid. Voor de berekening van de totale onnauwkeurigheid wordt de volgende basisformule gebruikt:

$$e_{tot} = \sqrt{(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_n^2)} \quad (9)$$

Waarin:  $e$  = onzekerheid (dimensieloos)

#### 3.3.2 Nauwkeurigheid herkomst pompgegevens

Een belangrijk deel van de onnauwkeurigheid van de debietberekening komt voor rekening van de herkomst van de pompgegevens. In hoofdlijnen onderscheidt men twee mogelijke scenario's, te weten:

1. De herkomst van de pompgegevens berust op fabrieksopgave
2. De pompgegevens zijn verkregen door middel van ijking

Ad 1 (scenario 1):

Gaat men daarbij uit van fabrieksgegevens dan weet men niet wat de nauwkeurigheid in werkelijkheid is. Dat hangt af van de kennis en kundigheid van de fabrikant en de aannames die deze bij de vaststelling van de fabrieksgegevens heeft gedaan. In ongunstige gevallen kan de afwijking oplopen tot orde grootte  $\pm 8$  %.

Ad 2 (scenario 2):

Door een ijking uit te voeren kan men de onnauwkeurigheid van de debietberekening terugbrengen tot  $\pm 2,0 - 2,5$  %. Voor de onderbouwing van de meetonnauwkeurigheid zie bijlage 1. Hierin zijn de factoren genoemd die van invloed zijn op de onnauwkeurigheid met de bijbehorende waarden. Relatief de grootste onnauwkeurigheid is de meetfout van de stroomsnelheidsmeter. Daarna komt de onnauwkeurigheid door variatie van het peil in het meetprofiel. In de praktijk zal het peil gedurende een meting (welke 5 tot 10 minuten duurt) maximaal 5 cm verlopen. Is het verloop groter dan moet (noodgedwongen) de meettijd worden bekort.

Als meetinstrument is in de onderbouwing uitgegaan van de inzet van Ott-molens. Een ander veel gebruikt meetinstrument is een ADCP (Acoustic Current Doppler Profiler). Met een ADCP wordt een totale meetonnauwkeurigheid aangehouden die in dezelfde orde grootte ligt als die genoemd voor Ott-molens (zie Handboek Debietmetingen).

Voor ADCP's is het daarbij wel van belang dat de apparatuur is voorzien van:

- Vier meetkoppen
- 'Bottom-tracking': software welke het mogelijk maakt om het drijflichaam waar de meetapparatuur aan bevestigd is met een vloeiende doorgaande beweging door het dwarsprofiel te trekken, doordat de software zelf de afgelegde weg door het dwarsprofiel registreert

Afgezien van de meetapparatuur is de *meetlocatie* met bijbehorende meetomstandigheden voor een belangrijk deel verantwoordelijk voor de meetonnauwkeurigheid. Heeft men niet de beschikking over een goede meetlocatie, dan kan de meetonnauwkeurigheid oplopen (voorbeelden van 5 % tot zelfs 10 % zijn bekend). Over de keuze van de meetlocatie in hoofdstuk 2 al het nodige vermeld.

Voor het nauwkeurig kunnen bepalen van een pompcurve is het wenselijk om minimaal 4, doch bij voorkeur 6 meetpunten te hebben met een zo groot mogelijke spreiding over het werkgebied van de pomp. Door deze punten wordt een curve getrokken door de 'best fit' over alle metingen. Meestal wordt de fabriekscurve ernaast gehouden om de meetgegevens hiermee te kunnen vergelijken.

### **3.3.3 Nauwkeurigheid debietberekening door verschalen**

De onnauwkeurigheid van de uitkomst van de debietformule hangt af van de mate waarin men verschaalt, dat wil zeggen de reikwijdte van de extrapolatie (vanuit de oorsprongsgegevens naar de gewenste gegevens). Omdat in de formule kwadratische componenten zitten, wordt de onnauwkeurigheid groter naarmate men over een groter traject extrapoleert. Toch valt dit effect in de praktijk mee, waarbij aan orde grootte van maximaal  $\pm 1$  % moet worden gedacht.

### **3.3.4 Nauwkeurigheid meting variabelen**

De variabelen die ingevoerd worden voor de debietberekening, worden betrokken uit actuele meetgegevens. De hierboven genoemde variabelen hebben de volgende meetonnauwkeurigheden:

#### *Opvoerhoogte (H-statisch)*

De peilen worden gemeten door middel van drukmeting. De totale onnauwkeurigheid van de meting van de opvoerhoogte is door ons vastgesteld op  $\pm 2,3$  % (zie bijlage 2). Door verwerking van dit gegeven in de debietformule is het effect op de uitkomst van het debiet geringer.



Als voorbeeld: bij Hst = 1,5 meter is het effect op de uitkomst van het debiet  $\pm 0,2$  %.  
 Kanttekening hierbij is dat naarmate de opvoerhoogte kleiner wordt, het effect ongunstiger wordt.

#### *Toerental*

Bij de bepaling van de meeton nauwkeurigheid van het toerental gaan wij ervan uit dat er sprake is van een vaste meetinrichting op een aandrijf as. De meeton nauwkeurigheid hiervan is verwaarloosbaar ( $\ll \pm 0,01$  %).

### **3.3.5 Totale onnauwkeurigheid debietberekening**

Samenvattend is de uitkomst van de onnauwkeurigheid van de debietberekening als volgt:

Onnauwkeurigheid per onderdeel	Scenario 1 (fabrieksgegevens)	Scenario 2 (ijking)
Brongegevens	$\pm 8,0$ %	$\pm 2,5$ %
Gebruik debietformule	$\pm 1,0$ %	$\pm 1,0$ %
Meting variabelen input formule	$\pm 0,2$ %	$\pm 0,2$ %
<b>Totaal</b>	<b><math>\pm 8,1</math> %</b>	<b><math>\pm 2,7</math> %</b>

Uit de tabel blijkt dat de onnauwkeurigheid van een debietberekening kan worden verkleind van circa 8 % naar 3 % door het uitvoeren van een debietmeting. Individuele gevallen kunnen een ander beeld opleveren.

### **3.3.6 Oorzaken onnauwkeurigheid debietberekening door externe factoren**

Onze inschatting is dat voor het grootste deel van de gemalen de vastgestelde debietberekening in de loop van de tijd niet of nauwelijks meer zal verlopen. Echter kan door bijzondere (locale) omstandigheden de relatie die is vastgesteld voor de debietberekening na verloop van tijd niet meer juist zijn. Mogelijke oorzaken hiervoor kunnen zijn:

- Verloop van de niveaumeting (welke als parameter in de formule zit)
- Slijtage van de pomp (naarmate een pomp een grotere opvoerhoogte heeft, is het toerental hoger, waardoor de kans op slijtage groter is)
- Aangroei op de waaierbladen van de pomp met bestanddelen welke zich van nature in het water bevinden (ijzerhoudende bestanddelen, kroos/vegetatie, et cetera)
- Cavitatie (erosie op de waaierbladen ten gevolge van dampbellen die door onderdruk imploderen)

Het is onmogelijk om in deze rapportage aan te geven wat de invloed is van bovenstaande factoren op de debietberekening. Als het zich al voordoet, is het per situatie verschillend.

In zijn algemeenheid kan men stellen dat grote pompen welke op een langzaam toerental draaien, het minst gevoelig zijn voor bovenstaande factoren.

Door regelmatige controles van niveaumetingen en pompinspecties kan men voorkomen dat bovengenoemde factoren een te grote rol gaan spelen. Wanneer men gemalen regelmatig inspecteert, zal men inzicht verkrijgen welke gemalen gevoelig zijn voor bepaalde factoren.

### **3.4 Kosten van het onderzoek**

In de voorgaande paragraaf is gesproken over twee scenario's. Het verschil tussen beide scenario's zit in de herkomst van de brongegevens (die in de vervolgstap leiden tot de debietformule).

Omdat scenario 2 (debietberekening met ijkgegevens als bron) leidt tot een hogere nauwkeurigheid van de debietwaarde, ligt het voor de hand dat men bij een gemaal met een hoge importantie voor dit scenario zal kiezen. Deze keuze zal echter per locatie en per waterschap individueel worden genomen.

De hierna te noemen bedragen zijn een indicatie en kunnen afhankelijk van de werkelijke situatie hoger of lager uitvallen.

#### **3.4.1 Kosten scenario 1**

Deze kostenopzet geldt voor het genereren van een formule voor debietberekening vanuit de beschikbare documentatie, dat wil zeggen een pompgrafiek welke bij nieuwbouw door de fabrikant is verstrekt.

De advieskosten voor scenario 1 bedragen circa EUR 2.000,- exclusief btw.

Het resultaat bestaat op hoofdlijnen gezien uit:

- Korte rapportage
- Pompgrafiek
- Debietformule (voor alle pompen identiek)

#### **3.4.2 Kosten scenario 2**

Voor scenario 2 wordt een ijking uitgevoerd voor de pompen van een gemaal. Uitgangspunten zijn:

- Twee-pompsgemaal
- Middelgroot gemaal (60 – 600 m<sup>3</sup>/min per pomp)
- Meting kan op één dag worden uitgevoerd

De advieskosten voor scenario 2 bedragen circa EUR 5.200,- exclusief btw.

In dit bedrag zal in de praktijk enige spreiding zijn, vanwege de complexiteit die per object kan verschillen. Kostenverhogende factoren zijn:

- Metingen bij zee- en riviergemalen, vanwege de wisselende buitenpeilen. Grofweg kan men stellen dat de kosten dan zo'n 50 % hoger zijn
- Gemalen met meer dan twee pompen. Voor een drie- of vierpomps gemaal zijn de kosten eveneens zo'n 50 % hoger
- Metingen bij grote gemalen (> 600 m<sup>3</sup>/min per pomp). Kosten op aanvraag

Het product bestaat globaal gezien uit:

- Meetrapportage
- Pompgrafieken (gemeten)
- Debietformules (voor alle pompen uniek)

### **3.5 Conclusies**

Samenvattend kan men de volgende conclusies trekken:

- De maximale onnauwkeurigheid van een debietberekening is circa 2,0 – 2,5 % indien de uitgangsgesgevens zijn verkregen op basis van een ijking
- Voor de debietberekening met een formule (zie paragraaf 3.2.4, formule 6) zijn twee te meten parameters nodig, te weten de opvoerhoogte en het toerental

Kenmerk R001-4818706PHU-wga-V02-NL

---

# Bijlage

## 1

Berekening meetonnauwkeurigheid debiet



## Verificatie debietmeting conform ISO 3354:2008

Project      Gemaal X  
Datum        6-jan-12

### 1. Locale (stroom-)snelheid

#### 1a. Willekeurige fout

Nr.	Onderdeel	Meetfout	Normverwijzing
$e_1$	Meting omwentelingen Ott C31	0,50 %	
$e_2$	---	%	
$e_3$	---	%	
$e_4$	---	%	
$e_5$	---	%	

**Subtotaal 1a** **0,50 %**

#### 1b. Systematische fout

$e_6$	Meetapparatuur Ott C31	0,83 %	
$e_7$	Turbulentie	1,00 %	Annex H 1.2
$e_8$	Snelheidsgradient	0,50 %	Annex H 1.3
$e_9$	Hoek Ott-molen	0,70 %	Annex H 1.4
$e_{10}$	Blockage-effect	0,00 %	Annex B en H 1.5

**Subtotaal 1b** **1,56 %**

#### 1. Willekeurige en Systematische fout

$e_w$	Willekeurige fout	0,50 %	
$e_q$	Systematische fout	1,56 %	

**Totaal Locale (stroom-)snelheid** **1,64 %**

### 2. Debietmeting

#### 2a. Willekeurige fout

$e_{11}$	Locale (stroom-)snelheid (uit 1.)	1,64 %	
$e_{12}$	Positie molens	0,10 %	
$e_{13}$	Variatie in peil tpv meetprofiel	0,77 %	
$e_{14}$	Variatie in opvoerhoogte/peilaflezing	0,25 %	
$e_{15}$	---	%	

**Subtotaal 2a** **1,83 %**

#### 2b. Systematische fout

$e_{16}$	Maatvoering nat opp	0,05 %	Annex J 3.4
$e_{17}$	Aantal meetpunten	0,00 %	Annex H 4 en J 3.5
$e_{18}$	Integratie-methode	1,00 %	Annex H 2
$e_{19}$	Randinvloeden	0,15 %	Hfst 8.3
$e_{20}$	---	%	

**Subtotaal** **1,01 %**

#### 2. Willekeurige en Systematische fout

$e_w$	Willekeurige fout	1,83 %	
$e_q$	Systematische fout	1,01 %	

**Totale meetfout debietmeting** **2,1 %**





# Bijlage

## 2

Berekening meetonnauwkeurigheid statische opvoerhoogte



## Verificatie meting opvoerhoogte conform ISO 3354:2008

Project      Gemaal X  
Datum        6-jan-12

### 1. Drukmeting

#### 1a. Willekeurige fout

Nr.	Onderdeel	Meetfout	Normverwijzing
$e_1$	Stroming langs drukopnemer	0,00 %	
$e_2$	Variatie niveau door stroming / golfwerking (instroming)	1,25 %	
$e_3$	Variatie niveau door stroming / golfwerking (uitstroming)	1,25 %	
$e_4$	Variatie instroompeil door afmaling	1,25 %	
$e_5$	Variatie uitstroompeil door opmaling	0,00 %	
<b>Subtotaal 1a</b>		<b>2,17 %</b>	

#### 1b. Systematische fout

$e_6$	Meetapparatuur instr $\pm 1$ cm (op meetbereik van 2 m)	0,50 %	
$e_7$	Meetapparatuur instr $\pm 1$ cm (op meetbereik van 2 m)	0,50 %	
$e_8$		%	
$e_9$		%	
$e_{10}$		%	
<b>Subtotaal 1b</b>		<b>0,71 %</b>	

#### 1. Meting H-statisch

$e_w$	Willekeurige fout	2,17 %	
$e_q$	Systematische fout	0,71 %	
<b>Totaal H-statisch</b>		<b>2,28 %</b>	

<b>Totale meetfout H-statisch</b>	<b>2,3 %</b>
-----------------------------------	--------------

