

# Metten en regelen

R.R.P. van Nooijen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Afdeling Water management  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Technische Universiteit Delft

Slimmer Waterbeheer met Real-Time Control, 11-12 oktober 2016

## Regelen

Regelaars uit de praktijk.

Regeltechniek begrippen in context

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie

## Regelen

Regelaars uit de praktijk.

Regeltechniek begrippen in context

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie



Figuur: Polder (Jan Arkesteijn, public domain)

- ▶ Peilvakken
- ▶ Polder
- ▶ Boezem

# De vaste stuw (overlaat)



Figuur: Stuw („Titico”, public domain)

## Formule

Voor  $h_{\text{bovenstrooms}} > h_{\text{kruin}}$  en  $h_{\text{benedenstrooms}} < h_{\text{kruin}}$

$$c_{\text{stuw}} \times b \times (h_{\text{bovenstrooms}} - h_{\text{kruin}}) \times \sqrt{h_{\text{bovenstrooms}} - h_{\text{kruin}}}$$

waar  $b$  staat voor de doorstroombreedte en  $c_{\text{stuw}}$  een kunstwerk afhankelijke constante is tussen 1 en 2.

(Theoretisch voor lange stuw zonder wrijving:  $\frac{2}{3} \times \sqrt{\frac{2g}{3}} \approx 1.7 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s}$ ,  $g$  is de valversnelling aan het aardoppervlak, ongeveer  $9.81 \text{ m/s}^2$ )

- ▶ Noodzakelijk:
  - ▶ Afstemmen afstroom over stuw op instroom in peilvak
  - ▶ Naar juiste peil brengen
- ▶ Hoe stemt stuw instroom af op uitstroom?
  - ▶ als instroom  $>$  afstroom stijgt het peil  $\Rightarrow$  afstroom neemt toe
  - ▶ als instroom  $<$  afstroom daalt het peil  $\Rightarrow$  afstroom neemt af
  - ▶ als instroom  $=$  afstroom dan peil constant
- ▶ Juiste peil?
  - ▶ Helaas bijna altijd een afwijking ...





Figuur: Poldergemaal („Gouwenaar”, public domain)

- ▶ Gebruikelijke regeling (poldergemalen):
  - ▶ gaat aan bij aanslagpeil (streefpeil + 5 a 10 cm)
  - ▶ gaat uit bij afslagpeil (streefpeil - 5 a 10 cm)
- ▶ Gebruikelijke regeling (rioolgemalen):
  - ▶ gaat aan bij aanslagpeil (bovenkant onderkant inkomende buis B.O.B.)
  - ▶ gaat uit bij afslagpeil (veilige afstand boven bodem pompkelder)

- ▶ Handhaaft bovengrens alleen voor instroom  $<$  pomp capaciteit.
- ▶ Kan geen water inlaten (probleem bij „negatieve” instroom).
- ▶ Afstand tussen aanslagpeil en afslagpeil nodig om pendelen te voorkomen.
- ▶ Het is aan te bevelen peilmetingen af te schermen van golfjes.

1. Wat willen we bereiken?
  - 1.1 en hoe kwantificeren we succes?
2. Hoe kunnen we ingrijpen?
  - 2.1 Kunstwerken, pompen, enz.
3. Wat weten we?
  - 3.1 Beschikbare metingen.
  - 3.2 Kennis systeemgedrag.
    - ▶ Beschikbare voorspellingen (KNMI, bovenstroomse debietmetingen, ...).

- ▶ In boezem systemen stuurt men op opgeslagen volume
- ▶ Verval binnen peilvakken vaak zeer beperkt.
- ▶ Verval in een ononderbroken watergang eigenlijk altijd zeer beperkt.
  - ▶ Behalve nabij (te) grote gemalen.

## Voorbeeld voor verdere uitleg

- ▶ klein meertje (of netwerkje van sloten)
- ▶ ongeregelde instroom
- ▶ geregelde uitstroom
  - ▶ ofwel met regelbare stuw
  - ▶ ofwel met pomp met variabel toerental

- ▶ Probeer om voor een systeem dat u kent de kernvragen te beantwoorden (5 minuten)
- ▶ Overleg met uw burens (5 minuten)
- ▶ Korte samenvatting resultaten

1. Wat willen we bereiken?
  - 1.1 en hoe kwantificeren we succes?
2. Hoe kunnen we ingrijpen?
  - 2.1 Kunstwerken, pompen, enz.
3. Wat weten we?
  - 3.1 Beschikbare metingen.
  - 3.2 Kennis systeemgedrag.
    - ▶ Beschikbare voorspellingen (KNMI, bovenstroomse debietmetingen, ...).



## Regelen

Regelaars uit de praktijk.

Regeltechniek begrippen in context

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie

## Meertje met zomer en winterpeil.

- ▶ Zomerpeil  $-0,75\text{m}$  NAP, winterpeil  $-0,9\text{m}$  NAP.
- ▶ Gemiddeld debiet zomer:  $0,01 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ , winter:  $0,05 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ .
- ▶ Rechthoekige stuw,  $0,5\text{m}$  brede doorstroom opening,  $c_{\text{stuw}} = 1,7$ .
- ▶ Stand kruin: zomer:  $-0,72\text{m}$  NAP, winter  $-0,95\text{m}$  NAP.
- ▶ Verstellen handmatig op vaste data in het jaar.

- ▶ Algemene term voor alle regelingen zonder terugkoppeling
- ▶ Voorbeelden:
  - ▶ Regel actie op basis van ervaring, geen metingen, geen voorspellingen
  - ▶ Meertje met zomerpeil/winterpeil

- ▶ Streefpeil  $-0,75\text{m}$  NAP.
- ▶ Doorstroomregeling m.b.v. twee pompen.
- ▶ Instroom via pomp met vast toerental en gemeten debiet
- ▶ Uitstroom via pomp met variabel toerental
- ▶ Uitstroom volgt meting van instroom

- ▶ Speciale vorm van open loop:
  - ▶ Regel actie op basis van meting systeem invoer
  - ▶ Regeling uitgaande pomp voor singel

- ▶ Feedback  $\equiv$  terugkoppeling („closed loop”)
  - ▶ Regelactie op basis van meting van afstand tussen gewenste en actuele situatie
  - ▶ voorbeeld: proportionele regelaar

## Voorbeeld

Meertje met ongeregelde instroom, pomp met variabel toerental voor uitstroom. Streefpeil  $-0,8\text{m}$  NAP. Pompdebiet  $5 \times \left( \frac{h_{\text{waterstand}}}{1\text{m}} + 0,8 \right) \times 1\text{m}^3/\text{s}$ . Uitstroom is *proportioneel* met afwijking van streefpeil. Werking: uitstroom  $<$  instroom, peilafwijking groeit; uitstroom  $>$  instroom, peilafwijking neemt af.

In formule vorm ( $a$ : oppervlak in  $\text{m}^2$ , peilen in meters,  $dh/dt$  in  $\text{m/s}$ )

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q_{\text{in}} - (h - h_{\text{streefpeil}}) \times (5\text{m}^2/\text{s})}{a}$$

# Componenten van een regeling

- ▶ Waterpeil  $\xrightarrow{\text{sensor}}$  meetsignaal (sensor  $\equiv$  meetapparaat)
- ▶ meetsignaal  $\xrightarrow{\text{regelaar}}$  regelsignaal (regelaar vertaalt van beschikbare informatie naar gewenste actie)
- ▶ regelsignaal  $\xrightarrow{\text{actuator}}$  actie, die het systeem beïnvloedt (voorbeeld van actuator: pomp)



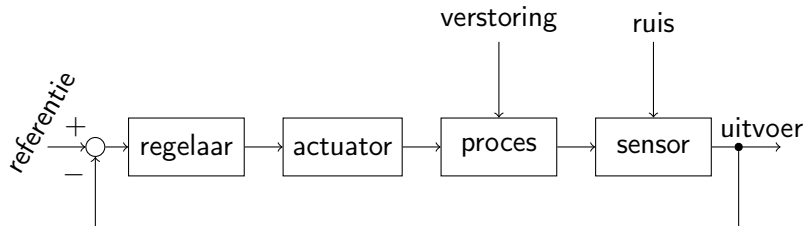
- ▶ Systeem: model van duidelijk afgebakend deel van de werkelijke wereld.
- ▶ Ingangsgrootheid (input): hoe de rest van de wereld het systeem beïnvloedt.
- ▶ Uitgangsgrootheid (output): hoe het systeem de rest van de wereld beïnvloedt.
- ▶ Toestand: het „geheugen” van het systeem.
- ▶ Referentiegrootheid: gewenste waarde voor een bepaalde uitgangsgrootheid.
- ▶ Afwijking: verschil tussen een uitgang en de bijbehorende referentie.

# Praten over samengestelde systemen

Een plaatje is  $10^n$  woorden waard ...

- ▶ Blokken: processen.
- ▶ Lijnen met pijlen: informatiestromen met richting (signalen).

## Plaatje



## Regelen

Regelaars uit de praktijk.

Regeltechniek begrippen in context

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie

- ▶ Fysische processen
- ▶ Grootheden veranderen meestal continu in de tijd

- ▶ Zeer zelden analoog (continu in de tijd en de uitvoer)
- ▶ Bijna allemaal digitaal en met tijdstappen

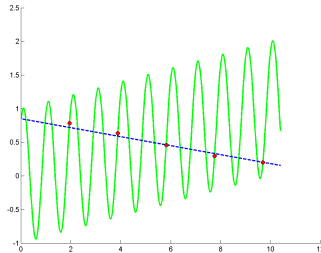
- ▶ Continue tijd  $\xrightarrow{\text{sampler}}$  discrete tijd: bemonsteren, „sampling”
- ▶ Discrete tijd  $\xrightarrow{\text{ZOH}}$  continue tijd: waarde vasthouden, ZOH = „Zero order hold”.

- ▶ Bijna altijd: beperking op aantal schakelingen/instellingswijzigingen per uur.
- ▶ Zeer zelden met hoge precisie instelbaar.

- ▶ Fysische systeemtoestand verandert continu in de tijd.
- ▶ Metingen worden  $x$  keer per uur ingewonnen.
- ▶ Computer (of PLC) berekent regelacties.
- ▶ Kunstwerken worden  $y$  keer per uur versteld.
- ▶ Dit zijn *hybride* systemen.



# Gevaar van een beperkt aantal metingen



**Figuur:** De cirkeltjes zijn metingen, wat is het echte signaal: stippellijn of slinger?

## Regelen

Regelaars uit de praktijk.

Regeltechniek begrippen in context

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie

## Beschrijving variant I

Een vijver (singel, peilvak) met een open water oppervlak  $a$  van  $1000\text{m}^2$  ontvangt een onbekende variabele instroom  $q_{\text{in}}(t)$ , die tussen de  $0,01 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$  en  $0,25 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$  ligt. Het streefpeil  $h_{\text{streef}}$  is  $-0,75\text{m}$  NAP. Een pomp met variabel toerental en een maximale capaciteit van  $0,27 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$  is beschikbaar om het overtollige water af te voeren. De instelling van de pomp wordt eens per  $\Delta t$  seconden aangepast.

## Beschrijving variant II

Als variant I, maar met een verstelbare stuw met doorstroombreedte  $1\text{m}$  en  $c_{\text{stuw}} = 1,7$  om het overtollige water af te voeren. De instelling van de kruin van de stuw wordt eens per  $\Delta t$  seconden aangepast.

In formule vorm

$$\frac{dh}{dt}(t) = \frac{q_{\text{in}}(t) - q_{\text{uit}}(t)}{a}$$

$$h(0) = h_{\text{initieel}}$$

In formule vorm

$$x(j) = k_p e(j) + k_I \sum_{i=0}^j e(i)$$

$$y(j) = x(j)$$

- ▶ Stel het regelende kunstwerk heeft onder en bovengrenzen op de regel actie

$$x(j) = k_p e(j) + k_i \sum_{i=0}^j e(i)$$

$$y(j) = \min(\max(0, x(j)), 1)$$

- ▶ Helaas blijft de som oplopen
- ▶ Als de verstoring ophoudt en fout nul wordt ...
- ▶ Wordt nog een tijdje - in de verkeerde richting - gestuurd

- ▶ Stel het regelende kunstwerk heeft onder en bovengrenzen op de regel actie

$$x(j) = k_p e(j) + k_i \sum_{i=0}^j e(i)$$

$$y(j) = \min(\max(0, x(j)), 1)$$

- ▶ Helaas blijft de som oplopen
- ▶ Als de verstoring ophoudt en fout nul wordt ...
- ▶ Wordt nog een tijdje - in de verkeerde richting - gestuurd

# Discrete PI regelaar (beschermd tegen „wind up”)



## In formule vorm

$$x(j) = y(j-1) + k_p(e(j) - e(j-1)) + k_I e(j)$$

$$y(j) = \min(\max(0, x(j)), 1)$$

- ▶ Als instroom  $\neq$  uitstroom zal het peil gaan afwijken van streefpeil.
- ▶ Een proportionele regelaar zal de uitstroom op de instroom afstemmen.
- ▶ Echter: er treedt een blijvende afwijking van streefpeil op.
- ▶ Het sommatie deel van een PI regelaar kan hiervoor in de loop van de tijd corrigeren.

## Vijver met bidirectionele pomp

Voor het gemak nemen we aan dat de pomp een onbeperkte maximum capaciteit heeft en in beide richtingen kan pompen, dus zowel water kan aanvoeren als afvoeren. Vijver water oppervlak  $a$  is  $1000\text{m}^2$ , het streefpeil  $h_{\text{streef}}$  is  $-0,75\text{m}$  NAP en de tijdstap  $\Delta t$  is  $300\text{s}$ . Stel op tijd  $t = 00 : 00 : 00$  (hh:mm:ss) is de instroom  $0\text{m}^3/\text{s}$ , maar tussen tijd  $t = 00 : 07 : 00$   $t = 00 : 09 : 00$  verandert dit lineair van  $0\text{m}^3/\text{s}$  naar  $0,24\text{m}^3/\text{s}$ . Daarna blijft deze instroom gehandhaafd.

## Rekenvoorbeeld deel II: tijdsevolutie proportioneel

tijd hh:mm:ss	peil m NAP	afwijking m	instroom $\text{m}^3/\text{s}$	actie $\text{m}^3/\text{s}$
00:00:00	-0,75	0	0	0
00:05:00	-0,75	0	0	0
00:07:00	-0,75	0	0	n.v.t.
00:08:00	-0,7464	0,0036	0,12	n.v.t.
00:09:00	-0,7356	0,0144	0,24	n.v.t.
00:10:00	-0,7212	0,0288	0,24	0,144
00:15:00	-0.6924	0,0576	0,24	0,288
00:20:00	-0.7068	0,0432	0,24	0,216
00:25:00	-0.6996	0,0504	0,24	0,252
00:30:00	-0.7032	0,0468	0,24	0,234
00:35:00	-0.7014	0,0486	0,24	0,243

Tabel: Tijdsevolutie,  $k_p = 5$ ,  $k_I = 0$

tijd hh:mm:ss	peil m NAP	afwijking m	afw. cumulatief m	instroom m <sup>3</sup> /s	actie m <sup>3</sup> /s
00:00:00	-0,75	0	0	0	0
00:05:00	-0,75	0	0	0	0
00:07:00	-0,75	0	n.v.t.	0	n.v.t.
00:08:00	-0,7464	0,0036	n.v.t.	0,12	n.v.t.
00:09:00	-0,7356	0,0144	n.v.t.	0,24	n.v.t.
00:10:00	-0,7212	0,0288	0,0288	0,24	0,2304
00:15:00	-0,7183	0,0317	0,0605	0,24	0,3398
00:20:00	-0,7483	0,0017	0,0622	0,24	0,1953
00:25:00	-0,7349	0,0151	0,0774	0,24	0,3078
00:30:00	-0,7552	-0,0052	0,0722	0,24	0,1905
00:35:00	-0,7403	0,0097	0,0818	0,24	0,2937

Tabel: Tijdsevolutie,  $k_P = 5$ ,  $k_I = 3$

Puur proportioneel

$$k_I = 0$$

$$0 < k_P < 2 \frac{a}{\Delta t}$$

Proportioneel met integrerende term

$$0 < k_P < 2 \frac{a}{\Delta t}$$

$$0 \leq k_I < 2 \left( 2 \frac{a}{\Delta t} - k_P \right)$$

- ▶ Geen algemene regels, behalve stabiliteits eisen
- ▶ Kies hoge  $k_p$ , lage  $k_i$  als oscillaties ongewenst zijn
- ▶ Kies lage  $k_p$ , hoge  $k_i$  als snel naar streefpeil het belangrijkst is
- ▶ Houdt altijd een marge voor fouten in  $a$  en/of  $\Delta t$
- ▶ Bij een kanaal: neem  $a$  op basis van „vlakke” deel van stuwkromme.





- ▶ Korte instructie Sobek en gezamenlijk doorlopen eerste deel van eerste oefening.
- ▶ In paren werken aan overige oefeningen.