

# Meten, sturen en regelen

R.R.P. van Nooijen

Afdeling Water management  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Technische Universiteit Delft

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

## Sturen en Regelen

- Voorbeelden uit de praktijk
- Sturingstypes in context

## Regeltechniek

- Componenten en systemen
- Hybride systemen

## De PI regelaar

- Theorie
- Practicum

## Sturen en Regelen

Voorbeelden uit de praktijk

Sturingstypes in context

## Regeltechniek

Componenten en systemen

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie

Practicum



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  $b$  = doorstroombreedte en  $c_{\text{stuw}}$  = kunstwerk afhankelijke constante (meestal  $1 < c_{\text{stuw}} < 2$ ).

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

- ▶ 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;
  - 3.3 Beschikbare voorspellingen (KNMI, bovenstroomse debietmetingen, ...).

- ▶ 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;
  - 3.3 Beschikbare voorspellingen (KNMI, bovenstroomse debietmetingen, ...).

## Sturen en Regelen

Voorbeelden uit de praktijk

Sturingstypes in context

## Regeltechniek

Componenten en systemen

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie

Practicum

### Voorbeeld: 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,  $2,0\text{m}$  brede doorstroom opening,  $c_{\text{stuw}} = 1,7$ .
- ▶ Stand kruin: zomer:  $-0,77\text{m}$  NAP, winter  $-0,96\text{m}$  NAP.
- ▶ Verstellen handmatig op vaste data in het jaar

### „Definitie”

- ▶ Algemene term voor alle regelingen zonder terugkoppeling
- ▶ Regel actie op basis van ervaring, geen metingen, geen voorspellingen



### Voorbeeld: 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,  $2,0\text{m}$  brede doorstroom opening,  $c_{\text{stuw}} = 1,7$ .
- ▶ Stand kruin: zomer:  $-0,77\text{m}$  NAP, winter  $-0,96\text{m}$  NAP.
- ▶ Verstellen handmatig op vaste data in het jaar

### „Definitie”

- ▶ Algemene term voor alle regelingen zonder terugkoppeling
- ▶ Regel actie op basis van ervaring, geen metingen, geen voorspellingen

# Voorwaartsregeling of voorwaartse koppeling

Feed forward

## Voorbeeld: Singel met regelbare pompen

- ▶ 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

## „Definitie”

- ▶ Speciale vorm van sturing
- ▶ Regel actie op basis van meting systeem *invoer*
- ▶ Regeling uitgaande pomp voor singel

# Voorwaartsregeling of voorwaartse koppeling

Feed forward

## Voorbeeld: Singel met regelbare pompen

- ▶ 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

## „Definitie”

- ▶ Speciale vorm van sturing
- ▶ Regel actie op basis van meting systeem *invoer*
- ▶ Regeling uitgaande pomp voor singel

# Terugkoppeling of Gesloten regelkring

## Feedback

Voorbeeld: Overlaat die bovenstrooms peil regelt

- ▶ Debiet proportioneel met  $(\text{waterhoogte boven kruin})^{3/2}$

„Definitie”

- ▶ Regelactie op basis van meting van verschil tussen gewenste en actuele situatie

# Terugkoppeling of Gesloten regelkring

## Feedback

Voorbeeld: Overlaat die bovenstrooms peil regelt

- ▶ Debiet proportioneel met  $(\text{waterhoogte boven kruin})^{3/2}$

„Definitie”

- ▶ Regelactie op basis van meting van verschil tussen gewenste en actuele situatie

# Lineaire proportionele regelaar (continu)

## Terugkoppeling of Gesloten regelkring

### Voorbeeld: Meertje met ongeregelde instroom $q_{in}$

Pomp met variabel toerental voor uitstroom. Streefpeil  $-0,8\text{m}$  NAP. Pompdebiet  $\left(\frac{h_{\text{meertje}}}{1\text{m}} + 0,8\right) \times 5\text{m}^3/\text{s}$ . Uitstroom is *lineair 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  $\text{m/s}$ )

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

## Sturen en Regelen

Voorbeelden uit de praktijk  
Sturingstypes in context

## Regeltechniek

Componenten en systemen  
Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie  
Practicum

# Componenten

De juiste vertaler op de juiste plek

- ▶ Fysische grootheid  $\xrightarrow{\text{sensor}}$  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)

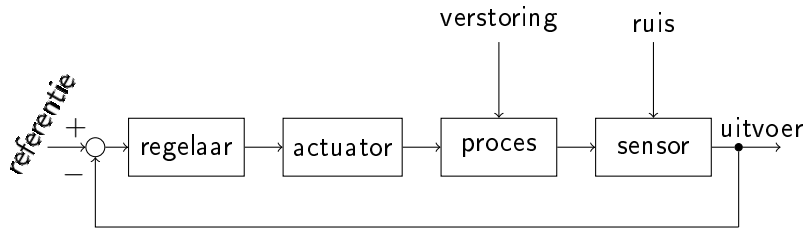


- ▶ Systeem: model van duidelijk afgebakend deel van de werkelijke wereld
- ▶ Ingangsgrootte (input): hoe de rest van de wereld het systeem beïnvloedt
- ▶ Uitgangsgrootte (output): hoe het systeem de rest van de wereld beïnvloedt
- ▶ Toestand (state): het „geheugen” van het systeem
- ▶ Referentiegrootte: gewenste waarde voor een bepaalde uitgangsgrootte
- ▶ Afwijking (error): 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).



## Sturen en Regelen

Voorbeelden uit de praktijk

Sturingstypes in context

## Regeltechniek

Componenten en systemen

Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie

Practicum

Watersysteem = te regelen proces

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

Computer = regelaar

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

Actuatoren

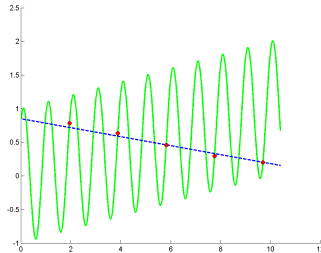
- ▶ Bijna altijd: beperking op aantal schakelingen/instellingswijzigingen per uur.
- ▶ Zeer zelden met hoge precisie instelbaar.

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

# Automatische sturing in het Waterbeheer.

- ▶ Fysische systeemtoestand verandert continu in de tijd
- ▶ Metingen worden  $m$  keer per uur ingewonnen
- ▶ Computer (of PLC) berekent regelacties
- ▶ Kunstwerken worden  $n$  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?

## Sturen en Regelen

Voorbeelden uit de praktijk  
Sturingstypes in context

## Regeltechniek

Componenten en systemen  
Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie  
Practicum



## 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.

## Vijver

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

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

peil  $h$ , uitstroom  $q_{\text{uit}}$ , en initieel peil  $h_{\text{initieel}}$ .

## Discrete PI regelaar

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

waar  $e(j)$  de afwijking van streefpeil is op tijd  $t_j$  en  $u(j)$  de regel actie van  $t_j$  to  $t_{j+1}$ .

## „Integrator wind up”

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

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

$$u(j) = \min(\max(0, u_{\text{hulp}}(j)), 1)$$

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

## „Integrator wind up”

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

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

$$u(j) = \min(\max(0, u_{\text{hulp}}(j)), 1)$$

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

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

$$u_{\text{hulp}}(j) = u(j-1) + k_P(e(j) - e(j-1)) + k_I e(j)$$

$$u(j) = \min(\max(0, u_{\text{hulp}}(j)), 1)$$

- ▶ 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,  $k_p = 5$ ,  $k_I = 0$



## Rekenvoorbeeld deel III: tijdsevolutie PI

tijd hh:mm:ss	peil m NAP	afwijking m	afw. cumulatief m	instroom $\text{m}^3/\text{s}$	actie $\text{m}^3/\text{s}$
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

# Stabiliteit discrete proportionele regelaar

Informeel en optioneel

- ▶ Geen instroom
- ▶ regeling puur lineair

$$h_{k+1} - h_k = -k_p \frac{(300\text{s}) \times 1\text{m}^3\text{s}^{-1}}{1000\text{m}^2} (h_k - h_{\text{ref}})$$

$$(h_{k+1} - h_{\text{ref}}) = \left(1 - k_p \frac{(300\text{s}) \times 1\text{m}^3\text{s}^{-1}}{1000\text{m}^2}\right) (h_k - h_{\text{ref}})$$

$$(h_{k+1} - h_{\text{ref}}) = \left(1 - k_p \frac{(300\text{s}) \times 1\text{m}^3\text{s}^{-1}}{1000\text{m}^2}\right)^2 (h_{k-1} - h_{\text{ref}})$$

## Sturen en Regelen

Voorbeelden uit de praktijk  
Sturingstypes in context

## Regeltechniek

Componenten en systemen  
Hybride systemen

## De PI regelaar

Theorie  
Practicum

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