
DE TWEEWEGREGELKLEP

I. DE INHERENTE KLEPKARAKTERISTIEK

1. Tussen het volumedebiet dat een regelklep doorlaat en het drukverschil over die klep bestaat (in het geval van onsamendrukbare stroming) de relatie:

$$V = A_{vr} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho}} \quad (1)$$

V = volumedebiet [m^3/s]

Δp_v = drukverschil over de regelklep [Pa]

ρ = massadichtheid van het stromend fluïdum [kg/m^3]

A_{vr} = klepfactor, klepcoëfficiënt of stroomcoëfficiënt (*flow coefficient*)

Uit vgl. (1) volgt dat het volumedebiet dat een regelklep doorlaat, enerzijds afhangt van het drukverschil over de klep en anderzijds van de klepfactor.

In het geval van een regelklep kunnen we de klepfactor A_{vr} variëren door de doorlaatopening S tussen klepplug en -zitting te variëren. De waarde van de klepfactor A_{vr} is recht evenredig met de oppervlakte van de doorlaatopening S ($A_{vr} = kS$) tussen de klepzitting en de klepplug. Wanneer de stand (de hoogte t.o.v. de klepzitting) van de klepplug (h) wordt gewijzigd, verandert de doorlaatopening S . De wijze waarop de doorlaatopening S , en recht evenredig daarmee de klepfactor A_{vr} , varieert i.f.v. klepstand h , is evenwel afhankelijk van de geometrie (vormgeving) van de klepplug en -zitting.

2. Om het verloop van het volumedebiet V te kennen uitsluitend i.f.v. de klepstand h , dient het drukverschil Δp_v over de klep voor elke stand van de klepplug constant te blijven. Indien $\Delta p_v = \rho$, stemt de klepfactor A_{vr} overeen met het volumedebiet dat de regelklep doorlaat. De variatie van A_{vr} i.f.v. de klepstand h wordt door de inherente klepkarakteristiek beschreven.

Afhankelijk van het type regelklep en de geometrie van de klepplug worden verschillende soorten inherente klepkarakteristieken bekomen: open-dicht, lineair, equiprocentueel,... (zie verder par. IV).

II. KLEPAUTORITEIT

1. Beschouw een cv-leidingstelsel bestaande uit maar één enkele tak. Een pomp doet de vloeistof (het verwarmingswater) in de tak circuleren. M.b.v. een tweewegklep wordt het volumedebiet in de tak geregeld.

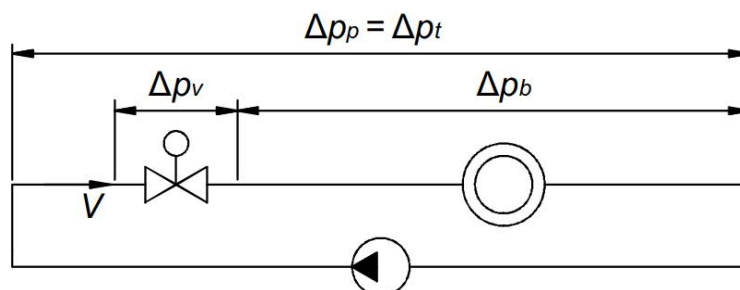


Fig. 1

Wanneer de tweewegklep in een meer gesloten stand wordt geplaatst, ten einde het doorgelaten debiet in de tak te verminderen, zal een groter aandeel van de pompvoerdruk over de regelklep komen te staan. Deze toename van het drukverschil over de regelklep zal de reductie van het volumedebiet tegenwerken: het volumedebiet zal minder afnemen dan zou het drukverschil over de regelklep constant zijn gebleven.

Het drukverschil over de regelklep en de klepfactor van een geïnstalleerde regelklep veranderen dus onvermijdelijk samen, waarbij de verandering van het drukverschil over de regelklep de verandering van de klepfactor tegenwerkt. Echter, hoe kleiner de optredende verandering van het drukverschil, hoe geringer de storende invloed ervan zal zijn op de volumedebietregeling.

Het volumedebiet door de geïnstalleerde regelklep i.f.v. de klepstand (de klepfactor) zal te wijten aan het veranderend drukverschil een ander verloop kennen dan er wordt weergegeven in de inherente klepkarakteristiek van die regelklep. Om het volumedebiet te kennen i.f.v. de klepstand van een geïnstalleerde tweewegklep, dient men de effectieve klepkarakteristiek van de regelklep te bepalen (zie par. IV).

2. De klepautoriteit α van een geïnstalleerde regelklep is per definitie de verhouding van het drukverschil over de regelklep wanneer de regelklep volledig openstaat op het drukverschil over de regelklep wanneer de regelklep volledig dichtstaat.

De klepautoriteit drukt uit in welke mate het drukverschil over een geïnstalleerde regelklep toeneemt, wanneer de klepplug beweegt van de stand volledig open naar de stand volledig dicht. Bv. een klepautoriteit van 0,25 betekent dat het drukverschil over de gesloten regelklep 4× groter zal zijn dan het drukverschil over de volledig geopende regelklep.

3. Het drukverschil over de gesloten regelklep van de tak zal altijd gelijk zijn aan de (pomp)opvoerdruk over de tak. Indien de pompopvoerdruk d.m.v. een toerentalregeling of een drukverschilregelaar op een constante waarde wordt geregeld, zal diezelfde pompopvoerdruk er ook zijn wanneer de regelklep volledig openstaat. In dat laatste geval is de pompopvoerdruk gelijk aan de som van het drukverlies over de volledige geopende regelklep en het drukverlies te wijten aan de stromingsweerstand in de rest van de tak. Aldus geldt er dat:

$$\Delta p_p = \Delta p_{v(0)} = \Delta p_{v(100)} + \Delta p_{b(100)} = \Delta p_{t(100)} \quad (2)$$

Δp_p = (constante) pompopvoerdruk over de tak [Pa]

$\Delta p_{v(0)}$ = het drukverschil over de gesloten regelklep [Pa]

$\Delta p_{v(100)}$ = het drukverschil over de volledig geopende regelklep [Pa]

$\Delta p_{b(100)}$ = het drukverschil over de rest van de tak wanneer de regelklep volledig openstaat en het maximum volumedebiet door de tak stroomt [Pa]

$\Delta p_{t(100)}$ = het totale drukverlies over de tak = de totale opvoerdruk over de tak als de regelklep volledig openstaat [Pa]

In dat geval kan de klepautoriteit van de geïnstalleerde regelklep in de tak worden uitgedrukt door:

$$\alpha = \frac{\Delta p_{v(100)}}{\Delta p_{v(0)}} = \frac{\Delta p_{v(100)}}{\Delta p_{v(100)} + \Delta p_{b(100)}} = \frac{\Delta p_{v(100)}}{\Delta p_{t(100)}} \quad (3)$$

Indien de pompopvoerdruk niet constant is, zal gelden dat $\Delta p_{v(0)} = \Delta p_p > \Delta p_{t(100)}$ en derhalve zal de klepautoriteit α in realiteit kleiner zijn. Bij de selectie van een tweewegklep in een tak van een leidingstelsel zal men echter voor de eenvoud aannemen dat $\Delta p_{v(0)} =$ de totale opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$ over de tak.

4. Uit het bovenstaande volgt dat de klepautoriteit geen vast kenmerk is van een regelklep, maar zal afhangen van de beschikbare opvoerdruk over de tak en van de overige drukverliezen in de tak waarin de regelklep is geplaatst.

III. SELECTIE VAN EEN TWEEWEGREGELKLEP

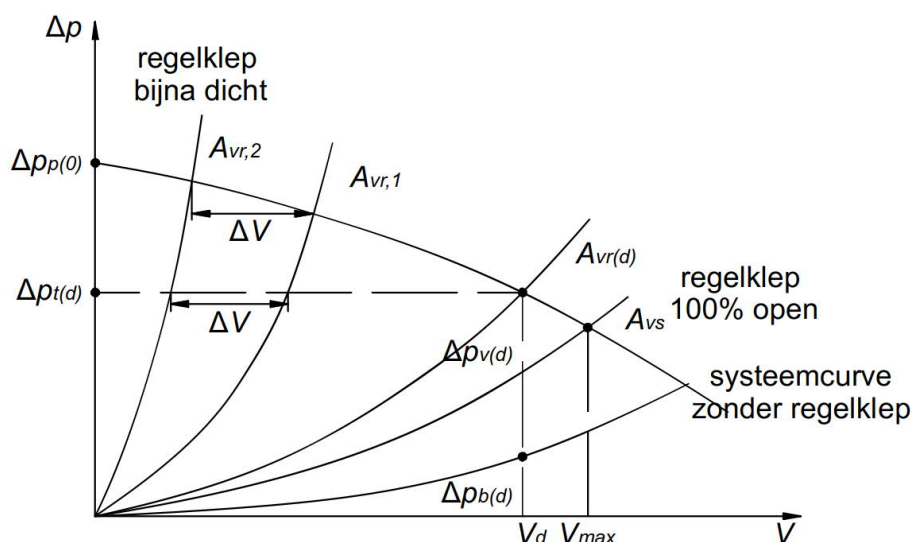


Fig. 2

1. Stel dat door de tak een bepaald ontwerpdebiet V_d [m^3/s] wordt gewenst. Het daaraan verbonden drukverlies $\Delta p_{b(d)}$ [Pa] over de tak zonder de regelklep kan worden berekend. Daaruit volgt de hydraulische weerstand van de tak zonder de regelklep:

$$R_b = \Delta p_{b(d)} / V_d^2 \quad (4)$$

De systeemcurve van de tak zonder regelklep volgt dan bij benadering uit:

$$\Delta p_b = R_b \cdot V^2 \quad (5)$$

2. Wordt nu een regelklep in volledig geopende stand in de tak bijgeplaatst, dan zal over deze regelklep een zeker bijkomend drukverlies $\Delta p_{v(d)}$ ontstaan wanneer het ontwerpdebiet V_d erdoor stroomt. Om dit drukverlies te bepalen, kiest men een zekere klepautoriteit α (zie verder meer over de keuze van deze klepautoriteit) en men bepaalt het drukverlies $\Delta p_{v(d)}$ uit:

$$\alpha = \frac{\Delta p_{v(d)}}{\Delta p_{v(d)} + \Delta p_{b(d)}} \Rightarrow \Delta p_{v(d)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \Delta p_{b(d)} \quad (6)$$

3. De vereiste opvoerdruck $\Delta p_{t(d)}$ over de tak die nodig is om het ontwerpdebiet V_d door de tak te realiseren volgt dan uit:

$$\Delta p_{t(d)} = \Delta p_{v(d)} + \Delta p_{b(d)} \quad (7)$$

4. Vervolgens kan de vereiste klepfactor $A_{vr(d)}$ van de regelklep worden berekend uit vgl. (1):

$$V_d = A_{vr(d)} \sqrt{\frac{\Delta p_{v(d)}}{\rho}} \Rightarrow A_{vr(d)} = V_d / \sqrt{\Delta p_{v(d)} / \rho} \quad (8)$$

De kans is nu uitermate klein dat er een regelklep standaard verkrijgbaar zal zijn met exact deze berekende klepfactor $A_{vr(d)}$. In de regel selecteert men dan de regelklep met de standaard klepfactor die direct volgt op de berekende waarde. Deze klepfactor stellen we voor door A_{vs} .

IV. EFFECTIEVE PROCENTUELE KLEPKARAKTERISTIEK

1. Hieronder wordt aangenomen dat de opvoerdruck over de tak waarin de regelklep is geïnstalleerd onder alle bedrijfsomstandigheden constant blijft, m.a.w. het drukverschil $\Delta p_{v(0)}$ over de regelklep wanneer deze helemaal dicht is = het drukverschil Δp_t over de tak wanneer de regelklep helemaal openstaat = constant.

2. Afleiding van de effectieve procentuele klepkarakteristiek

- De verhouding van een willekeurig volumedebiet V op het maximaal volumedebiet V_{max} als de klep volledig openstaat:

$$\begin{aligned} \frac{V}{V_{max}} &= \frac{A_{vr} \sqrt{\Delta p_v / \rho}}{A_{vs} \sqrt{\Delta p_{v(100)} / \rho}} = \frac{A_{vr}}{A_{vs}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\Delta p_{v(100)}}} = \frac{A_{vr}}{A_{vs}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_v / \Delta p_t}{\Delta p_{v(100)} / \Delta p_t}} \\ &= \frac{A_{vr}}{A_{vs}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_v / \Delta p_t}{\alpha}} \end{aligned} \quad (a)$$

- De opvoerdruck over de tak als de regelklep 100% openstaat = het drukverlies in de tak zonder de regelklep + drukverlies over de regelklep:

$$\begin{aligned} \Delta p_t &= \Delta p_{b(100)} + \Delta p_{v(100)} = \Delta p_{b(100)} + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \Delta p_{b(100)} = \frac{\Delta p_{b(100)}}{1 - \alpha} \\ &= \frac{R_b V_{max}^2}{1 - \alpha} \end{aligned} \quad (b)$$

- Het drukverlies over de regelklep bij een willekeurig volumedebiet V :

$$\begin{aligned}\Delta p_v &= \Delta p_t - \Delta p_b = \Delta p_t - R_b V^2 = \frac{R_b V_{max}^2}{1 - \alpha} - R_b V^2 \\ &= R_b \left(\frac{V_{max}^2 - (1 - \alpha) V^2}{1 - \alpha} \right)\end{aligned}\quad (c)$$

- Verhouding van het drukverlies over de regelklep tot de opvoerdruk over de tak. Uit vgl. (b) en (c) volgt:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta p_v}{\Delta p_t} &= \frac{V_{max}^2 - (1 - \alpha) V^2}{1 - \alpha} \cdot \frac{1 - \alpha}{V_{max}^2} = \frac{V_{max}^2 - (1 - \alpha) V^2}{V_{max}^2} \\ &= 1 - (1 - \alpha) \cdot (V/V_{max})^2\end{aligned}\quad (d)$$

- Vult men deze verhouding in vgl. (a) in, dan bekomt men de effectieve procentuele klepkarakteristiek i.f.v. de klepfactorverhouding:

$$\begin{aligned}(V/V_{max})^2 &= (A_{vr}/A_{vs})^2 \left(1 - (1 - \alpha)(V/V_{max})^2 \right) (1/\alpha) \\ (V/V_{max})^2 &= (1/\alpha)(A_{vr}/A_{vs})^2 - [(1 - \alpha)/\alpha](A_{vr}/A_{vs})^2 (V/V_{max})^2 \\ \left\{ 1 + [(1 - \alpha)/\alpha](A_{vr}/A_{vs})^2 \right\} (V/V_{max})^2 &= (1/\alpha)(A_{vr}/A_{vs})^2\end{aligned}\quad (e)$$

Uit vgl. (e) volgt nu de uitdrukking voor de effectieve procentuele klepkarakteristiek van een regelklep:

$$V/V_{max} = \sqrt{\frac{(1/\alpha) \cdot (A_{vr}/A_{vs})^2}{1 + [(1 - \alpha)/\alpha] \cdot (A_{vr}/A_{vs})^2}}\quad (9)$$

3. Inherente klepkarakteristiek van de lineaire regelklep

$$\frac{A_{vr}}{A_{vs}} = \frac{h}{h_{max}}\quad (10)$$

4. Inherente klepkarakteristiek van de equiprocentuele regelklep

$$\frac{A_{vr}}{A_{vs}} = (1/R) \cdot \exp(\ln R \cdot (h/h_{max}))\quad (11)$$

- h = de klepstand die correspondeert met de klepfactor A_{vr}
 h_{max} = de klepstand die correspondeert met de maximale klepfactor A_{vs}
 R = het inherent regelbereik (*rangeability*) van de regelklep, d.i. de verhouding van de maximale volumestroom die de regelklep in volledig geopende positie doorlaat op de minimum regelbare (stabiel blijvende) volumestroom die de regelklep nog doorlaat wanneer deze bijna gesloten is, gemeten bij een constant drukverschil over de klep

5. Vgl. (9), (10) en (11) geven voor het type van regelklep (lineair c.q. equiprocentueel) het verband weer tussen de relatieve klepstand (0...1) en het overeenkomstig volumedebiet dat de regelklep zal doorlaten, uitgedrukt als een fractie van het maximaal volumedebiet dat de regelklep doorlaat in de volledig geopende stand.

6. Men stelt vast dat naarmate de klepautoriteit van de regelklep in de tak kleiner is (m.a.w. naarmate het drukverschil over de regelklep meer toeneemt tijdens het dichtgaan van de regelklep), de effectieve klep karakteristiek van de regelklep meer vervormd wordt, t.t.z. meer en meer gaat afwijken van de inherente klep karakteristiek.

V. KEUZE VAN DE KLEPAUTORITEIT

1. Kiest men in par. III, randnr. 2 een kleine klepautoriteit dan leidt dit tot een kleine drukval $\Delta p_{v(d)}$ over de klep en zodoende volgt uit vgl. (8) een grote klepfactor $A_{vr,d}$, waaruit dan ook een grote standaard klepfactor A_{vs} voortkomt. Daar de klepfactor recht evenredig is met de grootte van de doorlaatopening van de regelklep, stemt een grote klepfactor dus overeen met een klep met grote doorlaatafmetingen.

De keuze van een kleine klepautoriteit zal derhalve leiden tot de selectie van een regelklep met een grote doorlaatopening.

In het geval van een regelklep met een lineaire inherente klep karakteristiek en een grote doorlaatopening, dus kleine klepautoriteit α en grote klepfactor A_{vs} , zal een geleidelijke klepverplaatsing van 100% (volledig open) naar 0% (volledig dicht) aanvankelijk weinig invloed hebben op het volumedebiet door de klep.

Wanneer het punt wordt bereikt dat de regelklep begint te regelen, zal een kleine klepverplaatsing al onmiddellijk aanleiding geven tot een grote verandering van het volumedebiet door de klep. Het volumedebiet is bijgevolg moeilijk regelbaar.

In het geval men voor een grote klepautoriteit α zou kiezen, wordt een kleine klepfactor A_{vs} en dus een klep met kleine doorlaatopening bekomen. De regelbaarheid zal dan gunstiger zijn, maar het kost nu echter meer pompvermogen (energie) om hetzelfde volumedebiet door de klep te laten stromen, daar de weerstand van de regelklep vanwege de kleine doorlaatopening groter zal zijn.

Vandaar de praktijkregel dat de geselecteerde klepautoriteit kleiner dan of gelijk aan 0,5 moet zijn om het pompvermogen enigszins te beperken, maar zeker niet minder dan 0,25 mag bedragen, opdat een stabiele debietregeling nog zou mogelijk zijn.

2. Merk op dat het uitgangspunt voor de selectie van de regelklep in par. III erin bestond om op basis van een zelf gekozen klepautoriteit een klepfactor $A_{vr(d)}$ te bepalen die het ontwerpdebiet V_d pas doorlaat als de klep volledig openstaat. Daarbij werd verondersteld dat de opvoerdruk $\Delta p_{t(d)} = \Delta p_{v(d)} + \Delta p_{b(d)}$ over de tak constant blijft ongeacht de klepstand.

Echter, éénmaal een pomp met een welbepaalde pompkarakteristiek is geselecteerd, zal de klepautoriteit finaal worden bepaald door het *shut-off point* $\Delta p_{p(0)}$ van de pomp, dewelke in de regel groter zal zijn dan $\Delta p_{t(d)}$ (zie fig. 2).

De uiteindelijke of effectieve klepautoriteit zal bijgevolg kleiner zijn dan aanvankelijk aangenomen (tenzij, ofwel een pomp met vlakke pompcurve wordt geselecteerd, ofwel gebruik wordt gemaakt van een overstortventiel of drukverschilregelaar, ofwel door toerentalregeling de opvoerdruk van de pomp constant wordt geregeld).

Bovendien, vermits de kans zeer groot is dat er geen regelklep bestaat die precies de berekende klepfactor $A_{vr(d)}$ heeft, zal men in de regel de regelklep selecteren met de eerstvolgende beschikbare standaard klepfactor A_{vs} .

Het resultaat is dan dat de regelklep in volledig geopende stand een groter debiet V_{max} zal doorlaten dan het ontwerpdebiet V_d (tenzij men ervoor zorgt dat het ontwerpdebiet V_d samenvalt met V_{max} , zie noot hieronder). Daardoor zal de effectieve klepautoriteit ook kleiner worden dan de klepautoriteit die aanvankelijk werd aangenomen (zie fig. 2).

Vandaar dat bij de selectie van een regelklep in vgl. (6) best een wat grotere klepautoriteit wordt gekozen. Als vuistregel wordt in sommige literatuur minimum 0,5 aanbevolen.

NOOT

3. Men kan de vereiste opvoerdruk over de tak cf. par. III, randnr. 3 ook zodanig bepalen dat het ontwerpdebiet V_d pas doorgelaten wordt wanneer de klep daadwerkelijk volledig open staat. In dat geval zal gelden: $V_{max} = V_d$.

Men begint terug met eerst een bepaalde klepautoriteit α te kiezen, bepaalt vervolgens de drukval $\Delta p_{v(d)}$ over de regelklep m.b.v. vgl. (6) en berekent de overeenkomstige klepfactor $A_{vr(d)}$ met vgl. (8), op basis waarvan dan een standaard klepfactor A_{vs} wordt geselecteerd.

4. Met deze klepfactor A_{vs} en het ontwerpdebiet V_d kan nu de vereiste drukval over de volledig geopende regelklep herberekend worden. I.p.v. de notatie $\Delta p_{v(d)}$ gebruiken we voor de herberekende drukval de notatie $\Delta p_{v(100)}$ daar de klep nu effectief volledig open staat. $\Delta p_{v(100)}$ volgt uit:

$$V_d = A_{vs} \sqrt{\frac{\Delta p_{v(100)}}{\rho}} \Rightarrow \Delta p_{v(100)} = \rho \left(V_d / A_{vs} \right)^2 \quad (12)$$

5. De vereiste opvoerdruk over de tak om het ontwerpdebiet V_d in de tak te realiseren volgt dan uit:

$$\Delta p_{t(100)} = \Delta p_{b(d)} + \Delta p_{v(100)} \quad (13)$$

6. De opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$ en het ontwerpdebiet V_d bepalen samen het nominaal werkpunt van de pomp, waarmee nu een pomp met geschikte pompkarakteristiek kan geselecteerd worden.

De effectieve klepautoriteit volgt dan uit:

$$\alpha = \frac{\Delta p_{v(100)}}{\Delta p_{p(0)}} \quad (14)$$

met $\Delta p_{p(0)}$ de pompopvoerdruk over de tak als de regelklep volledig dichtstaat (volumedebiet is nul).

De effectieve klepautoriteit moet cf. supra tussen 0,25 en 0,5 liggen.

VI. LEIDINGSTELSEL MET MEERDERE PARALLELE TAKKEN

1. Tot dusver werd een leidingstelsel met slechts één tak beschouwd, zodat de beschikbare opvoerdruk over de tak met regelklep steeds overeenstemt met de opvoerdruk van de pomp die direct uit de pompkarakteristiek volgt. In zo'n systeem is het onmogelijk dat, wanneer de regelklep 100% openstaat, de opvoerdruk Δp_t over de tak groter kan worden dan de opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$.

2. Beschouwen we nu een leidingstelsel met meerdere parallelle takken. Onder ontwerpcondities zijn de regelkleppen in alle takken 100% open.

- Na de keuze van de leidingdiameters kunnen we het drukverlies bepalen in elke tak zonder de regelklep die hoort bij het ontwerpdebiet V_d in de tak.
- Vervolgens kiezen we een zekere klepautoriteit α en bepalen met vgl. (6) de drukval over de volledig geopende regelklep. M.b.v. vgl. (8) kan dan de klepfactor $A_{vr(d)}$ bepaald worden op basis waarvan een standaard klepfactor A_{vs} kan geselecteerd worden.
- Met de geselecteerde klepfactor A_{vs} en het ontwerpdebiet V_d kan de drukval over de volledig geopende regelklep herberekend worden cf. vgl. (12), zodat het ontwerpdebiet V_d pas zal doorgelaten worden wanneer de klep daadwerkelijk volledig openstaat ($V_{max} = V_d$).
- De vereiste opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$ om het ontwerpdebiet V_d te realiseren in de tak onder beschouwing volgt dan uit vgl. (13).

De bovenstaande berekeningen moeten voor elke tak van de installatie herhaald worden.

3. De tak met de grootste vereiste opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$, plus de drukverliezen die zullen optreden in de distributieleidingen tussen de pomp en die tak, zullen de vereiste opvoerdruk van de pomp bepalen die nodig is wanneer in alle takken de regelkleppen volledig open staan, d.w.z. als de pomp het totale ontwerpdebiet voor de installatie levert. Doorgaans zal het de verst van de pomp verwijderde tak zijn die de vereiste opvoerdruk van de pomp zal bepalen. Naarmate een tak verder is verwijderd van de pomp, zal de beschikbare opvoerdruk vanwege de pomp afnemen t.g.v. de drukverliezen die optreden in de distributieleidingen.

Dit impliceert dat over de takken dicht bij de pomp de beschikbare opvoerdruk $\Delta p_{t(a)}$ groter kan zijn dan de vereiste opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$ om het ontwerpdebiet door die tak te realiseren, zodat in volledig geopende stand van de regelklep door deze takken een groter debiet zal stromen dan het ontwerpdebiet. Om het debiet in die takken te begrenzen tot het ontwerpdebiet dient een extra hydraulische weerstand in de tak ingebouwd d.m.v. een balanceer- of inregelventiel. De drukval Δp_{bv} die over het balanceerventiel moet komen als het ontwerpdebiet er doorheen stroomt, volgt uit:

$$\Delta p_{bv} = \Delta p_{t(a)} - \Delta p_{t(100)} \quad (15)$$

4. Beschouwt men nu één tak in het leidingstelsel waarin de regelklep volledig openstaat, terwijl in de andere takken de kleppen dicht of bijna dicht zijn. T.a.v. de pomp is de weerstand van het totale leidingstelsel nu groot. Het werkpunt zal op de pompkarakteristiek naar links opgeschoven zijn: klein totaal debiet, grote opvoerdruk. Gezien het klein totaal debiet, zullen de drukverliezen in de distributieleidingen tussen de pomp en de beschouwde tak nu ook klein zijn. Over de tak zelf staat dan nagenoeg de maximale opvoerdruk Δp_p vanwege de pomp. Daardoor stroomt door de tak met volledig geopende regelklep een groter debiet dan het gewenste ontwerpdebiet V_d .

Daarnaast zal de effectieve klepkarakteristiek bij de opvoerdruk Δp_p over de tak een steiler verloop kennen dan bij de opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$. Wanneer de regelklep meer sluit en de klepfactor varieert van $A_{vr,1}$ naar $A_{vr,2}$, zal de verandering van het volumedebiet bij de grotere opvoerdruk Δp_p groter zijn dan bij de kleinere opvoerdruk $\Delta p_{t(100)}$ (zie fig. 2). Aldus, het steiler verloop van de effectieve klepkarakteristiek impliceert dat dezelfde klepverplaatsing bij de grotere opvoerdruk Δp_p resulteert in een grotere verandering van het volumedebiet, waardoor de kans op een instabiele volumedebietregeling toeneemt.

Om dit te vermijden wordt aanbevolen dat de drukval $\Delta p_{v(100)}$ over de volledig geopende regelklep wanneer het ontwerpdebiet V_d wordt doorgelaten minstens 25% moet bedragen van de maximale opvoerdruk van de pomp, m.a.w. dat de klepautoriteit van de regelklep t.a.v. de maximaal beschikbare opvoerdruk ten minste gelijk is aan 0,25.

Door evenwel, ofwel een pomp te selecteren met een vlakke pompcurve, ofwel gebruik te maken van een overstortventiel/drukverschilregelaar, ofwel m.b.v. een toerentalregeling de opvoerdruk van de pomp constant te houden, kunnen we ook vermijden dat de beschikbare opvoerdruk over een tak wijd kan fluctueren afhankelijk van het aantal open- en dichtstaande takken.

VII. REGELBEREIK VAN EEN TWEEWEGREGELKLEP

1. Het inherent regelbereik van een regelklep werd hierboven reeds gedefinieerd, zie vgl. (11):

$$R = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{A_{vs}}{A_{vr,min}} \quad (16)$$

M.b.v. het opgegeven regelbereik van een regelklep kan het minimaal volumedebiet V_{min} bepaald worden dat de klep nog kan regelen wanneer de klep bijna gesloten is i.f.v. een gegeven maximum debiet V_{max} dat de klep doorlaat in volledig geopende stand. Hoe groter het regelbereik van de regelklep, hoe kleiner het volumedebiet V_{min} dat nog kan geregeld worden (d.w.z. door een regeling constant kan worden gehouden).

2. Bij een geïnstalleerde regelklep zal evenwel ook de klepautoriteit α een invloed uitoefenen op het effectieve regelbereik van de regelklep.

$$\begin{aligned} \Delta p_{v(0)} &= \frac{\Delta p_{v(100)}}{\alpha} \\ \frac{\rho V_{min}^2}{A_{vr,min}^2} &= \frac{\rho V_{max}^2}{\alpha A_{vs}^2} \\ V_{min} &= \left(\frac{A_{vr,min}}{A_{vs}} \right) \frac{V_{max}}{\sqrt{\alpha}} = \frac{V_{max}}{R\sqrt{\alpha}} = \frac{V_{max}}{R_{eff}} \\ V_{min} (\%) &= \frac{V_{min}}{V_{max}} \times 100 = \frac{100}{R\sqrt{\alpha}} = \frac{100}{R_{eff}} \end{aligned} \quad (17)$$

$\Delta p_{v(0)}$ in vgl. (17) is de maximale opvoerdruk over de tak, die praktisch volledig over de regelklep zal staan, wanneer de klep bijna dicht is en nog net het minimaal regelbaar volumedebiet V_{min} doorlaat.

Uit vgl. (17) volgt dat naarmate de klepautoriteit kleiner is, het minimaal regelbaar debiet V_{min} toeneemt (nadert naar V_{max}), m.a.w. het effectieve regelbereik van de regelklep krimpt in.

VIII. K_{vr} -WAARDE VAN EEN TWEEWEGREGELKLEP

1. In vgl. (1) werden basis SI-eenheden aangewend. Een andere formule, die eigenlijk het meest in de praktijk wordt aangewend, is:

$$V = K_{vr} \sqrt{\frac{\Delta p_v}{\rho/1.000}} \quad (18)$$

- V = volumedebiet in eenheid m^3/h
 Δp_v = drukverlies over de regelklep in eenheid bar
 ρ = massadichtheid van het stromend fluïdum [kg/m^3]
 K_{vr} = klepfactor, klepcoëfficiënt of stroomcoëfficiënt (*flow coefficient*)

2. In het geval van water rekent men doorgaans met $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$, zodat voor water:

$$V = K_{vr} \sqrt{\Delta p_v} \quad (19)$$

3. Wanneer de regelklep volledig openstaat, wordt de klepfactor doorgaans aangeduid met K_{vs} of K_v . Wanneer over een volledige geopende regelklep met klepfactor K_{vs} een druk staat van 1 bar, stroomt door deze klep een volumedebiet van $K_{vs} \text{ m}^3/h$.

4. Tussen K_{vr} en A_{vr} bestaat de relatie:

$$K_{vr} = 36.016,211 \times A_{vr} \quad (20)$$

NOOT

5. Indien de diameter van de regelklep kleiner is dan de pijpdiameter, zijn reduceerfittingen tussen de klep en de pijp noodzakelijk. Deze creëren een bijkomend drukverlies, waardoor de globale K_{vs} -waarde van de regelklep + reduceerfittingen kleiner wordt.

$$K'_{vs} = F_p \times K_{vs} \quad (21)$$

met

$$F_p = 1 - 0,14 \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right) \cdot \left(\frac{116 \cdot K_{vs}}{d^2} - 1\right) \quad (22)$$

d = aansluitdiameter van de klep [mm]

D = inwendige buisdiameter [mm]

Als zou blijken dat $F_p > 1$, gebruik dan $F_p = 1$.

6. Bij de selectie van een regelklep, bepalen we de A_{vs} -waarde (K_{vs} -waarde) cf. par. III en par. V. Vervolgens passen we deze klepfactor aan m.b.v. vgl. (21) en berekenen dan de drukval $\Delta p_{V(100)}$ over de volledige geopende regelklep + reduceerfittingen met vgl. (12). Uit vgl. (13) volgt dan ten slotte de vereiste opvoerdruk over de tak om het ontwerpdebiet V_d te realiseren.

IX. HET THERMOSTATISCH RADIATORVENTIEL (TRV)

1. Het werkingsprincipe van een thermostatisch radiatorventiel (TRV) steunt op de volumeverandering van een vulvloeistof (of was) o.i.v. de ruimtetemperatuur. De vloeistof, die onsamendrukbaar is, zit opgesloten in een cilinder met een verplaatsbare zuiger met steel. De uitsteeklengte van deze zuigersteel is een functie van het volume dat de vulvloeistof in de cilinder inneemt en zodoende van de ruimtetemperatuur (de temperatuur van de vulvloeistof). Bij een zekere lage ruimtetemperatuur is de zuigersteel volledig ingeschoven. Naarmate de ruimtetemperatuur toeneemt, expandeert de vulvloeistof en de zuigersteel van de cilinder schuift uit.

Een sluitveer in de draaiknop van het TRV drukt op de cilinder. De zuigersteel van de cilinder drukt op zijn beurt op de klepsteel van het ventiel. De klepveer wordt daardoor volledig ingedrukt (maximaal gecomprimeerd). Naarmate de ruimtetemperatuur afneemt, schuift de zuigersteel in (het volume van de vulvloeistof krimpt), waardoor de sluitveer zal ontspannen (zie schets hieronder). Dit betekent dat de sluitkracht van de sluitveer afneemt. Wanneer de sluitkracht van de sluitveer is afgenomen tot de maximale compressiekracht van de klepveer, zal nu ook de klepveer kunnen ontspannen (uitzetten), waardoor de klep wordt opgelicht.

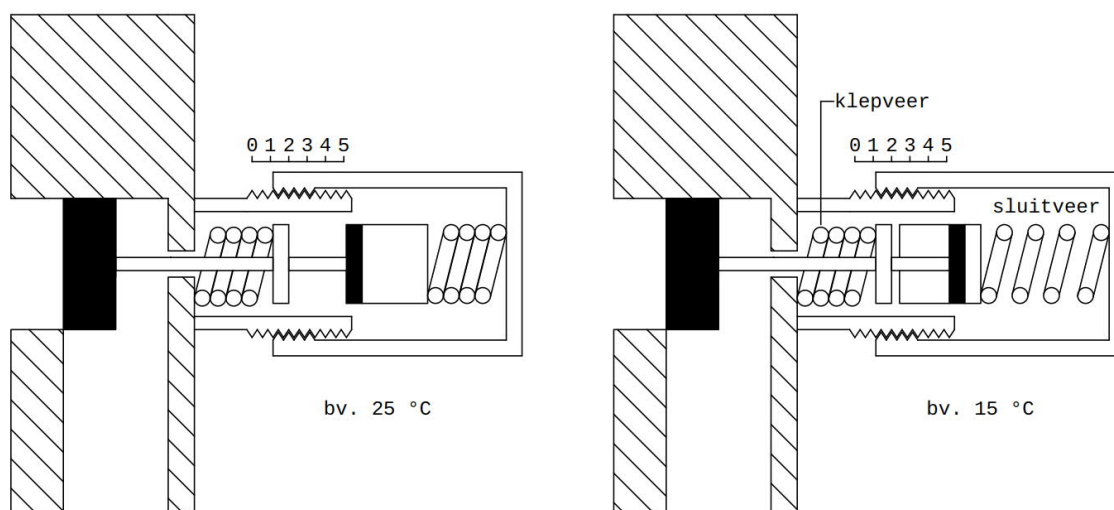
De ruimtetemperatuur waarbij de klep begint te openen, duiden we aan met $T_{r,max}$. De temperatuur waarbij de klep volledig openstaat, duiden we aan met $T_{r,min}$.

Tussen $T_{r,max}$ en $T_{r,min}$ neemt de klepfactor van het TRV toe van 0 tot de K_{vs} -waarde van het ventiel.

Op de draaiknop van het TRV is een schaalverdeling aangebracht, bv. 0, I, II, III, IV en V. Door aan de knop te draaien, kan men deze in een welbepaalde stand plaatsen. De verschillende standen stemmen overeen met een zekere sluitkracht van de sluitveer. Naarmate men de draaiknop meer indraait, hoe hoger de sluitkracht van de veer wordt (de sluitveer wordt nl. meer gecomprimeerd). Dit impliceert dat de zuigersteel van de cilinder dan verder moet inschuiven, alvorens de klepveer kan ontspannen en de klep begint te openen.

In de nulstand (vorstbeveiligingsstand) blijft de klep tot een temperatuur van ca. 5 °C volledig gesloten ($T_{r,max} = 5$ °C). Zou de temperatuur nog verder blijven afnemen, dan begint de klep te openen en bij een temperatuur rond 0 °C zal de klep dan volledig geopend zijn. Zodoende wordt voorkomen dat het water in een afgesloten radiator kan bevriezen (weliswaar moet de verwarmingsinstallatie dan ook in bedrijf zijn).

Stand III stemt ongeveer overeen met de normale kamertemperatuur. In deze stand blijft de klep volledig gesloten tot een temperatuur van ca. 22 °C ($T_{r,max} = 22$ °C). Vanaf 22 °C is de sluitkracht van de sluitveer al afgenomen tot de maximale compressiekracht van de klepveer en begint de klep te openen.



Als de ruimtetemperatuur verder daalt, schuift de zuigersteel verder in de cilinder. Zowel de sluitveer als de klepveer kunnen daardoor verder ontspannen, terwijl de klep verder opent.

2. Een TRV bezit het regelgedrag van een P-regelaar. De P-regelactie wordt algemeen beschreven door de vergelijking:

$$h = K_r (T_{r,m} - T_{r,s}) + h_0 \quad (23)$$

- h = het uitgangssignaal van de regelaar, in casu de klepstand van het TRV. De klepstand is nul wanneer de klep volledig dicht is, de klepstand is maximaal wanneer de klep volledig openstaat.
- K_r = de versterkingsfactor van de P-regelaar; in het geval van een direct werkende regelaar is dat een positieve waarde, in het geval van een indirect werkende regelaar een negatieve waarde.
- $T_{r,m}$ = de gemeten ruimtetemperatuur
- $T_{r,s}$ = de ingestelde gewenste ruimtetemperatuur
- h_0 = de 'bias' van de P-regelaar; d.i. het uitgangssignaal van de regelaar als de deviatie nul is, m.a.w. de klepstand van het TRV als de gemeten ruimtetemperatuur overeenstemt met gewenste ruimtetemperatuur.

Het verschil $T_{r,m} - T_{r,s}$ is de deviatie. Als $T_{r,m} < T_{r,s}$ is de deviatie negatief en omgekeerd, als $T_{r,m} > T_{r,s}$ is de deviatie positief. In het geval van een negatieve deviatie, moet het TRV verder openen, d.w.z. de klepstand moet toenemen. Dit impliceert dat de regelaar indirect werkend moet zijn: de versterkingsfactor is dus negatief.

De P-vergelijking is in het coördinatenstelsel $[T_{r,m}, h]$ de vergelijking van een rechte die door het punt $(T_{r,s}, h_0)$ passeert en een helling heeft die gelijk is aan de versterkingsfactor. De versterkingsfactor kan men dan ook uitdrukken door:

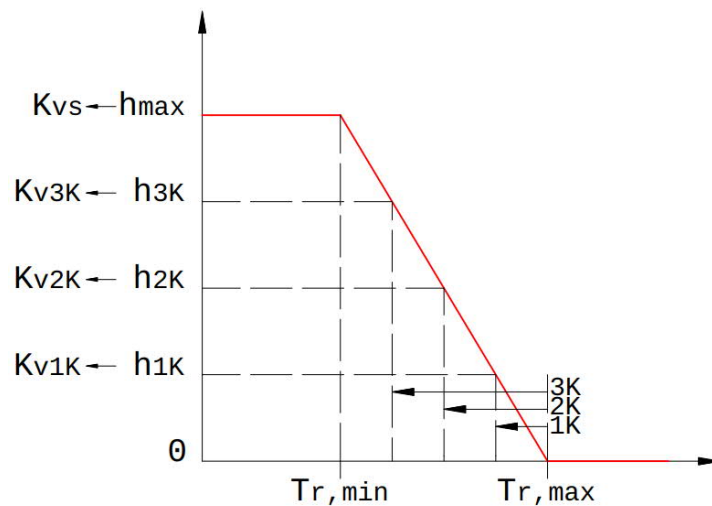
$$-|K_r| = -\frac{h_{max} - 0}{|T_{r,min} - T_{r,max}|} \quad (24)$$

Het verschil $|T_{r,min} - T_{r,max}|$ wordt de proportionele band van de regelaar genoemd. Tussen $T_{r,max}$ en $T_{r,min}$ gaat de regelklep van volledig dicht ($h = 0$) naar volledig open ($h = h_{max}$). Enkel tussen deze twee temperaturen kan het TRV de klepstand regelen. Boven $T_{r,max}$ blijft de klep immers steeds volledig dicht en onder $T_{r,min}$ blijft de klep steeds volledig open, ongeacht de waarde van de ruimtetemperatuur.

Hoe groter de versterkingsfactor K_r , m.a.w. hoe steiler de P-rechte verloopt, hoe groter de verandering zal zijn van de klepstand h voor eenzelfde temperatuurverandering binnen het bereik $|T_{r,min} - T_{r,max}|$.

Als dusdanig heeft de versterkingsfactor een impact op de 'felheid' waarmee het TRV op temperatuurveranderingen reageert. Een TRV met grote versterkingsfactor zal zich doorgaans 'onrustiger' gedragen dan een TRV met kleinere versterkingsfactor.

De grootte van de klepverplaatsing van 0 tot h_{max} wordt door de constructie van het ventiel bepaald. De breedte van het temperatuurbereik $|T_{r,min} - T_{r,max}|$ wordt bepaald door de vulvloeistof in de cilinder of de diameter van de cilinder. Als de temperatuur van de vulvloeistof vanaf $T_{r,max}$ daalt, zal dit t.g.v. de volumevermindering van de vulvloeistof met een zekere verplaatsing van de klepsteel samengaan. Hoe groter de verplaatsing van de klepsteel per °C temperatuurverandering, hoe hoger de temperatuur $T_{r,min}$ waarbij de klepsteel zijn eindpositie h_{max} al zal bereiken en hoe nauwer dus het bereik $|T_{r,min} - T_{r,max}|$ waarbinnen de klep van de volledig gesloten naar de volledig geopende stand overgaat.



Fabrikanten zullen in de praktijk evenwel niet spreken over de versterkingsfactor van het TRV of de bias of het setpunt van de TRV. Fabrikanten geven naast de K_{vs} -waarde van het ventiel enkel maar de K_v -waarde op bij verschillende zgn. "P-afwijkingen", doorgaans 1 K, 2 K en 3 K (Kelvin). Deze stemmen overeen met de K_v -waarde bij de temperatuur die resp. 1 K, 2 K en 3 K verwijderd liggen van $T_{r,max}$ (zie figuur hierboven).

Wanneer de draaiknop van het TRV is ingesteld op stand III ($T_{r,max} = 22$ °C), zal bv. P-afwijking 2 K overeenstemmen met een ruimtetemperatuur van ca. 20 °C.

Bemerkt nog dat waar de P-regelaarvergelijking $h = f(T_{r,m})$ een rechte lijn is, dit niet noodzakelijk betekent dat ook de relatie $K_v = f(T_{r,m})$ een rechte lijn zal zijn. De relatie $K_v = f(h)$, d.i. de inherente klepcharacteristiek, wordt door de geometrie van de klepplug en de klepzitting bepaald.

3. De selectieprocedure van een TRV gebeurt op dezelfde wijze als deze van een tweeregelklep (zie par. III). Men bepaalt a.h.v. het ontwerpdebiet het drukverlies in de radiatortak zonder het TRV.

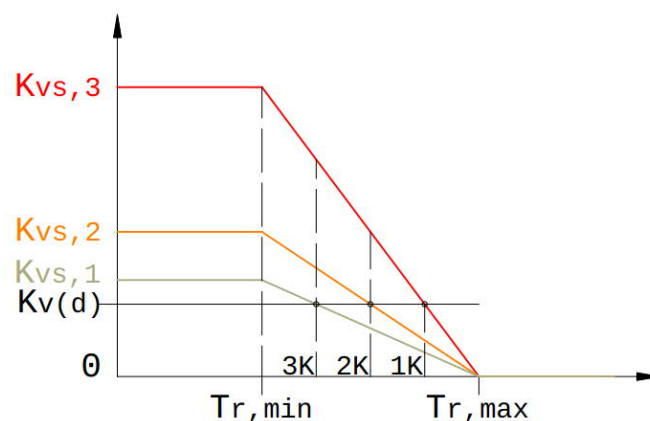
Op basis van een gekozen klepautoriteit bepaalt men daarmee het na te streven drukverlies over de regelklep.

Met het ontwerpdebiet en het na te streven drukverlies bepaalt men dan de overeenkomstige klepfactor. We zullen deze hier aanduiden met $K_{v,d}$. Men selecteert dan een TRV niet op basis van diens K_{vs} -waarde, maar op basis van de K_v -waarde bij een zekere P-afwijking.

In de figuur hieronder zijn de regelaarkarakteristieken getekend van drie verschillende TRV's met dezelfde lineaire inherente klepcharacteristiek ($K_v = k \cdot h$) en met een gelijke proportionele band, maar met een verschillende K_{vs} -waarde (verschillende h_{max}).

De situatie is met opzet zo voorgesteld dat de berekende klepfactor $K_{v,d}$ overeenstemt met de K_v -waarde van TRV 1 bij P-afwijking 3 K, met de K_v -waarde van TRV 2 bij P-afwijking 2 K en met de K_v -waarde van TRV 3 bij P-afwijking 1 K.

Men noteert dat de regelaarkarakteristiek van TRV 3 de grootste versterkingsfactor bezit en de regelaarkarakteristiek van TRV 1 de kleinste versterkingsfactor. Doorgaans zal men het TRV verkiezen waarvan de klepfactor bij P-afwijking 2 K overeenstemt met (of in de buurt ligt van) de berekende klepfactor $K_{v,d}$ (in casu TRV 2).



Zodoende, wanneer onder ontwerpcondities (de radiator geeft het maximaal warmtevermogen af dat correspondeert met het berekende warmteverlies bij een ruimtetemperatuur van 20 °C) door de radiator het corresponderende, berekende ontwerpdebiet stroomt, zal in stand III ($T_{r,max} = 22$ °C) de TRV zich ingesteld hebben op de berekende klepfactor $K_{v,d}$ = de klepfactor van het TRV bij P-afwijking 2 K (20 °C).

Het TRV staat dan nog niet volledig open, wat betekent dat enige veiligheidsmarge wordt voorzien (ontwerpberekeningen kunnen immers de werkelijkheid enkel maar benaderen). Zou men zich bij de selectie van een TRV baseren op de K_{vs} -waarde, dan zou dit betekenen dat ingeval de ruimtetemperatuur toch nog zou afnemen (het werkelijk warmteverlies is groter dan hetgeen er was berekend), het volumedebiet cv-water door de radiator niet meer kan opgevoerd worden.

4. Door in serie met het TRV een restrictie (radiatorvoetventiel) te plaatsen, kan de K_v -waarde van de combinatie worden gewijzigd. De restrictie kan ook ingebouwd worden in het TRV zelf. (zgn. voorinstelbaar TRV).

Als het TRV volledig openstaat, stroomt door de radiatortak het maximaal volumedebiet. Tussen het volumedebiet en het drukverlies over het TRV geldt de relatie:

$$V_{max} = K_{vs,TRV} \sqrt{\Delta p_{TRV}} \Rightarrow \Delta p_{TRV} = \left(V_{max} / K_{vs,TRV} \right)^2 \quad (25)$$

met $K_{vs,TRV}$ de klepfactor van het TRV in volledig geopende stand.

Tussen datzelfde volumedebiet door de radiatortak en het drukverlies over de restrictie geldt de relatie:

$$V_{max} = K_{res} \sqrt{\Delta p_{res}} \Rightarrow \Delta p_{res} = \left(V_{max} / K_{res} \right)^2 \quad (26)$$

met K_{res} de instelbare, constante doorlaatcoëfficiënt van de restrictie.

Over de combinatie staat de som van de drukverliezen. Voor de combinatie geldt dan dat:

$$\begin{aligned} V_{max} &= K_{vs,comb} \sqrt{\Delta p_{TRV} + \Delta p_{res}} \\ V_{max} &= K_{vs} \sqrt{\left(V_{max} / K_{vs,TRV} \right)^2 + \left(V_{max} / K_{res} \right)^2} \\ 1 &= K_{vs,comb} \sqrt{1 / K_{vs,TRV}^2 + 1 / K_{vs,res}^2} \\ K_{vs,comb} &= 1 / \sqrt{1 / K_{vs,TRV}^2 + 1 / K_{vs,res}^2} \end{aligned} \quad (27)$$

$K_{vs,comb}$ is dan feitelijk de resulterende klepfactor van het TRV i.c.m. de restrictie als het TRV volledig openstaat.

Feit dat men de K_{vs} -waarde van het TRV kan wijzigen door een restrictie in serie met het TRV te plaatsen, impliceert dat men daarmee ook de regelaar-karakteristiek van het TRV zal wijzigen.

Fabrikanten geven in een grafiek het drukverschil over de combinatie weer i.f.v. het debiet voor verschillende instelstanden van de restrictie, teneinde de klepfactor bij de gewenste P-afwijking (bv. 2 K) te bekomen.

Door een verticale te trekken door het benodigd ontwerpdebiet V_d en een horizontale door het gewenst of benodigd drukverschil over de combinatie (i.f.v. de gewenste klepautoriteit of teneinde de radiatortak te balanceren), bekomt men een snijpunt dat ligt op een curve of tussen twee curven welke corresponderen met een bepaalde instelling van de restrictie.

