

Modelvorming rond de Gemco sand cleaner

Citation for published version (APA):

van Gend, K. P. (1996). *Modelvorming rond de Gemco sand cleaner*. (DCT rapporten; Vol. 1996.020). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1996

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Stageverslag

Modelvorming rond
de Gemco Sand Cleaner

WFW rapport nr: 96.020

K.P. van Gend

Technische Universiteit Eindhoven, januari 1996



Inhoudsopgave

Summary	3
Inleiding	5
Het Onderzoek	7
Deel 1. Verband tussen meetwaarden van de sonde en zandkwaliteit	7
Probleemstelling	7
Uitvoering met behulp van meervoudige regressie	7
Mogelijke invloedsfactoren	7
Theorie Regressie analyse	9
Resultaten van de regressie-analyse	11
Meervoudige regressie met niet-lineaire factoren	13
Conclusie regressie-analyse	14
Het kleistof/laagjes-model	14
Conclusie kleistof/laagjes-model	16
Deel 2. Modelvorming	17
Doel	17
Uitvoering	17
Het modelleren van het ontstoffen	17
Modelleren van het slijpen	21
Invloed klei op meetsonde	21
Keuze toestandsgrootheden	22
Het totaalmodel	22
Conclusie	23
Deel 3. Simulatie van het model	24
Doel	24
Uitvoering	24
Simulatiestrategie	25
Lineariseren	25
Het numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen	26
Implementatie oplossingsalgorithmen	28
Problemen	28
Mogelijke Oorzaken	29
Alternatieven voor de hier gepresenteerde aanpak	30
Conclusie	31
Conclusies	32
Aanbevelingen	33
Bijlagen	34
Bijlage 1, Overzicht gebruikte literatuur	34
Bijlage 2, Meetresultaten bij onderzoek	35
Bijlage 3, Geleidbaarheidsmetingen	36
Bijlage 4, Verdeling van de klei over de verschillende zeeffracties	38
Bijlage 5, Sourcecode simulatie-script in MATLAB	39
Bijlage 6, Notatie en gebruikte symbolen	42

Summary

De Globe Weert is a foundry for spheroidal and grey flake cast iron. In cooperation with Gemco Engineers they have designed a sand reclamation unit. This device is based upon a cold mechanical grinding process. To control the output sand quality a sensor has been installed.

After two years of use some problems still exist:

1. What is the sensor measuring exactly?
2. Is the measured value an identifier of the quality of reclaimed sand ?
3. A dynamic model of this plant is not available. Can it be developed?
4. Is it possible to use a model of the plant to reduce wear of the sensor due to the pneumatic cleaning system, for instance by model based control?

A multiple linear regression is used to provide an experimental correlation between some recognised sand quality identifiers and the output value of the sonde.

Then a dynamic model of the system was designed.

For modelling purposes, the process has been divided in three parts: grinding, dedusting and measuring. Afterwards this has been assembled into a dynamic model. This model consists of three interactive first order ordinary differential equations.

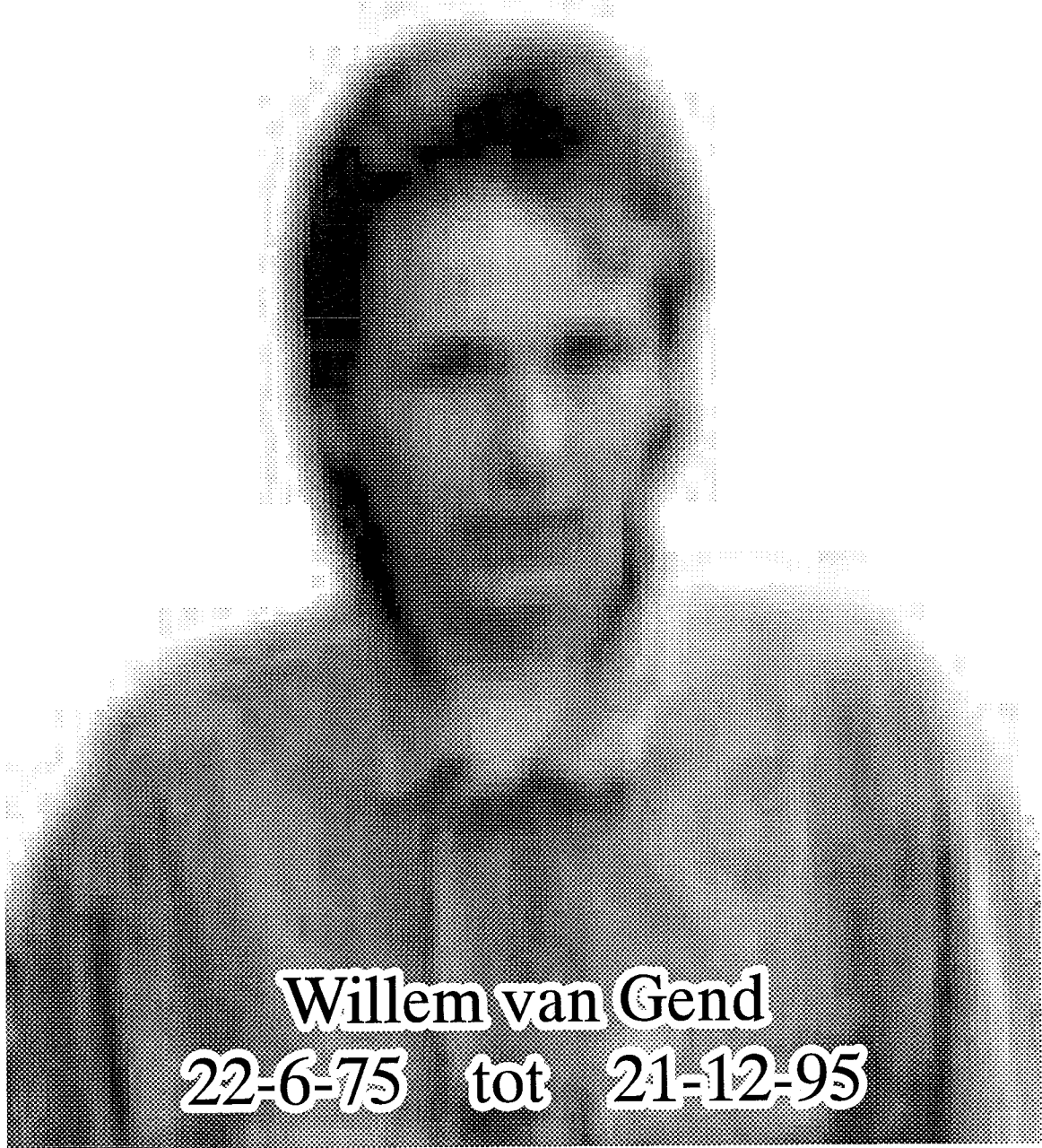
The system is linearised around the stationary endpoint.

Simulating this model has revealed two major problems: The system does not have a full rank reconstructability matrix and one factor in the dedusting process is mistakenly neglected.

Therefore the simulation is not producing the expected outcomes.

The fourth problem mentioned above is not covered in this essay, as time runned out.

Im Memoriam



Willem van Gend
22-6-75 tot 21-12-95

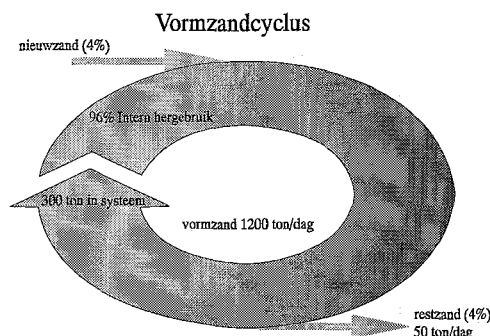
Je tweede stage. Je eerste auto. De eerste sneeuw. Een boom. Het eind.

Inleiding

De Globe Weert is een ijzergieterij voor nodulair en lamellair gietijzeren producten tot ongeveer 300 kilogram. Zij gieten volgens het kleigebonden vormzand-systeem, waarbij eerst via een mal een modelafdruk in vormzand - dat is zand met toevoegingen als bentoniet (een soort klei) en koolpoeder - wordt gedrukt die daarna volgegoten wordt met ijzer.

De Globe is gespecialiseerd in 'moeilijke' gietstukken met veel kernen. Kernen werden vroeger gemaakt van nieuwzand. Na het gieten komt het zand van de kernen tussen het vormzand terecht waardoor er telkens zand in de vormzandcyclus bijkomt. Een overschot aan vormzand (50 ton per dag) moet worden afgetapt en gestort.

Door de milieu-eisen die de laatste jaren zijn ingevoerd, is het veel duurder geworden om dit afval-zand te storten. Daarom is onder auspiciën van AVNEG, de Nederlandse vereniging voor gieterijen, de stuurgroep 'Afvalstromen' begonnen met een driestromenbeleid: preventie, regenereren en hergebruik buiten de gieterij.



Een van deze projecten is het weer opwaarderen van gietzand tot zand dat geschikt is voor kernfabricage. Hiervoor worden speciale eisen gesteld aan de samenstelling en mag er maar weinig stof (bentoniet, koolpoeder, zand met een korrelgrootte kleiner dan 0.063 mm) in zitten omdat anders het verbruik van hars, het bindmiddel van kernzand, sterk toeneemt en de kwaliteit van de kernen afneemt. Gebruikt vormzand bestaat uit zandkorrels met daaromheen een klei/koolpoeder laagje. Dit laagje moet eraf.

Om aan deze eisen tegemoet te komen zijn er diverse oplossingen bedacht.

- * De oplossing waar we het hier over gaan hebben, de Sand Cleaner, is een mechanisch procedé waarbij de zandkorrels geslepen worden. Een aanwezig kleilaagje wordt er afgeslepen en wordt als stof afgevoerd.
- * Anderen werken aan thermisch regenereren, waarbij de zandkorrel verhit wordt en het omhullende laagje er aan vast sintert. Daarna wordt het laagje er alsnog mechanisch afgehaald. De belangrijkste nadelen van dit procedé zijn de grote, dure installaties en de hoge gebruikskosten. Bovendien is het erg indirect.
- * Het kan ook nog door het kleilaagje water op te laten nemen en dit water dan sterk te verhitten. De stoom die zo ontstaat zorgt ervoor dat het kleilaagje met geweld van de korrel afspringt.
- * Andere methode met veel geweld is de zandkorreltjes tegen iets aanschieten waardoor de klei er afspat.

Het voordeel van koud regenereren is dat het zand niet verwarmd hoeft te worden. Zand schakelt bij 573 °C namelijk over op een ander kristalrooster ($\alpha \rightarrow \beta$ modificatie), waarbij een volumeverandering van $\pm 2\%$ hoort waardoor de zandkorrel beschadigd zou kunnen raken.

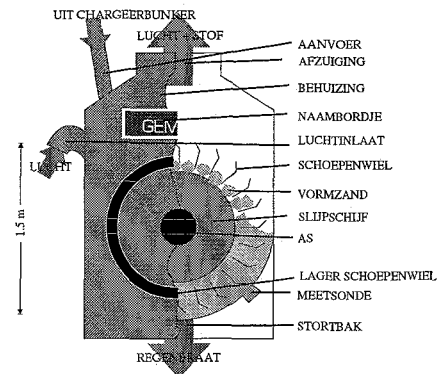
Het zand dat naar de Sand Cleaner gaat, komt hetzij uit de vormzand-cyclus of van de poetsmachine. Het zand uit de poetsmachine is al veel schoner omdat deze ook al een reinigende

werking heeft. Dit heeft een sterk wisselende ingangskwaliteit tot gevolg.

Voordat het zand de Sand Cleaner in gaat, worden eerst de klonten fijngemalen en wordt het gedroogd. Daarna komt het batchgewijs (per keer 800 kg) de Sand Cleaner in.

De Sand Cleaner bestaat uit een slijpschijf met daaromheen een schoepenwiel dat het zand over de slijpschijf stuurt. Het stof dat zo ontstaat wordt aan de bovenkant afgezogen en via een labrynt, een filter en een cycloon teruggewonnen. Dit stof bevat naast kwartsmeel (fijngemalen zandkorrels), het bentoniet- en koolpoeder welke na een scheiding opnieuw gebruikt kunnen worden.

Hoe langer de Sand Cleaner slijpt, des te meer klei er weggeslepen wordt. De kernmakerij eist echter een zo constant mogelijke kwaliteit. Dit betekent dat er met een variabele tijd geslepen moet worden, afhankelijk van de beginzandkwaliteit. In de Sand Cleaner wordt gebruik gemaakt van een meetsonde die de kwaliteit meet. Afhankelijk van de gemeten kwaliteit wordt door de SPC, de besturingscomputer, besloten nog een minuut door te slijpen of door te gaan met de volgende stap in het procedé: onstoften. Momenteel wordt onstoften nog gedaan door de slijpsteen stil te zetten maar het schoepenwiel wél door te laten draaien met de afzuiging aan, welke dan het stof wegzuigt. In de toekomst gaat De Globe onstoften in een ander apparaat, vlak voordat het regeneraat in de kernmakerij wordt ingezet.



De meetsonde bestaat uit een aantal platen waartussen zand wordt gebracht. Dan wordt er iets gemeten (de capacitieve impedantie volgens Kostelijk [1, § 3.2.1]), waarna het zand er met perslucht weer uitgeblazen wordt. Dit laatste gaat met tamelijk veel geweld, waardoor de sonde min of meer gezandstraald wordt.

Rond dit procedé doen zich enkele vragen voor:

1. Waar is de sonde gevoelig voor?
Michenfeller, de fabrikant, wil er weinig over kwijt totdat ze hun patent binnen hebben.
2. Is dit een maat voor de kwaliteit van het regeneraat?
3. Hoe ziet een model van het proces er uit?
4. Is het mogelijk om op basis van dat model de meetsonde zodanig aan te sturen dat met veel minder metingen, en dus minder slijtage, dezelfde kwaliteit te bereiken valt?

In de rest van dit verslag wordt geprobeerd om een antwoord te geven op de bovenstaande vragen.

Eerst wordt er een poging gedaan om de invloed van een aantal procesparameters op de metingen van de sonde te kwantificeren. Het doel hiervan is een eenduidig verband te vinden tussen enkele kwaliteitskenmerken van vormzand en de meetwaarde van de sonde.

Met de verkregen kennis wordt vervolgens een simpel mathematisch model afgeleid van de Sand Cleaner, dat daarna gesimuleerd zal worden. Tenslotte zal een algoritme worden ingevoerd om met behulp van de proces-simulatie een regeling te maken die de slijtage van de sonde kan terugbrengen.

Het Onderzoek

Deel 1. Verband tussen meetwaarden van de sonde en zandkwaliteit

Probleemstelling

Het is niet exact bekend welke eigenschap(en) van het vormzand door de meetsonde gemeten worden. De waarden van de meetsonde worden door de SPC, SAND PROCESS CONTROL oftewel de besturingscomputer van de Sand Cleaner, omgerekend en opgeslagen. Het doel van het eerste deel van dit verslag is om te proberen een verband te vinden tussen de kwaliteitseigenschappen van het vormzand en de meetwaarde die door de SPC wordt afgegeven.

Uitvoering met behulp van meervoudige regressie

Neem zoveel mogelijk monsters met verschillende eigenschappen, kwantificeer die eigenschappen en ga een verband zoeken met meervoudige regressie.

De monsters zijn uitgezocht op basis van de SPC-metwaarde. Deze moeten dus ruim gespreid liggen binnen het meetgebied.

Een probleem is dat de zandkwaliteit niet willekeurig gestuurd kan worden. Men kan maar op twee plaatsen zand aftappen, namelijk van de chargeerbunker (dat is de opslag vlak voordat het zand de Sand Cleaner in gaat) en uit de opvangbunker (de trechter onder de beide Cleaners). Het zand van de chargeerbunker kan variëren tussen de -10% en de 50% van de gewenste eindkwaliteit¹, afhankelijk van de mengverhouding tussen de hoeveelheden vormzand en poetsmachinezand.

Het zand uit de opvangbunker hoort een constante eindkwaliteit te hebben. Doordat zo nu en dan een charge met een andere eindkwaliteit gemaakt mocht worden, kon toch een beetje gevarieerd worden. Helaas heeft dit zand de gehele ontstofcyclus doorlopen. Het ontstoffen is een extra bewerking na het slijpen. Deze beïnvloedt de zandkwaliteit, waardoor dus niet de werkelijke procesinvloed gemeten kan worden.

Mogelijke invloedsfactoren

Hieronder is een opsomming gegeven van mogelijke invloedsfactoren op de meetwaarde van de sonde. Deze lijst is ontstaan na overleg met De Globe en Gemco.

1. Slijper en Sonde

Door een verschillende constructie van de twee Sand Cleaners, onder andere doordat de sonde op een andere plaats zit, kan er een verschil optreden in de metingen. Daarom is er alleen gemeten aan slijper twee.

2. Werking slijper

In de loop der tijd slijt de slijpsteen en moeten sommige procesparameters worden aangepast, zoals toerentallen, spleetbreedte en beginvullingsgraad.

Als deze factoren al invloed hebben, dan is deze moeilijk kwantificeerbaar. Om de paar weken worden door de Technische Dienst van De Globe de spleetbreedte en de diameter

¹De besturingssoftware van de beide Sand Cleaners relateert elke meting aan de eindkwaliteit en geeft daarom een percentage op.

van de slijpschijf gemeten. Indien nodig wordt dan de diameter van het schoepenwiel versteld en het toerental van de slijpschijf verhoogd.

Voor de eenvoud moeten alle metingen dan plaats vinden binnen de tijdsspanne tussen twee verstelbeurten, want anders moeten we nog extra gegevens mee gaan nemen.

3. Schoonblazen van de sonde.

Nog een proceskenmerk, alleen heeft deze een duidelijke invloed: slecht schoonblazen beïnvloedt de meting. Als het schoonblazen slecht werkt, blijven er resten van de vorige meetbatch achter welke de nieuwe meting dan beïnvloeden. Er is echter aangenomen dat dit buiten beschouwing kan worden gelaten.

4. Afzuiging/klimaat/stofgehalte regeneraat.

Het stofgehalte van het regeneraat is duidelijk afhankelijk van de afzuiging. Astrid Kostelijk [1, §4.8 en §4.9] heeft hiernaar onderzoek gedaan. Hoewel de afzuiging zeker niet constant is - daar wordt nu ook onderzoek naar verricht -, wordt deze toch als constant verondersteld.

5. geleidbaarheid en pH van het vormzand

Gemco Engineers beweren dat de sonde een geleidbaarheid meet [Kostelijk §4.5] Bij De Globe is alleen een methode aanwezig om de geleidbaarheid in een nat milieu te meten. Tijdens dit onderzoek bleek dat de methode waarop deze bij De Globe gemeten wordt een systematische fout bevat. Daarom zijn de geleidbaarheidsmetingen nog eens herhaald op een iets andere wijze. Zie hiervoor bijlage 3.

Uiteindelijk is de betrouwbaarheid van de metingen van de geleidbaarheid zo laag, dat deze in de verdere behandeling NIET worden meegenomen. Volgens Kostelijk [1, §4.5] is er geen verband tussen de geleidbaarheid en de zandkwaliteit. In de pilot-plant waarmee De Globe geëxperimenteerd heeft voordat de huidige Sand Cleaners ontworpen werden, werd echter wél een verband gemeten.

De pH wordt gemeten op dezelfde manier als geleiding. Doordat de systematische fout op een pH-meting van veel minder invloed is, kunnen deze metingen wél worden meegenomen.

6. Actief klei-gehalte

De voor De Globe belangrijkste kwaliteitseigenschap. Deze is alleen met een chemische proef te bepalen, namelijk de titratie met methyleenblauw (De Globe-norm W 529-08.3-14). Vormzand wordt in water gedaan. Dan worden er enkele bewerkingen uitgevoerd om zoveel mogelijk alle actieve klei van de zandkorrels af te halen. Hierna wordt de oplossing getitreerd. Deze titratie bepaalt via adsorptie van methyleenblauw aan actieve klei het percentage actieve klei in het vormzand. Van elk monster is twee keer het actief klei-gehalte bepaald, en deze zijn gemiddeld.

7. Korrelgrootteverdeling

De korrelgrootteverdeling van het vormzand wordt gemeten met een zeeftest conform De Globe-norm W 589-7016-5.0. Kostelijk [1, §4.6 en §4.7] heeft aangetoond dat de huidige norm voor verbetering vatbaar is doordat de reproduceerbaarheid van deze proef gering is. Deze zeeftest bestaat uit zes zeven met steeds kleinere maaswijdten waarmee een ruwe korrelgrootte verdeling gemaakt kan worden. In de regressieanalyse zijn zowel enkele losse zeef-waarden meegenomen (zeef1 en zeef6) als stof (dat is hier het restant na zeef 6) als de AFS-waarde, een rekenwaarde om de korrelgrootteverdeling dimensieloos in één getal weer te geven.

Kort samengevat zijn de volgende invloeden meegenomen, het actieve klei-gehalte (in %), de slijptijd (in seconden), de pH (in pH), en zeef1, zeef6 en stof (in grammen) en de AFS-waarde (dimensieloos).

Niet meegenomen zijn dus bijvoorbeeld de geleidbaarheid en onderdruk afzuiging.

In negen dagen tijd zijn 22 monsters genomen. Om de tijdsinvloed gering te houden is de volgorde van de monsters in kwaliteit van het zand in de loop van de tijd zo willekeurig mogelijk. Dit om de invloed van slijtage en klimaatsinvloeden toevallig te doen zijn.

De resultaten staan in bijlage 2.

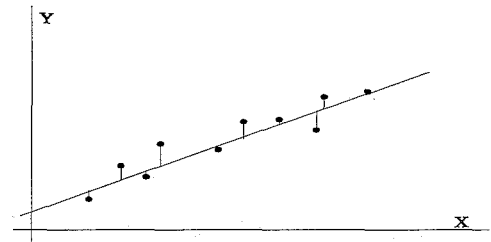
Opgemerkt moet worden dat 22 monsters erg weinig is voor een statistische analyse van deze aard. Als gevolg hiervan moet het aantal mee te nemen parameters in berekeningen gering gehouden worden.

Theorie Regressie analyse

Meervoudige regressie is een rekenwijze om experimenteel verbanden te zoeken in een verzameling meetgegevens. Deze berekening is tamelijk ingewikkeld. Er is gebruik gemaakt van het softwarepakket StatGraphics. Dit pakket neemt weliswaar al het rekenwerk uit handen, maar enige achtergrondkennis over de berekeningsmethode is toch noodzakelijk. Hierna volgt een korte samenvatting van de theorie zoals die staat in Rijpkema [2, hoofdstuk 3], vooral toegespitst op het werken met StatGraphics, en Chatfield [3, chapter 8].

Enkelvoudige regressie²

Gegeven zijn n koppels metingen (x_i, y_i) welke beschreven kunnen worden door een verband $y = f(x)$, bijvoorbeeld het lineaire verband $y = a_0 + a_1 x$.



Het is mogelijk om 'op het oog' een rechte lijn door deze puntenwolk te tekenen, maar het is ook mogelijk om een optimale lijn te berekenen. Hiervoor wordt een optimale lijn gedefinieerd die eigenschap heeft dat de fout $e_i = y_i - (a_0 + a_1 x_i)$, dus het verschil per punt tussen y en \hat{y} (de schatting van y) in het kwadraat en dan gesommeerd over alle punten, zo klein mogelijk wordt.

In formulevorm: $S = \sum_{i=1}^n e_i^2$ moet minimaal zijn. Dit levert wat wiskundig gegoochel op,

met als resultaat: $\hat{a}_0 = \bar{y} - \hat{a}_1 \bar{x}$ en: $\hat{a}_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$. Hierin betekenen \bar{x} en \bar{y}

respectievelijke het gemiddelde van x en het gemiddelde van y .

Als deze oplossing niet exact is, dan houden we een restsom van S over. Deze restsom kan omgewerkt worden tot een getal dat aangeeft hoe goed de fit is.

We hebben nu een schatting voor a_0 en a_1 . De vraag of de helling niet toevallig nul is, kan worden beantwoord door te gaan toetsen of deze significant is: nulhypothese $H_0: a_1 = 0$ en het alternatief $H_1: a_1 \neq 0$.

² Voor notatie en gebruikte symbolen zie bijlage 6.

De test bestaat uit toetsen of a_1 vermenigvuldigd met (fout-kwadratensom van x) gedeeld door de standaarddeviatie de Student t-verdeling volgt met $n-2$ vrijheidsgraden. Voor de theorie over toetsen: zie Chatfield [3, chapter 7].

Uitbreiding naar meervoudige regressie

Voor meervoudige regressie wordt de berekening wat ingewikkelder, want dan is kennis van lineaire algebra (matrices) nodig. Je neemt dan alle waarnemingen samen in een matrix X , en de coëfficiënten in een vector β . Bundel dan alle waarnemingen in een waarnemingsvector y . Het totaal wordt dan:

$$\hat{y} = X \beta; \text{ bijvoorbeeld: } \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 3 & 6 \\ 5 & 7.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix}; \text{ en de oplossing: } \hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$$

met een kwadratensom: $S = e^T e$ en een variantieschatting $s^2 = S / (n-k)$, waarin n het aantal meetpunten voorstelt en k het aantal te schatten parameters.

Voor $n-k$ wordt in de statistiek de term vrijheidsgraden gebruikt, dat is hier dus het aantal metingen dat verklaard moet worden door de berekeningen. De term vrijheidsgraad komt bijvoorbeeld ook terug in de (experimentele) mechanica (aantal onafhankelijke bewegingsmogelijkheden) en de regeltechniek (aantal vrij in te stellen regelparameters). Kijk uit voor verwisseling van de betekenissen!

Ook nu valt weer voor elke parameter te toetsen of deze wel significant van nul verschilt; weer met dezelfde hypothesen en de toets: de *coëfficiënt / standaardfout* moet kleiner zijn dan de Student t-verdeling voor $n-k$ vrijheidsgraden.

Meervoudige regressie met StatGraphics

Al deze gegevens zijn ook op de uitdraaien van StatGraphics te vinden:

10/16/95		03:40:00 PM		Page 1	
Model fitting results for: CARDATA.price					
Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level	
CONSTANT	-6.749519E4	7702.013087	-8.7633	0.0000	
CARDATA.cylinders	355.23262	257.632174	1.3788	0.1700	
CARDATA.displace	-24.182138	6.645151	-3.6391	0.0004	
CARDATA.weight	3.345899	0.5132	6.5197	0.0000	
CARDATA.year	815.315824	92.219332	8.8411	0.0000	
R-SQ. (ADJ.) = 0.4217 SE= 1542.320639 MAE= 970.983899 DurbWat= 1.336					
Previously: 0.0000 0.000000 0.000000 0.000000 0.0000					
155 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.					

Hier staat alle benodigde informatie:

R-SQ (ADJ.) is de verklaarde rest-kwadratensom, (kwadratensom model / kwadratensom totaal), aangepast aan het aantal vrijheidsgraden.

SE is de standaarddeviatie van de fout.

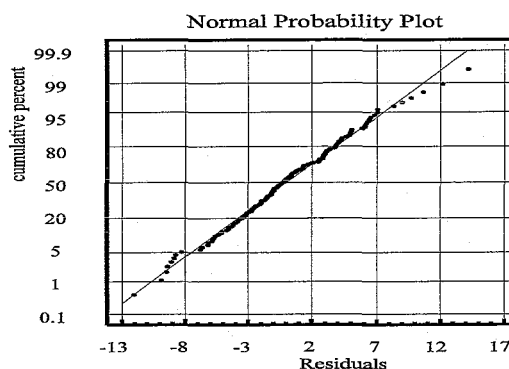
t-value is de berekende t-waarde voor de toets; dit is gelijk aan *coeff/stderr*.

sig.level geeft aan bij welk significantieniveau deze waarde nog net door de beugel kan bij dat aantal vrijheidsgraden. Als nu het sig. level voor een variabele groter is dan de toetsingsgroot-

heid, dan mag deze parameter weggelaten worden zonder dat het model veel aan waarde inboet. Dit geldt alleen maar onder de voorwaarde dat alle overige termen in het model blijven.

Nu moet nog gecontroleerd worden of de verdeling van de residuen ($\hat{y} - y_i$) voldoende toevallig is. Als StatGraphics hier een plotje van maakt, mag er geen systematisch verband te zien zijn in deze residuen. Ook kun je er een 'normaal-waarschijnlijkheidsplot' van maken, zoals hiernaast.

Deze grafiek laat zien hoe de waargenomen waarden verdeeld zijn ten opzichte van de Gaussische verdeling (in de statistiek ook wel normale verdeling genoemd). De normale verdeling wordt weergegeven door de lijn, de waarnemingen staan als puntjes. In dit voorbeeldgeval lijkt het vrij goed te kloppen, alleen bij hele grote en hele kleine waarden wijkt de verdeling van de waarnemingen af.



LET OP: een eventueel gevonden verband is zuiver empirisch. Er zal dus eerst nog gekeken moeten worden of de gekozen parameters en de berekende coëfficiënten ook theoretisch te verklaren zijn.

Resultaten van de regressie-analyse

Met alle gegevens is in StatGraphics een 'Multiple Regression' uitgevoerd met alleen lineaire coëfficiënten.

De output is als volgt:

Model fitting results for: MEET.meet				
Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
CONSTANT	68696.8647	6.582886E4	1.0436	0.3191
MEET.klei	-791.201726	285.127801	-2.7749	0.0181
MEET.slijptijd	-0.301452	0.895063	-0.3368	0.7426
MEET.ph	-431.517214	1607.139427	-0.2685	0.7933
MEET.zeef1	-413.568427	1174.325622	-0.3522	0.7314
MEET.zeef6	945.832107	1185.12047	0.7981	0.4417
MEET.stof	-8438.444975	6705.638988	-1.2584	0.2343
MEET.AFS	-1009.925484	1263.882905	-0.7991	0.4412
R-SQ. (ADJ.) = 0.7501 SE= 1170.013053 MAE= 701.669820 DurbWat= 2.406				
Previously: 0.0000 0.000000 0.000000 0.000				
19 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.				

Er is een significantieniveau van 95% vereist. Dat betekent hier dat elke invloedsfactor met een sig.level van meer dan 0.0500 in dit model geen betekenis heeft. Daarom wordt nu achter elkaar telkens de variabele met het hoogste significantielevel weggehaald. Hierdoor veranderen ook steeds de significantieniveaus van de andere variabelen. Dit wordt gedaan tot alle overgebleven variabelen het vereiste significantieniveau bezitten.

Er blijft dan slechts één parameter over namelijk het kleigehalte. In de op één na laatste stap

zit het stofgehalte ook nog in het verband. Deze term heeft weliswaar een significantie van slechts 87% maar dit levert toch een betere verklaring van de restsom op.

Het volgende verband blijft dan over, met een verklaarde restsom van 83%:

$$\text{meetwaarde} = 17022 - 768 * \text{klei} - 5769 * \text{stof}$$

In dit verband zit dus een beetje klei (variërend in waarde tussen 0 en 7.5%) en stof (variërend in waarde tussen 0 en 0.4 massa%). Dat is te verklaren, want stof bevat relatief veel klei (zie Bijlage 4).

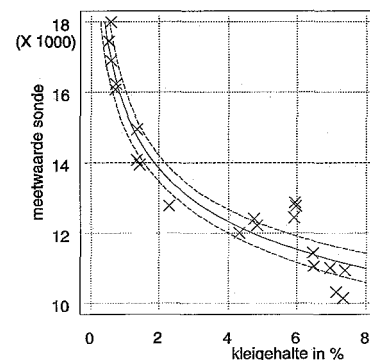
Klei

Aan de grafiek van de klei (zie hierbeneden) is al te zien dat een verband niet-lineair zal zijn. Daarom wordt een model van de vorm $Y = a * X^b$ geprobeerd met alleen klei als variabele. Ter controle wordt de set data ook nog willekeurig opgedeeld in twee stukken en is voor deze twee groepen ook nog eens hetzelfde verband gezocht. De resultaten staan hieronder.

	<i>a</i>	<i>b</i>	verklaarde restsom
gehele set	15506	-0.165	92%
helft 1	15606	-0.172	91.2%
helft 2	15521	-0.164	91.3%

De drie groepen lijken sterk op elkaar. Dit is een aanwijzing dat dit verband ook inderdaad valide is.

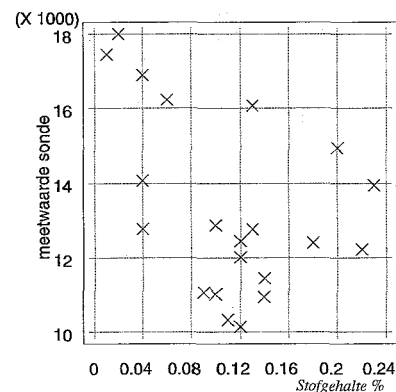
Hiernaast staat de grafiek waarin horizontaal het kleigehalte in procenten uitstaat en verticaal de waarde van de meetsonde. De kruisjes zijn de meetpunten. De getrokken lijn is het gevonden verband, de gestreepte lijnen zijn het 95% betrouwbaarheidsinterval (hier tussenin hoort 95% van de metingen te liggen).



Stof

Voor stof kan dezelfde exercitie gedaan worden. Zelfs als een uitbijter met een stofgehalte van 0.59 niet wordt meegenomen, is het echter niet mogelijk om een betere verklaring van de restwaarde te krijgen dan 31%. In de grafiek hiernaast is deze uitbijter ook niet getekend.

Hier lijkt twijfel over of deze parameter wel echt meegenomen mag worden in een verband gerechtvaardigd.



Meervoudige regressie met niet-lineaire factoren

Als de gegevens van hierboven worden meegenomen, kan nog een keer een meervoudige regressie worden berekend, maar dan met als extra mogelijke vrijheidsgraden $klei^{-0.165}$ en $klei^2$.

Het verband dat dan gevonden wordt, met een verklaarde restsom van 98%, is:

$$meetwaarde = -55457 + 2483 * klei + 39924 * klei^{-0.165} - 191 * klei^2 + 2506 * pH + 271 * zeef6.$$

StatGraphics, het gebruikte statistiekpakket duidt dus aan dat nu ineens de pH en de hoeveelheid zand met een korrelgrootte van 0.16 tot 0.063 mm ook significant van invloed zijn. Dit waren ze hiervoor nog niet! De factor stof is nu ook verdwenen uit het verband.

Hiererder moet worden opgemerkt dat een model met 6 vrijheidsgraden in principe niet betrouwbaar kan worden berekend als er maar een set meetdata van 22 stuks ter beschikking is. Om betrouwbare conclusies te kunnen trekken is minstens het tienvoudige aan data nodig. Desondanks is toch met de beperkte dataset verder gewerkt.

Ook nu kan de groep gegevens gesplitst worden.

De resultaten hiervan zijn niet bemoedigend. Voor de eerste helft geldt het volgende verband:

$$meetwaarde = -78733 + 4645 * klei + 59161 * klei^{-0.165} - 359 * klei^2 + 2749 * pH + 7109 * stof.$$

Niet alleen de factoren wijken flink af, maar ook de meegenomen parameters verschillen!

De tweede helft levert het volgende verband op: $meetwaarde = -15661 * klei^{-0.165}$.

Dit is zo sterk afwijkend dat de conclusie gerechtvaardigd is dat het gevonden verband slechts 'modellering van ruis' vormt.

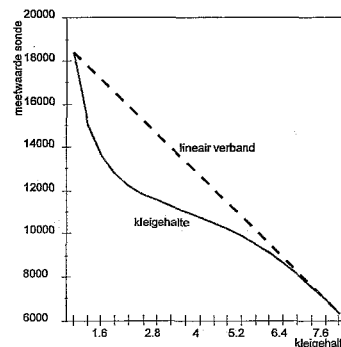
Als extra onderbouwing van deze negatieve conclusie kunnen ook nog de diverse gevonden factoren onderzocht worden.

* Klei

De invloed van de klei op de meetwaarde is absoluut niet meer lineair. Het werkelijke verband staat hiernaast getekend.

Het is nu niet mogelijk om aannemelijk te maken waarom het verband deze termen bevat. Vooral de kwadratische term doet vreemd aan.

Toch is er nog een hele andere verklaring mogelijk, maar die volgt verderop.



* zeef6

Een verklaring voor het aanwezig zijn van zeef6 in het verband is het feit dat dit 'bijna stof' is.

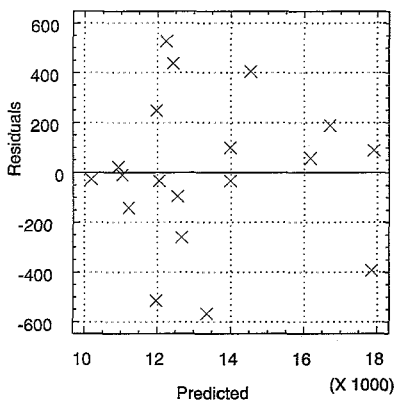
Om na te gaan of de klei zich verzamelt in deze zeef is van een viertal verschillende monsters het kleigehalte per zeef bepaald. Zie bijlage 4 voor de resultaten. Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat de klei zich niet in deze zeef verzamelt. Dat een hoge meetwaarde van de sonde iets te maken heeft met de hoeveelheid zand in deze zeef is dus "toevallig".

* pH

De pH is hier de logaritme van de concentratie van H^+ - en OH^- -ionen van een suspensie van zand in water. Deze wordt gemeten in een natte omgeving. Door deze logaritme heeft een

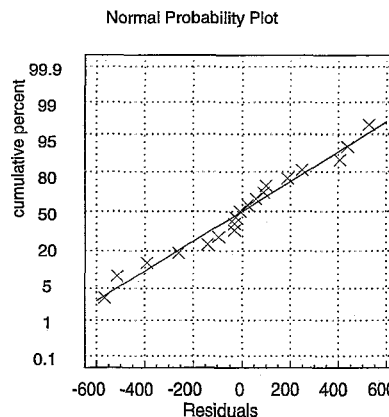
afwijking van 10% maar weinig invloed op de eindwaarde. Op basis van dit soort overwe-
gingen is het niet mogelijk om deze factor als invloedsfactor te schrappen.

Om te controleren of dit verband enigszins betrouwbaar is, moeten de residuen-verdeling en
de normaal/waarschijnlijkheids-verdeling nog gecontroleerd worden.



Links staat de verdeling van de
residuen tegen de voorspelde
waarde, rechts staat de normaal-
waarschijnlijkheidsverdeling
van de residuen.

De rechter verdeling lijkt een
golfvorm te bevatten, waardoor
de verdeling van de residuen
dus afwijkt van een normale
verdeling.



Conclusie regressie-analyse

Eerst is regressie gedaan met lineaire factoren. Toen bleken het actieve kleigehalte en het
stofgehalte de bepalende parameters te zijn. Hierna is van beide parameters de invloed
onderzocht. Voor klei geldt dat dit verband beter met een multiplicatief verband kan worden
beschreven, voor het stofgehalte geldt dat een verband tussen enkel stof en de meetwaarde
van de sonde niet aanwezig lijkt.

Daarna is nog een keer regressie gedaan waarin het kleigehalte ook nog als niet-lineaire term
voorkomt. Nu blijkt het mogelijk om een betere verklaring van de restsom te verkrijgen.
Helaas blijkt bij splitsing van de gegevens in twee groepen dat daaruit geheel andere
verbanden worden verkregen. Dit betekent dat het verband slechts 'toevallig' is.

In ieder geval mag geconcludeerd worden dat er een verband bestaat tussen het actief klei-
gehalte en de meetwaarde van de sonde.

Over de invloed van andere parameters kan slechts betrouwbaar een uitspraak worden gedaan
indien het aantal meetpunten minstens vertienvoudigt.

Het kleistof/laagjes-model

De tegenvallende resultaten van de regressie-analyse kunnen misschien vanuit een geheel
andere gezichtspunt verklaard worden. Met enig denkwerk is het namelijk mogelijk om een
model op te stellen waarin de invloed van het kleigehalte op de meetsonde verklaard wordt.

Vormzand bestaat uit zandkorreltjes met een klei/koolpoeder laagje eromheen. De Sand
Cleaner slijpt dit laagje eraf, wat resulteert in schone korrels en kool- en kleistof.

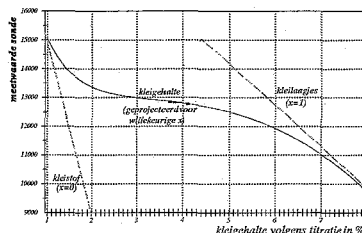
Als nu de gevoeligheid van de meetsonde verschillend is voor kleistof of kleilaagjes, dan is de verhouding van deze twee van invloed op de meetwaarde. Dit verklaart waarom de grafiek lijkt te bestaan uit twee asymptoten (hierin is de concentratie van een van beiden nul) met daartussen een overgang.

Een verklaring voor het verschil in gevoeligheid kan gegeven worden in de vorm van het verschil in vullingsgraad van de sonde. Als deze gevuld wordt met grote korrels, zit er veel (niet geleidende) lucht tussen. Als deze gevuld wordt met stof, wat een veel kleinere korrelgrootte heeft, zit er minder ruimte tussen. De geleiding zal verbeteren.

Chargeerzand kan van twee verschillende bronnen komen. In vormzand is de meeste klei aanwezig als kleilaagje. Poetsmachinezand is al gestraald en ontstof, en bevat dus minder kleilaagjes. Deze twee soorten zand komen samen in de verzamelbunker en mengen daar. Dit levert een verschillende begin kwaliteit op. Deze variatie is de basis voor het eerste deel van de metingen uit dit verslag.

Tijdens het regenereren wordt een kleilaagje weggeslepen; tegelijkertijd wordt er stof afgezogen. Alle monsters die zijn genomen van regeneraat zijn ook na het slijpen nog 10 minuten ontstof. Dit was de tweede bron voor monsters.

Hiernaast is het klei-meetwaarde verband nog eens opnieuw getekend, nu met twee asymptoten. De ene asymptoot geeft aan hoe het verband zou luiden indien er alleen zandkorrels met een variërend kleilaagje aanwezig zijn, de andere hoort bij een verband met enkel stof.



Hierbij hoort een verband van de volgende vorm:

$meetwaarde = k_2 (1-x) c_{klei} + k_3 x c_{klei} + k_4$; c_{klei} is het gehalte aan klei zoals bepaald met een titratie en x de fractie van de totale klei die als stof aanwezig is.

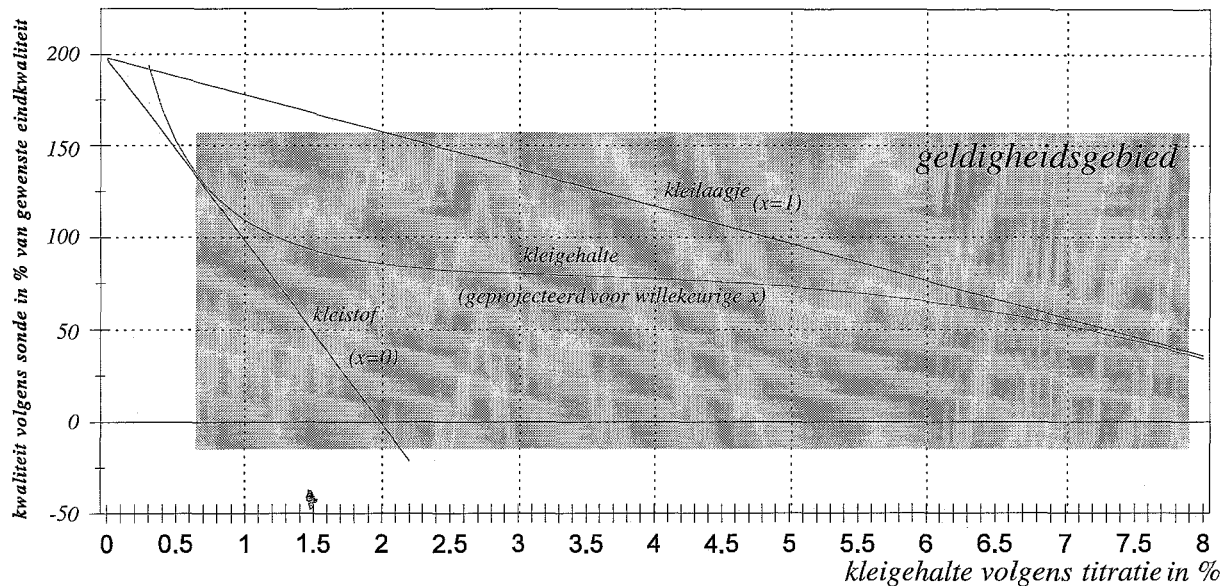
Deze constanten zijn te bepalen mits we in het achterhoofd houden dat de asymptoten visueel geschat moeten worden. Beide lijnen zijn los bepaald, de constanten zijn dan: $k_2 = -7000$; $k_3 = -1430$; $k_4 = 21250$. Tijdens het simuleren werd ontdekt dat deze constanten dan niet rechtstreeks mogen worden ingevuld in de bovenstaande vergelijking. De waarde van de constanten zoals die gebruikt werden tijdens de simulatie zijn: $k_3 = -1975$; $k_2 = -395$; $k_4 = 15150$. Deze zijn berekend aan de hand van enkele speciale metingen, die verder bij de simulatie besproken zullen worden.

Natuurlijk moeten beide asymptoten dezelfde waarde leveren voor $klei=0$.

Het besturingsprogramma van de sonde werkt intern alleen maar met een andere kwaliteitsmaat, namelijk een percentage van de GEWENSTE eindkwaliteit. Tijdens het ijken wordt een beginwaarde voor zand genomen en gedefinieerd als 10% en na een aantal minuten slijpen wordt de dan bereikte kwaliteit op 100% gesteld.

Hiermee is een transformatie te maken van meetwaarden van de sonde naar %eindkwaliteit.

Als deze transformatie wordt losgelaten op de vorige grafiek, volgt de volgende grafiek.



In deze grafiek valt op dat de grafiek voor het kleigehalte de asymptoot niet blijft volgen. Dit komt doordat de kleistof-asymptoot berekend is in een andere grafiek die alleen maar het praktische werkingsgebied van het kleigehalte bevat. Deze grafiek geeft ook nog het snijpunt aan van beide asymptoten, welke buiten het geldigheidsgebied van mijn formuleringen valt.

Vanuit deze grafiek kan een bekend verschijnsel van de SPC mooi onderbouwd worden. In de grafieken van de SPC blijkt vaak dat in het begin van het slijpproces een kuil in de grafiek zit. De kwaliteit daalt dus eerst. Daarna gaat de grafiek wel het normale patroon volgen. De verklaring hiervan is de volgende: er wordt begonnen met alleen kleilaagjes. Een deel daarvan wordt omgezet in stof. De meetwaarde van stof ligt veel lager. Hierdoor daalt de kwaliteit. Dan wordt dit stof afgezogen, waarmee de kwaliteit stijgt.

Conclusie kleistof/laagjes-model

Het is mogelijk om de invloed van het kleigehalte op de meetwaarde van de sonde te modelleren door onderscheid te maken in kleistof en klei aanwezig als laagje rond een zandkorrel.

Hiermee zijn enkele tot dusver onverklaarde verschijnselen alsnog te verklaren.

Het model is nog niet uitvoerig getest. Dat past ook niet meer in het kader van dit verslag. Toch zal dit model gebruikt worden in het vervolg van dit verslag, omdat de resultaten zeer bevredigend zijn en meer kunnen verklaren dan de regressie-analyse.

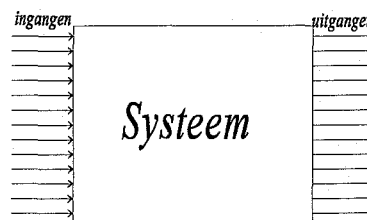
Deel 2. Modelvorming

Doel

In dit deel van het verslag zal geprobeerd worden om een model op te stellen voor de Sand Cleaner. Het is de bedoeling de invloed van procesparameters als ingangskwaliteit, toerentalen en onstoftingstijd op het proces te vatten in wiskundige vergelijkingen.

Uitvoering

Begin met het systeem te definiëren als een 'Black Box' met ingangen en uitgangen. Door de ingangen te variëren veranderen de uitgangen. Het is nu de bedoeling om onderscheid te maken tussen ingangen en parameters door vergelijkingen op te stellen die het systeem beschrijven.



Als onafhankelijke ingangen zijn hier te vinden:

- * Hoeveelheid, soort en beginkwaliteit ingangszand,
- * Straal, snelheid, vorm en type slijpschijven,
- * Straal, snelheid, vorm schoepenwiel (waarmee de spleetbreedte vastligt),
- * Afmetingen behuizing Sand Cleaner,
- * Luchtsnelheid afzuiging,
- * Tijd (slijpduur en onstoftingstijd).

Als uitgangen zijn hier te vinden:

- * meetwaarden van de sonde,
- * meetwaarden gevonden door de zandbereiding gebaseerd op het uitgangszand. Deze metingen gebeuren één keer per dag en omvatten o.a. korrelgrootteverdeling, schuifsterkten, pH, geleidbaarheid en actief-kleigehalte.

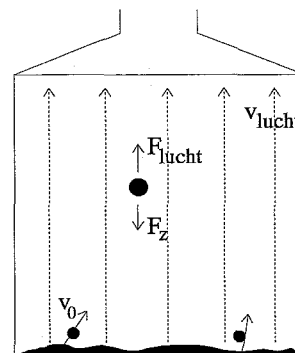
De werking van de Sand Cleaner berust in principe op de omzetting van zandkorreltjes met daaromheen een kleilaagje in kleistof en schone zandkorreltjes. Het stof kun je dan afzuigen. Er spelen zich in de Sand Cleaner drie processen af:

- * het slijpen, de omzetting kleilaagje in kleistof.
- * het ontstoffen, dus het afzuigen van (klei)stof.
- * het meten in de sonde, dus de invloed van stof en kleilaagjes op de meetwaarde.

Elk van deze processen kan gemodelleerd worden, hetgeen in de navolgende hoofdstukken besproken wordt. Na de modellering van de deelprocessen zal een inventarisatie plaatsvinden van de gebruikte/bekende ingangen en zullen de procesparameters en de toestandsgrootheden worden gekozen om het model te assembleren.

Het modelleren van het ontstoffen

Beschouw de Sand Cleaner als een ruimte met een onderkant (hoogte $h(0) = 0$) waardoor zandkorreltjes met verschillende afmetingen



komen vliegen met een constante begin-impuls³ voor alle korreltjes $m \dot{h}_0$. Hierin wordt de hoogte van het korreltje als de lopende variabele h beschouwd.

In de ruimte is er een luchtstroming omhoog met een snelheid v_{lucht} . Als een zandkorreltje de bovenrand raakt wordt het korreltje als afgezogen beschouwd en verdwijnt het daarmee uit het model.

Dit levert voor een zandkorreltje de volgende krachtenbalans op:

* Naar boven gericht: $F_{lucht} = \frac{1}{2} C_w A_{proj} \rho_{lucht} (v_{lucht} - \dot{h})^2$, waarin A_{proj} het geprojecteerde oppervlak is en C_w de luchtweerstandcoëfficiënt. Deze is een functie van de vorm van de zandkorrel en het Reynolds-getal. Voor N_{Re} tussen 1 000 en 350 000 en als vorm een bol is dit $C_w = 0.445 \pm 13 \%$ (Zie Perry [6, section 5-63]).

* Naar beneden gericht: $F_z = m g$.

Volgens de tweede wet van Newton geldt:

$$\vec{F} = \frac{d(m \vec{v})}{dt} \quad \text{hier:} \quad \frac{1}{2} C_w A_{proj} \rho_{lucht} (v_{lucht} - \dot{h})^2 - m g = m \ddot{h}$$

Als we nu alle termen met een (afgeleide van) h links schrijven en alles delen door het geprojecteerde oppervlak, krijgen we:

$\frac{m}{A_{proj}} \ddot{h} + C_w \rho_{lucht} (v_{lucht} - \dot{h}) \dot{h} = \frac{1}{2} C_w \rho_{lucht} v_{lucht}^2 - \frac{m}{A_{proj}} g$, een niet-lineaire tweede orde differentiaalvergelijking waarin we twee invloeden op h onderscheiden: de lichtsnelheid en de factor m/A_{proj} . Als verondersteld wordt dat zandkorreltjes perfect bolvormig zijn, kan hiervoor ook $2/3 \rho_{zand} d_{korrel}$ geschreven worden, hetgeen een maat is voor de grootte van een zandkorreltje.

Deze differentiaalvergelijking is te gieten in de vorm $\dot{\underline{x}} = \underline{\chi}(\underline{x}, \underline{u}, t)$, waarin in \underline{x} (de toestand) de hoogte h en zijn afgeleide worden opgenomen. De ingang \underline{u} bestaat dan uit de lichtsnelheid v_{lucht} en de grootte van de zandkorrel $2/3 \rho_{zand} d_{korrel}$.

Om in MATLAB 4.2c het zandkorreltje te kunnen simuleren, gebruiken we een numerieke oplossingsfunctie met de naam `ode23` (), dit is een implementatie van een tweede orde Runge-Kutta methode. (Zie deel 3 voor uitleg over het oplossen van differentiaalvergelijkingen).

Het hoofdprogramma ziet er dan uit als in het linker tekstvak, de (externe) functie staat in het rechter tekstvak.

³Dit is de impuls! Het alternatief, constante snelheid, valt af want dan zouden zonder afzuiging alle korreltjes even hoog komen. Constante kinetische energie lijkt mij geen reële mogelijkheid. Nu is de beginsnelheid dus omgekeerd evenredig aan de korrelgrootte.

```

% hoofdprogramma met aanroep van sub.
d = 0.0001;
G_ = 9.81;
CRho_ = 0.445*1.293; % Cw * rho
Vl_ = 1; % vlucht
Ma_ = 2/3*1600*d; % m/Aproj
m = 4/3*pi*(d/2)^3*1600; % m korrel

global CRho_ Ma_ G_ Vl_;

impuls0=1.68E-9*0.5; % de beginimpuls...
t0 = 0;
h0 = [0 impuls0/m]';
tmax = 1;

%oplossen dv:
[t,x]=ode23('f_zand', t0, tmax, h0,
1e-2);
plot(t,x);
end

function hdot = f_zand(t,h)
% simulatie van een zandkorreltje
% in een stroming.

global CRho_ Ma_ G_ Vl_;

if (h(1) >= 0.9),
    hdot(1)=0;
    hdot(2)=-h(2); % sneller dan 0;
else
    hdot(1)=h(2);
    hdot(2)=.5*CRho* (Vl-h(2))^2/Ma_
    ...
    - G;
end;

```

Bij het invullen van alle waarden is er vanuit gegaan dat de beginsnelheid van een zandkorreltje met een diameter van 0.063 [mm] gelijk is aan 0.5 [m s⁻¹] en dat de hoogte van de afzuigruimte 0.9 [m] is.

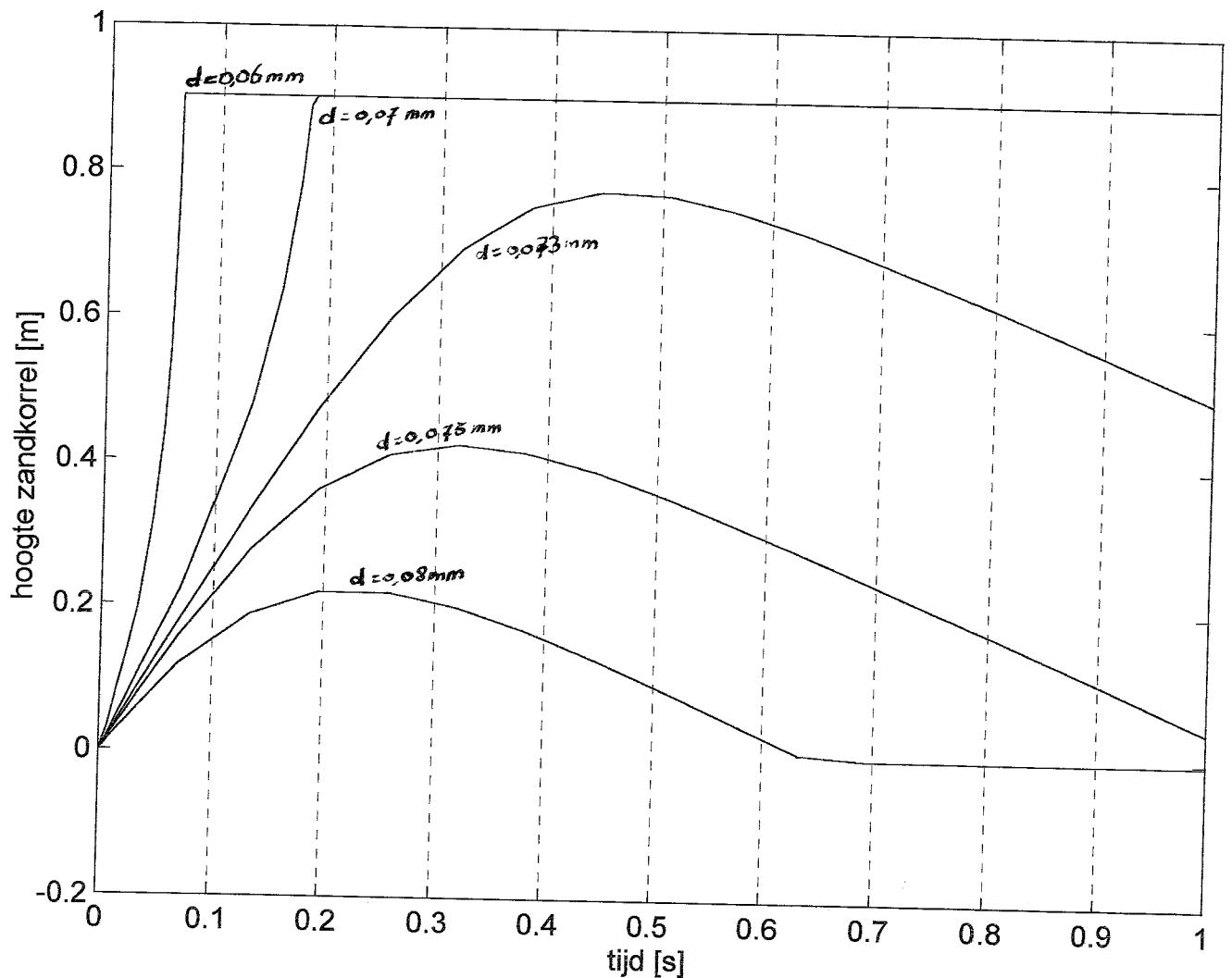
Voor het draaien van het programma moet de variabele *d* op de juiste waarde in [m] gezet worden.

Het blijkt dan dat in dit model zandkorreltjes met een diameter kleiner dan 0.073 [mm] (73 [µm]) worden afgezogen als de lichtsnelheid op 1 [m s⁻¹] staat ingesteld.

Alle diameters groter dan 0.073 [mm] leveren banen op van korreltjes die eerst omhooggaan maar daarna snel omlaag gaan bewegen, zoals in de volgende afbeelding te zien is.

Hier staat horizontaal de tijd uitgezet en vertikaal de hoogte van een zandkorreltje.

Door de lichtsnelheid aan te passen is het mogelijk om in te stellen waar de grens komt te liggen waarop een zandkorreltje wel of niet wordt afgezogen.



---Intermezzo.

In Perry [6, section 5] wordt een valsnelheid afgeleid onder invloed van een stroming verticaal en de zwaartekracht. Hij poneert een oplossing die volgens hem altijd geldt. Deze luidt in het algemeen:

$$u_t = \sqrt{\frac{4gD_p(\rho_p - \rho)}{3\rho C}} \quad \text{en als } N_{Re} \in (1e3; 3.5e5) : \quad u_t = 1.73 \sqrt{\frac{gD_p(\rho_p - \rho)}{\rho}}$$

Zijn afleiding geldt alleen voor Newtonse media (dus bijvoorbeeld lucht of water).

Oftewel: volgens hem komt elk deeltje weer beneden. Dat wordt door het model in dit verslag niet ontken, maar als een deeltje de bovenrand haalt, is het 'weg' en kan dan nooit meer omlaag vallen.

---ozzemretnI

Conclusie deelmodel ontstopping

Als we naar deze resultaten kijken, zien we dat of een korreltje wordt afgezogen, afhankelijk is van de luchtsnelheid, beginsnelheid en korrelgrootte.

Dit betekent dat als de luchtsnelheid netjes wordt afgesteld, dat dan de hoeveelheid afgezogen stof recht evenredig is met de hoeveelheid aanwezig stof en hoe hard het schoepenwiel verstuift.

Dan is $\frac{dn_{stof}}{dt}$ recht evenredig met $-k_1 c_{stof}$, waarin k_1 bijvoorbeeld de verstuiwingsfactor mag heten.

Modelleren van het slijpen

Het slijpen zet het kleilaagje om in stof. Dit gebeurt doordat zandkorreltjes gedurende enige tijd in aanraking komen met de slijpschijf. Neem de omzettingssnelheid recht evenredig met de passerende oppervlakte van de slijpschijf tussen twee schoepen per seconde. Het schoepenwiel draait in dezelfde richting als de slijpschijf. We hebben dan te maken met de aandrijffrequenties (f) van de twee motoren, de straal van de slijpschijf (r_{slijp}) en de binnenstraal van het schoepenwiel (r_{schoep}). Het verband ziet er dan als volgt uit:

$$\frac{dn_{stof}}{dt} = -\frac{dn_{klei}}{dt} \sim 2\pi (f_{slijp} r_{slijp} - f_{schoep} r_{schoep}) c_{klei}$$

Deze formule geldt wanneer we in de spleet tussen schoep en slijpschijf een lineaire snelheidsverdeling mogen aannemen.

Dat is gevaarlijk, er bestaat namelijk nog zoiets als een 'grenslaag' (term uit Fysische Transport Verschijnselen [4]).

De rest glijdt gewoon zonder te schuren met de schoepen mee. Hierom is het belangrijk dat de spleetbreedte niet te groot wordt. Om dit te modelleren zou eerst een model opgesteld moeten worden van de grenslaag.

Dit is een zeer ingewikkeld verhaal doordat het niet gaat over een vloeistofstroming maar over een zandstroming. Een verdere afleiding hiervan valt buiten het kader van dit verslag. Hierom wordt dit allemaal maar in een constante verdisconteerd. Het kan zijn dat straks bij de simulatie een duidelijke variatie van deze parameter in de loop van vele charges gevonden wordt. Dat kan het interessant zijn om te zien of hier een spleetbreedte uit berekend zou kunnen worden.

De totale formule wordt dan:

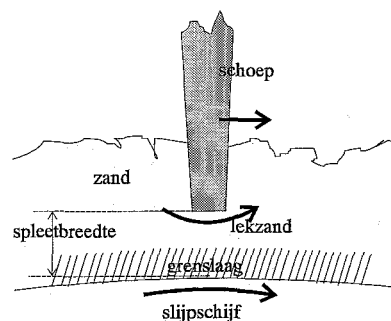
$$\frac{dn_{stof}}{dt} = -k_0 2\pi (f_{slijp} r_{slijp} - f_{schoep} r_{schoep}) c_{klei}$$

Invloed klei op meetsonde

In deel 1 van dit onderzoek is hier al voldoende over geschreven.

Hier wordt er vanuit gegaan dat het kleistof/laagjes-model klopt, en wel dat er een lineair verband bestaat tussen kleigehalte en meetwaarde. Klei (bentoniet en koolpoeder) komt in dit model in twee verschijningsvormen voor: als laagje rond zandkorreltjes en los, als stof. Beide hebben een andere invloed op de meetwaarde van de meetsonde.

$$meetwaarde = k_2 c_{klei} + k_3 c_{kleistof} + k_4$$



Overzicht gebruikte ingangsvariabelen

afzuiging:

- hoogte van de afzuigruimte constant
- luchtsnelheid in de afzuiging in constante k_I verwerkt
- vorm schoepenwiel constant
- concentratie kleistof variabel tijdens proces

slijpen:

- snelheid & straal schoepenwiel ingangsvariabelen, want deze zijn meetbaar en instelbaar
- snelheid slijpschijf ingangsvariabele, want instelbaar
- straal slijpschijf parameter, niet meetbaar, zal geschat moeten worden.
- concentratie kleilaagjes variabel tijdens proces

en verder:

- totale zandmassa variabel tijdens proces
- beginkwaliteit zand beginconditie
- tijd lopende variabele

Als uitgang houden we over:

- meetwaarde sonde

Keuze toestandsgrootheden

Eerst moet gekozen worden welke procesgrootheden het proces kunnen beschrijven. Deze moeten het verloop van het proces volgen en reproduceerbaar de stand van zaken kunnen aangeven. Toestandsgrootheden hoeven niet rechtstreeks meetbaar te zijn.

De kleigehaltes lijken goede kandidaten. Tenslotte is het doel van de Sand Cleaner om de hoeveelheid klei in het vormzand terug te brengen. Door nu deze hoeveelheid klei als basis te beschouwen en de veranderingen daarin als vergelijkingen te geven, kunnen we het proces beschrijven.

In enkele delen van het hiernavolgende model zal een concentratie gebruikt worden. Hiervoor moet ook de momentane massa van de charge bekend zijn. Om deze te kunnen schatten wordt deze ook als toestandsgrootheid meegenomen.

Alle toestandsgrootheden hebben de dimensie [kg].

Het totaalmodel

Voor elke toestandsgrootheid moet de volgende algemene balansvergelijking gelden [6, §4.2]:

$$\frac{\text{opeenhoping}}{\Delta t} = \frac{\text{instroom}}{\Delta t} - \frac{\text{uitstroom}}{\Delta t} + \frac{\text{genereren}}{\Delta t} - \frac{\text{consumptie}}{\Delta t}$$

Voor de vaste klei geldt:

- * instroom $t = 0$ is na het vullen \rightarrow doet niet mee.
- * uitstroom het storten na afloop zit niet in het model, er zitten geen lekken in de behuizing van de Sand Cleaner.
- * genereren er wordt niets gegenereerd.

* consumptie de omzetting in kleistof.

Voor het kleistof geldt:

- * instroom er stroomt geen stof naar binnen.
- * uitstroom er wordt kleistof afgezogen.
- * genereren vaste klei wordt omgezet in kleistof.
- * consumptie er wordt niets verbruikt.

Voor de totale massa geldt:

- * instroom geen.
- * uitstroom er wordt kleistof afgezogen.
- * genereren geen.
- * consumptie geen.

De totale groep vergelijkingen wordt dan:

$$\begin{cases} \frac{dm_{klei}}{dt} = -k_0 2\pi (f_{slijp} r_{slijp} - f_{schoep} r_{schoep}) m_{klei} \\ \frac{dm_{stof}}{dt} = -\frac{dm_{klei}}{dt} - k_1 m_{stof} \\ \frac{dm_{tot}}{dt} = -k_1 m_{stof} \end{cases}$$
$$meet = k_2 \frac{m_{klei}}{m_{tot}} + k_3 \frac{m_{stof}}{m_{tot}} + k_4$$

In dit stelsel hebben de constanten de volgende betekenis:

- k_0 [m^{-1}] omzetting per meter geschuurd.
- k_1 [s^{-1}] verstuiwingsconstante.
- k_2 [μS] overdrachtsconstante van kleigehalte naar meetwaarde
- k_3 [μS] overdrachtsconstante van stofgehalte naar meetwaarde
- k_4 [μS] theoretische meetwaarde sonde als alleen kaal zand aanwezig is.

Dit is een lineair stelsel differentiaalvergelijkingen, hetgeen simuleren mogelijk maakt in de geest van de TUE-colleges 'Werktuigkundige Regeltechniek 2' door J.J. Kok e.a. [10] en 'Werktuigkundige Regeltechniek 3: Parameter- en Toestand-schatten' door F.E. Veldpaus e.a. [7].

Conclusie

Het is mogelijk om een model van het proces in de Sand Cleaner op te stellen.

In deel drie van dit verslag zal worden gecontroleerd of dit model de werkelijkheid voldoende benadert.

Deel 3. Simulatie van het model

Doel

Het in het vorige hoofdstuk afgeleide stelsel van differentiaalvergelijkingen zal nu worden gebruikt voor een simulatie. Dat betekent dat een computerprogramma - dat aan de hand van deze vergelijkingen, die tenslotte hetzelfde zouden moeten voorstellen als het echte apparaat - het gedrag van de Sand Cleaner moet kunnen imiteren. Door het gedrag van het model te vergelijken met de echte metingen, kunnen dan schattingen voor de onbekende parameters berekend worden door middel van een zgn. extended Kalman-filter.

Uitvoering

Het in het vorige hoofdstuk afgeleide stelsel luidt:

$$\begin{cases} \frac{dm_{klei}}{dt} = -k_0 \cdot 2\pi (f_{slijp} r_{slijp} - f_{schoep} r_{schoep}) m_{klei} \\ \frac{dm_{stof}}{dt} = -\frac{dm_{klei}}{dt} - k_1 m_{stof} \\ \frac{dm_{tot}}{dt} = -k_1 m_{stof} \end{cases}$$
$$meet = k_2 \frac{m_{klei}}{m_{tot}} + k_3 \frac{m_{stof}}{m_{tot}} + k_4$$

Dit stelsel kan worden omgeschreven in een stelsel volgens de theorie in 'Werktuigkundige Regeltechniek 3: Parameter- en Toestandschatten' (Veldpaus, e.a. [7, hoofdstuk 5]):

$$\underline{\dot{x}}^* = \begin{bmatrix} \dot{\underline{x}} \\ \dot{\underline{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \chi(\underline{x}, \underline{u}, \underline{\theta}, t) \\ \underline{0} \end{bmatrix}; \quad \text{en} \quad y = \gamma(\underline{x}, \underline{u}, \underline{\theta}, t);$$

waarin:

ingangen: $\underline{u} = [r_{schoep} \ f_{schoep} \ f_{slijp}]^T$;

toestand: $\underline{x} = [m_{klei} \ m_{stof} \ m_{tot}]^T$;

te schatten parameters: $\underline{\theta} = [r_{slijp} \ k_0 \ k_1]^T$;

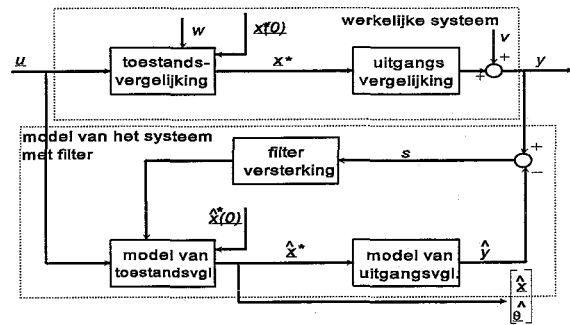
(gemeten) uitgang: $y = meet$.

De constanten k_2 , k_3 , k_4 worden als bekend beschouwd.

De grootheid \underline{x}^* wordt de augmented state van het systeem genoemd en bestaat uit de drie toestandsvariabelen en de te schatten parameters. In het stelsel worden de veranderingen van deze parameters nul verondersteld, eventuele kleine veranderingen worden door het Kalman-filter bijgestuurd.

Simulatiestrategie

De strategie komt kort samengevat op het nevenstaande schema neer. Het principe is dat van een extended Kalman-filter. De bovenste twee blokken representeren de Sand Cleaner, met daarop de verstoringen $w(t)$ en de meetfouten $v(t)$. Beneden staat het model, waaraan dezelfde $u(t)$ wordt toegevoerd als aan de werkelijke Sand Cleaner. Omdat dit maar een model is, zal de schatting van de uitgang $\hat{y}(t)$ van de gemeten uitgang $y(t)$



verschillen. Dit verschil, het zogenaamde innovatiesignaal $s(t)$ wordt aan de filterversterkingsmatrix gevoerd, die hiermee aanpassingen doorgeeft aan het model.

De behandeling van de achterliggende theorie staat uitgelegd in [7].

Lineariseren

Dit soort modellen zijn alleen maar geldig in een gebied rond een nominale 'evenwichtsstand'. Er zijn twee mogelijkheden voor een nominale stand:

- * Het eindpunt. Het proces bestaat in principe uit het verwijderen van klei uit vormzand. In dit proces is maar één stationair punt aan te wijzen: dat er geen klei meer aanwezig is. In de praktijk zal echter niet alle klei verwijderd kunnen worden.
- * Het midden van het werkgebied. Hiermee worden de afwijkingen van het werkpunt in getalswaarde geminimaliseerd, het punt is echter geen evenwicht.

In dit verslag wordt gekozen voor de uitgebreide eindtoestand als nominaal werkpunt omdat dit de eigenschap heeft stationair te zijn.

Het nominale uitgebreide werkpunt is dan $(mO_{klei}, mO_{stof}, mO_{tot}, rO_{slijp}, kO_0, kO_1)$ en bijvoorbeeld m_{klei} wordt dan opgebouwd als: $m_{klei} = mO_{klei} + \Delta m_{klei}$.

Het gekozen werkpunt is stationair; dus $\dot{x}^* = 0$. Uit het voorgenoemde stelsel blijkt dat mO_{klei} en mO_{stof} dan gelijk moeten zijn aan nul.

De gelineariseerde vergelijkingen worden dan:

$$\frac{d}{dt}(\underline{x}^* - \underline{x}_0^*) = \left. \frac{\partial \underline{x}(\underline{x}^*, \underline{u}, t)}{\partial \underline{x}^*} \right|_{\underline{x}_0^*, \underline{u}_0} (\underline{x}^* - \underline{x}_0^*) + \left. \frac{\partial \underline{x}(\underline{x}^*, \underline{u}, t)}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{x}_0^*, \underline{u}_0} (\underline{u} - \underline{u}_0);$$

hetgeen met matrices kort kan worden geschreven als: $\frac{d}{dt} \underline{\Delta x}^* = A \underline{\Delta x}^* + B \underline{\Delta u}$, waarin A gedefinieerd is als: $A_{ij} = \left. \frac{\partial x_i(\underline{x}^*, \underline{u}, t)}{\partial x_j^*} \right|_{\underline{x}_0^*, \underline{u}_0}$. De matrix B berekenen is niet nodig omdat $\underline{\Delta u}$ altijd

nul zal zijn want de parameters in \underline{u} zijn namelijk tijdens het proces constant, deze zijn alleen door de Technische Dienst te veranderen tussen twee batches, waarna in de formules het nominale werkpunt wordt aangepast.

In feite wordt dus alleen de vrije responsie van het systeem bestudeerd.

De matrix A ziet er als volgt uit (NB: mO_{klei} en mO_{stof} zijn nul):

$$A = \begin{bmatrix} -2\pi kO_0(f_{sl}rO_{sl} - f_{sc}r_{sc}) & 0 & 0 & -2\pi kO_0 mO_{kl} f_{sl} & -2\pi (f_{sl}rO_{sl} - f_{sc}r_{sc}) mO_{kl} & 0 \\ +2\pi kO_0(f_{sl}rO_{sl} - f_{sc}r_{sc}) & -kO_1 & 0 & -2\pi kO_0 mO_{kl} f_{sl} & -2\pi (f_{sl}rO_{sl} - f_{sc}r_{sc}) mO_{kl} & -mO_{st} \\ 0 & -kO_1 & 0 & 0 & 0 & -mO_{st} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Voor de meetvergelijking geldt: $y - y_0 = \left. \frac{\partial \gamma(\underline{x}^*, \underline{u}, t)}{\partial \underline{x}^*} \right|_{\underline{x}_0^*, \underline{u}_0} (\underline{x}^* - \underline{x}_0^*) + \left. \frac{\partial \gamma(\underline{x}^*, \underline{u}, t)}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{x}_0^*, \underline{u}_0} (\underline{u} - \underline{u}_0)$

oftewel $\Delta y = C \Delta x + D \Delta u$, waarin D gelijk is aan nul omdat de ingang niet rechtstreeks in de uitgang doorwerkt (bovendien is Δu nul). Voor C valt af te leiden dat:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{k_2}{mO_{tot}} & \frac{k_3}{mO_{tot}} & -\frac{k_2 * mO_{klei} + k_3 * mO_{stof}}{mO_{tot}^2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

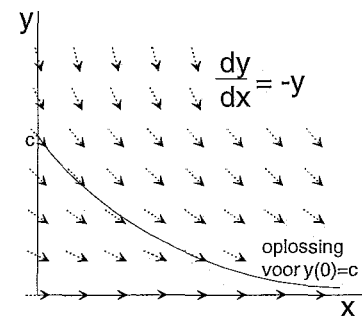
Hiermee is het stelsel gelineariseerd. Vanaf nu wordt voor alle Δm gewoon m geschreven en worden asterisken (*) weggelaten, omdat dit weinig meerwaarde biedt.

Het numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen

In een differentiaalvergelijking (DV) staat minstens één variabele in de vorm van een afgeleide genoteerd. Praktijkvoorbeelden zijn de snelheid (plaats naar tijd [dx/dt ofwel \dot{x}]) of de drukverandering in een lange buis (druk naar plaats [dp/dx]).

Als een DV is te schrijven in de vorm $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$, dan kan hiervan een plaatje getekend worden. De eerste term dy/dx is te beschouwen als de helling van een kromme. Het is mogelijk om dan een plaatje te tekenen waarin in een aantal punten een pijltje staat dat de helling van een kromme door dat punt aangeeft.

Bij een beginwaardeprobleem wordt een beginpunt gegeven, meestal in de vorm van $y(0)=5$. Als we nu vanuit het beginpunt langs de helling gaan bewegen komen we wel in de buurt van een volgende pijl. Deze geeft een iets andere richting aan. Dan zoeken we dié baan die ervoor zorgt dat we zo netjes mogelijk aan de helling in dat punt voldoen. De lijn die we dan tekenen heet de oplossing van de differentiaalvergelijking.



Er zijn een aantal wiskundige manieren voor om oplossingen te vinden van beginwaardeproblemen. Analytisch is dit helaas alleen in enkele mooie en/of bijzondere gevallen mogelijk [8, chapter 10.5] zoals bij het bovenstaande plaatje. De oplossing voor die DV is $y=c e^{-x}$. Meestal zal echter de toevlucht moeten worden gezocht tot een numerieke methode om te komen tot een oplossing.

De eenvoudigste, Euler voorwaarts (ook wel expliciete Euler genoemd), werkt als volgt:

- * Kies een stapgrootte h .
- * Begin in het beginpunt en ga met de helling van dat beginpunt een stap van h naar rechts.
- * Bepaal daar opnieuw de helling en
- * Maak opnieuw zo'n stap, etc.

Deze werkwijze staat hierbeneden ook getekend.

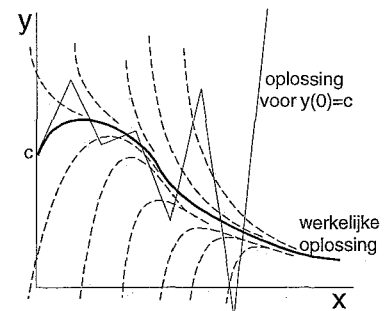
In formulevorm ziet dit er als volgt uit voor een vergelijking $dy/dx = f(x, y)$, met de stapjes genummerd in i : $y_{i+1} = y_i + h f(x_i, y_i)$, met $y_0 = c$ als beginvoorwaarde.

Het nadeel van deze Euler-methode is de beperkte betrouwbaarheid. Deze werkt namelijk alleen maar voor convergerende richtingsvelden (dan staan de pijltjes in buurt van de oplossing in de richting van de werkelijke oplossing). Bij divergerende richtingsvelden staan de pijltjes weg van de oplossing. Dit betekent dat als er een kleine fout wordt gemaakt in de schatting, dat de volgende stap je verder weg brengt van de oplossing, en de daarop volgende stap weer. In het geval van het stelsel van dit verslag is er een convergerend richtingsveld.

Een ander probleem zijn de zogenaamde 'stijve DV's'. [9, pp. 33 - 38]. Deze hebben een convergerende richtingsveld, maar de pijltjes staan zó scheef, dat het volgende stapje ver aan de andere kant van de oplossing terechtkomt, zoals te zien is in het nevenstaande plaatje. In

het geval van de Sand Cleaner is de afwijking aan het einde van de simulatie in de orde van 10^{170} .

Dit is enerzijds op te lossen door voldoende kleine stapjes te kiezen, maar dat kost heel erg veel rekentijd. Anderzijds is het vaak erg lonend om over te gaan op een zgn. impliciete oplossingsmethode zoals Euler backward. Deze zijn gebaseerd op een iets andere oplossingsstrategie waarbij vanuit een (begin)punt gekeken wordt waar een stap verder een nieuw punt ligt waarvan de richtingscoëfficiënt door het (begin)punt gaat. De hierbij horende oplossingsvergelijking luidt: $y_{i+1} = y_i + h f(x_{i+1}, y_{i+1})$. Deze methode zal -ongeacht de stapgrootte- altijd stabiel zijn. Een heel erg groot nadeel is dat de bovenstaande vergelijking impliciet is, d.w.z. dat die vergelijking eerst opgelost moet worden om y_{i+1} te vinden.



Het is mogelijk om te voorspellen of een stelsel DV's stijf zal zijn door de eigenwaarden te berekenen van de matrix A . Als deze sterk in grootte verschillen is het stelsel stijf en moet de stapgrootte in het begin zo klein worden gekozen als bij een oplossing met de grootste eigenwaarde hoort. Meestal zal de oplossing dan iets zijn als $y = a e^{-t} + b e^{-1000t}$, waarin die tweede term al spoedig helemaal wegdempt.

Voor het stelsel van dit verslag geldt de volgende waarde voor A:

$$A = \begin{bmatrix} -0.4344 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0.4344 & -0.0008 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0008 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

De eigenwaarden zijn: -0.0008 en -0.4344, deze schelen een factor 543, dat is inderdaad veel.

Implementatie oplossingsalgorithmen

Als we volgens de theorie van 'Regelen 3, Parameter- en Toestandschatten' werken, wordt er gesimuleerd met een Euler forward. Het programma dat hiervoor is geschreven staat gegeven in bijlage 5, voorzien van enige uitleg.

Om meetwaarden te verkrijgen voor het werkelijke systeem zijn nog een aantal proeven gedaan om bijvoorbeeld de coëfficiënten k_2 , k_3 en k_4 te bepalen.

De software van de SPC is in staat om opgeslagen grafieken ook op diskette te zetten.

Weliswaar zit er een "bug" in dit programma waardoor het onmogelijk is om meer dan één dag tegelijk op een floppy te zetten, maar het werkt. Er is in TURBO C++ een programma geschreven om de resulterende files om te zetten in voor MATLAB geschikte invoer. Dit programma zal ook op de diskette worden meegeleverd inclusief sourcecode.

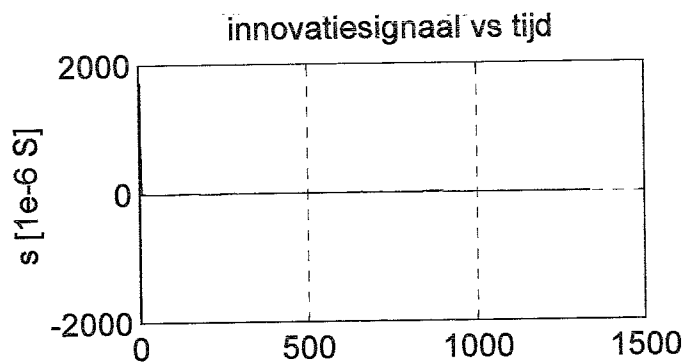
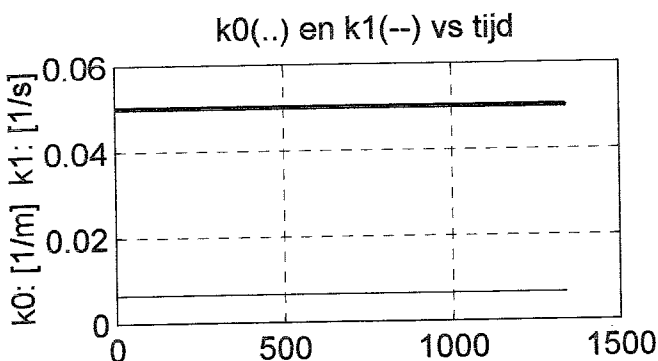
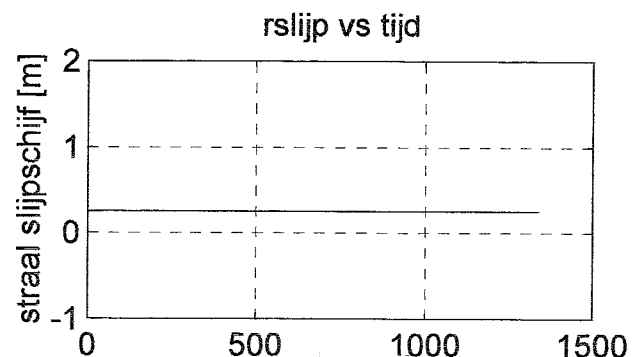
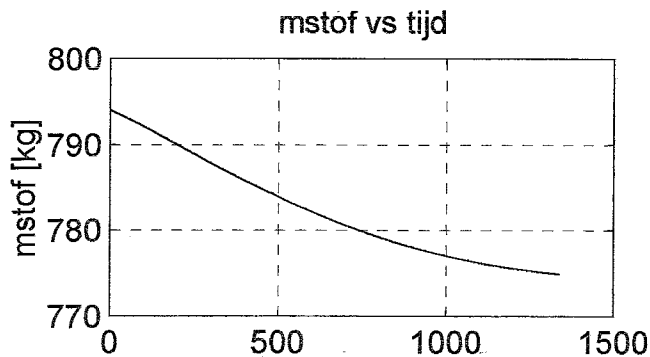
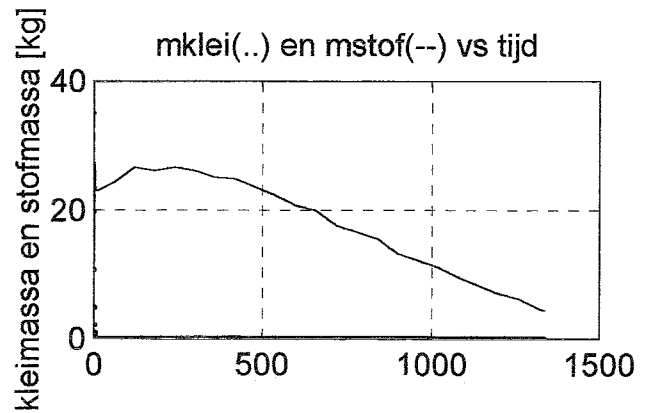
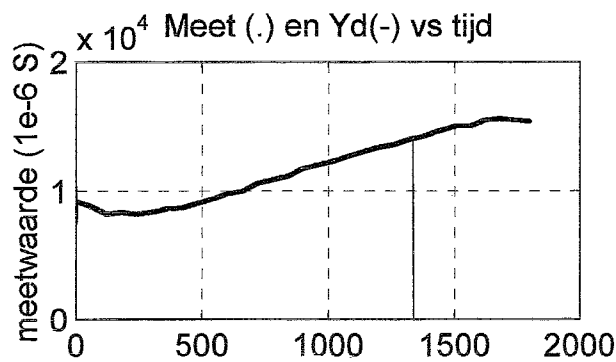
Helaas slaat de SPC de meetdata op in procenten van de eindkwaliteit. Hierdoor is het niet mogelijk om zonder de ijkgegevens de werkelijke meetwaarde terug te berekenen. Dit wordt momenteel pas in het MATLAB-simulatiescript gedaan.

Momenteel wordt er door de sonde elke minuut gemeten. Om tussendoor ook meetwaarden te verkrijgen wordt er geïnterpoleerd tussen meetwaarden.

Problemen

In het in de bijlage vermelde programma wordt met staptijden van 1 [s] gewerkt. Met deze staptijd is het systeem nog niet instabiel en wordt het slijpen op een 486DX33 met 8 Mb geheugen onder WINDOWS gesimuleerd in 18 [s]. Dit is ruim afdoende snel om straks on-line schattingen bij te werken, ook op de huidige SPC (een 386DX).

De simulatie levert niet de gewenste resultaten op, zie volgende pagina.



Het Kalman-filter stuurt de schatting voor m_{klei} in enkele iteraties naar nul, waarna met kleine variaties in m_{stof} het verloop in de uitgangswaarde wordt gevolgd.

Hierdoor worden er ook geen waarden geschat voor de parameters, deze blijven vrijwel op de beginschatting steken.

Mogelijke Oorzaken

Er zijn meerdere oorzaken aan te wijzen:

- * De enige mogelijkheid om gegevens te verkrijgen voor het EKF waarmee aanpassingen berekend kunnen worden voor de uitgebreide toestand is uit de uitgang. Dit is één variabele, die volgens het model bestaat uit de optelling van m_{klei} en m_{stof} . In de rest van het model wordt maar één verband aangegeven tussen m_{klei} en m_{stof} , namelijk de omzetting van klei in stof.

In regeltechnische termen: De reconstrueerbaarheid [10, pag 3.100 e.v.] van het systeem is niet goed: de rang van de reconstrueerbaarheidsmatrix (hier een 6x6-matrix) is slechts 2, terwijl een volle rang vereist is.

- * Bij het modelleren is vergeten om rekening te houden met het fenomeen kwartsmeel. Kwartsmeel onstaat als zandkorrels kapot gaan en heeft alle slechte eigenschappen van kleistof (veel binder nodig in kernmakerij). In de Sand Cleaner neemt de massa van het zand in het echt in de orde van 120 [kg] af, terwijl in het model maar een afname van 40 [kg] wordt gevonden. De overige 80 [kg] is dus kwartsmeel. Om deze factor toe te voegen moet een extra toestandsvariabele worden ingevoerd.
- * Er is niet gekeken naar de ligging en overeenkomst in de polen van het werkelijke systeem en van het gefilterde model. De polen horen in het linker complexe halfvlak te liggen om een systeem stabiel te maken. Voor een goede filtering horen de eigenwaarden van $A-KC$ nog links van die van A te liggen. Dat is hier wel het geval: De eigenwaarden van A zijn zoals reeds vermeld -0.0008 en -0.4344 . De eigenwaarden van $A-KC$ zijn echter -1 en -0.5636 en liggen dus meer naar links. Het filter is nu teveel sneller. Sturing van deze waarden met beïnvloeding van alleen S_e , S_v en S_w (de variantiematrices van de modelfouten, de meetruis en de systeemruis) is nauwelijks mogelijk, door systematisch proberen zijn de eigenwaarden omlaag gebracht naar -0.96 resp. -0.42 , hetgeen geen merkbare invloed had op de reconstructie.

Alternatieven voor de hier gepresenteerde aanpak

Er zijn enkele verbeteringen mogelijk op de werkwijze zoals die in dit verslag is gevolgd:

- * Het is mogelijk om de rang van de reconstrueerbaarheidsmatrix te verbeteren. Dit kan op twee manieren:
 - verminder het aantal te schatten parameters. Dit vermindert het aantal toestandsgrootheden terwijl de rang gelijk blijft.
 - ga extra parameters meten. De (ook in de praktijk) makkelijkst toe te voegen meetwaarde is afgezogen hoeveelheid stof m_{af} . Voor deze parameter geldt het tegengestelde van m_{tot} : $\frac{dm_{af}}{dt} = -\frac{dm_{tot}}{dt} = -k_1 m_{stof}$. Als we even aannemen dat we deze afgezogen hoeveelheid stof per tijdseenheid kunnen meten, wordt dit opgenomen in de uitgangsvergelijking. Hierdoor verandert de uitgang y naar $y = \begin{bmatrix} meet & \frac{dm_{af}}{dt} \end{bmatrix}^T$ en de matrix C

krijgt dus ook een rij extra:

$$C = \begin{bmatrix} +\frac{k_2}{mO_{tot}} & +\frac{k_3}{mO_{tot}} & -\frac{k_2 * mO_{klei} + k_3 * mO_{stof}}{mO_{tot}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +kO_1 & 0 & 0 & 0 & +mO_{stof} \end{bmatrix}$$

De reconstrueerbaarheidsmatrix gaat er hierdoor ook anders uitzien. Hoewel deze een stuk beter gevuld lijkt, blijft de rang echter twee.

Als mO_{stof} en mO_{klei} niet-nul gekozen worden, stijgt de rang naar drie. Lineariseren rond een ander werkpunt (bijvoorbeeld langs de werklijn) heeft dus invloed op de reconstrueerbaarheid.

- * Van het huidige systeem wordt alleen naar de vrije responsie gekeken. De linearisatie rond het eindpunt heeft het systeem lineair en constant gemaakt. Hierdoor kan het systeem ook analytisch worden opgelost:

De toestandsvergelijking luidt: $\dot{x}(t) = A x(t)$. Dit is om te schrijven naar een systeem waarvan de toestand als volgt berekend wordt: $x(t) = \Phi(t, t_0) x(t_0)$ waarin $\dot{\Phi}(t, t_0) = A \Phi(t, t_0)$. Na integratie met als beginvoorwaarde $\Phi(t_0, t_0) = I$ staat hier

$\Phi(t, t_0) = e^{A(t-t_0)}$. zie verder J.J. Kok [10, § 3.5] voor de achtergronden.

Voor de uitgangsvergelijking geldt iets soortgelijks: $y(t) = C x(t) = C \Phi(t, t_0) \underline{x}(t_0)$.

Er wordt alleen naar de vrije responsie gekeken en we zijn geïnteresseerd in de inschakelverschijnselen. Dan is het niet verstandig om te lineariseren rond een punt waarin alle inschakelverschijnselen zijn verstomd. Een linearisatie langs de trajectorie lijkt verstandiger. Dit levert echter wél tijdsafhankelijke matrices $A(t)$ en $C(t)$ op.

De bovenstaande formulering kan herhaald worden voor zulke niet-constante systemen, alleen kan dan voor de overgangsmatrix $\Phi(t, t_0)$ niet zo gemakkelijk een formulering worden gevonden omdat de systeemmatrix A nu tijdsafhankelijk is geworden.

Merk op dat nu bijvoorbeeld ook de reconstrueerbaarheidsmatrix tijdsafhankelijk is geworden, evenals de eigenwaarden van het filtersysteem $A(t)-K(t)C(t)$.

Conclusie

De hier gebruikte combinatie van lineariseren in het eindpunt en toestand- en parameterschaten met een extended Kalmanfilter is geen juiste gebleken.

Hierdoor is het niet mogelijk geweest om een betrouwbare en kloppende simulatie te verkrijgen.

De hoofdoorzaken lijken te zijn:

- * een modelleringsfout: er is geen rekening gehouden met kwartsmeel.
- * de reconstrueerbaarheid van het systeem laat te wensen over, dit kan liggen aan een foute plaats voor de linearisatie. Ook kunnen meer (soorten) metingen worden meegenomen maar dit hoeft niet per se te resulteren in een betere reconstrueerbaarheid.
- * de eigenwaarden van de filterkring zijn veel sneller dan die van het oorspronkelijke systeem.

Er zijn een aantal veranderingen en verbeteringen geponeerd om de simulatie te verbeteren, maar deze zijn nog niet volledig uitgewerkt.

Conclusies

In dit verslag is geprobeerd om de volgende vragen te beantwoorden.

1. Waar is de sonde gevoelig voor?

De sonde is gevoelig voor het actief-klei gehalte en misschien voor de korrelgrootte-verdeling. Hiervoor zijn meerdere verbanden gevonden, waaronder via lineaire regressie en 'het kleistof/laagjes-model'.

2. Is dit een maat voor de kwaliteit van het regeneraat?

Ja. Zowel het actief-kleigehalte als de hoeveelheid stof in het regeneraat zijn belangrijke grootheden in de kernmakerij. Ze beïnvloeden namelijk rechtstreeks de hoeveelheid benodigde binder en de sterkte van de kernen.

3. Hoe ziet een model van het proces er uit?

Er is een poging gedaan om de diverse processen in de Sand Cleaner te modelleren. Hiervoor is het proces opgedeeld in drie delen: slijpen, onstoffen en meten. Deze zijn los van elkaar gemodelleerd met eerste orde differentiaalvergelijkingen, daarna zijn deze geassembleerd tot een stelsel van vergelijkingen. Het model is helaas niet volledig reconstrueerbaar, daarom is een poging om met behulp van een extended Kalman-filter het proces te simuleren mislukt. Er zijn nog enkele verbeteringen en aanvullingen (zoals meer metingen meenemen) voorgesteld. De meeste hiervan moeten echter nog beter worden uitgewerkt.

4. Is het mogelijk om op basis van dat model de meetsonde zodanig aan te sturen dat met veel minder metingen, en dus minder slijtage, dezelfde kwaliteit te bereiken valt?

Dit is in het verslag niet verder uitgewerkt.

Aanbevelingen

Deze zijn op te delen in twee stukken:

voor vervolgondezoeken

- * Beter onderzoek doen naar een verband tussen kleigehalte, korrelgrootte en meetwaarde. Hiervoor zijn véél meer meetgegevens vereist. Dit vereist veel titraties, dat is geen TU-stagairewerk. Bovendien is het ook heel erg nuttig om:
 - * metingen te kunnen doen tijdens het slijpen. Dat is momenteel niet mogelijk.
 - * De theoretische modelvorming 'rammelt nog'. Zeker *Particle Mechanics* is een heel erg specifiek stuk kennis.
 - * Strakkere uitvoering van linearisaties. Momenteel is gelineariseerd rond het eindpunt, misschien levert lineariseren halverwege het traject betere resultaten op.

voor verbetering van het proces bij DE GLOBE WEERT.

- * De reproduceerbaarheid van de geleidbaarheidsmetingen laat momenteel te wensen over. In dit verslag is een verbetering voorgesteld.
- * De programmatuur bevat nog een aantal 'schoonheidsfoutjes':
 - Sonde vanuit de programmatuur tijdens het proces leeg kunnen blazen. Er schijnt wel een knopje op de luchtklep te zitten om dit te doen, maar dan komt er een sterk afwijkende meetwaarde voor de SPC die dan rare dingen gaat doen.
 - Beter opletten met de keuze van de kleuren van grafieken om de display. Momenteel wordt een van de grafieken zwart getekend op een zwarte achtergrond.
 - Export-functie met bereikbare einddatum, waardoor er meerdere dagen op een floppy kunnen worden opgeslagen.
 - meetwaarden in absolute waarde opslaan in plaats van gerelateerd aan de gewenste eindkwaliteit. Dit is nodig om de ijking van de meetsonde te kunnen corrigeren.

Bijlagen

Bijlage 1, Overzicht gebruikte literatuur

- [1] Astrid Kostelijk
De Sand Cleaner en Sand Process Control (SPC)
stageverslag Hogeschool Eindhoven en De Globe Weert BV, 19-01-95.
- [2] J.J.M. Rijpkema
Statgraphics bij Statistiek voor B,T, en W.
Dictaat TU Eindhoven, nummer 2482, versie: studiejaar 1993/94.
- [3] Christopher Chatfield
Statistics for technology, A Course in Applied Statistics
Chapman & Hall, London, Third Edition 1983.
- [4] G. Vossers
Fysische Transportverschijnselen voor W
Dictaat TU Eindhoven, nummer 3438, versie: september 1986
- [5] Robert H. Perry† and Don W. Green (editor)
Perry's Chemical Engineers Handbook
McGraw-Hill, Singapore, sixth edition 1984, 4th printing 1988
section 5, Fluid and Particle Mechanics, by Byron C Sakiadis
section 7, Handling of bulk solids and packaging of solids and liquids,
by Grantges J Raymus
section 20, Solids drying and gas-solid systems, by Harold F. Porter.
- [6] George Stephanopoulos
Chemical Process Control: An introduction to theory and practice
PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984
- [7] F.E. Veldpaus, J.P.A. Banens en J.J. Kok
Werktuigkundige Regeltechniek III, Parameter- en Toestandschatten
Dictaat TU Eindhoven, nummer 4699, versie: 1992-1993.
- [8] Glyn James e.a.
Modern Engineering Mathematics
Addison-Wesley publishing company, Wokingham, England 1992
- [9] Geurts, Van Bree, Willemsen e.a.
Numerieke methoden en programmatuur
Dictaat TU Eindhoven nummer 2434, versie lentetrimester 1995.
- [10] J.J. Kok
Werktuigkundige Regeltechniek II
Dictaat TU Eindhoven, nummer 4594, versie: 1990.

Bijlage 2, Meetresultaten bij onderzoek

Sonde	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
datum	28-8-95	28-8-95	28-8-95	28-8-95	28-8-95	29-8-95	29-8-95	29-8-95	29-8-95	29-8-95	29-8-95	30-8-95	31-8-95	31-8-95	4-9-95	4-9-95	4-9-95	4-9-95	4-9	5-9-95	5-9-95	5-9-95
meetwaarde	16071	10326	16225	14073	10146	12772	12873	11445	11066	17996	12779	14941	12013	16069	16894	11018	10944	17450	13943	12224	12408	12448
slijptijd (s)	1254.00	0.00	1314.00	894.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	576.00	553.00	894.00	0.00	1014.00	1440.00	0.00	0.00	1350.00	2160.00	0.00	0.00	0.00
Metingen																						
zeef 1 (g)	0.28	0.98	0.16	0.33	1.45	1.92	0.8	0.83	1.18	0.55	0.43	0.35	1.6	0.09	0.57	1.74	1.1	0.35	0.58	0.35	0.57	0.65
zeef 2 (g)	3.5	7.01	3.81	3.91	9.42	8.64	7.64	6.63	8.23	6.78	5.66	4.06	9.23	3.66	5.82	8.19	7.1	4.4	6.48	4.72	4.71	7.34
zeef 3 (g)	14.93	21.13	15.48	18.25	24.27	21.94	21.04	20.55	21.97	22.39	19.38	16.97	20.57	13.45	19.84	22.03	20.75	16.72	22.43	18.74	18.74	21.52
zeef 4 (g)	56.72	56.79	57.81	57.81	54.73	55.13	55.76	55.43	55.92	55.13	58.4	56.79	53.86	51.48	57.37	55.36	57.34	58.42	54.11	57.92	57.98	55.8
zeef 5 (g)	13.26	8.46	12.71	11.72	6.49	7.38	9.22	9.18	8.1	9.71	10.21	11.79	8.78	14.03	10.26	8	8.01	12.21	8.68	9.78	10.04	8.22
zeef 6 (g)	11.01	5.62	9.77	7.92	3.5	4.77	5.78	7.43	4.67	5.4	5.92	9.7	5.86	16.68	6.05	4.76	5.71	7.74	6.99	8.29	7.86	6.66
zeef bak (g)	0.13	0.11	0.06	0.04	0.12	0.13	0.1	0.14	0.09	0.02	0.04	0.2	0.12	0.59	0.04	0.1	0.14	0.01	0.23	0.22	0.18	0.12
Klei 1 (ml)	2.7	27	2.7	5	27	21.8	21.8	24.7	24.5	2.12	8.52	5.6	16.6	---	2.28	27	28	2.2	6	18.4	17.8	22.5
BURET nr	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	---	2	1	1	1	1	1	2
Klei 2 (ml)	2.7	27.5	2.9	5.4	29	24	23.6	24.8	25.3	2.4	9	4.9	16.5	---	2.2	28.4	28.4	1.9	5	18.7	18.7	23
BURET nr	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	---	1	2	1	2	1	2	2	2
pH	---	---	10.07	10.5	11.18	11.44	11.4	11.17	11.18	10.75	11.05	10.54	10.93	10.33	10.18	11.25	11.26	10.24	10.68	10.72	11.03	11.34
Eq 1 (vlg meter)	0.105	0.545	0.125	0.165	0.55	0.56	0.56	0.51	0.47	0.16	0.23	0.18	0.235	0.15	0.085	0.51	0.54	0.19	0.17	0.44	0.42	0.43
Eq 2 (vlg meter)	0.09	0.44	0.09	0.13	0.49	0.43	0.42	0.44	0.43	0.07	0.20	0.15	0.40	0.07	0.44	0.48	0.07	0.14	0.37	0.37	0.41	0.41
Rekenwerk																						
som korrels (g)	99.83	100.10	99.80	99.98	99.98	100.11	100.34	100.19	100.16	99.98	100.04	99.86	100.02	99.98	99.95	100.18	100.15	99.85	99.50	100.02	100.08	100.31
AFS-waarde	56.09	50.86	55.17	53.66	48.48	49.52	51.01	52.13	49.89	50.91	51.86	54.90	50.48	59.93	51.82	49.77	50.84	53.68	51.87	53.51	53.22	51.33
Klei 1	0.71	7.07	0.71	1.31	7.07	5.68	5.71	6.47	6.42	0.56	2.23	1.47	4.32		0.59	7.07	7.34	0.58	1.57	4.82	4.66	5.85
Klei 2	0.70	7.21	0.76	1.41	7.60	6.29	6.18	6.45	6.58	0.62	2.36	1.27	4.32		0.58	6.86	7.44	0.49	1.31	4.86	4.86	5.98
Klei (gem.)	0.7047	7.1395	0.7336	1.3624	7.336	5.9736	5.9474	6.4597	6.4985	0.58972	2.29512	1.3708	4.3195	0	0.5846	6.969	7.3884	0.5352	1.441	4.8414	4.7628	5.915

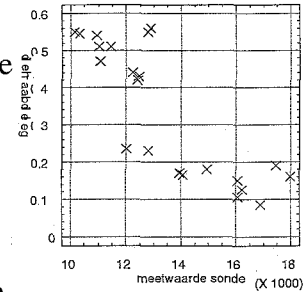
Opmerkingen:

- * De geleidbaarheid (Eq) heeft als eenheid microSiemens, te verkrijgen door de gevonden waarde te vermenigvuldigen met 100.
- * De nummering van de metingen is begonnen bij 1, alleen zijn metingen 1-5 uitgesloten omdat deze onvolledig waren.

Bijlage 3, Geleidbaarheidsmetingen

Inleiding

Een van de eigenschappen van vormzand die gemeten kan worden is de geleidbaarheid. Deze wordt bij De Globe gemeten in een nat milieu, hiervoor wordt 10 gram vormzand in 100 ml gedemineraliseerd water gedaan, gekookt en afgekoeld en daarna met een sonde wordt de geleidbaarheid gemeten. Hiernaast staat de grafiek met de meetpunten die op deze manier verkregen zijn. Het lijkt erop dat er twee groepen meetwaarden zijn, te weten die genomen uit vormzand en die genomen uit regeneraat.



Probleem

Er zijn wat vraagtekens te plaatsen bij deze bepaling van de geleidbaarheid.

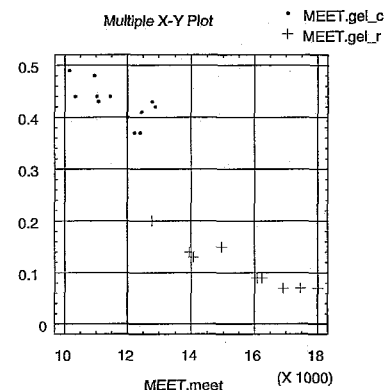
Je moet namelijk het water-zand mengsel koken en daarna laten afkoelen. Tijdens dit proces verdwijnt er stoom, waardoor de inhoud en dus de concentratie in het bekersglas verandert.

Nu wordt de geleidbaarheid uitgedrukt in Siemens (de reciproke van Ohm), hetgeen neerkomt op het aantal ladingdragers (in dit geval ionen) dat tegelijk aan de uitwisseling van ladingen meewerkt. Dit is lineair afhankelijk van de concentratie van de oplossing waarin de geleidbaarheid gemeten wordt, hetgeen betekent dat het referentievolume aan water constant moet zijn.

Oplossing

Daarom is de geleidbaarheid van alle monsters twee weken later opnieuw bepaald, maar nu is na het afkoelen de hoeveelheid water weer met gedemineraliseerd water aangevuld tot de oorspronkelijke 100 ml. Ter controle is de geleidbaarheid van gedemineraliseerd water bepaald, deze is nagenoeg nihil, dus dit mag zonder kwalijke invloeden in kleine hoeveelheden worden toegevoegd.

Dit scheelt behoorlijk: zie de grafiek hiernaast. De nieuwe waarden liggen duidelijk lager en zijn verdeeld in twee groepen, die ik dan ook maar gescheiden heb, namelijk die van het regeneraatzand (gel_r) en het chargeerbunkerzand (gel_c). Hierdoor is er geen lineair verband meer te trekken tussen meetwaarde en geleidbaarheid, maar zijn er twee verbanden, een voor geslepen en een voor ongeslepen zand. Alle nieuwe waarden liggen lager dan de oorspronkelijke waarden. Dit kan twee oorzaken hebben: ten eerste is nu telkens de concentratie verlaagd, ten tweede zijn de metingen twee weken later gedaan, het kan zijn dat in die tijd de monsters chemisch veranderd zijn.



Beide sets meetwaarden zijn ook te vinden in Bijlage 2.

Conclusie

De methode voor bepaling van de geleidbaarheid bevat een systematische fout welke een flinke meetruis veroorzaakt.

Hierdoor zijn de oorspronkelijke metingen onbruikbaar.

De aangepaste methode levert lagere waarden, welke dichter bij elkaar liggen in twee groepen, namelijk ongeslepen en geslepen zand.

Voor regressie-analyse zijn deze waarden ongeschikt.

Bijlage 4, Verdeling van de klei over de verschillende zeeffracties

Van een viertal monsters is bepaald hoeveel actieve klei er in enkele van de secties zit.

In de tabel staat in de eerste kolom het gemiddelde aandeel van die zeeffractie in een monster (in [g], het is gebruikelijk 100 g monster te nemen). De laatste vier kolommen bevatten het percentage klei in die sectie.

	gem. gew. monsters (g)	klei chargeerzand 1 (%)	klei chargeerzand 2 (%)	klei in regeneraat 1 (%)	klei in regeneraat 2 (%)
zeef 5 (0.16 - 0.20 mm)	9,83	6,89	7,40	0,39	0,54
zeef 6 (0.16 - 0.063 mm)	7,19	9,15	9,98	0,57	1,05
stofbak (≤ 0.063 mm)	0,13	21,70	23,40	2,60	4,68
geheel	100,00	6,90	7,02	0,36	0,61

Conclusie

In de secties met een korrelgrootte kleiner is dan 0.16 mm is duidelijk meer klei aanwezig.

In 17% van het totale monster bevindt zich 30% van de klei.

De overige 83% bevat dus ook nog klei!

Bijlage 5, Sourcecode simulatie-script in MATLAB

Het volgende programma is geschreven voor gebruik in Matlab 4.2c voor Windows.

```
% Dit is de simulatie voor de Gemco Sand Cleaner bij De Globe.
% (c) Klaas van Gend, oktober 1995
%
% resultaten:
% 30 oktober 1995 22:24 : zonder parameterschatter werkt de DV nu.
% 30 oktober 1995 24:00 : werkt nu ook met parameterschatter, dt = 0.005 sec.
% 31 oktober          foutje... min fout en 'vergeten' m0tot in te voeren.
% 08 novembr 1995 14:00 : SUKKEL!!! WEL GOED LINEARISEREN DE VOLGENDE KEER.
% 05 decembr 1995      : inderdaad. Maar doe het dan ook goed en op de juiste plaatsen.
% 06 decembr 1995      : Lin vgl als model *en* voor het Kalmanfilter.
% 13 decembr 1995      : major code cleanup.
%                          eigenlijk is nu geen niet-lineair algoritme meer nodig!
%
% Oorspronkelijke file/algoritme hoort bij Practicum Regelen 3, eindopdracht opgave 6.
% door Wim Raijmakers en Klaas van Gend
% maart 1995.

%   tekenafspraken: kleine letters: variabele
%                   hoofdletters: reeksvariabele
%
%                   xd = x dakje
%                   xdp = x dakje punt
%
% controleren of de meetdata wel aanwezig is, en anders inladen.
if exist('sc') ~= 1,
    disp('laden testdata');
    test3;
end

disp('initialisatie');

% welke proefneming gaan we 'fitten'?
proef    = 7;

% de tijdsschaal instellen.
dt = 1;          % aantal seconden per simulatiestap.
tmax= 30*60;     % we simuleren maximaal 30 minuten.
T    = [0:dt:tmax];

% constanten van de SC:
fslijp    = 47;
fschoep   = 0.5; %schatting, waarde is niet echt van belang.
rschoep   = 0.265;
u         = [fslijp;fschoep;rschoep];
pi2       = 2*pi;
k2        = -50*7.9*100;
k3        = -250*7.9*100;
k4        = 15150;

% nominale waarden:
m0klei    = 0;
m0stof    = 0;
m0tot     = 750;
r0slijp   = 0.248;
k00       = 0.006;
k01       = 0.0008;
xd0       = [m0klei;m0stof;m0tot;r0slijp;k00;k01];

% beginschattingen:
se = 0*eye(6);
sw=eye(6);
sw(1,1)=1;
sw(2,2)=1;
sw(3,3)=1;
```



```

sw(4,4)=1;
sw(5,5)=1;
sw(6,6)=1;
sv = [.05];
% betekenis: xd = [mklei; mstof; mtot; rsljijp; k0; k1];
xd = [ 35; 8.22; 794; 0.25; 0.05; 0.0065] - xd0;
% berekenen A.
A = zeros(6,6);
A(1,1)= - pi2* k00 * (fsljijp*r0sljijp - fschoep*rschoep);
A(1,4)= - pi2* k00 * m0klei * fsljijp;
A(1,5)= - pi2* m0klei * (fsljijp*r0sljijp - fschoep*rschoep);
A(2,1)= + pi2* k00 * (fsljijp*r0sljijp - fschoep*rschoep);
A(2,2)= - k01;
A(2,4)= + pi2* k00 * m0klei * fsljijp;
A(2,5)= + pi2* m0klei * (fsljijp*r0sljijp - fschoep*rschoep);
A(2,6)= - m0stof;
A(3,2)= - k01;
A(3,6)= - m0stof;
% berekenen C.
C = [k2/m0tot k3/m0tot -(k2*m0klei+k3*m0stof)/(m0tot^2) 0 0 0];

% wat variabelen initialiseren om resultaten in op te slaan
t0 = T(1);
Xd = ones(6,size(T,2));
Xd(:,1)=xd;
Yd = ones(1,size(T,2));
S = ones(1,size(T,2));

% voorcalculeren van de interpolatie van de meetwaarden (kan off-line);
% deze waarden zijn IJK-afhankelijk: ze veranderen bij iedere keer ijken.
% dus niet vergeten om in te vullen!!!
sclaag=sc(proef,floor(T/60)+1);
schoog=sc(proef,ceil(T/60)+1);
Meet = 67.98*(rem(T,60)/60 .* (schoog - sclaag) + sclaag)+8349;
% en ruim voor de veiligheid (out of memory) maar vast wat op.
clear sclaag schoog;

%nog even de beginwaarden uitrekenen voor enkele rijen.
Yd(1)=C*xd + k4;
S(1) =Meet(1)-Yd(1);

disp('start simulatie');

%-----
%----- De simulatie -----
%-----
for i=1:(size(T,2)-1)
te = T(i+1);
dt = te-T(i);

% dan nu de toestand reconstrueren mbv het EKF:

% de modelbenadering:
% vgl: 5.34, 5.35 en 5.36:
IdtA= eye(size(A))+dt*A;
Ni0= IdtA*se*IdtA' + sw*dt*dt;
Nil= IdtA*se*C';
iNi2= inv(C*se*C' + sv); % om sneller te werken: iNi2 = inverse Ni2.

% en toen 5.39:
se= Ni0 - Nil*iNi2*Nil';
% en voor K: (vergelijking 5.38)
K= 1/dt*Nil*iNi2;

% berekening yd en s
yd= C*xd + k4;
s = Meet(i+1) - yd;

if (yd>20000 | yd < 0),
disp('INSTABIEEL GEWORDEN...');

```

```

        T(i)    % geef aan op welk tijdstip in de simulatie
        break;
    end;

    if (yd>14000),
        disp('slijpen klaar...');
        T(i)    % geef aan op welk tijdstip in de simulatie
        break;
    end;

    % dan nu de gelineariseerde toestandsschatting:
    xdp = A*xd;

    % en een simpele Euler om de differentiaalvergelijking in te vullen.
    xd = xd + dt*(xdp + K*s);

    % en de waarden opslaan voor later gebruik
    Xd(:,i+1) = xd;
    Yd(:,i+1) = yd;
    S(:,i+1) = s;
end

disp('onstoffen');
% dan moet hier de ontstoffingsroutine komen.
% (maar dat is voor de volgende stage)...

% Nog even plotten om het af te maken...
plot(T,Xd');
grid;

```

Bijlage 6, Notatie en gebruikte symbolen

In dit verslag wordt de volgende notatie gebruikt:

- * Alle variabelen staan in *italics*.
- * Vectoren worden weergegeven door een streep onder de variabele.
- * Matrices zijn geschreven met hoofdletters.
- * Tijdsafgeleiden krijgen een of meerdere punten erboven, gemiddelden een streepje en schattingen een dakje. Voorbeelden: \dot{x} , \ddot{x} , \bar{x} , \hat{x} .
- * Een postfix 0 (nul) betekent een nominale waarde en een prefix Δ een kleine verandering.
- * Een asterisk (*) als postfix geeft een uitgebreide toestand (augmented state) aan.
- * indices worden gebruikt om specifieke metingen of onderdelen aan te geven.

Deel 1

β		(meerv. regressietheorie) coëfficiëntenvector
σ	[-]	(statistiek) standaarddeviatie populatie
σ^2	[-]	(statistiek) variantie populatie
a_0	[-]	(regressietheorie) intercept (oftewel snijpunt y-as)
a_1	[-]	(regressietheorie) slope (oftewel helling curve)
e_i	[-]	(regressietheorie) fout in schatting meetpunt i ($= y_i - \hat{y}_i$)
MEET.Klei		(StatGrahics) meetwaarden actief kleigehalte
MEET.slijptijd		(StatGrahics) gemeten slijptijden
MEET.pH		(StatGrahics) gemeten pH
MEET.zeef1		(StatGrahics) deel van vormzand met korrelgrootte groter dan 1 [mm]
MEET.zeef6		(StatGrahics) deel van vormzand met korrelgroottes tussen 160 en 63 [μm]
MEET.stof		(StatGrahics) deel van vormzand met korrelgroottes kleiner dan 63 [μm]
MEET.AFS		(StatGrahics) dimensieloos kental van de korrelgrootteverdeling
n	[-]	(regressietheorie) aantal meetpunten of aantal vrijheidsgraden
s	[-]	(statistiek) standaarddeviatie van steekproef
s^2	[-]	(statistiek) variantie van steekproef
S	[-]	(regressietheorie) restsom
x	[-]	(Kleistof/laagjes-model) fractie van totaal aanwezige klei als stof
x_i		meetpunt i
X		(meerv. regressietheorie) meetpuntenmatrix
y_i		waarneming/meetwaarde in meetpunt i
y		(meerv. regressie) waarnemingenvector

Deel 2 en 3

$\gamma(\dots)$	uitgangsvergelijking
$\underline{\theta}$	vector met parameters in model = $[r_{slijp} k_0 k_1]^T$
ρ	[kg m ⁻³] dichtheid
$\chi(\dots)$	stelsel van toestandsvergelijkingen
A	systematrix
A_{proj}	[m ²] geprojecteerd oppervlak doorsnede zandkorreltje
B	ingangsmatrix
C	uitgangsmatrix
C_w	[-] luchtweerstand
c_{klei}	[-] concentratie klei aanwezig in laagjes (= m_{klei} / m_{tot})
c_{stof}	[-] concentratie klei aanwezig als stof (= m_{stof} / m_{tot})
D	doorverbindingsmatrix
d_{korrel}	[m] diameter zandkorreltje
f_{schoep}	[Hz] frequentie motor schoepenwiel
f_{slijp}	[Hz] frequentie motor slijpschijf
F	[N] kracht (ook als vector of met indices)
g	[m s ⁻²] valversnelling (= 9.81 m s^{-2})
h	[s] stapgrootte numerieke oplossing differentiaalvergelijkingen
h	[m] hoogte van vliegend zandkorreltje in Sand Cleaner
k_0	[m ⁻¹] omzetting per meter geschuurd-constante
k_1	[s ⁻¹] verstuiwingsconstante
k_2	[μ S] overdrachtsconstante van kleigehalte naar meetwaarde sonde
k_3	[μ S] overdrachtsconstante van stofgehalte naar meetwaarde sonde
k_4	[μ S] theoretische meetwaarde sonde als alleen kaal zand aanwezig is
$meet$	[μ S] meetwaarde sonde
m_{klei}	[kg] massa klei aanwezig in laagjes rond de zandkorrel
m_{stof}	[kg] massa klei aanwezig als stof
m_{tot}	[kg] totaal aanwezige massa zand + klei
N_{re}	[-] dimensieloze getal van Reynolds (voor stromingen)
r_{schoep}	[m] straal binnenkant schoepenwiel
r_{slijp}	[m] gemiddelde straal van de slijpschijf
$s(t)$	[μ S] innovatiesignaal = $y - \hat{y}$
t	[s] tijd
\underline{x}	toestandsvector = $[m_{klei} m_{stof} m_{tot}]^T$
\underline{x}^*	uitgebreide toestandsvector (<i>augmented state</i>) = $[\underline{x} \underline{\theta}]^T$
$v(t)$	(model voor) meetfouten
v_{lucht}	[m s ⁻¹] luchtsnelheid afzuiging in Sand Cleaner
\underline{u}	ingang = $[r_{schoep} f_{schoep} f_{slijp}]^T$
y	[μ S] uitgang model (dus meetwaarde sonde)
$w(t)$	(model voor) verstoringen van proces en modelfouten