

RAPPORT

Regulering av flistransport og nivå i flissilo

av
Finn Håugen
1. amanuensis
Høgskolen i Telemark
Avdeling for teknologiske fag
3914 Porsgrunn

17. april 1995

Innhold

1	Sammendrag	3
2	Innledning	4
3	Dokumentasjon	4
4	Matematisk modell av flissiloen	4
5	Matematisk modell av flissilo med flistilførsel	7
6	Reguleringsstruktur og innstilling av regulatorer	10
6.1	Reguleringsstruktur	10
6.2	Kaskaderegulering	12
6.2.1	Innstilling av sekundærregulator WC129	12
6.2.2	Innstilling av primærregulator LC127	16
6.2.3	Reguleringssystemets ytelse ved kaskaderegulering	17
6.3	Foroverkopling fra forstyrrelsen	19

1 Sammendrag

En dynamisk matematisk modell for flistransporten og flissiloen er utviklet basert på prinsippet om massebalanse. Modellen er beskrevet i form av et matematisk blokkdiagram. Blokkdiagrammet er lagt inn i simuleringsprogrammet Simulink. Modellen viser at prosessen, enkelt uttrykt, er en integrator med transportforsinkelse. Integratoren skyldes siloen, mens transportforsinkelsen skyldes transportbåndene. Modellen er benyttet som grunnlag for beregning av regulatorparametre.

Reguleringsproblemet er å holde flisnivået i siloen på eller nær en referanseverdi (sett-punkt), tross variasjoner i utstrømmen og innstrømmen av flis. Strukturen for et nivåreguleringssystem er beskrevet. Reguleringssystemet er et kaskadereguleringssystem med foroverkopling fra forstyrrelsen.

Kaskadereguleringen består i en sekundærsøyfe som utfører massestrømsregulering av flistransporten på inngående transportbånd og en primærsøyfe som utfører selve nivåreguleringen. Ved hjelp av Ziegler-Nichols' åpen-søyfe-metode ble følgende parametre beregnet for sekundærregulatoren WC129 (som mer korrekt bør betegnes FC129 da denne utfører massestrømsregulering): $K_p = 0,139$, $T_i = 0,1 \text{ min.} = 6 \text{ sek.}$, $T_d = 0$, T_f vilkårlig. Ved hjelp av relébasert auto-tuning ble følgende parametre beregnet for primærregulatoren LC127: $K_p = 4,2$, $T_i = 6,75 \text{ min.} = 405 \text{ sek.}$, $T_d = 1,69 \text{ min.} = 101 \text{ sek.}$, $T_f = 0,169 \text{ min.} = 10,1 \text{ sek.}$ Regulatorparametrene er beregnet under forutsetning av kortfiberkjøring. Simuleringer viser at reguleringssystemets stabilitet er tilfredsstillende også ved langfiberkjøring, med de samme regulatorparametrene.

Reguleringssystemets ytelse er undersøkt ved hjelp av simuleringer. Følgende resultater er oppnådd (det er ikke bruk av foroverkopling): Når referansen og forstyrrelsene er konstante, altså under statiske forhold, er reguleringsavviket lik null. Det ble videre satt på sprang i utstrømningen fra siloen og i innstrømningen fra "lomma". Etter en sprangvis økning av massestrømningen fra siloen fra 850 t/døgn = 590 kg/min. til 1150 t/døgn = 799 kg/min. svinger nivået tilbake til referansen uten stasjonært avvik, men med en maksimal nivåreduksjon lik 0,22 m i transientdelen av responsen. Etter en sprangvis økning av flistilførselen fra lomma fra 0 til 200 kg/min svinger nivået tilbake til referansen med null stasjonært avvik, men med en maksimal nivåøkning lik 5,5 cm i transientdelen av responsen. I sistnevnte tilfelle er det antatt at flistilførselen fra lomma fanges opp av massestrømsmåleren WT129 (FT129).

Det er beregnet en foroverkopler fra forstyrrelsen, som her er masseutstrømningen av flis fra bunnen av siloen, til primærpådraget (pådraget ut fra primærregulatoren). Foroverkopleren gir et additivt bidrag til primærpådraget. Foroverkopleren er beregnet ut fra statiske, ikke dynamiske, forhold. Foroverkopleren er derfor ikke ideell. En ideell, dynamisk, foroverkopler blir nokså komplisert og er ikke utledet i denne rapporten. Den statiske foroverkopleren er i form av en forsterkningsfaktor fra massestrøm (i kg/min) til primærpådrag (i %): $K_f = 0,032 \text{ \%/(kg/min)}$. Foroverkoplingen gir forbedret regulering i form av mindre reguleringsavvik det meste av tiden, men forbedringen er ikke betydelig.

2 Innledning

Undertegnede holdt 21.3.95 et seminar i reguleringsteknikk ved Norske Skog, Tofte. Regulering av flistransporten og nivåregulering av flissiloen var der et gjennomgående eksempel. Denne rapporten gir en utdypende beskrivelse av systemet. En dynamisk matematisk modell blir utviklet, og regulatorparametre blir funnet dels ut fra simuleringer og dels ut fra modellbetraktninger. Simuleringer illustrerer/verifiserer reguleringssystemets ytelse.

Det må understrekes at resultatene er utledet med bruk av en matematisk modell. Hvis modellen er unøyaktig, det vil si gir en upresis beskrivelse av det virkelige system, mister også resultatene sin gyldighet, i mer eller mindre grad. De fysiske parametrene som inngår i modellen, er basert på opplysninger og data gitt av Tofte.

3 Dokumentasjon

Vedlegg 1 viser et utdrag av flytskjema for flistransporten (datert 21.5.79). Vedlegg 2 viser et utdrag av flytskjema (datert 14.12.94) for bl.a. kokeriet, inkludert flissiloen. Vedlegg 3 viser dimensjonene på flissiloen som er av typen Hula Bin som skal installeres i april i d.å. Vedlegg 4 gjengir "tekniske data og garantier" for flissiloen. Vedlegg 5 gjengir en del opplysninger knyttet til det aktuelle prosessavsnittet, i form av Toftes svar på diverse spørsmål stilt av undertegnede i forkant av seminaret.

Det vil videre bli henvist til [1] og [2] (disse bøkene ble benyttet på seminaret).

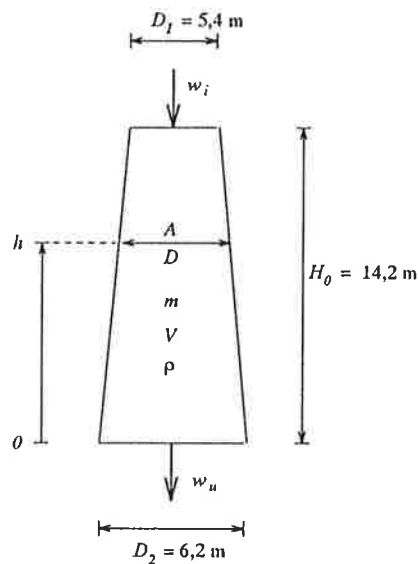
4 Matematisk modell av flissiloen

Som grunnlag for design av et nivåreguleringssystem for flissiloen, herunder et massestrømsreguleringssystem for flistransporten til siloen, skal det her utvikles en dynamisk matematisk modell av flissilo med transportbånd og skruer. Modellen er også nødvendig for å kunne simulere systemets oppførsel.

Figur 1 viser en prinsippskisse av flissiloen. I figuren gjelder

m	[kg]	er flisens masse.
V	[m ³]	er flisvolumet.
ρ	[kg/m ³]	er flistettheten.
A	[m ²]	er tverrsnittsarealet.
D	[m]	er diameter ved nivå h .
D_1	[m]	er diameter ved maks. nivå.
D_2	[m]	er diameter ved min. nivå.
h	[m]	er flisnivået (høyden).
w_i	[kg/min]	er masseinnstrømningen av flis fra toppen av siloen.
w_u	[kg/min]	er masseutstrømningen av flis i bunnen av siloen.

En dynamisk modell som beskriver flisnivået i flissiloen baseres på prinsippet om massebalanse, som lyder: *Endring av akkumulert masse av flis i siloen er lik netto mas-*



Figur 1: Prinsippskisse av flissiloen med flisinstrømning og flisutstrømning.

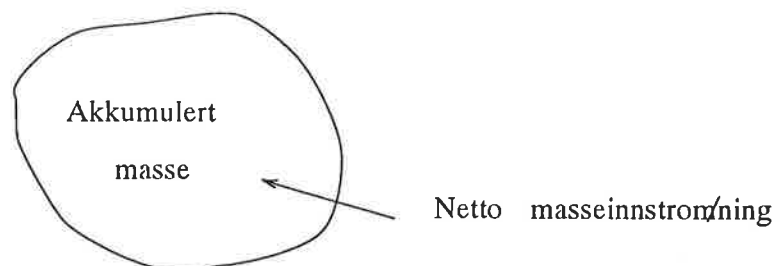
seinnstrømning av flis, se figur 2. Matematisk blir dette:

$$\frac{dm}{dt} = w_i - w_u \quad (1)$$

Her er $m = \rho V$, og vi kan skrive

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

V er en funksjon av nivået h som igjen er en funksjon av tiden t . Vi kan derfor benytte



Figur 2: Massebalanse: Endringen av akkumulert masse er lik netto masseinnstrømning.

regelen om derivasjon av en funksjon av en funksjon (kjerneregelen):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

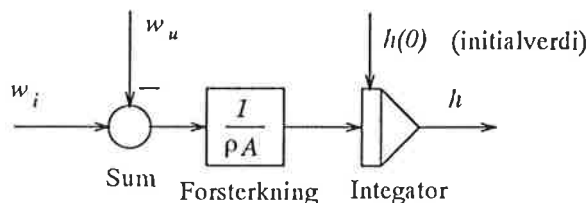
Her er

$$\frac{dV}{dh} = A(h) = A[h(t)] \quad (4)$$

Vi skriver $\frac{dh}{dt} = \dot{h}$. Massebalansen (1) blir da

$$\rho A[h(t)]\dot{h}(t) = w_i - w_u \quad (5)$$

(1) er illustrert med et blokkdiagram i figur 3, jfr. også [1], s. 60–62. $h(0)$ er nivåets initialverdi, det vil si nivået ved tiden $t = 0$. Dynamisk sett er selve flistanken en integrator.



Figur 3: Matematisk blokkdiagram for flissiloens matematiske modell.

Kommentarer til modellen:

- Flissiloen er sylindrisk. I eksempel 11.3 i læreboken er det utledet at tverrsnittsarealet ved høyden h er gitt ved

$$A(h) = \pi \frac{[D(h)]^2}{4} \quad (6)$$

der diameteren $D(h)$ ved nivået h er gitt ved

$$D(h) = D_2 - 2Y(h), \quad Y(h) = \frac{Xh}{H_0}, \quad X = \frac{D_2}{2} - \frac{D_1}{2} \quad (7)$$

Figur 4 viser $A(h)$ som funksjon av h .

Det normale arbeidspunktet er $h_N = 10,4$ meter som innsatt i (6) og (7) gir

$$A_N = A(h_N) = 24,75 \text{ m}^2 \quad (8)$$

som er avmerket spesielt i figur 4.

I de etterfølgende simuleringene er det antatt at $A = 24,75 \text{ m}^2$, uansett nivå. Denne unøyaktigheten er neglisjerbar ved bruk av den aktuelle siloen, med følgende begrunnelse: Under normal drift vil nivået med stor sannsynlighet ligge innenfor 8 og 12 meter, sikkert innenfor snevrere grenser også, men la oss her anta grensene 8 og 12 meter. Forholdet mellom arealet ved 8 meter og arealet ved 12 meter er $A(8)/A(12) = 25,96/23,97 = 1,08$, altså temmelig nær 1. Vi kan derfor trygt operere med et konstant areal, og vi velger som sagt $A(10,4) = 25,75 \text{ m}^2$.

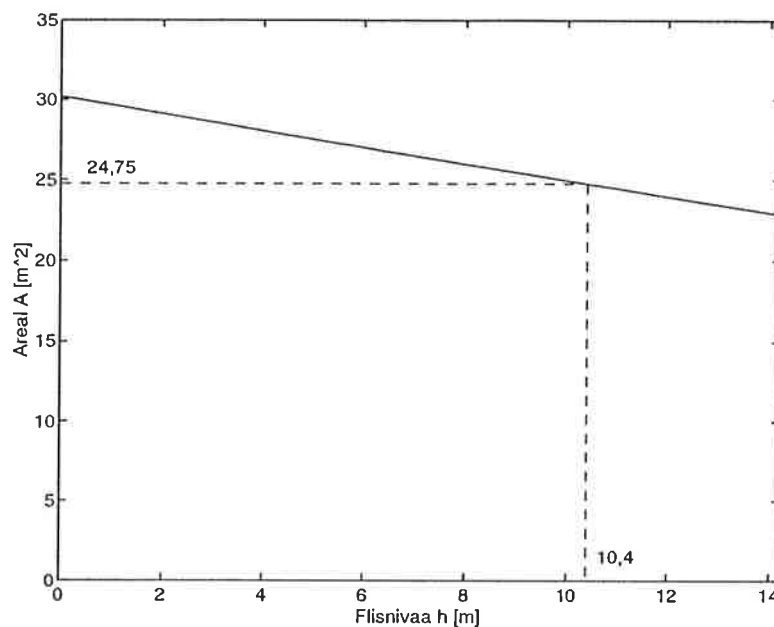
- Flistettheten varierer med flistypen:

Langfiber (det antas 30% sagbruksflis + 30% gran + 40% furu): $\rho = 155 \text{ kg/m}^3$

Kortfiber (eukalyptus): $\rho = 189 \text{ kg/m}^3$

- Masseutstrømningen w_u utgjør en forstyrrelse på nivåreguleringssystemet for flissiloen. w_u styres av settpunktet $w_{u,ref}$ for turtallsregulatoren SIC207. w_u blir ikke målt pr. idag, men man antar at det er en veldefinert sammenheng mellom turtallet av skrue 21-21113 og massestrømmen gjennom skruen.

Nominell massestrøm (produksjonsrate) er



Figur 4: Siloens tverrsnittsareal som funksjon av flisnivået.

Langfiber: $w_{uN} = 1000 \text{ t/døgn} = 694 \text{ kg/min}$.

Kortfiber: $w_{uN} = 1150 \text{ t/døgn} = 799 \text{ kg/min}$.

- Masseinnstrømmingen w_i stammer fra innmatningen via bånd 14-2136. w_i blir nærmere modellert i avsnitt 5.

5 Matematisk modell av flissilo med flistilførsel

Massestrømmer. Innmatningen av flis til flissiloen foregår på én av følgende to måter:

1. Kortfiber (eukalyptus), w_e , mates via skruer 13-2132. Videre er det en ukjent massestrøm w_l via lomme ("spånemottag"). w_l vil etter en ombygning i april/mai d.å. føres inn på bånd 13-2137. w_l blir dermed registrert av WT129.
2. Langfiber simultant fra tre skruer med følgende antatte relative massestrøm (angitt i prosent nedenfor), jfr. punkt 2 og 14 i vedlegg 5:
 - Skruer 13-2131. Sagbruksflis. 30%.
 - Skruer 13-2135. Gran. 30%.
 - Skruer 13-2140. Furu. 40%.

De respektive massestrømmer betegnes henholdsvis w_s , w_g og w_f [kg/min].

Videre blir Liwell-såld fjernet fra sålderiet via skruer 14-2119. Liwell-såld føres ikke inn til flissiloen. Massestrømmen her, w_{lw} , anslås til 6,5% av den totale massestrømmen tilført sålderiet, jfr. punkt 8 i vedlegg 5.

Ser vi bort fra transportforsinkelsene knyttet til transportbåndene, kan netto innstrømning til flissiloen, w_i , nå skrives

For langfiber:

$$w_i = w_s + w_g + w_f - w_{lw} = (1 - 0,065)(w_s + w_g + w_f) \quad (9)$$

$$= 0,935(w_s + w_g + w_f) \quad (10)$$

$$= K_{lw}(w_s + w_g + w_f) \quad (11)$$

der

$$K_{lw} = 1 - 0,065 = 0,935 \quad (12)$$

er "Liwell"-faktoren som representerer gjenværende flisstrøm etter fjerning av Liwellsåld.

For kortfiber:

$$w_i = w_e + w_l - w_{lw} = (1 - 0,065)(w_e + w_l) = K_{lw}(w_e + w_l) \quad (13)$$

Det er p.t. ikke tilgjengelig data for w_l .

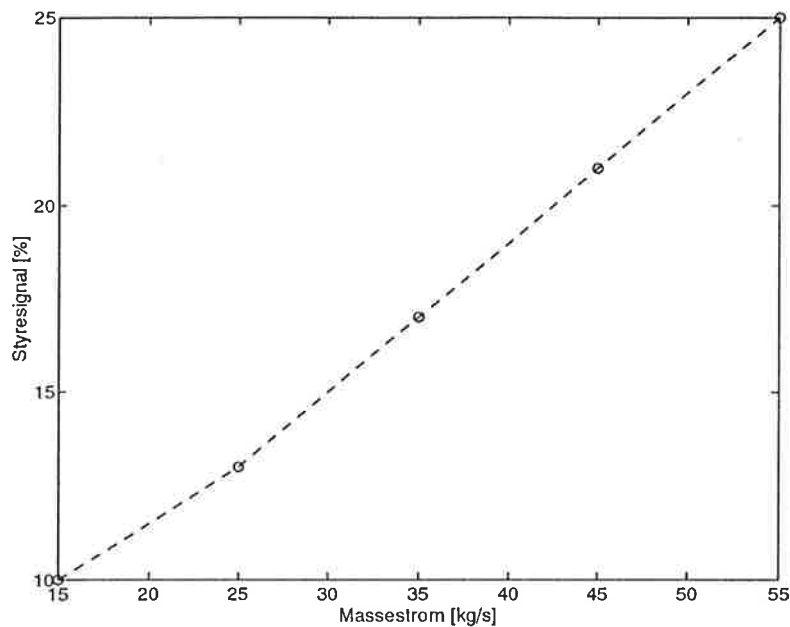
Flisskruer. Hver av skruene under flisshaugene er turtallsregulert. Det er altså lokale turtallreguleringssystemer rundt hver av skruene. Ved kjøring av langfiber fordeles det totale styresignalet u , som vil være pådraget i nivåreguleringssystemet for flissiloen, via "kvotstasjoner" (forsterkere) på de enkelte skruene (deres turtallssettpunkter). Forholdstallene er de samme som ovenfor er angitt som forholdstallene for de forskjellige flistypene, altså 30% sagbruksflis, 30% gran og 40% furu.

Den statiske sammenhengen mellom styresignal i prosent og massestrømmen gjennom en skrue er kjent for skrue 13-2132 (eukalyptus) (indeks "s" står for "statisk"): Punkt 3 i vedlegg 5 angir sammenhørende verdier for styresignal u til skrue 13-2132 og massestrømmen w fra skruen (målt med WT-129), og figur 5 viser et plott av disse dataene. Figuren viser at det er en lineær sammenheng mellom u og w når det ses bort fra den første delen av kurven. Kurvens stigningstall er (indeks "s" står for "statisk")

$$\frac{w_{es}}{u_s} = 0,4 \text{ (kg/s)/\%} = 24 \text{ (kg/min)/\%} = K_{ue} \quad (14)$$

K_{ue} kan kalles skrueforsterkningen. Det lokale turtallsreguleringssystemet rundt skrue 13-2132 sørger for at massestrømmen ut av skruen følger styresignalet til skruen tilnærmet proporsjonalt. Dette reguleringssystemet er tegnet inn i figur 6. I blokkdiagrammet representerer forsterkningsblokken K_2 en antatt proporsjonalitet mellom skrueturtall og massestrøm gjennom skruen (forholdet mellom massestrøm og turtall er altså K_2). Videre representerer forsterkningsblokken K_{s2} måleforsterkningen for turtallsmåleren som benyttes i turtallreguleringssystemet rundt skruen.

Jeg har ikke fått data for de andre skruene (for sagbruksflis, gran og furu). Skrueforsterkningene for disse er derfor ikke kjent, men det antas i denne rapporten at de er lik K_{ue} . I simuleringene og beregningene i rapporten er skruene med turtallsreguleringssystemer er representert ved de respektive skrueforsterkninger.



Figur 5: Sammenhørende verdier for styresignal u til skruer 13-2132 og massestrømmen w fra skruen (målt med WT129).

Transportforsinkelser. Transportforsinkelsen fra skruer 13-2132 (eukalyptus) til båndvekt WT129 (som egentlig burde betegnes FT129) er

$$\tau_e = 60 \text{ sek.} = 1 \text{ min.} \quad (15)$$

Transportforsinkelsen fra skruer 13-2131 (sagbruksflis) til båndvekt WT129 er

$$\tau_s = 50 \text{ sek.} = 0,83 \text{ min.} \quad (16)$$

Transportforsinkelsen fra skruer 13-2135 (gran) til båndvekt WT129 er

$$\tau_g = 20 \text{ sek.} = 0,33 \text{ min.} \quad (17)$$

Transportforsinkelsen fra skruer 13-2140 (furu) til båndvekt WT129 er

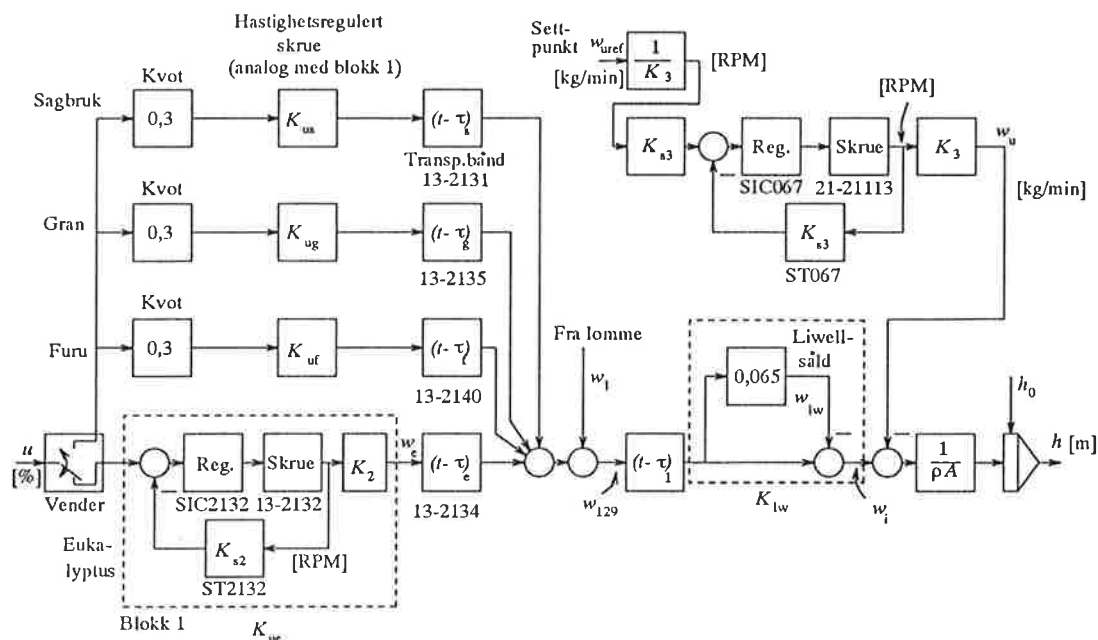
$$\tau_f = 40 \text{ sek.} = 0,67 \text{ min.} \quad (18)$$

Ovenstående transportforsinkelser er i henhold til punkt 1 i vedlegg 5.

Transporttiden fra WT129 til toppen av flissiloen er, jfr. punkt 9 i vedlegg 5,

$$\tau_1 = 165 \text{ sek.} = 2,75 \text{ min.} \quad (19)$$

Detaljert blokkdiagram. Med de ovenstående opplysninger om flistransporten kan nå blokkdiagrammet vist i figur 3 (eller ??) utvides som vist i figur 6. Lokale turtallsreguleringer er vist. Massestrømsreguleringen av bånd 13-2137 og nivåreguleringen av flissiloen er imidlertid ikke vist i blokkdiagrammet—se i stedet avsnitt 6. Blokkdiagrammet viser også turtallsreguleringssystemet som styrer flisutstrømningen w_u .



Figur 6: Matematisk blokkdiagram for flissilo med flistransport (og lokale turtallsreguleringer).

6 Reguleringsstruktur og innstilling av regulatorer

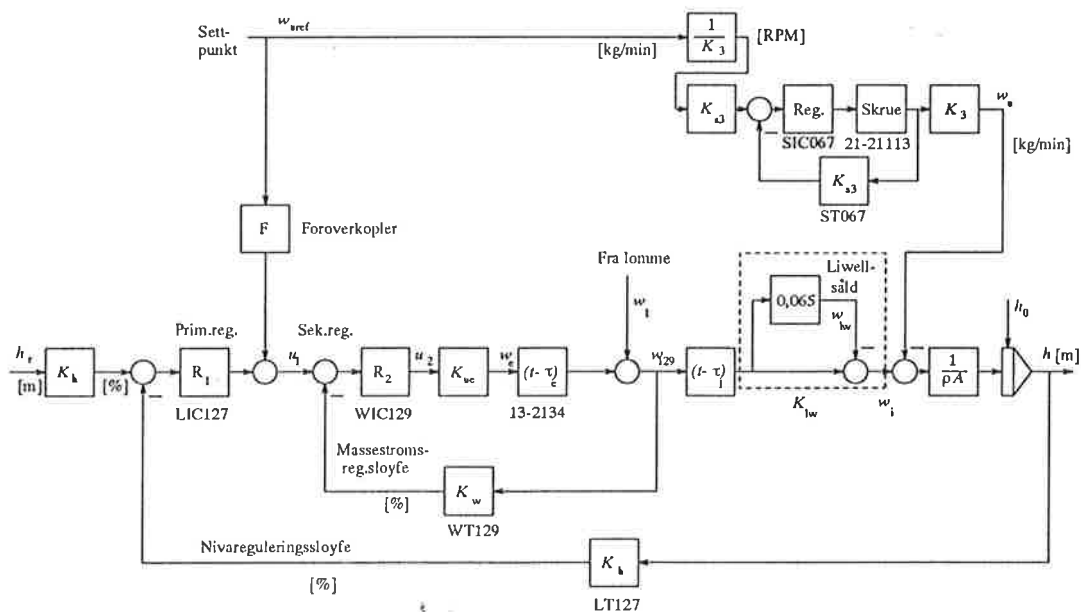
6.1 Reguleringsstruktur

Reguleringsproblemet er å holde flisnivået i siloen på eller nær en referanseverdi (sett-punkt), tross variasjoner i utstrømmen og innstrømmen av flis. I det eksisterende system er nivåreguleringen basert på kaskaderegulering og foroverkopling fra forstyrrelsen, som vist i figur 7. Noen kommentarer til reguleringsstrukturen:

Kaskadereguleringen: I kaskadereguleringen utgjør nivåreguleringssløyfen med tilbakekopling fra nivåmåleren LT127 primærsløyfen eller den ytre sløyfen. Massestrømsreguleringssløyfen basert på tilbakekopling fra WT129 utgjør sekundærsløyfen eller den indre sløyfen.

Hensikten med sekundærsløyfen er å få en presis styring av massestrømmen via styresignalet u . Sekundærsløyfen vil kompensere for forstyrrelser knyttet til massetransporten som ellers gir variasjoner i massestrømmen ved konstant pådrag u . Slike forstyrrelser er blant annet massestrømsvariasjoner på grunn av variasjoner i flistettheten og massestrømsvariasjoner på grunn av "tilfeldig" flistilførsel fra "lomme". Også massestrømmen av Liwellsæld, w_{lw} er på en måte en forstyrrelse, men siden w_{lw} er oppgitt til å utgjøre en bestemt prosentdel av innkommende massestrøm til såldeiet, er det riktigere å si at denne massestrømmen er opphav til en parametervariasjon i modellen, slik at forsterkningen K_{lw} (lw for Liwell) i figur 6 blir 0,935 i stedet for 1. At K_{lw} er 0,935 og ikke 1, får konsekvenser for regulatorparametrene i nivåregulatoren da K_{lw} inngår som en faktor i prosessforsterkningen og dermed i sløyfeforsterkningen i nivåreguleringssløyfen.

Det er tertiærsløyfer også, nemlig turtallsreguleringssløyferne rundt flisskruene. Disse er omtalt foran i rapporten og er vist (for eukalyptusskruen) i figur 6.



Figur 7: Nivåreguleringssystemet basert på kaskaderegulering og foroverkopling fra forstyrrelsen.

Foroverkoplingen: Foroverkopleren F skal ideelt sett være basert på en kopling fra en måling av forstyrrelsen, som her er masseutstrømningen gjennom skrue 21-21113. I det eksisterende system er imidlertid foroverkoplingen basert på en kopling fra den ønskede produksjonsraten. Dette kan introdusere en unøyaktighet da produksjonsraten faktisk ikke er presist regulert—det er kun turtallet for skrue 21-21113 som er regulert (med turtallsregulator SC067).

Hensikten med foroverkoplingen er via pådraget å gi en rask og direkte kompensering for masseutstrømningen fra flissiloen slik at flisnivået blir minst mulig påvirket av denne utstrømningen.

I det etterfølgende skal vi beregne brukbare PID-parametre for sekundærregulatoren WC129 og primærregulatoren LC127, i denne rekkefølge. Videre skal vi beregne foroverkopleren F slik den ideelt bør være. Det antas at det kjøres kortfiber, altså eukalyptus. Det kan vises at en regulator som innstilt for kortfiberkjøring og som ikke får endret sine regulatorparametre ved overgang til langfiberkjøring, vil gi bedre stabilitet ved langfiberkjøring. Mer om dette senere.

6.2 Kaskaderegulering

6.2.1 Innstilling av sekundærregulator WC129

Vi antar at skruen (med sitt lokale turtallsreguleringssystem) under eukalyptusflishaugen kan representeres med skruerforsterkningen $K_{ue} = 24$ (kg/min)/%, jfr. avsnitt 5. Måleforsterkningen for WT129 er, jfr. punkt 4 i vedlegg 5,

$$K_w = \frac{100\%}{55 \text{ kg/s}} = 0,030 \text{ \%/(kg/min)} \quad (20)$$

Når sekundærregulatoren R_2 skal innstilles, skal primærsløyfen være åpen. R_2 skal stilles inn for prosessdelen mellom u og w_{129} , se figur 7. R_2 mottar målesignalet fra WT129 som har måleforsterkning K_w . Transferfunksjonen fra pådraget u til målesignalet w_m blir

$$\frac{w_m(s)}{u(s)} = h_p(s) = K_{ue}K_w e^{-\tau_e s} \quad (21)$$

Dynamisk sett er prosessen (21) en ren transportforsinkelse, med forsterkning. Det kan vises at den beste standardregulator for en prosess som er en ren transportforsinkelse, er en integralregulator eller I-regulator, gitt ved transferfunksjonen

$$h_r(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (22)$$

En brukbar verdi for K_i skal nå beregnes ved hjelp av Ziegler-Nichols' åpen-sløyfe-metode. Deretter blir det vist hvordan man får en tilnærmet I-regulator fra en PID-regulator (det er jo PID-regulatoren som er tilgjengelig i styresystemet).

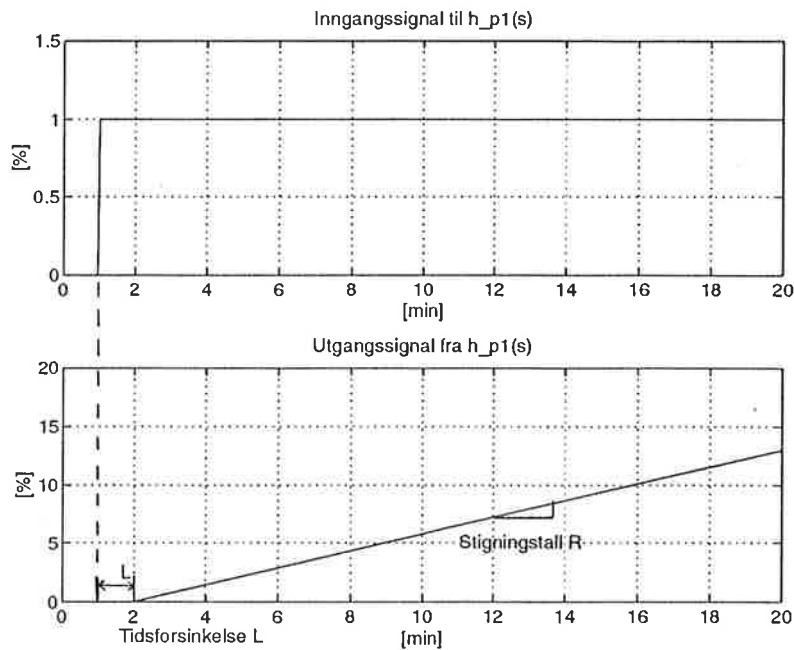
Ziegler-Nichols' metoder for regulatorinnstilling (åpen/lukket-sløyfe-metodene), se [1] (kap. 7), er enkle å bruke, og de er velprøvede. Men dessverre kan ingen av dem brukes på prosessen (21)! Vi kan omgå problemet ved å "flytte" integratoren $\frac{1}{s}$ fra regulatoren til prosessen, som da blir

$$h_{p1}(s) = \frac{K_{ue}K_w}{s} e^{-\tau_e s} = \frac{K}{s} e^{-\tau_e s} \quad (23)$$

der $K = K_{ue}K_w$ er prosessforsterkningen. Regulatoren er da bare en P-regulator med forsterkning K_i . Vi kan nå finne K_i med en av Ziegler-Nichols' metoder. Siden $h_{p1}(s)$ er en "integrator med transportforsinkelse", er $h_{p1}(s)$ perfekt for Ziegler-Nichols' åpen-sløyfe-metode. Denne metoden er basert på en åpen-sløyfe-test av selv prosessen som skal reguleres. Det settes på et sprang på prosessens inngangssignal, og prosessmålingen registreres. Ut fra avlest tidsforsinkelse og stigningstall i sprangresponsen beregnes passende regulatorparametre.

Prosessens er i vårt tilfelle gitt ved transferfunksjonen $h_{p1}(s)$. Figur 8 viser den simulerte sprangresponsen på utgangen av $h_{p1}(s)$. Det er satt på et enhetssprang på inngangen. Tidsforsinkelsen L og stigningstallet R kan avleses fra denne sprangresponsen. Imidlertid er det ikke så vanskelig i stedet å beregne L og R fra $h_{p1}(s)$: Anta at spranghøyden er Z . Fra definisjonen av transferfunksjonen har vi at responsens Laplacetransformerte er lik inngangens Laplacetransformerte ganger systemets transferfunksjon. I vårt tilfelle gir dette

$$w_m(s) = h_{p1}(s) \cdot z(s) \quad (24)$$



Figur 8: Simulert (enhets)sprangrespons på utgangen av $h_{p1}(s)$.

der z er brukt som betegnelse for inngangssignalet på $h_{p1}(s)$. I henhold til (C.13) og (C.2) i vedlegg C i [1] er $z(s) = \frac{Z}{s}$. Dermed blir den Laplacetransformerte av sprangresponsen

$$w_m(s) = h_{p1}(s) \frac{Z}{s} = \frac{K_{ue}K_w Z}{s^2} e^{-\tau_e s} \quad (25)$$

Tidsfunksjonen $w_m(t)$ finnes ved å invers-transformere $w_m(s)$. Til dette benyttes (C.14), (C.2) og (C.3) i [1]. Resultatet blir

$$w_m(t) = K_{ue}K_w Z(t - \tau_e) \quad (26)$$

Tidsforsinkelsen er altså

$$L = \tau_e \quad (27)$$

og stigningstallet er

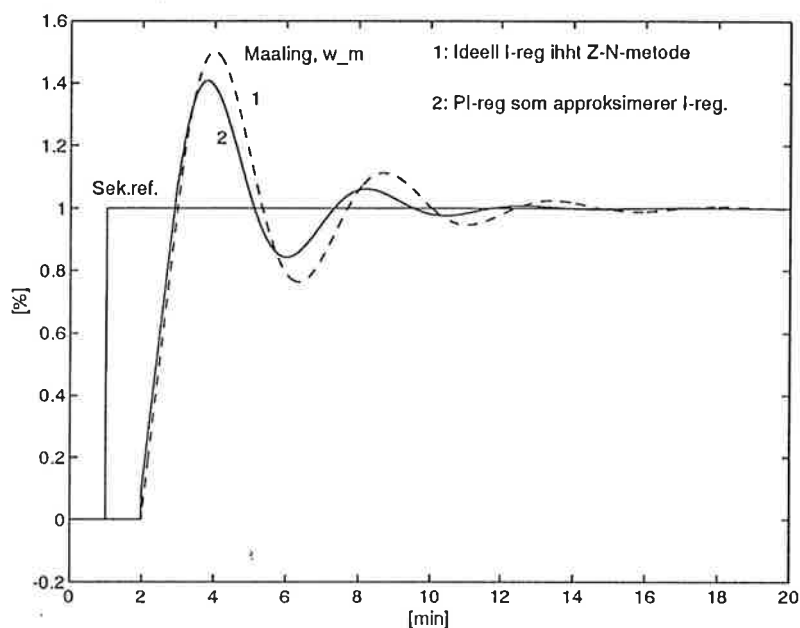
$$R = K_{ue}K_w Z \quad (28)$$

Disse uttrykkene, sammen med $Z = U$, settes nå inn i formelen regulatorforsterkningen i P-regulatoren i tabell 7.3 i [1]. Resultatet blir (vår P-regulator har forsterkning K_i)

$$\underline{K_i} = \frac{1}{\tau_e K_{ue} K_w} = \frac{1}{1 \cdot 24 \cdot 0,030} = \underline{1,39} \quad (29)$$

Simulering av sekundærsløyfen. Figur 9 viser den simulerte responsen i målingen w_m etter et enhetsprang (spranget har høyde 1) i (turtalls)referansen for sekundærregulatoren med den funne I-regulatoren (kurve 1). Hensikten med å se på denne responsen er å kontrollere at sekundærsløyfens stabilitet er tilfredsstillende med den funne regulatoren. Den aktuelle kurven i figur 9 viser en amplitudedempning som er slik man må forvente ved bruk av Ziegler-Nichols' metoder. I henhold til deres metoder

skal amplitudedempningen uttrykt ved amplitudeforholdet (decay ratio) mellom to etterfølgende topper i responsen være $1/4$, og vi ser av den simulerte responsen at dette stemmer noenlunde. Amplitudeforholdet gir uttrykk for reguleringsløyvens stabilitet. Vi kan slå fast at sekundærløyvens stabilitet er tilfredsstillende med den funne K_i .



Figur 9: Responsen i målingen w_m etter et (enhets)sprang i sekundærreferansen, for forskjellige regulatorer.

Fra PID til I (eller motsatt). Ovenfor fant vi forsterkningen K_i i I-regulatoren som utgjør sekundærregulatoren. Imidlertid er det i utgangspunktet en PID-regulator som er tilgjengelig. Første trinn på veien fra en PID-regulator til en I-regulator er å sette $T_d = 0$. Vi har dermed PI-regulatoren

$$u = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e \, d\tau \quad (30)$$

Her må vi sørge for at integralledet dominerer i regulatorfunksjonen, slik at

$$u = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e \, d\tau \approx \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e \, d\tau = K_i \int_0^t e \, d\tau \quad (31)$$

som gir transferfunksjonen

$$\frac{u(s)}{e(s)} = h_r(s) \approx \frac{K_p}{T_i s} = \frac{K_i}{s} \quad (32)$$

Vi har altså

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (33)$$

I oppgave 10.4 i [2] er det vist hvordan K_p og T_i kan velges slik at integralleddet blir dominerende samtidig som (33) blir oppfylt. Utledningen er basert på frekvensresponsanalyse. Resultatet er

$$\underline{T_i} = \frac{1}{10K_iK} = \frac{1}{10K_iK_uK_w} = \underline{0,1 \text{ min.} = 6 \text{ sek.}} \quad (34)$$

$$\underline{K_p} = K_iT_i = \underline{0,139} \quad (35)$$

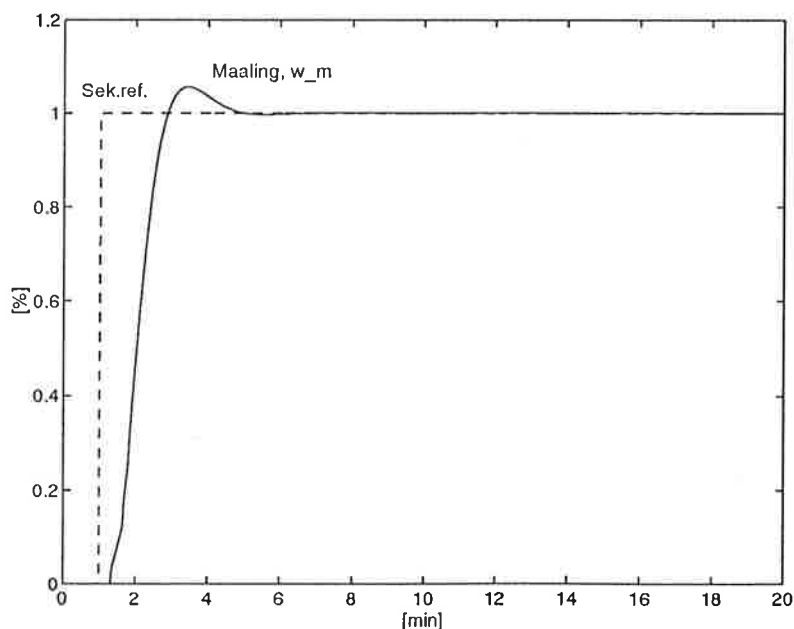
I tillegg er som nevnt ovenfor

$$\underline{T_d} = 0 \quad (36)$$

Filtertiden T_f i PI(D)-regulatoren kan, siden $T_d = 0$, settes til en vilkårlig verdi, f.eks. $T_f = 1$ (filtertiden er knyttet til derivatleddet).

Kurve 2 i figur 9 viser sprangresponsen i målingen w_m med den funne PI(D)-regulatoren. Vi ser at responsen er nokså lik den ideelle I-regulatoren (kurve 1). Vi kan fastslå at stabiliteten med bruk av PI-regulatoren er tilfredsstillende.

Kjøring med langfiber. Sekundærregulatoren ble ovenfor dimensjonert for kjøring med kortfiber. Er stabiliteten tilfredsstillende når det i stedet kjøres med langfiber? Transportforsinkelsene fra skruene (sagbruksfås, gran, furu) er alle *mindre* enn transportforsinkelsen fra eukalyptusskruen, så stabiliteten burde være sikret ved kjøring med langfiber. Figur 10 viser en simulering av denne situasjonen. I simuleringen er pådraget fordelt på de enkelte skruene i henhold til de oppgitte forholdstall (kvoter), se avsnitt 5. Simuleringene viser at stabiliteten er bedre enn ved kjøring av kortfiber, og den er



Figur 10: Responsen i målingen w_m etter et sprang i sekundærreferansen ved langfiberkjøring. Regulatoren er PI-regulatoren innstilt for kortfiberkjøring. Stabiliteten i sekundærsløyfen er fremdeles tilfredsstillende (stabiliteten er faktisk bedret).

tilfredsstillende (ikke "unødig" god).

6.2.2 Innstilling av primærregulator LC127

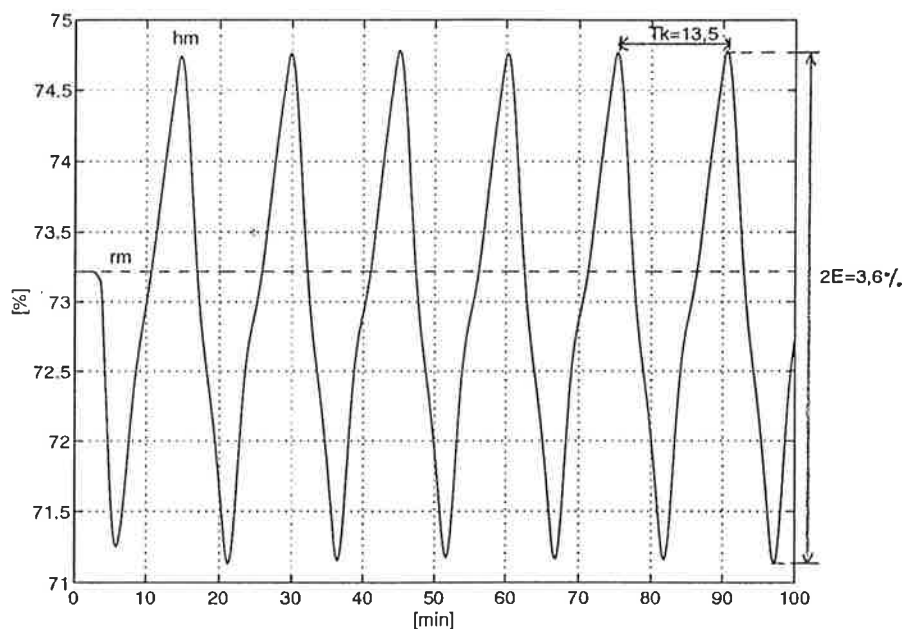
Primærregulatoren LC127 skal innstilles med bruk av relébasert auto-tuning benyttet på en simulator. Relébasert auto-tuning er beskrevet i kapittel 7 i [1]. Sekundærsløyfen skal være aktiv. Reguleringsystemets struktur er som vist i figur 7. Nivåmåleren har måleforsterkning (jfr. punkt 10 og 11 i vedlegg 5)

$$K_h = \frac{100\%}{14,2 \text{ m}} = 7,04\%/m \quad (37)$$

Nivåets initialverdi er 10,4 m, som svarer til måleverdien $10,4 \cdot K_h = 73,24\%$. Primærreferansen settes lik denne verdien.

Det antas kjøring med kortfiber.

Figur 11 viser responsen i nivåmålingen h_m med relégrenser $\pm M = \pm 10\%$. Amplituden



Figur 11: Responsen i h_m ved relébasert auto-tuning.

i h_m , som er identisk med amplituden i reléinngangen, avleses til å være $E = 1,8\%$. Ekvivalent kritisk forsterkning for reléet blir dermed

$$K_e = K_{pk} \approx \frac{4M}{\pi E} = \frac{4 \cdot 10}{\pi \cdot 1,8} = 7,1 \quad (38)$$

Periodetiden i de stående svingningene avleses fra figur 11 til å være $T_k = 13,5$ min. Innsetting i formlene for PID-regulatoren i tabell 7.2 i [1] gir

$$\underline{K_p} = 0,6K_{pk} = \underline{4,2} \quad (39)$$

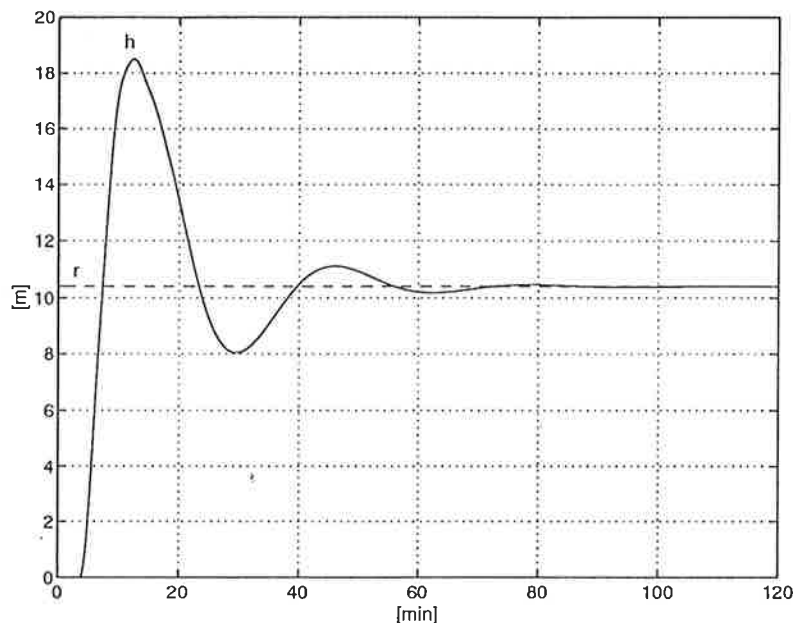
$$\underline{T_i} = \frac{T_k}{2} = \underline{6,75 \text{ min.} = 405 \text{ sek.}} \quad (40)$$

$$\underline{T_d} = \frac{T_k}{8} = \underline{1,69 \text{ min.} = 101 \text{ sek.}} \quad (41)$$

For filtertiden velger vi

$$T_f = 0,1T_d = \underline{0,169 \text{ min.} = 10,1 \text{ sek.}} \quad (42)$$

For å sjekke reguleringsystemets stabilitet, kan vi se på responsen i nivået etter et sprang i referansen. Figur 12 viser responsen i nivået etter et sprang i referansen (ved $t = 0$). Reguleringsystemets stabilitet synes å være tilfredsstillende. (Spranget i referansen, fra



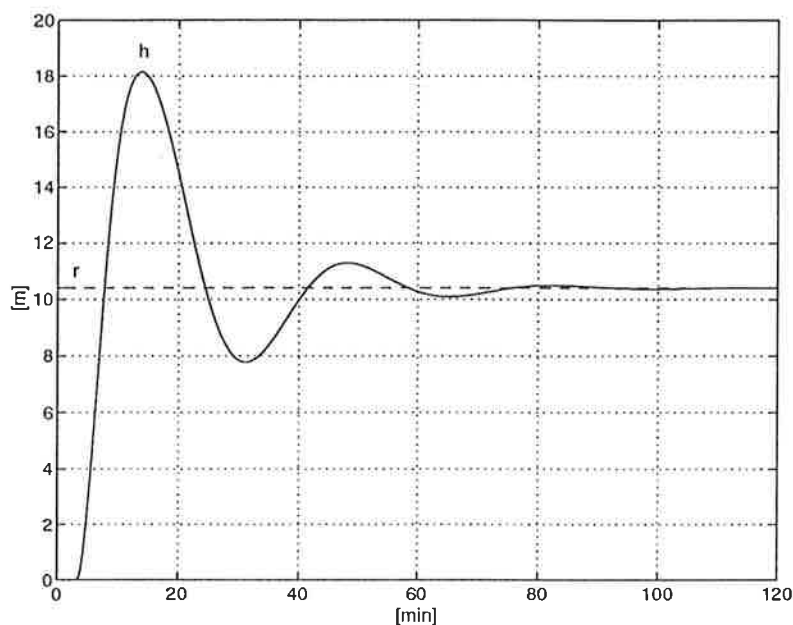
Figur 12: Responsen i nivået h med det ferdig innstilte kaskadereguleringsystemet. Ved $t = 0$ er det et sprang i referansen fra 0 til 10,4 m.

0 til 10,4 m, er i simuleringen urealistisk stort, og responsens oversving går da også over maks. nivå. Hvis man virkelig ønsker å styre nivået fra 0 til 10,4 m, bør referansen velges som et rampesignal mellom 0 og 10,4 m, hvilket gir en mykere endring av nivået. Dermed unngås det store oversvinget.)

Langfiberkjøring. Ovenfor var det antatt kortfiberkjøring. La oss se om reguleringsystemets stabilitet er tilfredsstillende også ved langfiberkjøring. Regulatorparametrene skal være de samme. Figur 13 viser responsen i nivået etter et sprang i primærreferansen (ved $t = 0$). av w_u , som skjer ved $t = 0$. Simuleringene viser at reguleringsystemets stabilitet fremdeles er tilfredsstillende.

6.2.3 Reguleringsystemets ytelse ved kaskaderegulering

Vi skal nå se nærmere på reguleringsystemets ytelse ved bruk av den ferdig innstilte PID-regulatoren. I praksis holdes nivåreferansen konstant det aller meste av tiden, mens forstyrrelsene vil kunne variere. At reguleringsystemet får nivået til å følge en konstant referanse, er påvist i avsnittet foran, se figur 12 eller 13. Vi skal her konsentrere oss om reguleringsystemets evne til å kompensere for forstyrrelser som virker på nivåreguleringen. Nivåreferansen holdes konstant lik $10,4 \text{ m} = 73,24\%$.



Figur 13: Responsen i nivået h med det ferdig innstilte kaskadereguleringssystemet. Ved $t = 0$ er det et sprang i referansen fra 0, til 10,4 m. Det kjøres langfiber, men regulatorparametrene er som ved kortfiberkjøring.

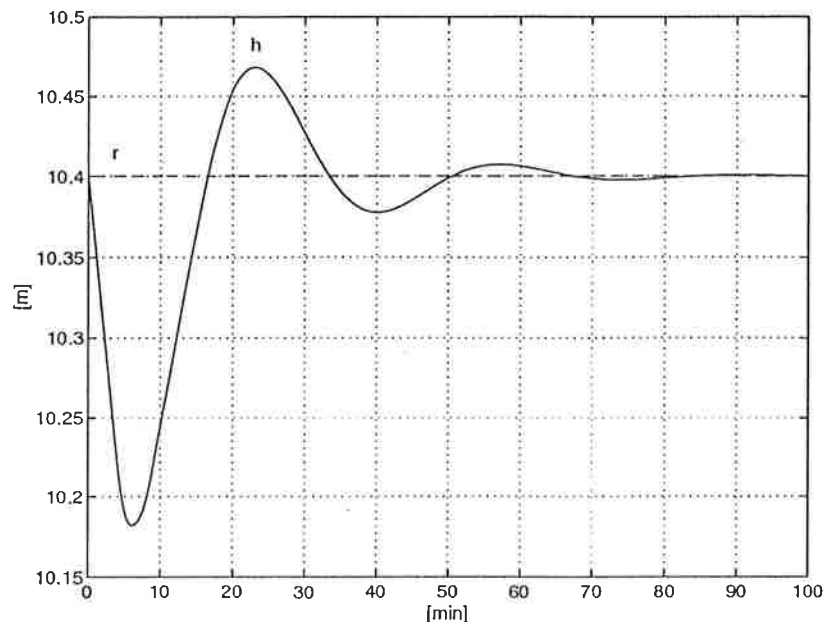
Sprang i utstrømningen w_u . Ved sprangvis overgang fra en produksjonsrate til en annen vil det bli en sprangvis forstyrrelse på nivåreguleringssystemet. La oss anta at w_u nominelt er 850 t/døgn = 590 kg/min. Så økes w_u til 1150 t/døgn = 799 kg/min. Figur 14 viser responsen i nivået etter denne sprangvise økningen av w_u , som skjer ved $t = 0$. Fra figur 14 ser vi at nivået svinger tilbake til referansen med null stasjonært avvik og at den maksimale nivåreduksjonen i transientdelen av responsen er ca 0,22 m.

La oss gjøre en overslagsberegning for å sjekke at endringen av w_u virkelig gir en maksimal reduksjon av nivået på bare rundt 0,22 m. Det kan ikke skje noen kompensasjon via innmatningen før en tid som er lik den totale tidsforsinkelsen fra innmatningsskruen til flissiloen, hvilket i simuleringen er $\tau_e + \tau_1 = 1 \text{ min.} + 2,75 \text{ min.} = 3,75 \text{ min.} = \tau$. Den økte utstrømningen får altså anledning til å trekke ned nivået, uten kompensasjon, i 3,75 min. Reduksjonen av masseutstrømningen er $w_u = 799 - 590 = 209 \text{ kg/min}$. La volumstrømningen være q [m^3/min]. Hastigheten som flisnivået synker med, er da $v = q/A$ der A er tverrsnittsarealet i siloen. q er lik massestrøm dividert med tetthet: $q = w/\rho$. Dermed blir $v = w/(\rho A)$. Flisnivåets reduksjon før det kan skje noen kompensasjon via innstrømningen blir dermed

$$\Delta h = v\tau = \frac{w_u\tau}{\rho A} = \frac{209 \cdot 3,75}{189 \cdot 24,75} = 0,17 \text{ m} \quad (43)$$

hvilket er i nokså god overensstemmelse med 0,22 m som simuleringen i figur 12 viser. Forskjellen skyldes at kompenseringen ikke er perfekt etter at 3,75 min. har passert, slik at vi må forvente en noe større maksimalverdi enn 0,17 m.

Sprang i tilførselen w_l fra lomme. Flis tilførselen fra lomma kan skje nokså tilfeldig. Dette er opphav til en variasjon i massestrømmen og vil dermed utgjøre en forstyrrelse



Figur 14: Responsen i nivået h ved bruk av kaskadereguleringen. Ved $t = 0$ er det en sprangvis økning av utstrømningen w_u fra $850 \text{ t/døgn} = 590 \text{ kg/min}$, til $1150 \text{ t/døgn} = 799 \text{ kg/min}$.

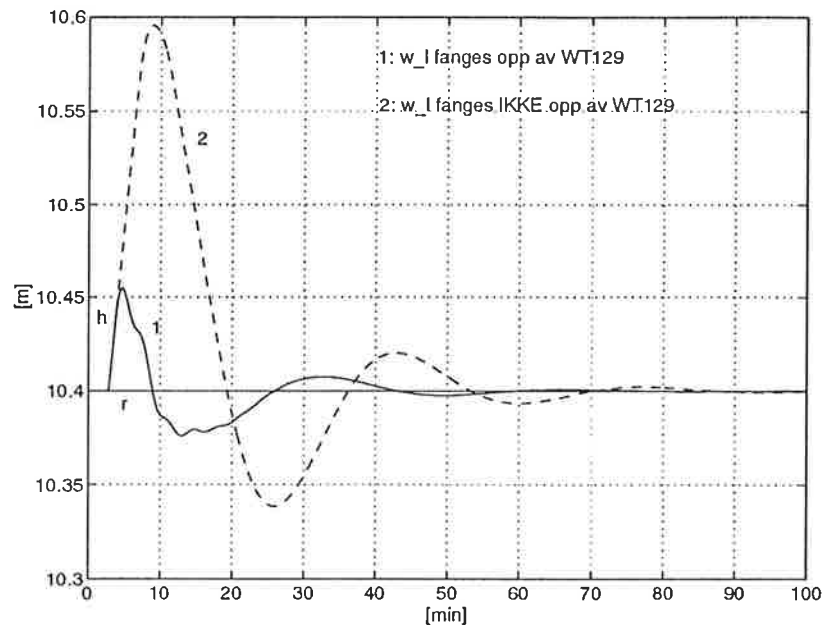
på nivåreguleringen. Jeg har ikke fått opplysninger for hvor stor w_1 kan være. La oss her anta at w_1 øker sprangvis fra 0 til 200 kg/min . Figur 15 viser den tilsvarende virkningen på nivået, se kurve 1. Fra figur 15 ser vi at nivået svinger tilbake til referansen med null stasjonært avvik og at den maksimale nivåøkningen i transientdelen av responsen er ca $5,5 \text{ cm}$.

Ovenfor er det antatt at at w_1 føres inn på ett av båndene under flishaugene slik at w_1 fanges opp av WT129, slik det vil være etter ombygningen i april/mai d.å. Dermed kan sekundærsløyfen kompensere for w_1 . Men la oss se hva som skjer hvis w_1 i stedet tilføres sålderiet utenom WT129, slik tilfellet er pr. dags dato. Kurve 2 i figur 15 viser responsen i nivået. Vi ser at responsen er langt større enn for tilfellet at w_1 fanges opp av sekundærsløyfen (kurve 1).

6.3 Foroverkopling fra forstyrrelsen

Med forstyrrelse menes her utstrømningen av flis, w_u , i bunnen av flissiloen. Foroverkopling fra forstyrrelsen innebærer en "direkte" kopling fra forstyrrelsen til pådraget. Dette vil kunne gi en raskere kompensasjon for forstyrrelsen. Foroverkoplingens struktur fremgår av blokkdiagrammet i figur 7. Foroverkopleren gir et additivt bidrag til "primærpådraget" som er pådraget ut fra primærregulatoren.

Vi skal nå finne foroverkopleren F ut fra blokkdiagrammet i figur 7. F skal antas å være en forsterkning, K_f . Merk at foroverkoplingen foregår fra w_u med enhet kg/min . Foroverkopleren skal virke slik at den gir en "kunstig" kopling fra forstyrrelsen som opphever eller kansellerer den naturlige koplingen som er mellom forstyrrelsen og prosessut-



Figur 15: Responsen i nivået h ved bruk av kaskadereguleringen, for to forskjellige konfigurasjoner av flisstrømmen w_l fra lomma. Ved $t = 0$ er det en sprangvis økning av massestrømmen w_l fra 0 til 200 kg/min.

gangen, her nivået. Vi skal benytte følgende resultat fra kap. 8 i [1]: Transferfunksjonen for et tilbakekoplet system er tilnærmet lik den inverse av transferfunksjonen i tilbakekopplingsgrenen. Derfor vil transferfunksjonen fra primærpådraget u_1 til massestrømmen w_{129} som passerer WT129, tilnærmet være

$$\frac{w_{129}(s)}{u_1(s)} = h_1(s) \approx \frac{1}{K_w} \quad (44)$$

altså den inverse av måleforsterkningen (som jo er transferfunksjonen i tilbakekoplingen). Hvis vi går ut fra statiske forhold, hvilket gjør at tidsforsinkelser kan neglisjeres, vil betingelsen for at den "kunstige" koplingen via F kansellerer den naturlige koplingen, være at

$$K_f \cdot \frac{1}{K_w} \cdot K_{lw} \cdot w_u = w_u \quad (45)$$

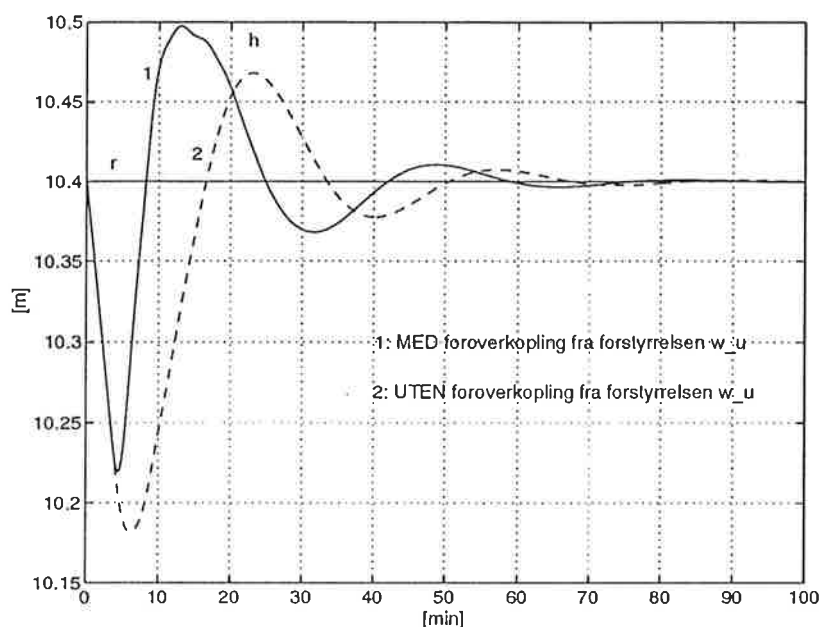
som gir

$$K_f \cdot \frac{1}{K_w} \cdot K_{lw} = 1 \quad (46)$$

som gir

$$K_f = \frac{K_w}{K_{lw}} = \frac{0,03}{0,935} = 0,032 \text{ \%/ (kg/min)} \quad (47)$$

Figur 16 viser responsen i nivået med og uten foroverkoplingen. I simuleringen er det ved tiden $t = 0$ et sprang i w_u fra 850 t/døgn = 590 kg/min. til 1150 t/døgn = 799 kg/min. Vi vil vel si at det er en viss forbedring ved å bruke foroverkopling (det er mindre reguleringsavvik det meste av tiden), men stor er forbedringen ikke. Hvis foroverkoplingen var ideell eller perfekt, hvilket ville innebære at det blant annet var tatt hensyn til såvel dynamikken i sekundærsløyfen som til tidsforsinkelsene knyttet til flistransporten, ville



Figur 16: Responsen i nivået h med og uten foroverkopling fra forstyrrelsen w_u .

w_u ikke gi noen virkning på nivået i det hele tatt, og responsen i nivået er "flat" (nivået er lik referansen hele tiden). Selve foroverkopleren ville da ha blitt mer komplisert. Jeg går ikke nærmere inn på hvordan den ideelle foroverkopleren kan beregnes. En referanse er kap. 13 i [1].

Ovenfor ga foroverkopleren et additivt bidrag til primærpådraget u_1 . Alternativt kan vi la foroverkopleren gi et additivt bidrag til sekundærpådraget u_2 (u_2 er vist i figur 7). Jeg har simulert også dette tilfellet, men det var bare marginale forbedringer sammenliknet med å ikke bruke foroverkopling. I det eksisterende reguleringsystem er det implementert foroverkopling til primærpådraget.

Referanser

- [1] F. Haugen, *Regulering av dynamiske systemer, bind 1*, Tapir forlag, 1994.
- [2] F. Haugen, *Oppgaver og løsninger til Regulering av dynamiske systemer, bind 1*, Tapir forlag, 1995.
- [3] *Simulink Users' Guide*, The MathWorks, 1992.