

6 Proces-respons

DOELSTELLINGEN

- Het gedrag van een nulde-orde-proces (+ dode tijd) verklaren.
- Het begrip procesversterking verduidelijken aan de hand van een voorbeeld.
- Het dynamisch gedrag van een eerste-orde-proces (+ dode tijd) toelichten.
- Grafisch de tijdsconstante van een eerste-orde proces bepalen.
- Het begrip stapresponsie verklaren.
- Aan de hand van een voorbeeld een tweede-orde proces (+ dode tijd) toelichten.

In het vorige hoofdstuk hebben we de niet zelfregelende processen reeds besproken. Dit hoofdstuk is volledig gewijd aan de zelfregelende processen.

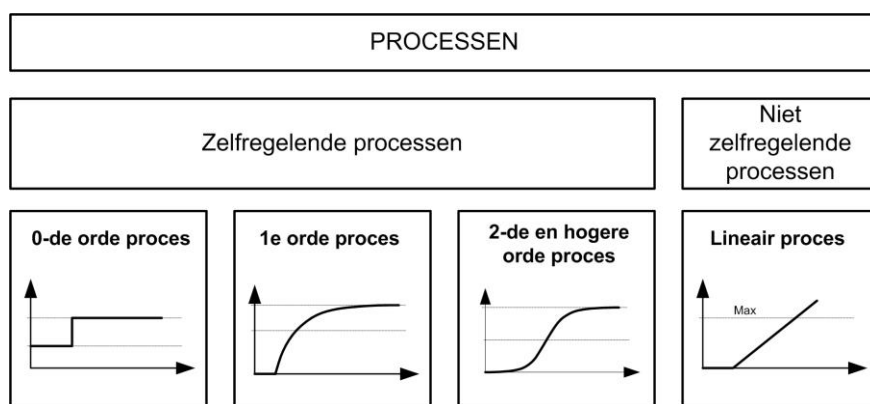


Fig. 6.1 tabel verschillende processen

Zoals u op de blokschematische voorstelling kan zien zijn de zelfregelende processen onderverdeeld in 3 grote blokken:

- De nulde orde processen
- De eerste orde processen
- De tweede en hogere orde processen

6.1 Dynamisch gedrag van een proces

Om de dynamische eigenschappen van een proces te weten is het absoluut niet nodig om het volledige proces te kennen, en is het al helemaal overbodig om een volledig wiskundig model van dit proces te schrijven.

Het dynamisch gedrag van een proces meten we op door de ingangswaarde van het proces geforceerd stapvormig te laten stijgen en aan de uitgang van het proces met een penrecorder op te tekenen hoe dit proces hierop reageert. Dit noemen we de stapresponsie of stapantwoord zoals we in hoofdstuk 5 reeds behandeld hebben.

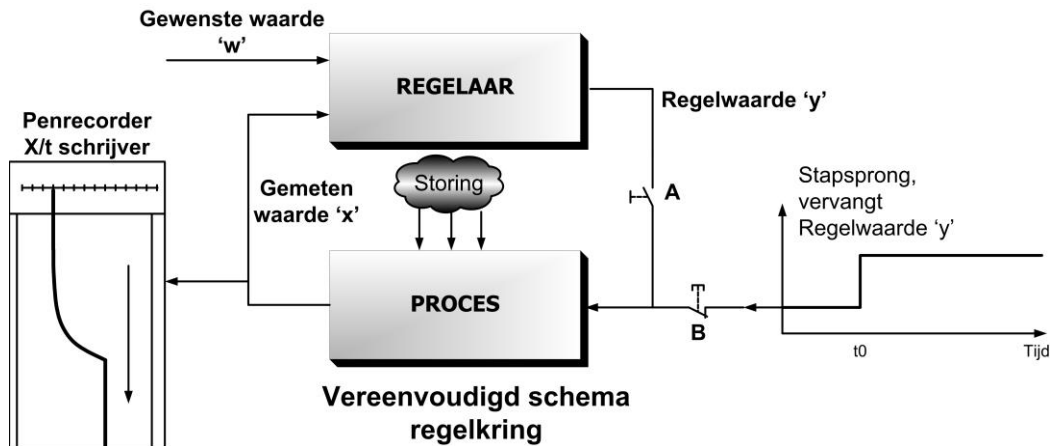


Fig.6.2 opnemen procesresponsie

Uit deze procesresponsie komen we volgende zaken te weten:

- Het type proces (0^{de} – 1^{ste} – 2^{e} of hogere orde proces)
- De versterkingsfactor van het proces
- De tijdsconstante en dode tijd van het proces.

Deze 3 zaken hebben we nodig om te weten hoe we de regelaar optimaal kunnen instellen om dit proces stabiel te houden.

6.2 De statische proceskarakteristiek

De volledige statische proceskarakteristiek moet worden opgenomen door:

- Aan de ingang van het proces vele verschillende regelwaarden 'y' aan te leggen.
- Aan de uitgang van het proces meten met welke uitgangswaarde 'x' deze regelwaarde 'y' overeen komt.
- Al de punten worden op grafiek uitgezet.

Als we dit doen, dan bekomen we de linkse karakteristiek:

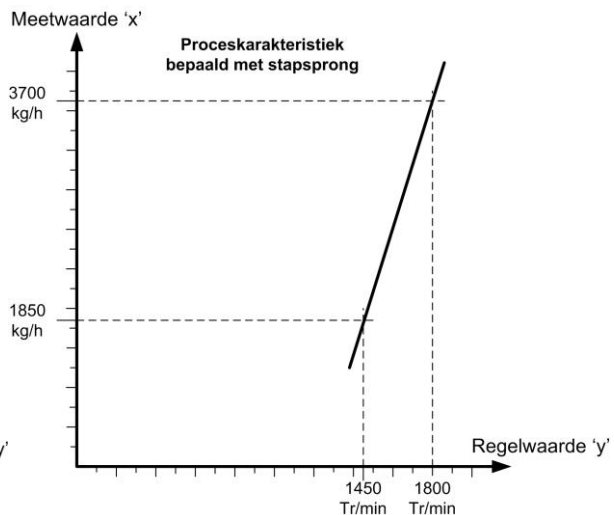
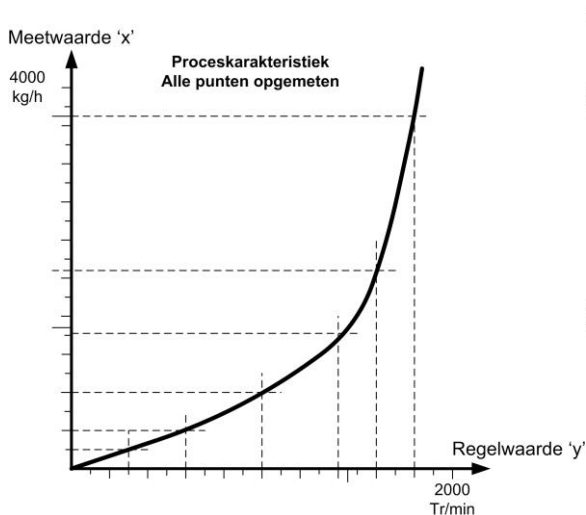


Fig. 6.3 volledige proceskarakteristiek Fig. 6.4 proceskarakteristiek 2 punten

We kunnen ook een gedeeltelijke proceskarakteristiek bepalen uit het opmeten van de stapsprong. De stapsprong legt eigenlijk 2 verschillende ingangswaarden

aan, aan het proces en meet aan de uitgang hoe het proces hierop reageert. Dit resulteert in de rechtse grafiek.

We hebben nu slechts 2 punten, en kunnen dus slechts een gedeeltelijke proceskarakteristiek bepalen. Dit is in de meeste gevallen echter ruim voldoende.

Meestal zal de proceskarakteristiek, opgetekend via de stapsprong methode, niet zo sterk verschillen van de proceskarakteristiek, opgetekend met alle punten gemeten. In het voorbeeld dat hier is gebruikt, is dit sterk overdreven om het verschil duidelijk te maken.

Uit deze karakteristiek kan men afleiden:

- Welke uitgangswaarde van het proces overeenkomt met welke uitgangswaarde van de regelaar.
- Als men storingen gaat toepassen op het systeem, dan kan men de proceskarakteristiek terug opmeten met deze storing en zien welke invloed deze storing op het proces heeft.

6.3 De versterkingsfactor 'Ks' van een proces

De versterkingsfactor van een proces is de verhouding van de gemeten waarde 'x' tot de stuurwaarde 'y' van een proces. Deze versterkingsfactor kan zowel uit de statische proceskarakteristiek als uit de dynamische proceskarakteristiek (stapantwoord) worden afgeleid.

We gaan na stabilisatie van de uitgang van het proces, meten hoe sterk de uitgangswaarde verandert is (dx) ten opzichte van een bepaalde verandering (stapsprong) aan de ingang van het proces (dy).

$$K_s = dx/dy \quad \text{of} \quad dx = K_s \times dy$$

Meestal proberen we deze procesversterking op 1 te houden.

De naam 'versterking' in procesversterking is misschien een beetje ongelukkig gekozen. De naam 'verhouding' of 'verband' zou beter zijn. De naam versterking kan eigenlijk enkel worden toegepast als de uitgangsgrootte gelijk is aan de ingangsgrootte en dat is bij processen zelden het geval. We gebruiken echter deze term toch omdat deze algemeen aanvaard is.

Bij processen sturen we een bepaald percentage klepopening in en krijgen we bijvoorbeeld een debiet in liter/h als uitgangswaarde.

$$\text{De procesversterking wordt in dit geval uitgedrukt in } K_s = \frac{\text{liter / h}}{\% \text{klepopening}}$$

6.4 Nulde orde proces met en zonder dode tijd

We gaan de dynamische proceskarakteristiek opmeten aan de hand van een stapantwoord.

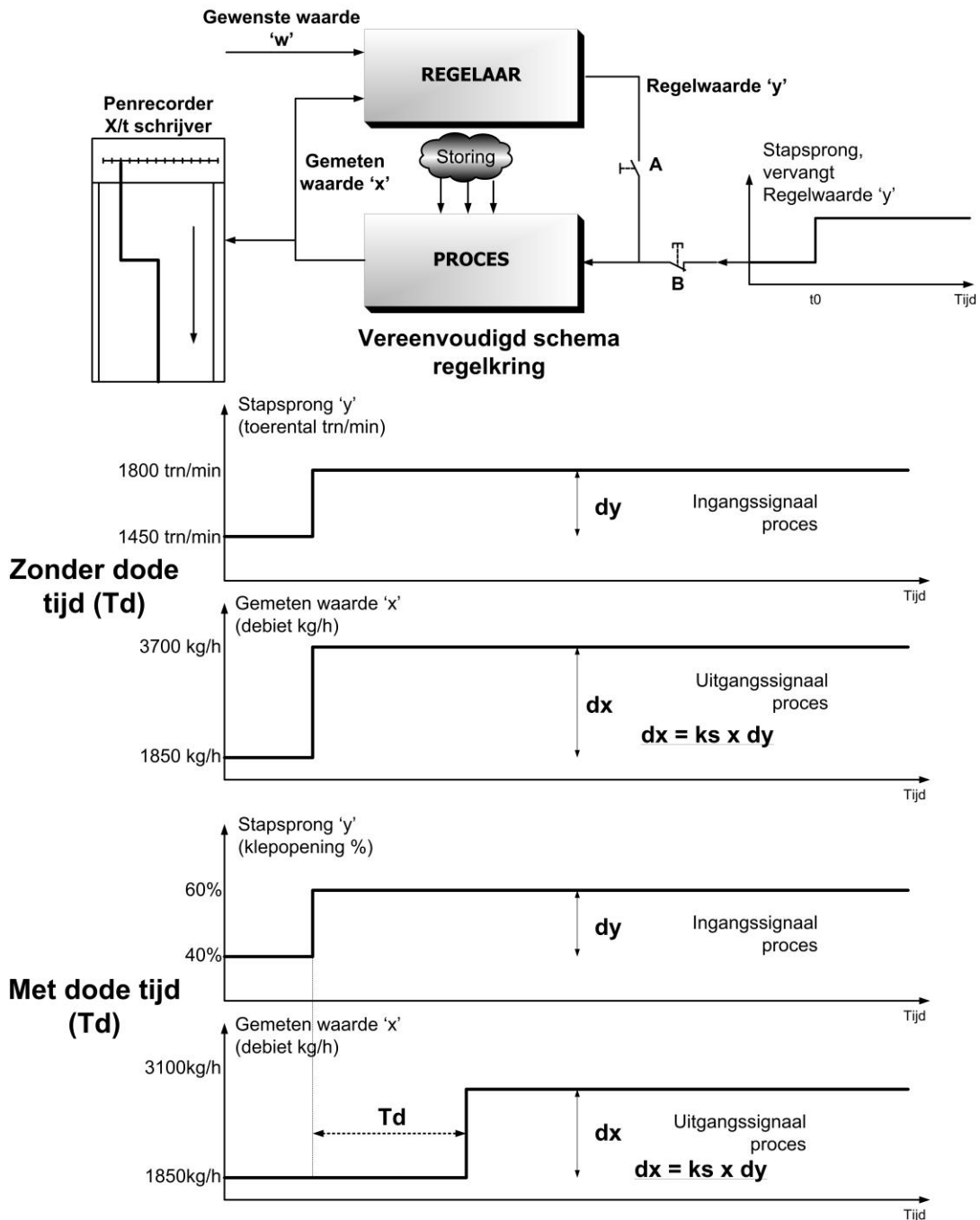


Fig. 6.5 Nulde orde proces met en zonder dode tijd

Zoals je kan zien leggen we hier aan de ingang van het proces een stapspiong aan met een grootte dy en meten we aan de uitgang hoe dit proces hierop reageert.

Een **nulde orde proces zonder dode tijd** reageert hier direct en zonder tijdsconstante op. Dat wil zeggen dat een verandering aan de ingang van

het proces aan de uitgang meteen meetbaar is en dat de proceswaarde oneindig snel stijgt.

Een voorbeeld van een nulde orde proces zonder dode tijd is onderstaande transportband.

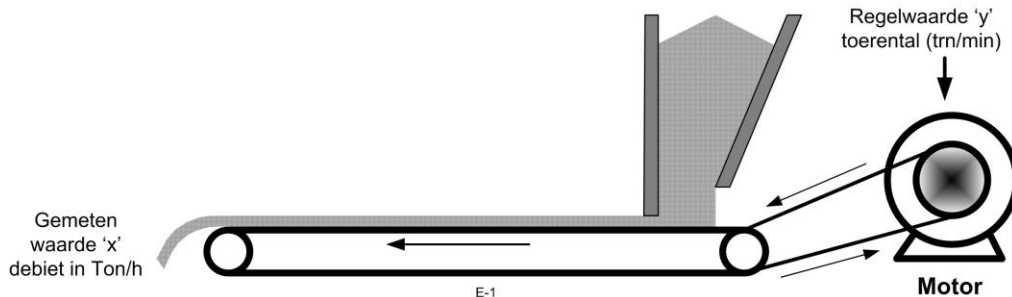


Fig. 6.6 voorbeeld nulde orde proces zonder dode tijd

Als het motortoerental stijgt, dan zal dit meteen merkbaar zijn in de debiet meting aan de uitgang van het proces.

Andere voorbeelden zijn de spanning over een ohmse belasting en druk of debietregelingen op een vloeistof in een buis, gemeten vlak na de regelklep.

Een **nulde orde proces met dode tijd** reageert hier ook op zonder vertraging in de stijging van de uitgangswaarde van het proces, maar voordat we dit aan de uitgang kunnen meten is er een zekere tijd gepasseerd. Dit verschil in het moment van aanleggen van de stapsprong en het moment dat we aan de uitgang van het proces iets kunnen meten, noemen we de dode tijd.

Dezelfde transportband, echter met een andere ingangswaarde is een mooi voorbeeld van een nulde orde proces met dode tijd.

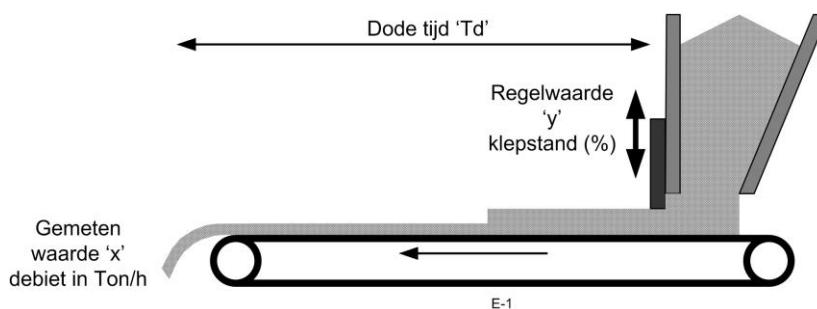


Fig. 6.7 Voorbeeld nulde orde proces met dode tijd

Het is heel duidelijk dat als we hier de klepstand bijvoorbeeld vergroten, het een zekere tijd duurt voordat deze verandering ook aan de uitgang (debiet meting) merkbaar is. Deze tijd noemen we de dode tijd.

Proceskarakteristiek van deze 2 processen:

De proceskarakteristiek wordt hier getekend aan de hand van de gegevens van de opneming van het stapantwoord. We hebben hier dus slechts 2

punten om de karakteristiek te tekenen, maar dat beschouwen we hier als voldoende.

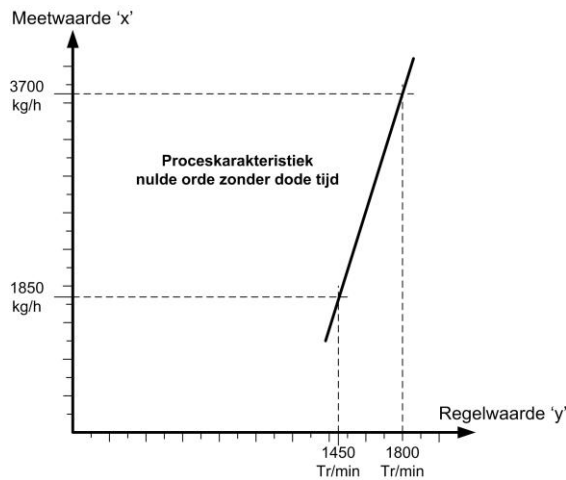


Fig. 6.8 proceskarakteristiek a

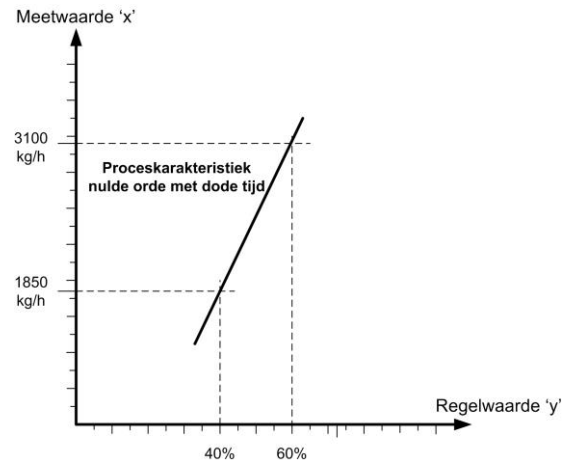


Fig. 6.9 proceskarakteristiek b

Procesversterking van deze 2 processen:

Procesversterking Nulde orde zonder T_d

$$K_s = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} = \frac{3700 \text{ kg/h} - 1850 \text{ kg/h}}{1800 \text{ tr/min} - 1450 \text{ tr/min}} = \frac{1850 \text{ kg/h}}{350 \text{ tr/min}} = 5286 \frac{\text{kg/h}}{1000 \text{ tr/min}}$$

Te lezen als: 5286 'kilogram per uur' per 'duizend toeren per minuut'.

Procesversterking Nulde orde met T_d

$$K_s = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} = \frac{3100 \text{ kg/h} - 1850 \text{ kg/h}}{60\% - 40\%} = \frac{1250 \text{ kg/h}}{20\%} = 62,5 \frac{\text{kg/h}}{\% \text{ klepopening}}$$

Te lezen als: 62,5 'kilogram per uur' per 'procent klepopening'.

6.5 Eerste orde proces met en zonder dode tijd

We meten de dynamische proceskarakteristiek van een eerste orde proces op, aan de hand van een stapantwoord.

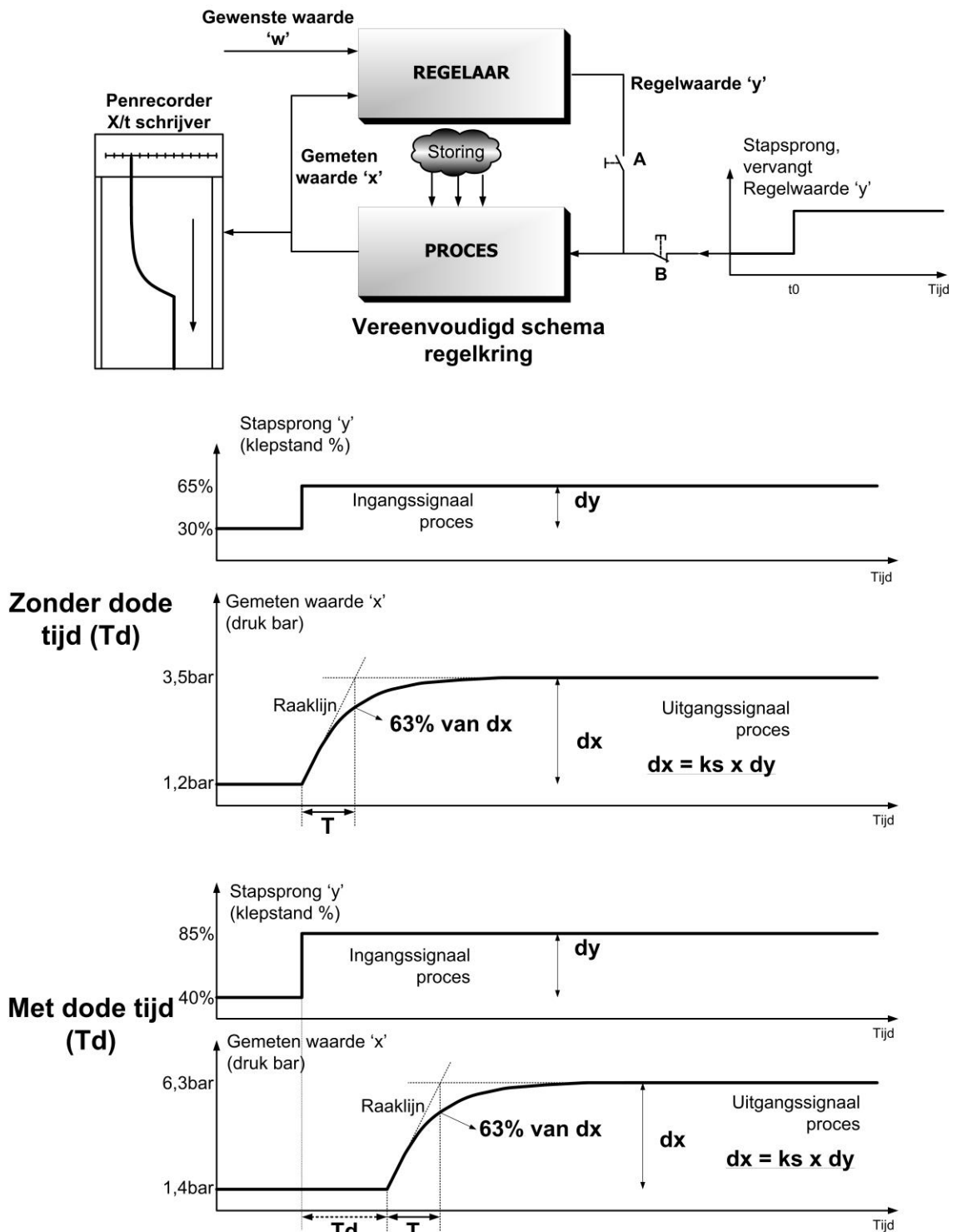


Fig. 6.10 Eerste orde proces met en zonder dode tijd

Eerste orde proces zonder dode tijd: Zoals u kan zien is bij dit proces de snelheid van het stijgen van de uitgangswaarde van het proces niet meer oneindig zoals dat bij het nulde orde proces wel het geval was.

De vorm waarmee de uitgangswaarde 'x' van dit proces naar zijn nieuwe evenwichtswaarde gaat, bepaald dat dit een eerste orde proces is.

De tijd die het proces nodig heeft om naar de nieuwe waarde te stijgen noemen we de tijdsconstante 'T'.

Deze tijdsconstante wordt grafisch bepaald door de raaklijn te tekenen aan de stijglijn van de grafiek. Het snijpunt van deze raaklijn met de nieuwe waarde bepaald mee de tijdsconstante.

Deze typische vorm van een eerste orde proces herkennen we van het 'opladen van een condensator via een weerstand'.

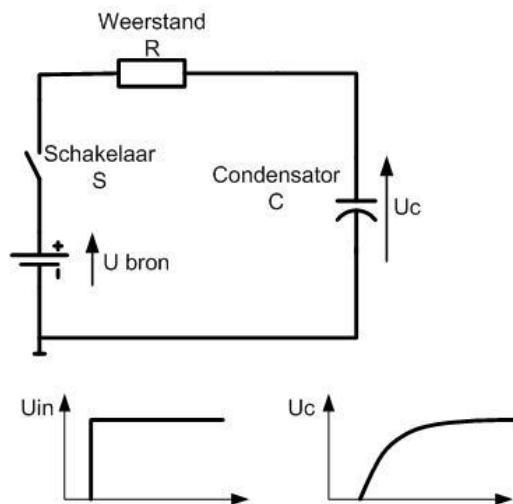


Fig. 6.11 Opladen condensator

De spanning over de weerstand stijgt exponentieel naar de bronspanning na het sluiten van de schakelaar S.

De snelheid waarmee deze condensatorspanning stijgt is afhankelijk van de tijdsconstante T.

De tijdsconstante in een RC kring wordt bepaald door: $T = R \times C$

De wiskundige formule die wordt gebruikt om een eerste orde grafiek te bepalen is de volgende:

Een stijgende grafiek: $Uc = U(1 - e^{\frac{-t}{T}})$

Via deze formule kan je bepalen dat na 1T 63% van de uitgangswaarde bereikt is en dat het 5T duurt voordat de proceswaarde zijn maximale waarde bereikt heeft en terug stabiel is. Anders gezegd: 'de tijdsconstante

T is de tijd die een proces nodig heeft om 63% van de eindwaarde te bereiken'.

Een mooi voorbeeld van een eerste orde proces uit de procesindustrie is de druk in een drukvat. Deze druk verandert exponentieel in verhouding met de klepstand. De grootte van vat, klep en buizen bepalen de tijdsconstante en dus de stijgsnelheid van de druk van dit proces.

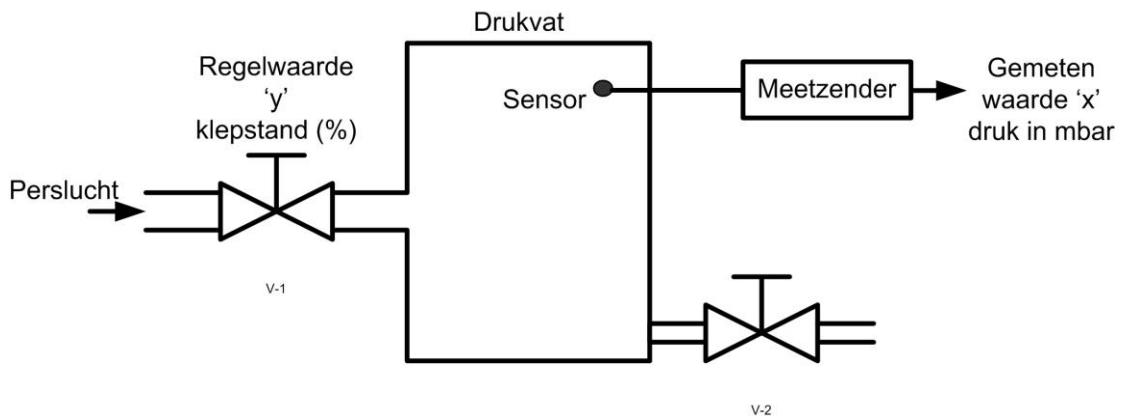


Fig. 6.12 Voorbeeld eerste orde proces zonder dode tijd

Dode tijden worden bij eerste en tweede orde processen vooral veroorzaakt doordat het regelorgaan (de klep) en de sensor die de verandering zal moeten meten, een zekere afstand van elkaar staan. Hierdoor zal er een zekere dode tijd passeren voordat een bijgeregelde waarde ook daadwerkelijk meetbaar is aan de uitgang.

Een voorbeeld hiervan is onderstaand proces:

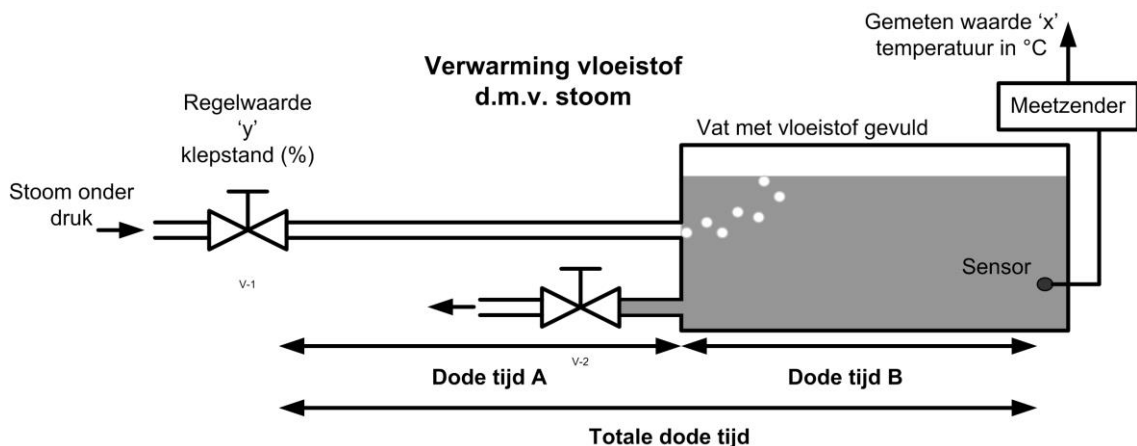


Fig. 6.13 Voorbeeld eerste orde proces met dode tijd

De verwarming van het water gebeurt hier door een rechtstreekse injectie van hete stoom.

De dode tijd is hier eigenlijk een samenstelling van de dode tijd veroorzaakt door een lange procesleiding tussen klep en vat en een 2^e dode tijd, veroorzaakt door een grote afstand tussen de plaats waar de hete stoom wordt geïnjecteerd en de plaats waar de sensor de temperatuur gaat meten.

Proceskarakteristiek van de 2 eerste orde processen.

Teken zelf aan de hand van de stapantwoorden een proceskarakteristiek voor het eerste orde proces zonder dode tijd en één voor het eerste orde proces met dode tijd:

Proceskarakteristiek eerste orde proces zonder en met dode tijd:

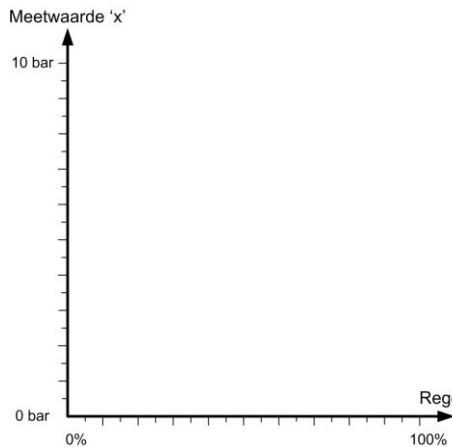


Fig. 6.14

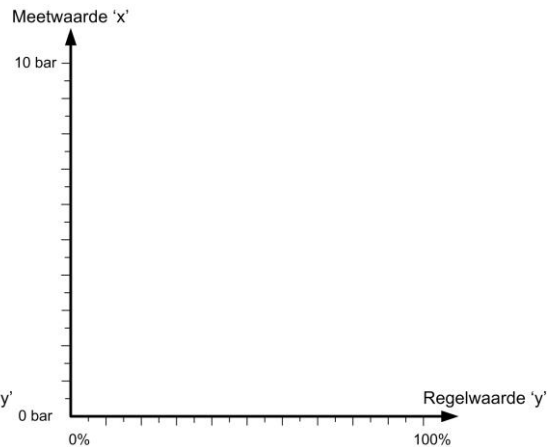


Fig. 6.15

Versterkingsfactor van de 2 eerste orde processen.

Bereken zelf aan de hand van de stapantwoorden de procesversterking van het eerste orde proces zonder dode tijd en van het eerste orde proces met dode tijd:

Eerste orde zonder T_d

$K_s =$

Eerste orde met T_d

$K_s =$

6.6 Tweede orde proces

Ook de dynamische proceskarakteristiek van een tweede orde proces meten we op aan de hand van een stapantwoord.

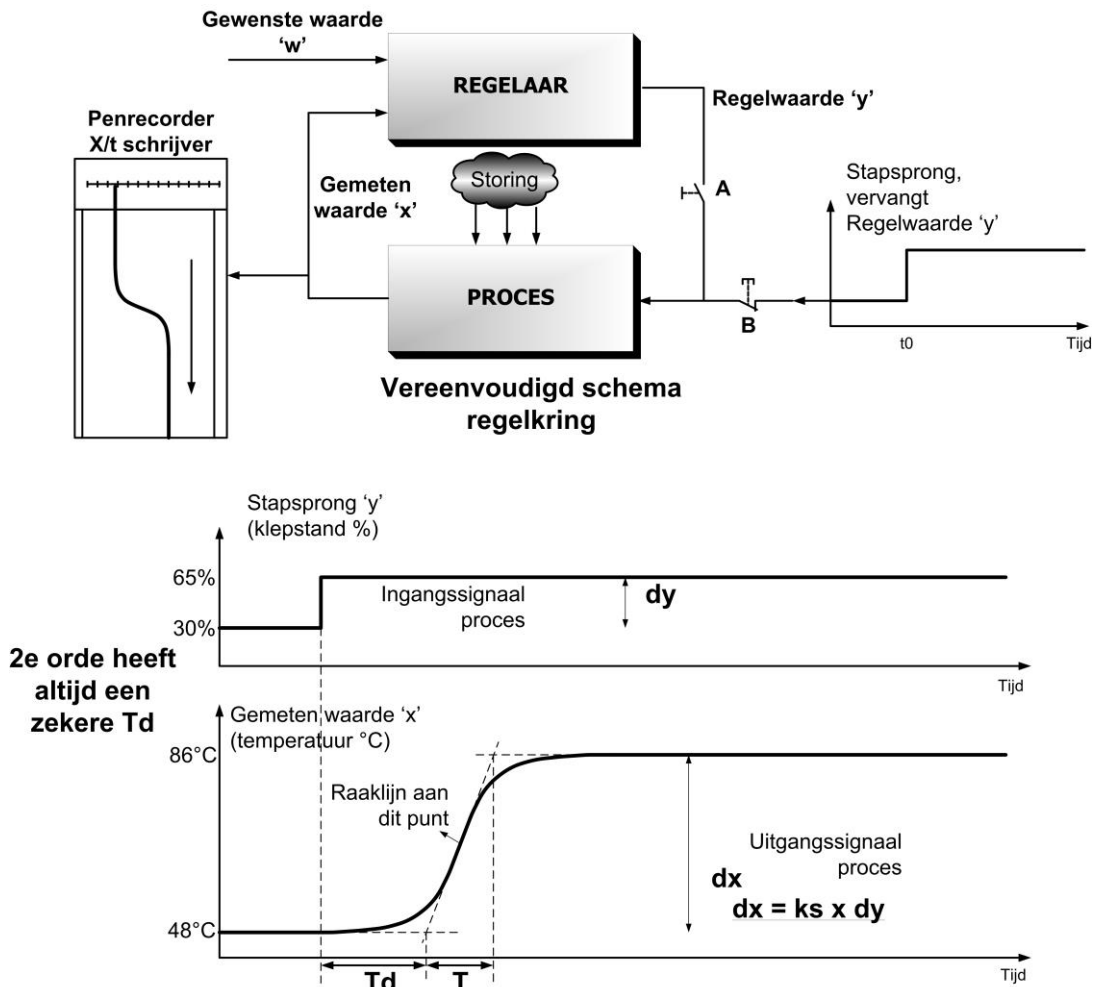


Fig. 6.16 Tweede orde proces

Je ziet hier de specifieke S-vorm die bij 2^e en hogere orde processen altijd aanwezig is. Hogere orde processen blijven die S-vorm behouden, enkel de tijdsconstante wordt groter zoals u hieronder ziet.

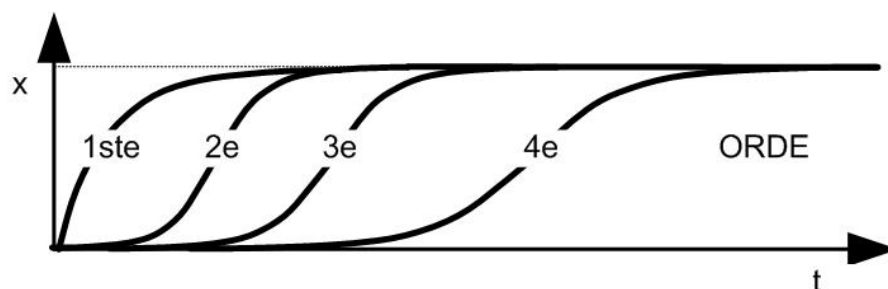


Fig. 6.17 Hogere orde processen

We merken hier ook dat er geen specifiek onderscheid meer wordt gemaakt tussen 2^e orde processen met en zonder dode tijd. 2^e orde processen hebben altijd een zekere dode tijd doordat ze in het begin zo traag beginnen te stijgen.

De Tijdsconstante 'T' wordt hier ook grafisch bepaald door de raaklijn te tekenen aan het middelste punt van de grafiek.

De dode tijd is de tijd tussen het aanleggen van de stapsprong en het kruispunt van de raaklijn met de beginwaarde.

In sommige handboeken wordt er een onderscheid gemaakt tussen de dode tijd, te wijten aan de trage stijging van een 2^e orde proces en de 'echte' dode tijd, veroorzaakt door vertragingen in het proces. In dit boek doen we dit voor alle eenvoud niet.

Een 2^e orde proces is gewoonlijk, en kan je altijd voorstellen als, een samenstelling van 2 eerste orde processen. Als je namelijk 2 eerste orde processen na elkaar zet, dan bekom je wonderbaarlijk genoeg, een tweede orde proces.

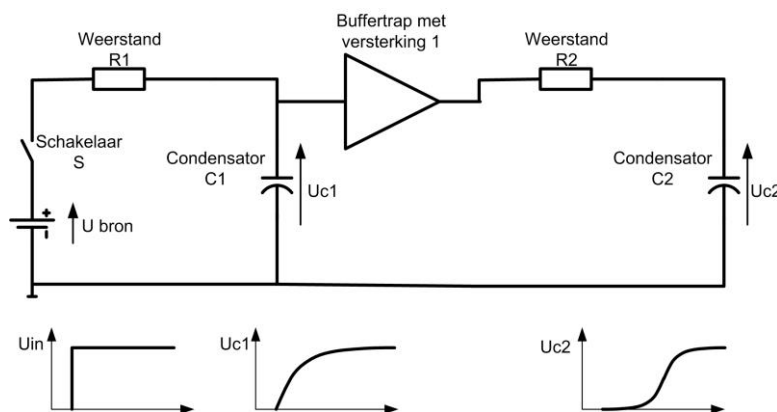


Fig. 6.18 Tweede orde RC netwerk

De 2 RC kringen na elkaar illustreren dit heel mooi. De buffertrap heeft als enig doel dat de 2^e trap de eerste niet zou belasten. De uitgangswaarde van de eerste trap ' U_{c1} ' wordt terug gebruikt als ingangswaarde voor de 2^e trap. Als je nu de laadcurve van de condensatorspanning van de 2^e trap opneemt, dan bekom je de S-vorm die typisch is voor een 2^e orde proces.

Dit is het mooiste bewijs dat 2 eerste orde processen na elkaar, samen een tweede orde proces vormen.

Een mooi voorbeeld van een **tweede orde proces zonder dode tijd** uit de procesindustrie is het opwarmen van een vat met vloeistof, dit keer echter via een warmtewisselaar.

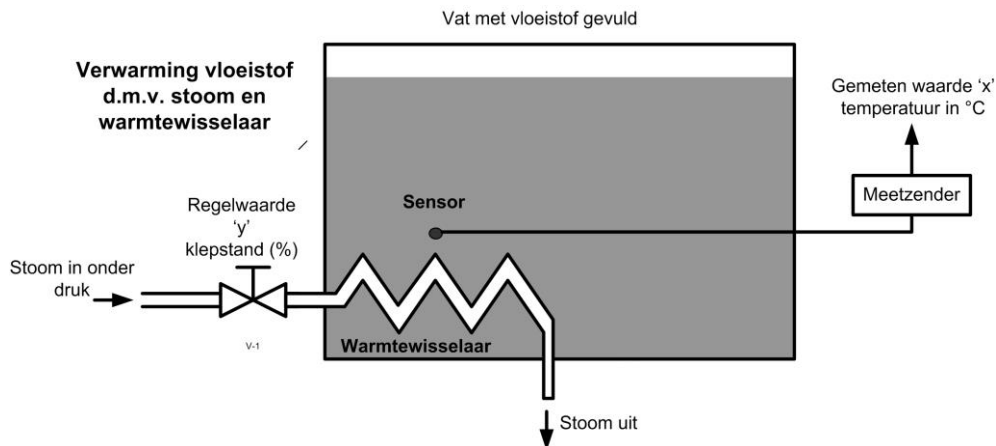


Fig. 6.19 Voorbeeld tweede orde (kleine dode tijd)

Een warmtewisselaar zorgt ervoor dat de stoom nooit in aanraking komt met de op te warmen vloeistof. Men spreekt hier van een gescheiden proces. Eigenlijk is de opwarming van de warmtewisselaar op zich al een eerste orde proces dat op zijn beurt zijn warmte moet afgeven aan een vat met vloeistof, ook een eerste orde proces. Twee eerste orde processen na elkaar vormen een tweede orde proces en dat verklaart de S-vorm die de meetzender van dit proces gaat opmeten.

Ook bij **tweede orde processen** kunnen er nog 'echte' **dode tijden** voorkomen, meestal veroorzaakt doordat het meetorgaan (de sensor) ver verwijderd is van het corrigerend orgaan (de regelklep) en zo veranderingen in de klepstand pas vertraagd zal opmerken.

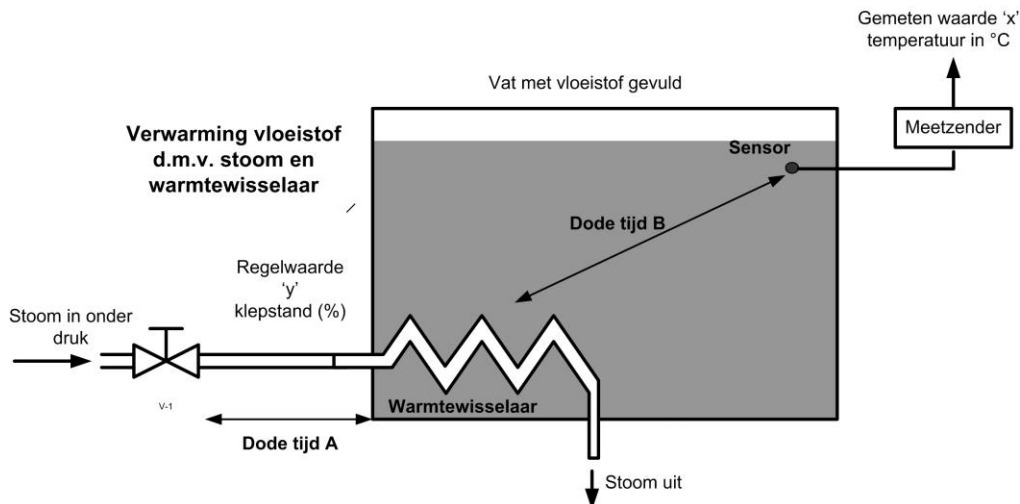


Fig. 6.20 Voorbeeld tweede orde met grote dode tijd

U merkt dat hier de pijp tussen klep en warmtewisselaar langer is en dat de afstand tussen sensor en warmtewisselaar ook groter is. Deze afstanden zorgen voor het vertraagd opmeten van een bijregeling en veroorzaken een dode tijd.

Proceskarakteristiek van het tweede orde proces

Teken zelf aan de hand van het stapantwoord een proceskarakteristiek voor het tweede orde proces.

Proceskarakteristiek tweede orde proces.

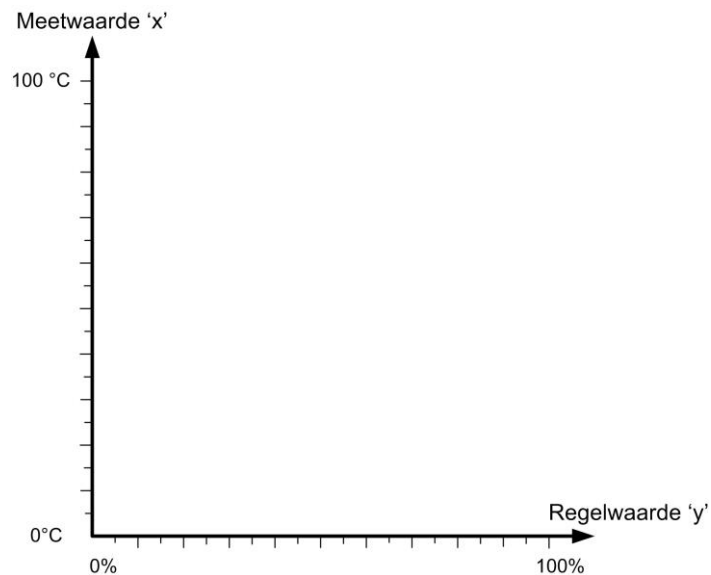


Fig. 6.21 proceskarakteristiek tweede orde proces

Versterkingsfactor van het tweede orde proces.

Bereken zelf aan de hand van het stapantwoord de procesversterking van het tweede orde proces.

$K_S =$

6.7 Oefeningen:

1. Bepaal grafisch van onderstaand proces de dode tijd.

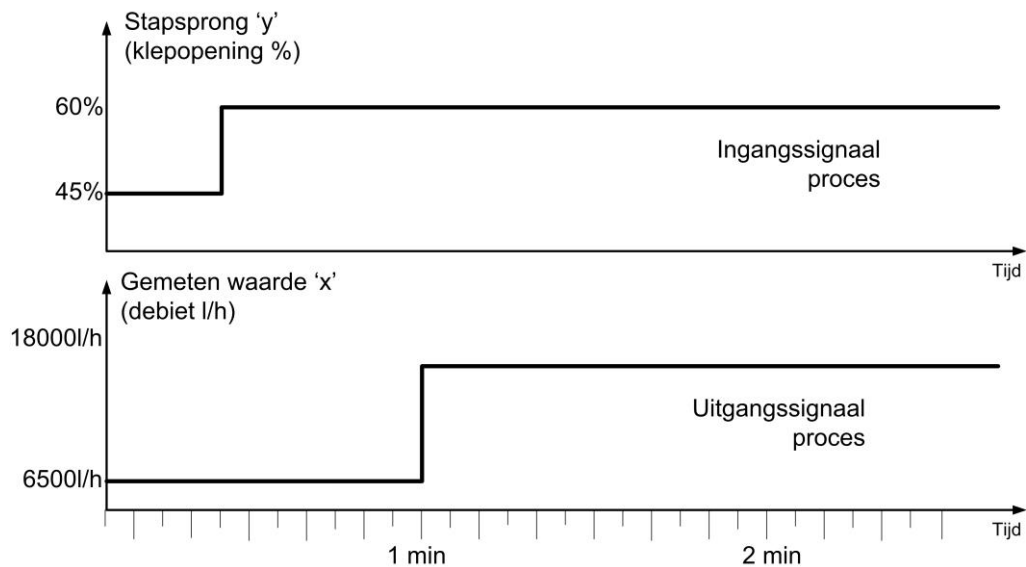


Fig. 6.22 oef1a

Dode tijd: _____

Hoe noemen we zo'n proces? _____

Bereken aan de hand van de stapresponsie de procesversterking:

Teken de proceskarakteristiek aan de hand van de opgenomen stapresponsie:

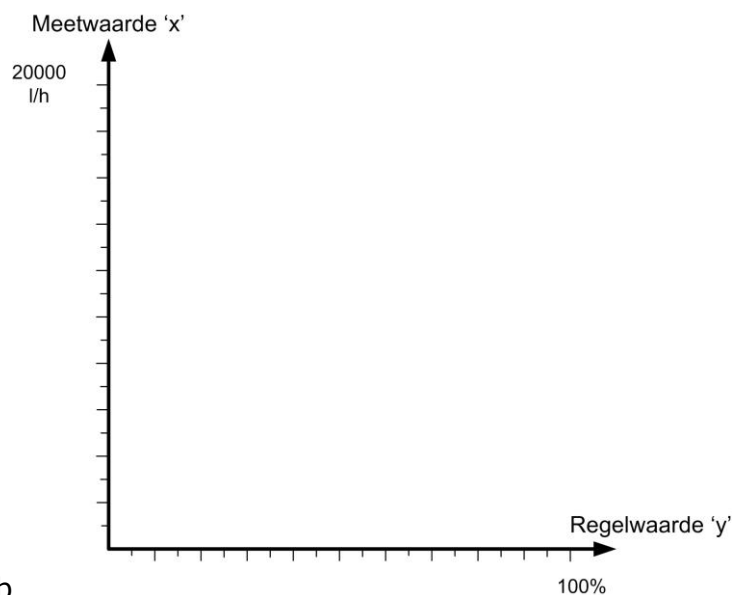


Fig. 6.23 oef1b

2. Bepaal grafisch van onderstaand proces de dode tijd en de tijdsconstante.
Duidt ook het 63% punt aan.

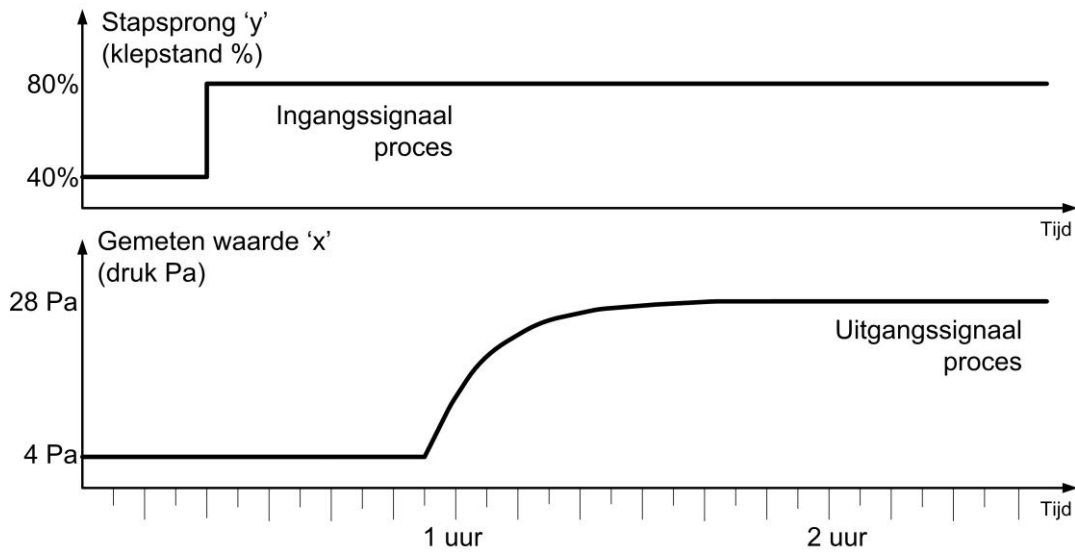


Fig. 6.24 oef 2a

Dode tijd: _____

Tijdsconstante: _____

Hoe noemen we zo'n proces? _____

Bereken aan de hand van de stapresponsie de procesversterking:

Teken de proceskarakteristiek aan de hand van de opgenomen stapresponsie:

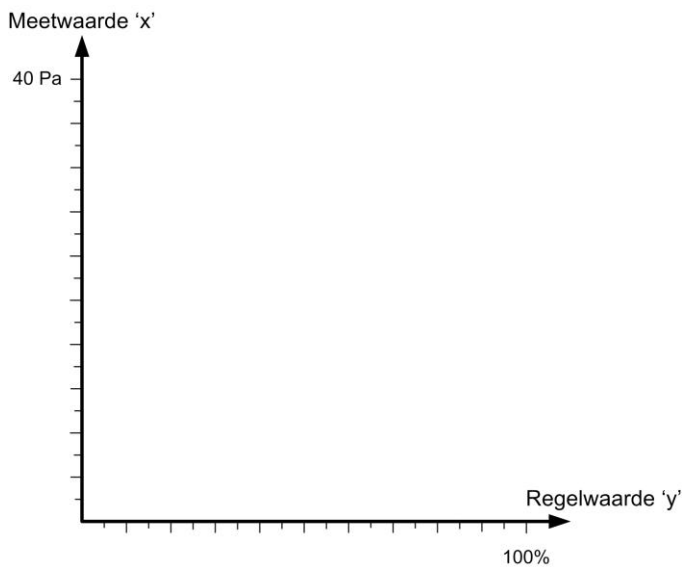


Fig. 6.25 Oef 2b

3. Bepaal grafisch van onderstaand proces de dode tijd en de tijdsconstante.

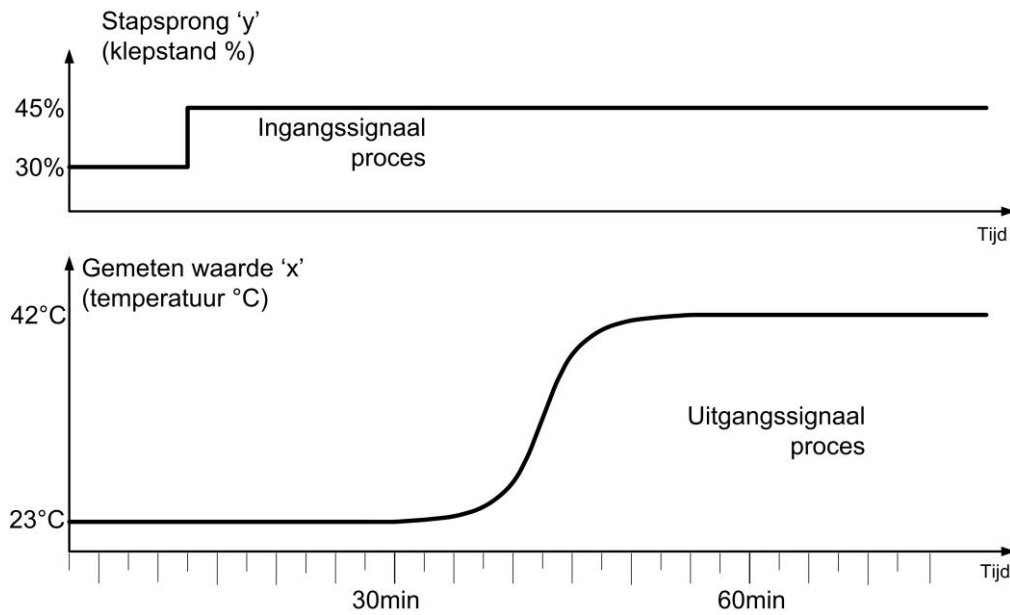


Fig. 6.26 Oef 3a

Dode tijd: _____

Tijdsconstante: _____

Hoe noemen we zo'n proces? _____

Bereken aan de hand van de stapresponsie de procesversterking:

Teken de proceskarakteristiek van dit proces aan de hand van de opgenomen stapresponsie:

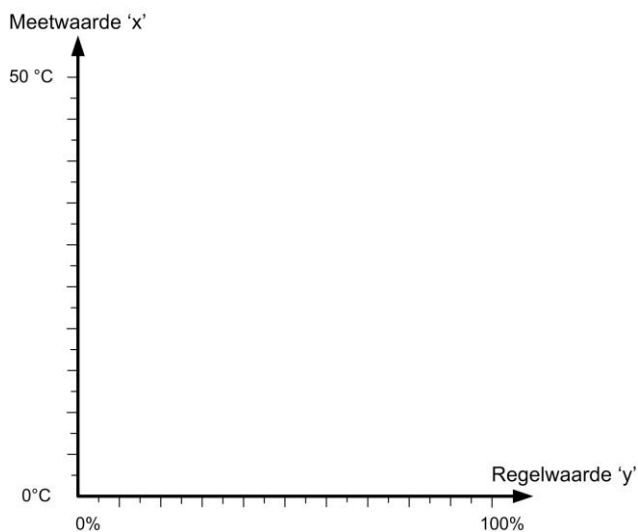


Fig. 6.27 Oef 3b

4. Teken de blokschematische voorstelling van de verschillende soorten processen. Vermeld ook telkens 'met' of 'zonder' dode tijd. Je zou in het totaal op 7 verschillende processen moeten uitkomen.

5. Beschrijf hieronder stap voor stap wat de procedure is om een dynamische proceskarakteristiek van een bepaald proces op te meten.

6. Wat is het nut van het opmeten van een dynamische proceskarakteristiek?

7. Wat zijn de 2 manieren om een statische proceskarakteristiek op te meten? Bespreek kort.

8. Welke nuttige informatie kan je uit een statische proceskarakteristiek afleiden?

9. Waarom is de term 'versterkingsfactor' of 'procesverterking' zo ongelukkig gekozen?

10. Er zijn ook nog hogere orde processen. Waarom noemen we die in een adem mee met de tweede orde processen?

11. Wat is de grote oorzaak van het ontstaan van dode tijden in eerste, tweede en hogere orde processen? Wat kan je hier aan doen?

12. Hoe verklaar jij dat een proces dat een vat water verwarmd via een warmtewisselaar, een tweede orde proces is, terwijl de verwarming van hetzelfde vat via rechtstreekse stoominjectie een eerste orde proces is?
