

Auteur ir. A.H.T.M. (Alet) van den Brink, Kropman Installatietechniek B.V.

De invloed van een niet-constant drukverschil op de klepselectie

Vanuit het temperatuurverloop en de hieraan gekoppelde vorm van de warmteafgifte karakteristiek [1] en de bepaling van de “ideale” autoriteit [2] is de verbinding gemaakt met de bestaande kennis. Deze nieuwe kennis is in [3] uitgebreid door de waterintrede- of luchtuitredetemperatuur niet constant te veronderstellen. Een laatste stap in deze reeks artikelen is om het drukverschil onder de loop te nemen. Alhoewel de huidige methode uitgaat van een constant drukverschil, is het aannemelijker dat het drukverschil niet-constant is. Dit kan veroorzaakt worden door een pomp met een constant toerental of door een van de moderne pompregelingen. Een voorbeeld van een moderne pompregeling is het dalend drukverschil bij een dalend debiet. Wat is het effect van het niet-constante drukverschil op de vermogensafgifte karakteristiek en hoe hou je hier, indien mogelijk, rekening mee bij de klepselectie. In dit artikel (5a) wordt een introductie gegeven over de achtergrond van de bestaande kennis bij een constant drukverschil. Vervolgens wordt in een vervolgartikel (5b) vanuit deze kennis de invloed van een niet-constant drukverschil op de klepkeuze en de k_v -sprong inzichtelijk gemaakt aan de hand van een nieuwe afleiding.

Inleiding

Een goed geselecteerde klep is onderdeel van een goed functionerende installatie. Daarom wordt er tijdens opleidingen in de installatietechniek hier de nodige aandacht aan gegeven. Voor het selecteren is een set rekenregels voorhanden. Bij de huidige set rekenregels wordt uitgegaan van een constant drukverschil bij het gedetailleerd in beeld brengen van de vermogensafgifte ten opzichte van de aansturing of klephoogte. Zoals bij elk model of vergelijking, is dit een benadering van de werkelijkheid. De vermogensafgifte van een warmtewisselaar is immers mede afhankelijk van het toegevoerde debiet en de temperatuur ervan. De invloed van een niet constante wateraanvoertemperatuur is gegeven in een

eerder artikel [3]. Het debiet is afhankelijk van onder andere de klepstand en het beschikbare pompdrukverschil. Echter, wijzigd dit drukverschil, is voor hetzelfde debiet een andere klepstand noodzakelijk voor hetzelfde vermogen. Vooral een wijzigend drukverschil via een zogenaamde afvallende karakteristiek wint aan populariteit in verband met energiebesparing. Echter, het effect op de gelijkmatigheid van de vermogensafgifte en klepkeuze is, zover bij de auteur bekend, nog niet eerder onderzocht of vertaald in formules of rekenregels. Het is daarom van belang om inzicht te krijgen hoe een niet-constant drukverschil van een circulatiepomp de klepselectie beïnvloed.

Het debiet bij een klepstand met waarde k_v [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{bar}^{-1/2}$], een bekende autoriteit A [-] en een constant drukverschil wordt berekend met de bekende vergelijking (1) [4]. Voor een alternatieve benadering van het niet-constante drukverschil – bijvoorbeeld bij toepassing van een pomp met een constant toerental – kan deze waarde vermenigvuldigd worden met een constante waarde. Hiermee wordt de invloed van de stijgende curve bij een dalend debiet verdisconteerd. In de literatuur wordt hiervoor een factor 1,3 gevonden [5]. Een kanttekening is dat deze factor constant is en dus wordt gebruikt voor het hele inzetbereik van de regelklep. De berekende debieten zijn dus enerzijds nauwkeuriger rondom het 0-gebied van de pomp. Anderzijds, de berekende debieten zijn minder nauwkeurig rondom het ontwerpdebiet van de pomp. Deze benadering is herkenbaar voor de pompen met vaste toerentallen. Omdat pompen in de gebouwde omgeving meer in deellast functioneren – dus met een lager debiet – en de vermogensvraag veelal gekoppeld is aan de buitenluchttemperatuur, is deze benadering zeker te rechtvaardigen.

Met de opkomst van de toerengeregelde pompen – bijvoorbeeld met een constant drukverschil – geeft deze factor 1,3 echter een te hoog debiet over het gehele gebied. Het is dan aan te bevelen om deze waarde 1,3 te verlagen naar 1 indien de pomp wordt ingesteld op het drukverschil uit de ontwerp. Toerengeregelde pompen worden veelal ingesteld op een constant drukverschil waarbij dit drukverschil intern (over de pomp) of extern (in het distributienet) gemeten wordt.

Moderne toerengeregelde pompen hebben inmiddels hun intrede gedaan en er zijn diverse instellingen mogelijk. Instellingen als een constant drukverschil of een constant toerental zijn nog steeds mogelijk maar bijvoorbeeld ook een dalend drukverschil bij een dalend debiet is instelbaar of programmeerbaar in externe software.

Het is dan ook aangewezen om de bestaande rekenregels uit te breiden om het effect van de moderne pompregelingen op de selectie van regelkleppen en autoriteiten inzichtelijk te maken. De resultaten worden onderling met elkaar vergeleken op basis van de gelijkmatigheid van de vermogens-afgifte ten opzichte van een lineaire aansturing.

In [1][2] is aangegeven dat moderne installaties (HT-koeling, LT-verwarming) niet vanzelf voldoen aan de bestaande vuistregels en dat met name de waterzijdige weersafhankelijke regeling a^* (a cursief ster) laat stijgen [3]. Maar wat betekent een variabel drukverschil nu op de klepselectie? In dit artikel (5a) wordt enige achtergrond gegeven van de bestaande kennis bij een constant drukverschil waarna in het vervolgartikel (5b) de invloed van een niet-constant drukverschil wordt uitgewerkt.

LET OP: het is goed om te benadrukken dat alle vergelijkingen in dit artikel bij **EN** a^* , zoals gebruikt in deze serie artikelen [1][2][3] **EN** bij a [4][5] gebruikt kunnen worden. Dit is mogelijk omdat de hier genoemde vergelijkingen alleen de verhouding tussen klepstand en debiet weergegeven. Ter herinnering, deze benadering(en) is/zijn gemaakt voor een constant waterzijdig debiet en constant luchtzijdig debiet [2] en is bekend als module 5 [5].

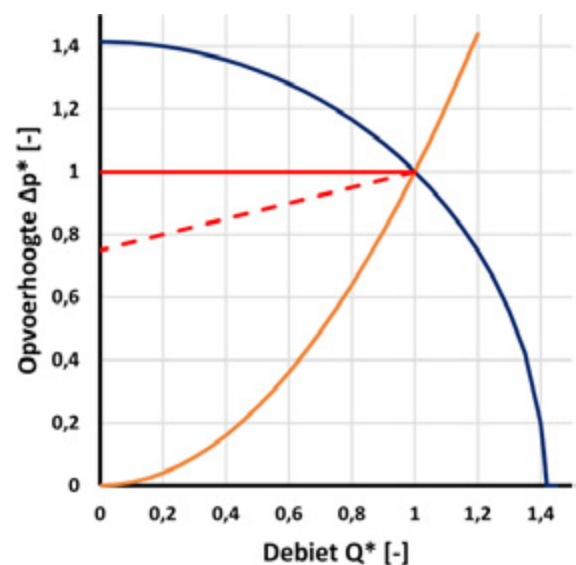
Introductie

De ideale autoriteit is gedefinieerd als de meest gelijkmatige vermogensafgifte bij een lineaire aansturing [2]. Dit bij een constant drukverschil [3]. Een veranderd drukverschil kan derhalve invloed hebben op de keuze van de autoriteit en/of op de keuze van de grondkarakteristiek. Bij detail-berekeningen wordt vanuit de aansturing of lichte hoogte van de klep de bijbehorende k_v -waarde van de klep berekend. De k_v -waarde kan berekend worden voor een klep met een lineaire of een equi-procentuele

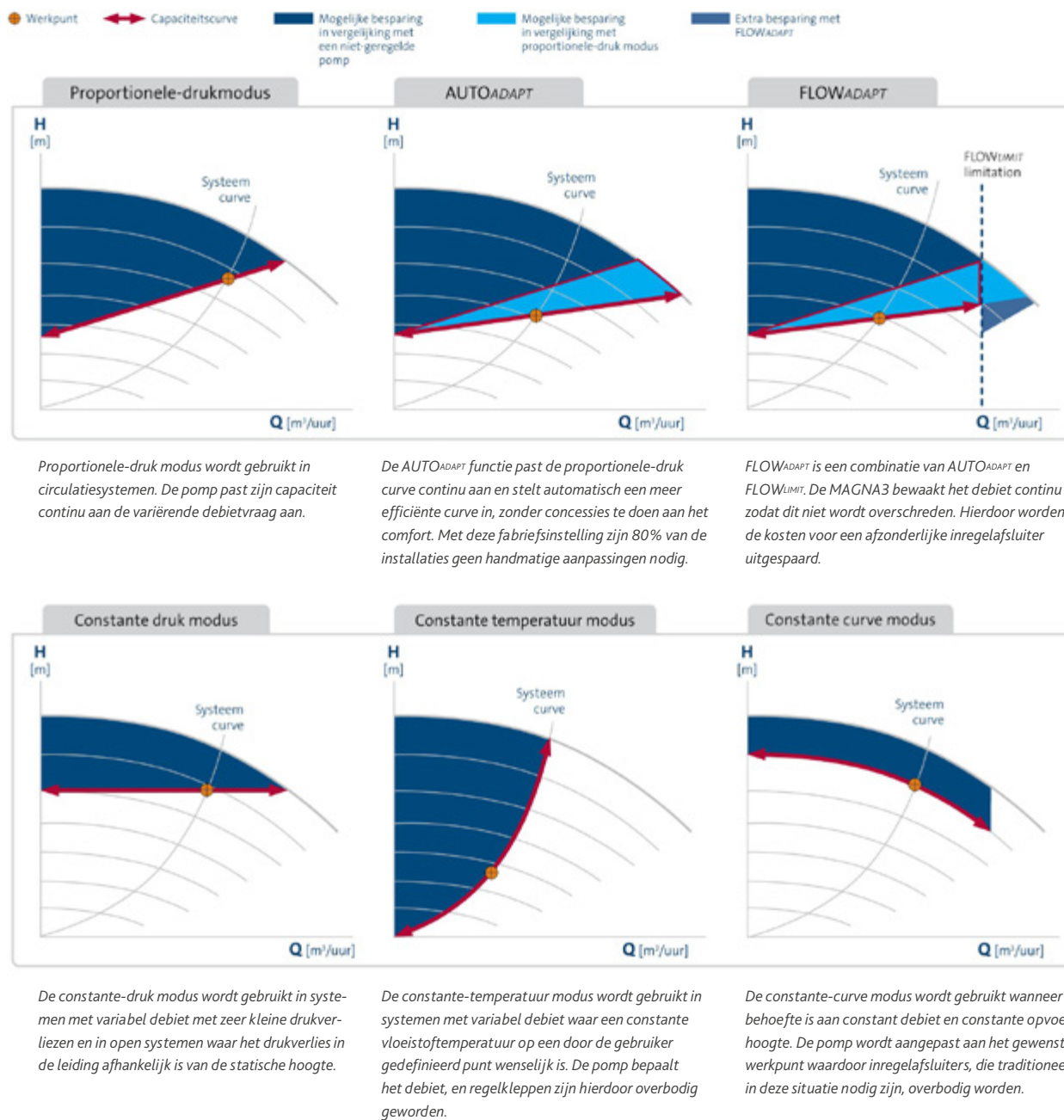
grondkarakteristiek. Vanuit deze k_v -waarde wordt het debiet berekend en vervolgens het afgegeven vermogen. Voor het berekenen van het debiet Q^* [-] als functie van de actuele k_v -waarde van de klep, wordt voor een constant drukverschil onderstaande formule gebruikt:

$$Q^* = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1 \right] \right)}} \quad (1)$$

Hierbij zijn Q^* [-] het dimensieloze debiet, k_{vs} [$m^3/h \cdot bar^{1/2}$] de k -waarde van de volledige geopende klep, k_v [$m^3/h \cdot bar^{1/2}$] de actuele k -waarde van de klep en A [-] de autoriteit. De afleiding van (1) is weergegeven in Intermezzo. In de literatuur wordt in plaats van de waarde van 1 in de teller, ook een waarde van 1,3 gevonden [5]. In beide gevallen geldt dit voor een constant drukverschil over het hele inzetbereik. Dit constante drukverschil (met een waarde van 1) is weergegeven in figuur 1 door middel van de rode lijn. De blauwe lijn is een benadering van een pompcurve bij een vast toerental en de oranje lijn is de installatiekarakteristiek. Het snijpunt van de leidingkarakteristiek en de pompcurve in het punt ($Q^*=1$, $\Delta p^*=1$) is het werkpunt. Hierop wordt de pomp geselecteerd. Een voorbeeld van een dalend drukverschil bij een dalend debiet is weergegeven door de rood gestippelde lijn.



Figuur 1: Pompcurve (blauw) met aangegeven de installatiekarakteristiek (oranje), een constant drukverschil (rood) en een dalend drukverschil bij een dalend debiet (rood gestippeld)



Figuur 2: Een selectie van mogelijkheden van een (moderne) toerengeregelde pomp. (bron: Grundfos)

De waarde van het drukverschil bij $Q^*=0$ (of 0-last) wordt gedefinieerd als Δp_0 [bar]. De waarde van het drukverschil bij $Q^*=1$ (of vollast) wordt als Δp_n [bar] gedefinieerd. De verhouding tussen beide wordt gedefinieerd als Δp^*_0 en is de verhouding tussen het drukverschil in 0-last en het drukverschil in de ontwerpsituatie en wordt als volgt berekend:

$$\Delta p^*_0 = \frac{\Delta p_0}{\Delta p_n} \quad (2)$$

De eenheid Δp is weergegeven in [bar] omdat bij het rekenen met k-waarden veelal met deze eenheid

wordt gewerkt en om geen gebruik te hoeven maken van correctiefactoren. Dit consequent gebruik van eenheden voorkomt vergissingen. Het gebruik van [m] of [kPa] zal resulteren in dezelfde waarde van Δp^*_0 . Als voorbeeld, in Figuur 1 is af te lezen bij de rood gestippelde lijn dat $\Delta p_n = 1$ [-] en $\Delta p_0 = 0,75$ [-] waarmee Δp^*_0 een waarde krijgt van $0,75/1 = 0,75$. Bij een constant drukverschil bedraagt deze waarde $\Delta p^*_0 = 1/1 = 1$. Het drukverschil in 0-last is nu gelijk aan het drukverschil in vollast. Hoe vergelijking (1) zich ontwikkelt bij een niet-constant drukverschil – en dus $\Delta p^*_0 \neq 1$ – en wat dit betekent voor de klepselectie, wordt uitgewerkt in het vervolgartikel.

Samenvatting

De opkomst van moderne pompregelingen resulteren in een aantal extra mogelijkheden. In dit artikel is de bestaande kennis uit de literatuur weergegeven. Daarnaast

is de afleiding gepresenteerd over hoe vergelijking (1) tot stand is gekomen. Het artikel eindigt met de introductie van de definitie van Δp^*_0 wat daarmee de introductie is van het vervolgartikel.

Referenties

1. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars (1), TVVL Magazine, 01-2017
2. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars (3), TVVL Magazine 10-2017
3. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars (4), TVVL Magazine 09-2018
4. Recknagel, H., Schramek, E.R., Sprenger, E., Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik
5. ISO-publikatie 44, Ontwerp van hydraulische schakelingen voor verwarmen, ISBN 90-5044-064-9, 1998

Intermezzo: afleiding constant drukverschil

Om de invloed van een variabel drukverschil te kunnen kwantificeren, is het van belang om de invloed van de constant drukverschil te kunnen berekenen. In de literatuur wordt gebruik gemaakt van een constant drukverschil over een systeem [4][5]. De afleiding voor een constant drukverschil wordt gegeven om het juiste vervolg te kunnen geven voor een variabel drukverschil. Op deze wijze wordt er een verbinding tussen een constant en een variabel drukverschil gemaakt, waardoor er sprake is van een logische uitbreiding op de bestaande vergelijkingen.

Er wordt gestart met een bekende vergelijking waarmee het debiet Q [m^3/h] wordt berekend aan de hand van een karakteristieke waarde k [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{bar}^{-1/2}$] en een beschikbaar drukverschil Δp [bar] over (dit deel van de) de installatie: (3)

$$Q = k\sqrt{\Delta p}$$

Deze vergelijking (3) wordt genormaliseerd ten opzichte van de ontwerp situatie:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{k}{k_n} \cdot \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\Delta p_n}} \quad (4)$$

Hierin zijn Q_n [m^3/h] het ontwerpdebiet, k_n [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{bar}^{-1/2}$] de karakteristieke waarde van het leidingwerk in de ontwerp situatie bij volledig geopende regelklep en Δp_n [bar] het ontwerp drukverschil. Dit is toegestaan omdat links en rechts door dezelfde waarde wordt gedeeld. Bij een constant drukverschil is dit drukverschil gelijk aan het drukverschil van het ontwerp en geldt: $\Delta p = \Delta p_n$. De variabelen worden nu gescheiden van de constanten wat resulteert in:

$$\left[\frac{\left(\frac{Q}{k}\right)}{\left(\frac{Q_n}{k_n}\right)} \right]^2 = \frac{\Delta p}{\Delta p_n} = 1 \quad (5)$$

De wens is om het debiet te berekenen en daarom worden de k -waarden geïsoleerd:

$$\frac{Q^2}{Q_n^2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{k}\right)^2}{\left(\frac{1}{k_n}\right)^2} = 1 \quad (6)$$

Merk op dat de 1 van het rechterlid nu staat voor het constante drukverschil. De beide k -waarden worden nu opgedeeld in een leidingdeel en een klepdeel.

De rekenregel die wordt gebruikt om k -waarden, die in serie met elkaar staan, op te tellen is:

$$\left(\frac{1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{k_{1,2}}\right)^2 \quad (7)$$

Vergelijking (6) wordt met behulp van (7) geschreven als:

$$\frac{Q^2}{Q_n^2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{k_v}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_l}\right)^2}{\left(\frac{1}{k_{vs}}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_l}\right)^2} = 1 \quad (8)$$

Hierin zijn k_v [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{bar}^{-1/2}$] de actuele klepstand, k_{vs} [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{bar}^{-1/2}$] de waarde van de volledig geopende klep bij de ontwerp situatie en k_l [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{bar}^{-1/2}$] de karakteristieke waarde van het overige leidingwerk en appendages. Vervolgens wordt de wortel getrokken en worden daarna de k -waarden naar de rechterzijde gebracht door te delen. Hieruit volgt:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(\frac{\frac{1}{k_v^2} + \frac{1}{k_l^2}}{\frac{1}{k_{vs}^2} + \frac{1}{k_l^2}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

Het is ongebruikelijk om een breuk in een breuk te laten staan. Hier wordt dit bewust gedaan om de waarde van 1, die staat van het constante drukverschil, later te kunnen gebruiken voor het bepalen van de invloed van een variabel drukverschil. In de grote noemer wordt de k_l -waarde van het onbekende leidingwerk geschreven als het verschil van de k_n en de k_{vs} -waarde, welke beide bekend zijn. De waarde van het leidingnet k_l is de waarde van het totaal k_n minus de waarde van de volledig geopende klep k_{vs} :

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(\frac{\frac{1}{k_v^2} + \frac{1}{k_n^2} - \frac{1}{k_{vs}^2}}{\frac{1}{k_{vs}^2} + \frac{1}{k_n^2} - \frac{1}{k_{vs}^2}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

Nu valt de k_{vs} uit de noemer omdat deze als positieve en als negatieve waarde voorkomt en wordt de vergelijking herschreven als:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(\frac{\frac{1}{k_v^2} + \frac{1}{k_n^2} - \frac{1}{k_{vs}^2}}{\frac{1}{k_n^2} - \frac{1}{k_n^2}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

en kan wordt de middelste term vereenvoudigd geschreven worden:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(\frac{\frac{1}{k_v^2} + 1 - \frac{1}{k_{vs}^2}}{\frac{1}{k_n^2} - \frac{1}{k_n^2}} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

Deze vergelijking wordt herschreven (omdat delen door een breuk hetzelfde is als vermenigvuldigen met het omgekeerde) als:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k_n^2}{k_v^2} - \frac{k_n^2}{k_{vs}^2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

Voor de laatste term in de noemer wordt een korte zijspiong gemaakt. De autoriteit A [-] wordt gedefinieerd als:

$$A = \frac{\Delta p_v}{\Delta p_n} \quad (14)$$

En wordt herschreven als:

(15)

$$A = \frac{\Delta p_v}{\Delta p_n} = \left(\frac{Q_n}{k_{vs}} \right)^2 \div \left(\frac{Q_n}{k_n} \right)^2 = \left(\frac{Q_n}{k_{vs}} \right)^2 \cdot \left(\frac{k_n}{Q_n} \right)^2 = \left(\frac{k_n}{k_{vs}} \right)^2$$

Hiermee kan de laatste term uit de noemer van (13) vervangen worden door de autoriteit A :

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k_n^2}{k_v^2} - A \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

Nu wordt de 2^e term uit de noemer vereenvoudigd. We zoeken een debietvariatie ten opzichte van de klepstand k_v en hiervoor dient k_n geëlimineerd te worden door gebruik te maken van bekende waarden. Om dit te doen vermenigvuldigen we de 2^e term met een handige keuze:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k_n^2}{k_v^2} \cdot \frac{k_{vs}^2}{k_{vs}^2} - A \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

Door deze keuze wordt met behulp van (15) een deel van de 2^e term geschreven als de autoriteit A :

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k_{vs}^2}{k_v^2} \cdot A - A \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

Nu resteert de laatste stap door de autoriteit A buiten haken te halen en het wortelteken herkenbaarder weer te geven. Het debiet Q/Q_n [-] wordt nu verkort geschreven als Q^* [-].

$$Q^* = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1 \right] \right)}} \quad (19)$$

Dit is de bekende vergelijking uit de literatuur [4][5].