

Title:	HerMes: The rational monitoring evaluation system		
	Final report		
	HerMes: HET Rationele Monitoring Evaluatie Systeem final report in Dutch		
Author:	Dr. ir. P. Hölscher	Institute:	GeoDelft
Author:	Ir. G.H. Wijnants	Institute:	TNO-Bouw
Februari 2003			
Number of pages	:	27	
Keywords (3-5)	:	monitoring	
DC-Publication-number	:	01.01.07-10	
Institute Publication-number (optional)	:		
Report Type	:	<input type="checkbox"/>	Intermediary report or study
	:	<input checked="" type="checkbox"/>	Final projectreport
DUP-publication Type	:	<input checked="" type="checkbox"/>	DUP Standard
	:	<input type="checkbox"/>	DUP-Science

Acknowledgement

This research has been sponsored by the Dutch Government through the ICES-2 programme and the Waardse Alliantie. The research is part of the Research programme of Delft Cluster. We thank the supportgroup for their critical comments.

Conditions of (re-)use of this publication

The full-text of this report may be used under the condition of a correct reference to this publication.

Research project sponsors:



Abstract

The final report of the development project HerMes: The rational monitoring evaluation system describes firstly the implementation of a general phasing of a monitoring project. The phases of preliminary study and design of the system have been developed in general terms, in order to facilitate the rational implementation and evaluation of an arbitrary monitoring project.

Subsequently, the various aspects for a rational design that have been developed have been evaluated and adapted in a number of studies.

All this has resulted in the first version of a work instruction that facilitates the design of a rational monitoring system, and a checklist by which principals are able to check whether the design proposed for a monitoring system meets the rational HERMES benchmark.

PROJECT NAME:	Monitoringsfilosofie Hermes	PROJECT CODE:	01.01.07
BASEPROJECT NAME:	Measuring, Monitoring and Exploration	BASEPROJECT CODE:	01.01
THEME NAME:	Soil and Structures	THEME CODE:	01

Executive Summary

Monitoring is the regular check of a structure in order to gather knowledge on the actual performance of the structure. Based on this knowledge, decisions on future activities or actions can be made. This seems simple, but in many cases monitoring does not lead to the desired results. Therefore, TNO Building and GeoDelft started a research project on rational monitoring. The objective of this research is an improvement of monitoring in general terms. This report presents an overview of this research and its' main results.

The project started with a systematic survey of all steps required to create a good monitoring project. These steps are ordered chronologically.

This list is tested in some case studies, in which real problems are monitored.

Cases during construction:

- full-scale field test for the strength of a dike (Bergambacht test)
- test embankment for soil improvement: No-recess
- the embankment for the freight-railwayline Betuweroute
- the judgement of the settlements during construction of Groene Hart Tunnel

Cases during lifetime:

- monitoring of viaducts with ASR damage
- comparison of monitoringstrategies for concrete structures

Based on this research, a workflow description for rational monitoring has been developed. This report can be used by consultants who are due to design a monitoringproject. It guarantees a rational and complete design of the monitoring project

Finally a checklist for rational monitoring has been developed. This interactive spreadsheet can be used by a principal of a monitoring project. A design of a monitoring project can be evaluated on rationality and completeness by using the checklist.

PROJECT NAAM:	Monitoringsfilosofie Hermes	PROJECT CODE:	01.01.07
BASISPROJECT NAAM:	Measuring, Monitoring and Exploration	BASISPROJECT CODE:	01.01
THEMA NAAM:	Soil and Structures	THEMA CODE:	01

Inhoud

1	Inleiding.....	6
1.1	De problematiek.....	6
1.2	Doelstelling van HerMes	6
1.3	Kader van deze ontwikkeling.....	6
1.4	Organisatie van dit rapport.....	7
2	Filosofie van rationele monitoring	8
2.1	Wat is monitoring.....	8
2.2	Wanneer is monitoring zinvol.....	8
2.3	De fasering van een monitoringsproject	9
3	Voorstudie en ontwerp van het monitoringssysteem.....	10
3.1	Overzicht van de fases	10
3.2	Detailtering van de voorstudie	11
3.2.1	Doelstelling en afbakening.....	11
3.2.2	Faalmechanismen.....	11
3.2.3	Monitoringsvragen	11
3.2.4	Monitoringsstrategie	12
3.3	Detailtering van het ontwerp.....	13
3.3.1	Algemeen	13
3.3.2	De te monitoren parameters	13
3.3.3	Orde van grootte van veranderingen.....	13
3.3.4	Bedenk vervolgacties bij overschrijding grenswaarde.....	13
3.3.5	Bepaal locaties van de instrumenten.....	13
3.3.6	Benoem specifieke doel van elk instrument.....	14
3.3.7	Registratie van relevante omgevingsinvloeden.....	14
3.3.8	Beschrijf eisen aan de uit te voeren metingen.....	14
3.3.9	Correct functioneren van de instrumenten	14
3.3.10	Verantwoordelijkheden bepalen voor diverse projectfasen	14
3.3.11	Selectie en specificatie instrumenten	14
3.3.12	Stel een voorlopige begroting op	14
3.3.13	Verdere detailtering van de planning.....	15
3.3.14	Verslag	15
4	Monitoring tijdens de bouwfase	16
4.1	Toepassing op de instrumentatie Bergambacht proef	16
4.2	Toepassing op de monitoring van zettingen van ophoging.....	17
4.2.1	Toepassing op referentiebaan No Recess.....	17
4.2.2	Toepassing op de Betuweroute	18
4.3	Toepassing HERMES voor risicobeheersing zakking tijdens bouw boortunnel	19
5	Monitoring tijdens de beheersfase	21

5.1	Voorbeeld toetsing monitorontwerp: Monitoraanpak HERMES; monitoren viaducten met ASR schade.	21
5.2	Voorbeeld: Vergelijking monitoringsstrategieën bij betonligger22	
6	Afsluiting en handreiking	23

1 Inleiding.

1.1 De problematiek

Het uitvoeren van waarnemingen (monitoring) is de manier bij uitstek om vast te stellen of een constructie of proces aan de gestelde eisen voldoet. Om de maximale voordelen van monitoring te behalen moet de monitoring goed opgezet worden, bijvoorbeeld via een rationele aanpak.

Monitoringsprogramma's zijn momenteel veelal nog niet rationeel van opzet, waarbij met name de volgende elementen in het oog springen:

- veelal wordt onvoldoende stilgestaan bij het *waarom* van monitoren, waardoor de keuzen *wat*, *waar*, *wanneer* en *in welke mate* gemonitord wordt, meestal op kwalitatieve overwegingen worden gemaakt. Aan deze keuzen ligt dan geen systematische, kwantitatieve betrouwbaarheidsanalyse ten grondslag, zodat mogelijk gemonitord wordt op indicatoren die niet maatgevend of niet gevoelig zijn, waardoor de monitoring niet optimaal of gewoonweg ineffectief is.
- vaak zijn de verouderingsmechanismen (en de oorzakelijke factoren daarvan) van een constructie nog niet goed begrepen of nog niet in modellen gevat. Soms ontbreken ook indicatoren om vast te stellen hoe ver een eventuele aantasting is voortgeschreden.
- de tijdreeks van meetdata wordt in het algemeen niet afgezet tegen de predicties van een ontwerpmodel (waarin verouderingsmodellen zijn inbegrepen); daarbij zijn de beschikbare tijdreeksen vaak onvolledig of te kort. Hierdoor kan geen toetsing van de gebruikte ontwerpmodellen op uitgangspunten en parameterkeuze plaatsvinden. De monitoringsresultaten spelen dan geen rol in de verbetering van predicties met het ontwerpmodel voor de verdere toekomst, noch waar het gaat om de inschatting van het geldigheidsgebied van het model, noch waar het de parametervariabiliteit van de constructie of haar omgeving betreft. Het doel van monitoring zou effectiever gerealiseerd kunnen worden wanneer de oorspronkelijke ontwerp-predicties door de monitoring geverifieerd zouden worden, zeker indien de juistheid van deze predicties niet wordt bevestigd door de metingen.

1.2 Doelstelling van HerMes

In dit onderzoek wordt een methodiek aangegeven om monitoringsgegevens op rationele wijze kwantitatief te laten bijdragen aan de betrouwbaarheid bij de bouw en het beheer van civieltechnische constructies. Hiermee is een betere beheersing van risico's mogelijk, zowel tijdens het bouwproces als in de exploitatiefase.

1.3 Kader van deze ontwikkeling

Deze methodiek is ontwikkeld in het kader van het Delft Cluster project 'Monitoringsfilosofie HerMes'¹. Dit project maakt deel uit van het Delft Cluster onderzoeksprogramma voor de periode 1999-2002. Dit programma is onderverdeeld in zeven thema's, waarvan het thema 'Grond en Constructies', waar dit project onder valt, er één is. Binnen dit thema is onderscheid gemaakt tussen specifieke basisprojecten, die een directe koppeling hebben met één van de subthema's, en generieke basisprojecten, die relevant zijn voor alle subthema's. Dit project is een onderdeel van het generieke basisproject 'Verkennen, Meten en Monitoren'.

¹ Het acroniem 'HerMes' staat voor 'HEt Rationeel Monitor Evaluatie Systeem'

In het onderzoeksprogramma is voor het thema ‘Grond en Constructies’ als doelstelling reductie van risico, kosten, bouwtijd, overlast en ruimtedruk genoemd. Dit project sluit daar als volgt op aan:

- de risico's nemen toe naarmate nieuwe constructies ingewikkelder zijn, meer kritische elementen bevatten en er minder relevante ervaring mee bestaat, bijvoorbeeld omdat ontworpen wordt op basis van een lange ontwerplevensduur. Dergelijke situaties leiden tot meer onzekerheid, waardoor het ontwerp potentieel minder betrouwbaar is. Monitoring tijdens bouw en beheer leidt tot beperking van deze risico's, waardoor (verdere) kostenreductie mogelijk wordt.
- kostenreductie kan verder onder meer worden bereikt door het optimaliseren van de beheerskosten door middel van een kwantitatieve afweging van mogelijke maatregelen (zoals niets doen, repareren, renoveren of integraal vervangen) en het in beschouwing nemen van de gevolgkosten (bijvoorbeeld files of geluidsoverlast). Door middel van monitoring kunnen ‘verouderingsverschijnselen’ in kaart worden gebracht en de keuze van de maatregel objectief onderbouwd worden.
- in toenemende mate worden beheerskosten op systeemniveau beoordeeld en niet meer op objectniveau (een viaduct bijvoorbeeld staat daarbij niet op zichzelf, maar is dan een onderdeel van een wegtraject). Hierdoor worden de consequenties van de prognoses van verouderingsverschijnselen steeds omvangrijker.
- door monitoring kunnen rekenmodellen voor het voorspellen van de het constructie gedrag worden geverifieerd, gevalideerd en geoptimaliseerd.
- monitoring tijdens kritische bouwfases kan calamiteiten helpen voorkómen en bijdragen aan een beter inzicht in het gedrag op de langere termijn van de constructie. Dit vermindert eventuele hinder door en de kans op disfunctioneren van de constructie.

1.4 Organisatie van dit rapport

Dit rapport bevat de volgende delen

- er wordt begonnen met de filosofie van rationele monitoring. Er wordt stilgestaan bij de vraag wat is monitoring, wanneer is monitoring zinvol en wat is de algemene opbouw van een rationeel opgezet monitoringsproject.
- vervolgens wordt gefocust op het ontwerpen van een rationeel monitoringsproject. Hiervoor wordt een stroomschema gepresenteerd en de achtergrond wordt toegelicht. Dit hoofdstuk resulteert in een procesbeschrijving en een checklist. Met de werkbeschrijving kan een monitoringsproces rationeel opgezet worden, met de checklist kan van een monitoringsproject nagegaan worden of een monitoringsproject rationeel opgezet is.
- in de volgende twee hoofdstukken wordt het concept rationele monitoring aan de hand van praktijkcases uitgewerkt. Eerst wordt aandacht besteed aan de bouwfase van een project (hoofdstuk 4) en daarna aan de gebruiksfase van een project (hoofdstuk 5)
- tenslotte bevat het laatste hoofdstuk aanwijzingen voor gebruikers die rationele monitoring willen gaan toepassen. Hiervoor is een werkbeschrijving gemaakt, die aangeeft monitoring rationeel opgezet kan worden. Er is ook een checklist opgesteld, waarmee nagegaan kan worden of de monitoring rationeel opgezet is. Het gebruik van de werkomschrijving en de checklist wordt toegelicht.

2 Filosofie van rationele monitoring

2.1 Wat is monitoring

In dit hoofdstuk wordt een rationele basis voor monitoring gelegd.

Monitoren wordt in dit verband gedefinieerd als het *herhaald* uitvoeren van *metingen* aan of bij een constructie om *beslissingen* te kunnen nemen ten aanzien van de verdere bouw- en/of beheerfasen.

2.2 Wanneer is monitoring zinvol

Het antwoord op de vraag ‘*Waarom* monitoren?’ heeft te maken met de behoefte aan kennis over de betrouwbaarheid van het functioneren van een constructie, veelal uitgedrukt als de kans op falen.

Hierbij kunnen twee niveau’s van ‘falen’ worden onderscheiden:

- a) het niet meer voldoen aan de functionele eisen die aan de constructie worden gesteld (in de (bouw)normen aangeduid als ‘servicibility limit state’ (SLS)) en
- b) het niet meer voldoen aan de constructieve eisen, waarbij het daadwerkelijk bezwijken van de constructie optreedt (‘ultimate limit state’ (ULS)).

De behoefte aan informatie over het functioneren kan optreden in een verschillende context. Deze behoefte wordt de impuls van de monitoring genoemd. De volgende impulsen worden onderscheiden:

- operationeel: kiezen, beslissen in een concreet project
- wetenschappelijk: valideren, kalibreren, verbeteren modellen, toetsen van hypothesen
- juridisch: voldoen aan wettelijke verplichting, verkrijgen van vergunning

In dit project ligt de nadruk op de eerste twee: de *beslissingscontext* en de *gevolgtrekkingscontext*. In de eerste context dient de via monitoring verkregen informatie als ondersteuning van bepaalde beslissingen, die moeten worden genomen tijdens bouw of beheer van de constructie. In de tweede context worden de via monitoring verkregen gegevens gebruikt om ontwerpmodellen, op basis waarvan initiële (betrouwbaarheids)analyses zijn of worden gemaakt, op te stellen of te toetsen en bij te stellen.

Bij de operationele impuls wordt nog onderscheid gemaakt tussen:

- beheersmatige impuls: keuzen, beslissingen om het beheer van de constructie naar behoren te doen
- kwaliteitsborgende impuls: keuzen, beslissingen om de kwaliteit van de uitvoering van de constructie (tijdens het bouwen) te waarborgen

Bij een rationeel monitoringsproject moet de impuls expliciet bekend zijn. De impuls van de monitoring heeft vele consequenties voor het ontwerp. De locatie van de opnemers en de bepaling van de vervolgacties op basis van overschrijding van een grenswaarde verschilt aanzienlijk bij de verschillende impulsen voor monitoring.

2.3 De fasering van een monitoringsproject

Een rationeel monitoringsproject valt in de volgende fasen te verdelen:

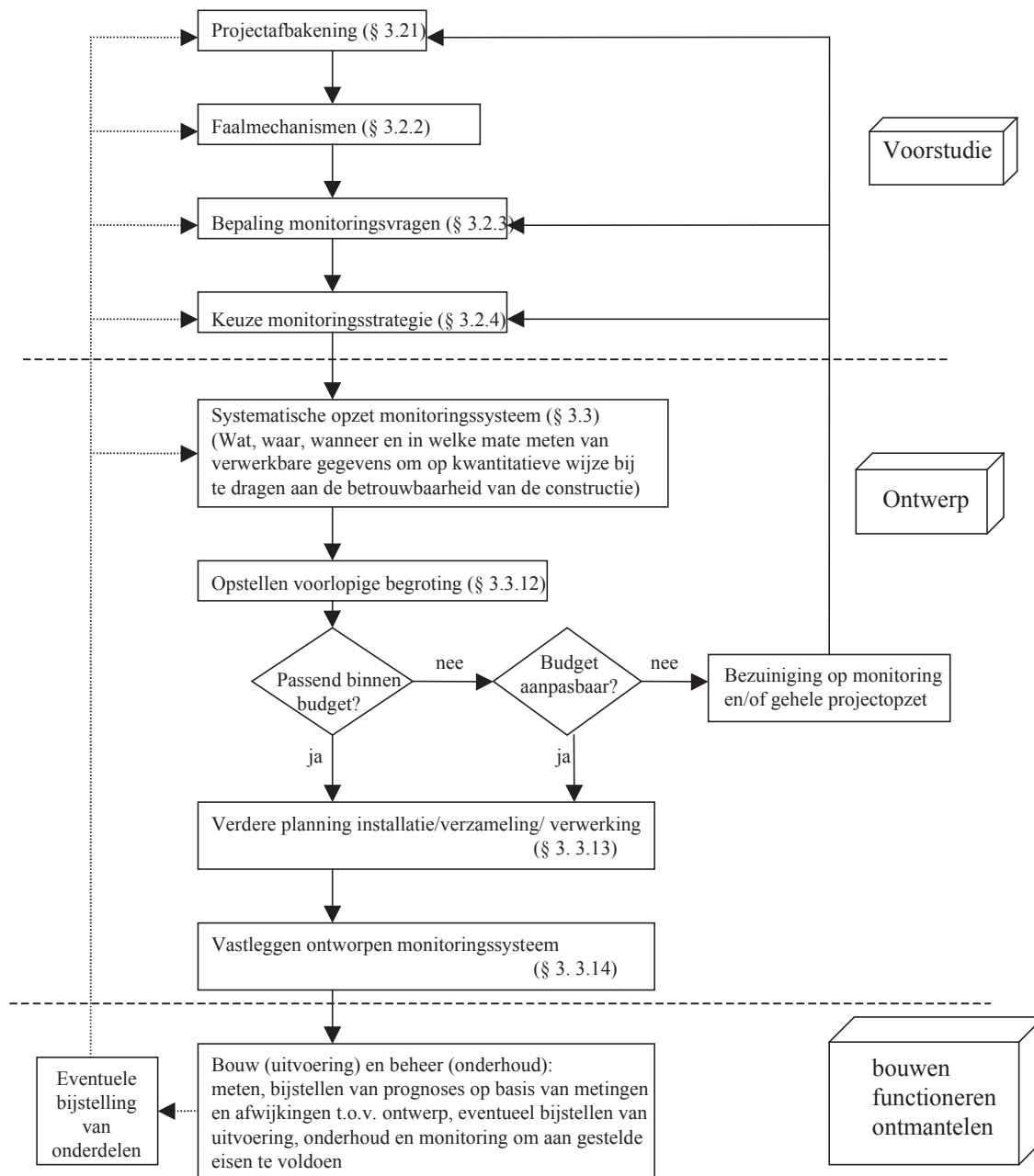
	fasering in HerMes	algemene naam van de fase in theorie projectmatig werken
		Initiatiefase
1	voorstudie voor het ontwerp	Definitiefase
2	ontwerp van het monitoringssysteem	Ontwerpfase
3	bouw van het monitoringssysteem	Vorbereidingsfase
4	functioneren van het monitoringssysteem	Realisatiefase
5	ontmanteling van het monitoringssysteem	Nazorgfase

Tabel 2.1 Overzicht fasering monitoringsproject

In de rechter kolom van deze tabel is een meer algemene benaming van de fasering opgenomen, waarbij het monitoringsproject als gefaseerd project beschouwd wordt. De fasering van het monitoringsproject moet niet verward worden met de fasering van het totale project waarbinnen het monitoringsproject uitgevoerd wordt. In verschillende fasen van het totale project kunnen één of meer monitoringsactiviteiten opgenomen worden. Het totale project is bijvoorbeeld de bouw van een baanlichaam of het beheer van een viaduct. Tijdens de bouw van een baanlichaam kunnen naast de zettingen bijvoorbeeld ook de trillingen door trilwalsen en vervormingen van panden vlak langs het tracé gemonitord worden.

3 Voorstudie en ontwerp van het monitoringssysteem

3.1 Overzicht van de fases



Figuur 3.1 Globaal overzicht van de stappen in de voorstudie- en ontwerpfase het een monitoringssysteem

In deze figuur zijn de essentiële stappen in de twee fasen weergegeven: de voorstudie en het ontwerp.

De voorstudie bestaat uit het vastleggen van basisgegevens waaronder het gestelde doel, de maatgevende faalmechanismen en het vaststellen van de te hanteren monitoringsstrategie. Hoofddoel van deze fase is

- rationeel beantwoorden van de vraag of monitoring zinvol en mogelijk is in de gestelde situatie
- Nevendoelen zijn:

- vaststellen welke monitoringsstrategie hiervoor het meest geschikt is
- vastleggen van de noodzakelijke informatie voor het ontwerp.

Het ontwerp bestaat uit het verder detailleren van het monitoringssysteem. Hoofddoel van deze fase is te komen tot een rationeel ontworpen monitoringssysteem. Het moet voldoen aan de eisen in termen van tijd, geld, kwaliteit, informatie en organisatie. In deze fase vinden onder andere de keuzes plaats van de instrumenten, de locatie van de instrumenten, het vastleggen van de interventiecriteria en de verschillende taken als interventie nodig is.

Monitoring is in het algemeen alleen relevant voor situaties waarbij sprake is van een ongewenste gebeurtenis, verandering of degradatie. Met de term faalmechanisme wordt een dergelijke ongewenste gebeurtenis in de meest algemene zin bedoeld. Het kan dus betrekking hebben op situaties waarbij constructief falen optreedt, maar ook falen vanuit een functioneel kader optreedt (niet voldoen aan een gestelde eis) of vanuit een esthetisch kader optreedt (bijvoorbeeld de verf bladdert).

3.2 Detaillering van de voorstudie

3.2.1 Doelstelling en afbakening

In de voorstudie worden eerst de doelstelling en de afbakening van het project vastgelegd. Naast de ruimtelijke beschrijving (wat behoort wel en wat behoort niet tot het project) betreft de afbakening basisinformatie over de normen die van toepassing zijn, de te hanteren ontwerpmodellen en de omgevingsinvloeden.

Daarnaast wordt in de afbakening op grond van het gestelde doel (bijv. kennis opdoen over het lange termijn gedrag) de looptijd van het monitoringsproject vastgesteld alsmede het benodigde budget. Het benodigde budget volgt in de voorstudie door de consequenties van het gestelde doel vanuit ervaringen te vertalen in het aantal, intensiteit en kwaliteit van metingen. Deze informatie schat af of de vanuit de opdrachtgever gestelde tijdslijmieten en budget afdoende zijn.

3.2.2 Faalmechanismen

Vervolgens worden de maatgevende faalmechanismen vastgelegd. Dit geldt ook in het geval dat het monitoringdoel zuiver wetenschappelijk is. In de betrouwbaarheidsanalyse die volgens de wettelijk voorgeschreven normen (voor de bouw: NEN 6702 en de van toepassing zijnde materiaalgebonden normen) dient te worden gemaakt, hoeft alleen te worden aangetoond dat de totale kans op het niet meer voldoen aan de prestatie-eisen voldoende klein is – er hoeft niet voor ieder mogelijk faalmechanisme afzonderlijk te worden bepaald wat de kans is dat dit mechanisme optreedt.

Voor de rationele opzet van een monitoringssysteem en een op kwantitatieve gronden gefundeerde keuze van een monitoringsstrategie is het noodzakelijk om wél een globale betrouwbaarheidsanalyse van het ontwerp te maken, waarbij voor elk mogelijk faalmechanisme een kans van optreden wordt bepaald, rekening houdend met de relevante kennis betreffende de invloedsfactoren die met betrekking tot het project beschikbaar is. Een dergelijke analyse hoeft overigens niet voor elk mechanisme even uitvoerig te worden uitgevoerd: er kan een categorie ‘overige mechanismen’ worden gedefinieerd waarvoor alleen bekend hoeft te zijn dat de kans van optreden daarvan relatief gering is.

De mogelijke faalmechanismen zijn op gestructureerde wijze kwalitatief te bepalen door middel van een zogenoemde ‘Failure Mode Effect Analysis’ [CUR 1997]. Vervolgens moet de monitoring zich verder richten op de faalmechanismen met een grote kans van optreden. Hierbij kan overwogen worden of in plaats van de kans het niet beter is het risico (risico = kans * gevolg) van een faalmechanisme als onderbouwing van de keuze te gebruiken.

3.2.3 Monitoringsvragen

Uit de betrouwbaarheidsanalyse zal voor elk mechanisme afgeleid moeten worden welke indicatoren maatgevend zijn. Er moet vastgesteld worden of deze indicatoren voldoende gevoelig gemeten

kunnen worden. Het is van groot belang indicatoren te kiezen met daarbij behorende reactieniveau's zodat het betreffende faalmechanisme voldoende tijdig vastgesteld wordt om noodzakelijke acties (zoals eventueel ingrijpen of verificatie acties) mogelijk te maken.

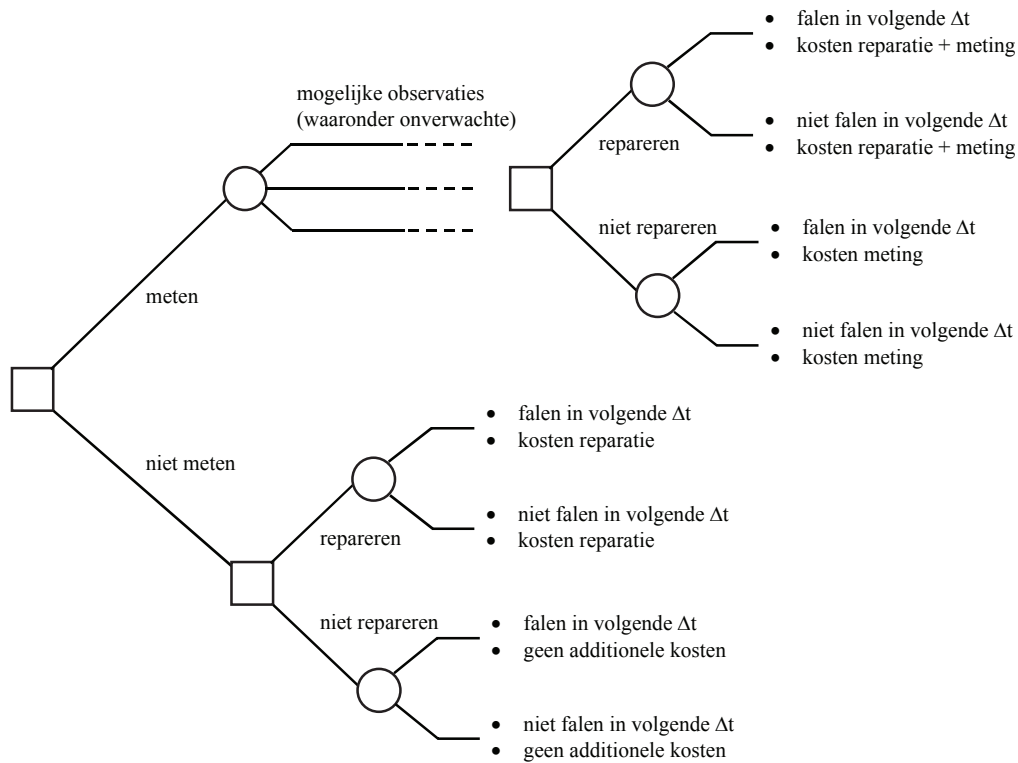
Bij het maken van de betrouwbaarheidsanalyse kan eventueel naar voren komen dat er een betrekkelijk grote onzekerheidsmarge bestaat met betrekking tot de parameters in de gehanteerde rekenmodellen, dat realisatie van het gestelde monitoringsdoel onzeker wordt. Voor een effectieve monitoringsaanpak moet deze onzekerheid expliciet in acht genomen worden, mogelijk kan deze onzekerheid door aanvullend onderzoek in de ontwerpfase verkleind worden. Overigens is vaak de onzekerheid in de parameters juist een reden om te gaan monitoren.

3.2.4 Monitoringsstrategie

Zodra duidelijk is welke vragen door monitoring dienen te worden beantwoord kan ook een monitoringsstrategie worden bepaald. Een monitoringsstrategie is het antwoord op de vragen *wat* te monitoren en *waar*, *wanneer* en *in welke mate* dat moet gebeuren. Deze vragen vormen een besluitvormingsprobleem.

Om op rationele gronden een actie te kiezen, zal de beslisser voor iedere actie de mogelijke gevolgen moeten afwegen tegen de waarschijnlijkheid waarmee deze kunnen optreden. Hierbij moet rekening gehouden worden met de kosten van falen enerzijds, tegen de kosten van repareren en monitoren anderzijds. Voor dit soort opgaven geeft met name de Bayesiaanse beslissingstheorie een goed houvast. Deze theorie biedt de mogelijkheid om via een analytische aanpak, waarin het totale probleem wordt uiteengerafeld in overzichtelijke deelproblemen, te komen tot een goed begrip van het beslissingsprobleem en daarmee tot een rationele keuze.

De bepaling van de strategie betekent, dat aan de hand van rationele criteria (desgewenst via kanstechnische berekeningen) de te nemen (monitoring-) acties vastgesteld worden. Dit is schematisch in de volgende figuur weergegeven.



Figuur 3.2 Weergave van aanwezige mogelijkheden tbv vaststelling strategie

3.3 Detaillering van het ontwerp

3.3.1 Algemeen

Bij de detaillering van het ontwerp moet niet alleen gedacht worden aan de directe vragen voor de monitoring, maar juist het monitoringsproces in de breedste zin moet beschouwd worden. Er moet ook aandacht besteed worden aan vraagstukken als ‘hoe worden de instrumenten aangebracht’ en ‘hoe worden de meetdata verwerkt’.

De nadruk bij het ontwerp dient ook te liggen op de rationaliteit van het ontwerp: elke ontwerpkeuze moet logisch onderbouwd worden op basis van eerdere constatering en ontwerpkeuzes.

In deze paragraaf worden slechts een aantal aspecten in globale termen besproken, voor de details wordt verwezen naar [DC Basisrapport HERMES, 2002]. Ten opzichte van dat rapport zijn hier enkele aspecten anders gegroepeerd.

3.3.2 De te monitoren parameters

De te monitoren parameters dienen de antwoorden te bieden op de gestelde monitoringsvragen. Bij een operationele impuls dienen deze parameters zodanig gekozen te worden dat tijdig voor falen gewaarschuwd wordt, zodat ook reparaties of desnoods evacuaties tijdig uitgevoerd kunnen worden. Bij een wetenschappelijke impuls, bijvoorbeeld inzicht in het gedrag van een constructie verkrijgen, kan het zinvol zijn om met betrekking tot hetzelfde mechanisme naar meerdere parameters tegelijk te kijken teneinde oorzaak-gevolg relaties met grotere zekerheid vast te stellen.

3.3.3 Orde van grootte van veranderingen

Om de benodigde meetrange en de benodigde meetnauwkeurigheid van de meetinstrumenten te bepalen moet een schatting worden gemaakt van maximaal mogelijke meetwaarden en minimale grootte van veranderingen die geregistreerd dienen te worden. In combinatie hiermee dienen waarschuwniveaus te worden bepaald waarbij overgegaan moet worden tot een hogere meetfrequentie, verhoogde paraatheid en/of tegenmaatregelen. Dergelijke waarschuwniveaus hoeven overigens niet (alleen) op basis van absolute meetwaarden te worden vastgesteld, maar kunnen ook worden vastgesteld op basis van de snelheid waarmee meetwaarden veranderen.

De meetnauwkeurigheid dient voldoende hoog te zijn om op betrouwbare wijze te kunnen bepalen of een zekere alarmfase bereikt is of niet. Bij de bepaling van de meetrange dient overigens niet zozeer te worden uitgegaan van de meetwaarden die onder extreme omstandigheden kunnen optreden, maar van de uiterste waarden die voor het beslissingsproces nog van belang zijn.

3.3.4 Bedenk vervolgacties bij overschrijding grenswaarde

Tevoren dient te worden bedacht welke maatregelen getroffen dienen te worden indien zich ongewenste meetwaarden voordoen. De eerder genoemde Failure Mode Effect Analysis zal hierbij een zinvol hulpmiddel zijn. Voor elk faalmechanisme zijn de effecten bekend en moet worden aangegeven welke maatregelen genomen kunnen worden om falen te voorkomen of de gevolgen acceptabel te maken. Ook moet aangegeven worden dat de voorgestelde maatregelen uitvoerbaar zijn en bij wie de verantwoordelijkheid komt te liggen.

3.3.5 Bepaal locaties van de instrumenten

De bepaling moet worden uitgevoerd op basis van betrouwbaarheidsanalyses voor alle maatgevende faalmechanismen. De locatie wordt bepaald door de punten waar de te monitoren parameter maximale gevoeligheid heeft voor het betreffende faalmechanisme.

3.3.6 **Benoem specifieke doel van elk instrument**

Voor elk instrument dat wordt voorzien dient een specifiek doel geformuleerd te kunnen worden, daar het anders immers overbodig is. Een instrument dat niet dient ter beantwoording van een specifieke monitoringsvraag dient te worden weggelaten!

Er moet in verband met mogelijke uitval van instrumenten en de vereiste controleerbaarheid van gegevens een zekere redundantie worden ingebouwd, mede afhankelijk van de te verwachten prestaties van de instrumenten en de risico's die bij het faalmechanisme horen.

In deze fase moet ook expliciet worden nagegaan of alle geselecteerde faalmechanismen in de monitoring opgenomen zijn.

3.3.7 **Registratie van relevante omgevingsinvloeden**

De registratie van relevante omgevingsinvloeden is van belang om de betrouwbaarheid van de meetwaarden van de instrumenten te kunnen bepalen. Alleen betrouwbare observaties kunnen vertaald worden in zinvolle uitspraken over het gedrag van de constructie. Het zal hier vaak ook gaan om metingen, waarbij de 'meetresultaten' niet uit getalswaarden zullen bestaan.

3.3.8 **Beschrijf eisen aan de uit te voeren metingen**

De specificatie van de meetinstrumenten moet gebaseerd worden op de informatie die bij eerdere stappen vastgelegd is. De meetnauwkeurigheid dient de voorziene grootte van de variatie te bevatten. De meetfrequentie dient afgestemd te worden op de te verwachten snelheid waarmee veranderingen (kunnen) optreden, en dient hieraan tijdig te kunnen worden aangepast. Hierbij zal ook overwogen moeten worden of de instrumenten handmatig dan wel automatisch uitgelezen dienen te worden.

3.3.9 **Correct functioneren van de instrumenten**

Het correct functioneren van de instrumenten heeft twee componenten:

- het systeem moet zodanig zijn dat er vastgesteld kan worden dat een instrument naar behoren functioneert. Mogelijk door instrumenten dubbel uit te voeren, visuele inspectie.
- het systeem moet regelmatig onderhouden en gekalibreerd worden. Dit moet vooraf gepland en begroot worden.

3.3.10 **Verantwoordelijkheden bepalen voor diverse projectfasen**

Voor elk van de fasen van het monitoringsproject (voorbereidend ontwerp, definitief ontwerp, voorbereiding van de uitvoering, de uitvoering van de monitoring zelf (inclusief de uitvoering van vervolgacties als grenswaarden overschreden worden) en het afbreken van de instrumentatie na afloop van de monitoring) zal moeten worden bepaald welke van de betrokken partijen verantwoordelijk is. De verantwoordelijke partij moet voldoende deskundigheid, capaciteit en gezag hebben om deze taak naar behoren uit te kunnen voeren.

3.3.11 **Selectie en specificatie instrumenten**

In deze stap worden de meetinstrumenten geselecteerd en de specificaties opgesteld. Bij selectie gaat het om het type instrument dat gekozen wordt om een monitoringsparameter te meten. Bij de specificatie gaat het om de betrouwbaarheid, het meetbereik, meetnauwkeurigheid en meetsnelheid. Deze volgen logisch uit de eerder gedane keuze.

3.3.12 **Stel een voorlopige begroting op**

In deze fase is aanzienlijk meer informatie beschikbaar dan aan het einde van de voorontwerpfase. Door nu een begroting op te stellen, kan nagegaan worden of het voorziene monitoringssysteem binnen het voorziene budget past, voordat de volgende definitieve uitwerking gaat plaatsvinden. Als het benodigde budget het beschikbare budget overschrijdt, dan moet of het monitoringsplan verkleind worden of het budget verhoogd worden. Hierin kunnen de voorziene opbrengsten (die inmiddels in het licht van de verkleinde risico's gekwantificeerd zijn) een belangrijke rol spelen.

3.3.13 **Verdere detaillering van de planning**

Nu worden alle stappen van het volledige monitoringsproces vast gelegd:

- het installeren van de instrumenten
- het verzamelen van de meetgegevens
- de verwerking van de meetgegevens
- de ontmanteling van het systeem.

Dit onderwerp wordt afgesloten met een definitieve begroting.

3.3.14 **Verslag**

Het gehele ontwerp van het monitoringssysteem wordt in een rapport vastgelegd.

4 Monitoring tijdens de bouwfase

Tijdens de bouwfase wordt vaak gemonitord. In dit hoofdstuk worden een aantal casestudies besproken, die het nut en de mogelijkheden van de rationele monitoringsfilosofie HerMes in de bouwfase illustreren.

Het betreft de volgende cases:

- monitoringsopzet van het proefproject Actuele Sterkte (Bergambachtproef)
- de monitoring van zettingen bij ophogingen voor aardebaan bij het No Recess project en de aanleg van de Betuweroute
- de monitoring van de zettingen die optreden tijdens het boren van de Groene Hart Tunnel

4.1 Toepassing op de instrumentatie Bergambacht proef

De ontwikkelde monitoringsstrategie is toegepast binnen het Delft Cluster project Actuele Sterkte [Koelewijn, 2000]. Dit project heeft tot doel de bezwijkveiligheid van een typische Nederlandse dijk vast te stellen. De kennis die daaruit komt moet de veiligheid van de Nederlandse rivierdijken in het algemeen verbeteren. Er is een grootschalige proef uitgevoerd waarbij een bestaande rivierdijk tot bezwijken is gebracht. De proef richt zich specifiek op de validatie van het opdrijfmodel, waarvoor het noodzakelijk is dat de dijk aan de binnenzijde bezwijkt met een diep glijvlak.

De resultaten van deze proef worden onder meer gebruikt voor:

- de validatie van de bestaande richtlijnen voor het ontwerp en de toetsing van dijken.
- de kalibratie van de bestaande rekenmodellen voor macrostabiliteit onder meer ten aanzien van 3D-effecten en anisotropie van de ondergrond, mede ter onderbouwing van eventuele wijzigingen van de hiervoor genoemde richtlijnen
- het bepalen van de mogelijkheden om op basis van een eventuele relatie tussen aangesproken sterkte en opgetreden vervormingen vast te kunnen stellen bij welke mate van vervorming maatregelen zoals een noodversterking of evacuatie van het achtergelegen gebied getroffen dienen te worden.

Tijdens de proef moet het gedrag van de relevante variabelen in de tijd en de spreiding in de ruimte vastgesteld worden. Hiervoor is een monitoringssysteem noodzakelijk. Dit systeem is als deelstudie binnen het HerMes project ontwikkeld.

De doelstelling van deze studie binnen het DC project rationele monitoring is:

- duidelijk te maken hoe de algemene monitoringsfilosofie werkt voor civieltechnische constructies
- een systematische opzet te bieden voor het monitoringssysteem voor de macrostabiliteitsproef

Aan de hand van de beschikbare procesbeschrijving is de voorstudiefase en een gedeelte van de ontwerpfase van het monitoringproject uitgewerkt. De uitwerking van het definitieve monitoringssysteem is uitgevoerd binnen het project Actuele Sterkte.

Bij deze studie bleek heel duidelijk de centrale rol die het bepalen van de faalmechanismen bij het rationeel opzetten van het monitoringssysteem speelt. Een faalmechanisme is in deze context een situatie waarbij de proef als mislukt (of niet volledig gelukt) moet worden beschouwd. In totaal zijn twaalf faalmechanismen geïdentificeerd. Aangezien het doel van de proef het gedrag van de dijk tijdens bezwijken te monitoren, is de gebeurtenis “de dijk bezwijkt niet” ook een faalmechanisme van de proef. Ook het bezwijken via een ander mechanisme dan het gewenste mechanisme is een vorm van falen van de proef. In deze case zijn de kansen van de verschillende (geotechnische) bezwijkmechanismen volledig gekwantificeerd. De kansen van de mogelijke niet-geotechnische faalmechanismen van de proef zijn in globale termen gekwantificeerd.

Opvallend detail is dat in deze studie als mogelijk faalmechanisme opgenomen is dat er door de storing van de pompen geen watertoevoer naar het zandscherm mogelijk is. Achteraf is gebleken dat dit faalmechanisme daadwerkelijk opgetreden is. Het voorziene gevolg “proef loopt vertraging op” is ook daadwerkelijk opgetreden, omdat de mogelijke maatregel “voldoende en betrouwbare pompcapaciteit in zetten” niet gekozen was in verband met de daaraan verbonden kosten.

In vergelijking met de tot nu toe gebruikelijke aanpak bij dergelijke projecten (die overigens ook voor de macrostabiliteitsproef ten dele is gevolgd, parallel aan dit Delft Cluster project) vallen met name de volgende voordelen op:

- het uitvoeren van een betrouwbaarheidsanalyse waarbij de geïdentificeerde bezwijkmechanismen zoveel mogelijk kwantitatief beschouwd zijn, waar mogelijk bovendien niet alleen met een (deterministische) bezwijkveiligheidsfactor, maar ook met een kans van optreden. Uit deze betrouwbaarheidsanalyse zijn enkele onderdelen naar voren gekomen waarvan het belang bij de traditionele aanpak niet onderkend was:
 - 1) het belang van het mechanisme ‘buitenwaarts bezwijken’: de kans van optreden hiervan was gevoelsmatig ingeschat op ‘voldoende klein om daar verder geen aandacht aan te besteden’, maar bij de kwantificering van de kansen bleek de mechanisme zeer belangrijk.
 - 2) het belang van kennis omtrent het verloop van het bodemprofiel aan de buitenwaartse zijde van de dijk, aangezien dit van groot belang is voor het bezwijkmechanisme ‘buitenwaarts bezwijken’
 - 3) de bijdrage van de onzekerheid in de waarde van de cohesie van het dijksmateriaal en de klei-afzettingen van Tiel aan de totale onzekerheid omtrent het wel of niet bezwijken van de dijk bij een gegeven belastingssituatie.
- een systematische, rationele onderbouwing van de instrumentatie op basis van de betrouwbaarheidsanalyse, in plaats van een meer gevoelsmatige bepaling van het aantal en de locaties van de meetinstrumenten.
- de mogelijkheid om op basis van de analyse een rationele discussie te voeren over de omvang van het monitoringsprogramma. In dit geval leidde dit tot een bijstelling van het beschikbare budget die onderbouwd was vanuit de doelstellingen van de proef.
- de mogelijkheden om in de uitvoeringsfase van de proef bij te sturen op basis van met behulp van meetdata vernieuwde (betrouwbaarheids)analyses.

4.2 Toepassing op de monitoring van zettingen van ophoging

Een monitoringsproject omvat verschillende fases. In de voorgaande paragraaf is de focus gericht op de voorstudie en het ontwerp van het monitoringsproject. In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan de interpretatie van de monitoringsdata. Deze studies zijn verricht in het kader van twee concrete projecten: de referentiebaan No Recess en de aanleg van de Betuweroute.

4.2.1 Toepassing op referentiebaan No Recess

De referentiebaan No Recess is aangelegd om de toepassing van technieken om de zettingen te verminderen in de praktijk te evalueren. In het proefvak zijn vijf ophogingen met verschillende technieken aangelegd. Via monitoring is de zetting van elk baanvak gedurende enige tijd gevolgd. Op basis van deze gegevens is vastgesteld of een techniek voor de aanleg van de hoge snelheidslijn in Nederland geschikt is. De studie in het kader van HerMes [Koelewijn, 2000b] heeft zich beperkt tot de conventionele baan, waarin zowel een hoge als een lage ligging getest zijn.

Bij deze studie moet opgemerkt worden dat de monitoring al uitgevoerd was op het moment van de studie. Er is aandacht besteed aan de opzet van de monitoring en aan de interpretatie van de meetgegevens.

De studie heeft twee doelstellingen:

- duidelijk te maken hoe de algemene monitoringsfilosofie voor dergelijke constructies kan worden toegepast
- aan te geven hoe de door deze monitoringsfilosofie voorgestane werkwijze bij de verwerking van monitoringdata in een concreet geval kan worden toegepast.

Om de toepassingsmogelijkheden van HerMes te evalueren is achteraf een analyse gemaakt van de project opzet. Het enige faalmechanisme dat beschouwd is, is “het niet voldoen aan de zettingseis”. De uit de onderzoeksopzet gedestilleerde monitoringsvragen betreffen de zettingen van en waterspanningen in verschillende lagen en de vraag of het nodig en mogelijk is op basis van de monitoringsresultaten de uitvoering zodanig te wijzigen dat de restzettingseisen wel gehaald kunnen worden. Bij de analyse van het ontwerp blijkt het antwoord op verschillende vragen niet vastgelegd te zijn.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het opstellen van een checklist duidelijk verbetering kan brengen voor dergelijke projecten.

Voor de modellering van het zettingsproces zijn twee modellen gebruikt voor de berekening van zettingsprognoses:

- het deterministische model MSettle
- een probabilistisch model voor het bijstellen van zettingsprognoses op basis van de meetresultaten.

Met behulp van het deterministische model is de modellering verbeterd door de parameters beter te kiezen, waarmee de metingen en de prognoses dichter bij elkaar komen. Het blijkt dat na enige tijd monitoren de parameters waarmee de prognoses voor de restzettingen gemaakt moeten worden enige aanpassing behoeven. Dan kan het model gebruikt worden om zowel na te gaan of aan de eisen van de restzettingen voldaan zal worden en welke mogelijkheden er bestaan om deze te beïnvloeden. MSettle blijkt hiervoor een geschikt instrument.

Het probabilistische model is ook toegepast. Hoewel dit eenvoudige model theoretisch beter onderbouwd is, blijkt het minder goed te werken in dit geval. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de rekenparameters en de gevonden parameters vrij ver uit elkaar liggen, en doordat er weinig zicht bestaat op de werkelijke correlatie coëfficiënt die tussen gemeten zettingen op verschillende tijdstippen bestaat. Dit vereist nader onderzoek.

Uit deze case blijkt dat de interpretatie met een deterministische model een belangrijke bijdrage kan leveren aan de interpretatie van de monitoringsgegevens. Toepassing van de monitoringsfilosofie is dus niet afhankelijk van de beschikbaarheid van probabilistische modellen.

4.2.2 Toepassing op de Betuweroute

Bij de Betuweroute worden in het contract met de aannemer expliciete eisen gesteld aan restzettingen, die optreden gedurende 30 jaar vanaf het moment van oplevering. Daartoe heeft de aannemer een uitgebreid monitoringssysteem voor zettingen opgezet. Op basis van deze gegevens moet de aannemer tijdig een inschatting kunnen maken of de restzettingseis gehaald zal worden en, als dat naar verwachting niet het geval is, welke acties noodzakelijk zijn om wel aan de restzettingseis te voldoen.

Bij de toepassing op de Betuweroute [Hölscher, 2002] is de aandacht volledig gericht geweest op de interpretatie van zettingsmetingen en de mogelijkheden die monitoring van de zettingen biedt op het beoordelen van de prognoses voor de restzettingen. Ook hier is uitsluitend gefocust op de restzettingseis. Het enige beschouwde faalmechanisme is dus het al of niet voldoen aan de restzettingseis.

Deze studie heeft tot doel om een techniek te beproeven waarmee op een eenvoudige doch consistente wijze prognose voor de restzetting in een profiel te verbeteren op basis van monitoring van de zettingen.

De zettingen voor de betreffende doorsnede zijn berekend met het volledig probabilistisch model. Het gedrag van de grond is beschreven met een vereenvoudigde versie van het isotachenmodel, waarin zowel de primaire consolidatie als de secundaire kruip consistent gemodelleerd worden. Dit vereenvoudigde versie is speciaal voor deze case ontwikkeld.

Voor alle parameters en de belasting zijn de geschatte waarde en de verwachte spreiding bepaald. Er is een Monte-Carlo simulatie uitgevoerd, zodat de verwachte restzettingen bekend zijn en de kans op overschrijding van de gestelde eis.

Het bepalen van de onzekerheid in de invoerparameters en de daarbij verwachte range in de te monitoren variabelen is overigens een belangrijk aspect van de voorstudie voor een monitoringsproject. Door de verwachte spreiding te bepalen kan ook aangegeven worden welke range de meetinstrumenten minimaal moeten hebben en eventueel waar gemonitord moet worden.

Vervolgens zijn de monitoringsresultaten in de simulatie betrokken. Uitgewerkt is welke berekende zakkingscurven binnen redelijke marges aan de gemeten zakkingscurven voldoen. Bij deze techniek worden dus achteraf de invoervariabelen bepaald op basis van de zettingsmeting. Aangezien dit een aantal getalswaarden betreft kan de verwachtingswaarde en de spreiding van elke invoervariabele à posteriori bepaald worden en vergeleken worden met de à priori geschatte waarden.

De resultaten kunnen op twee manieren gebruikt worden:

- voor bepaling van de restzettingen: Het blijkt dat de betrouwbaarheid van de verwachte restzettingen afneemt als monitoringsresultaten op deze manier beschouwd worden. In dit specifieke geval treedt dit op doordat het gemiddelde en de spreiding beide kleiner werden.
- voor parameterbepaling: de parameters waarmee de geselecteerde zakkingscurven berekend zijn kunnen bepaald worden. Hiervoor kunnen weer gemiddelde en standaard afwijking bepaald worden, zodat deze techniek zich leent voor evaluatie van de parameterbepaling.

Opvallend detail in de conclusie is dat monitoring in de beginfase van het bouwproces de betrouwbaarheid van de restzetting (de zetting na oplevering) duidelijk doet toenemen, maar de betrouwbaarheid van de eindzetting (de totale zetting vanaf begin van de werkzaamheden) nauwelijks toeneemt. Dat is een belangrijke constatering voor het geval de aandacht uitgaat naar de eindzettingen: dan heeft monitoring in de beginfase weinig zin.

Uit deze studie is geconcludeerd dat deze techniek zeer bruikbaar lijkt voor interpretatie van monitoringsresultaten in de bouwfase. Een verdere theoretische onderbouwing is wel wenselijk.

4.3 Toepassing HERMES voor risicobeheersing zakking tijdens bouw boortunnel

Tijdens het boren van tunnels kunnen maaiveldzakkingen optreden. Omdat deze zakkingen schade aan omliggende bebouwing kunnen veroorzaken, moeten deze zakkingen beperkt blijven. Dit wordt momenteel als eis in het contract met de aannemer opgenomen.

De maaiveldzakkingen ontstaan door de zogenaamde staartspleet die achter het boorschild (dat een grotere diameter heeft dan de tunnel) optreedt. Injectie van de staartspleet tijdens het boren verkleint de zakkingen. Om aan de contractuele eisen te voldoen is het voor de aannemer van belang dat hij de injectie zo uitvoert dat de maaiveldzakkingen binnen de gestelde eisen vallen. Voor de opdrachtgever is het van belang dat hij na kan gaan of de maaiveldzakkingen aan de contracteisen voldoen, maar even belangrijk is het voor de opdrachtgever dat er geen schade ontstaat.

In de praktijkcase betreffende de aanleg van de Groene Hart tunnel, is de HERMES filosofie gehanteerd om de opdrachtgever de hulpmiddelen te geven om de risico's als gevolg van zetting die ontstaan tijdens de bouw te beheersen [Wijnants, Brinkman, 2002]. Een bijzonder aspect was in dit geval dat er met een Design, Construct en Operate constructie wordt gewerkt waardoor het de opdrachtgever niet is toegestaan om het werkproces van de aannemer direct te sturen.

Het doel van dit project was de beheersing van zettingsrisico's zoals verbonden aan de door de aannemer gehanteerde monitoringaanpak. HERMES is daarbij gehanteerd als hulpmiddel om tot een rationele monitoringopzet te komen. Vergelijking van de aanpak van de aannemer met die rationele opzet biedt vervolgens een aantal risicofactoren die door de aannemer aan te pakken zijn.

De aanpak die gevolgd is om dit doel te bereiken, bevat de volgende onderdelen:

- a. identificeren van de aanwezige onzekerheden bij de beheersing van zetting
- b. vaststellen van een rationele terugkoppeling van zakkingsmetingen naar TBM instellingen
- c. ontwikkelen van een methode voor het beoordelen en volgen van de door de aannemer geleverde prestaties langs het tracé.

De uitwerking van deze onderdelen werd vervolgens door de opdrachtgever gehanteerd om het door de aannemer gehanteerde werkproces te toetsen op de aanwezige kwaliteit.

Deze aanpak heeft geleid tot de volgende resultaten:

- a1. de in de praktijk aanwezige nauwkeurigheid van de zettingsmetingen kon bepaald worden door beoordelingscriteria voor de kwaliteit van een zettingsmeting te ontwikkelen.
- a2. de te verwachten minimaal aanwezige onzekerheid in zetting als gevolg van de natuurlijke variatie aan "grond invloedsfactoren" is begroot door andere referentiecasses te inventariseren.
- b1. de noodzaak is vastgesteld om beslissingen op een minimum aantal van 3 metingen te baseren en ieder afzonderlijk meetresultaten te valideren. Deze noodzaak vloeit voort uit de kans dat (faal-)incidenten tot vertekening van zettingsresultaten kunnen leiden; deze vertekening leiden tot een onbetrouwbare terugkoppeling. Metingen die niet gevalideerd konden worden zijn voorzien van een incidentrapportage. De faalhistorie die daardoor ontstaat vormt een hulpmiddel voor verbeteracties; het aantal keren dat een bepaalde incident optreedt is te hanteren om prioriteiten te stellen bij het aanpakken van verbeteringen.
- b2. Er is een meetraster vastgesteld met een minimum onderlinge afstand van de meetpunten. Deze afstand is afgeleid uit de noodzaak om de aanwezige beheersing van het bouwproces door op zichzelf staande ("onafhankelijke") zettingsmetingen vast te stellen.
- c1. De ISO 2859 (standaard voor acceptatie van resultaten op basis van steekproefsgewijze controle) is gehanteerd om een beoordelingsmethode voor de geleverde prestatie vast te stellen. Hiermee is een prestatieniveau te definiëren afhankelijk van de risico's zoals die in een gebied aanwezig zijn. Deze prestaties, die te vervolgen zijn, zijn daarbij gekoppeld aan criteria voor de intensiteit van het aantal meetpunten.
- c2. Een effectiever proces van terugkoppeling en bijsturing is ontworpen door de toevoeging van een tolerantie marge voor afwijkingen in de vorm van een "alert" waarde onder het contractueel vastgestelde "alarm". De breedte van deze marge is vastgesteld door de diverse aanwezige onzekerheden te combineren.

De case heeft laten zien dat door het hanteren van een ratio voor afwijkingen en incidenten, het mogelijk is om van een "ervaringsgestuurd" (zo doen we dat altijd) naar een traceerbaar werkproces te komen. De op HERMES gebaseerde prestatie monitoring is in staat om inherente onzekerheden te accepteren en incidenten gericht aan te pakken middels een "top drie aan invloedsfactoren".

5 Monitoring tijdens de beheersfase

Tijdens de beheersfase van een project wordt vaak gemonitord op basis van functionele eisen, bijvoorbeeld de vlakheid van de spoorbaan. Bij oudere objecten kunnen onverwachte problemen extra monitoring noodzakelijk maken. In dit hoofdstuk worden twee cases op dit gebied bekeken. De eerste case betreft de monitoring van schade aan de betonconstructie van viaducten langs de A59 met het doel de renovatie strategie te optimaliseren. De tweede case geeft aan hoe de keuze van een monitoringsstrategie tot stand komt, aan de hand van een betonnen ligger op twee steunpunten.

5.1 Voorbeeld toetsing monitorontwerp: Monitoraanpak HERMES; monitoren viaducten met ASR schade.

In de betonconstructie van de viaducten langs de A59 treedt schade op door een chemische reactie in de beton (de alkali-silicareactie, ASR). Door deze reactie worden de mechanische eigenschappen (met name de treksterkte) aangetast en treden vervormingen van de constructie op. Als dit proces doorgaat komt de veiligheid van de constructie in gevaar. Dit kan voorkomen worden door preventieve maatregelen. Via een monitoringssysteem tracht de beheerder van de viaducten enerzijds te voorkomen dat preventieve maatregelen te vroeg uitgevoerd wordt, anderzijds te beoordelen of de uitgevoerde maatregelen de beoogde effecten op de veiligheid hebben.

Deze praktijk case in het HerMes-project beoordeelt het monitoringssysteem dat op viaducten toegepast wordt om de effectiviteit van toegepaste conserveringsmaatregelen te volgen [Postema, Siemes, 2002]. In deze viaducten waar ASR schade is geconstateerd, zijn herstelwerkzaamheden uitgevoerd die moeten leiden tot uitdrogen van de constructie en vervolgens tot het stoppen van de zwellings als gevolg van ASR.

Het gestelde doel van de monitoring is om het gedrag van de constructie na de uitgevoerde verbeteracties te volgen door het meten van het vochtgehalte en de uitzetting van het wegdek.

De aanpak die gehanteerd is, is dat als uitgangspunt een algemene opzet is gemaakt voor risicobeheersing van de constructies. In die opzet wordt de beoordeling van detectiekansen van voortschrijdende ASR schade en de effectiviteit van maatregelen tot het beperken van die risico's uitgewerkt. Vervolgens zijn de HERMES criteria voor een rationeel ontwerp gehanteerd om vast te stellen in hoeverre het bestaande ontwerp daaraan voldoet.

De case laat zien dat de bij het ontwerp gehanteerde kwalitatieve uitgangspunten (vast stellen of de verbeteracties wel of niet werken) het verhinderen de vereiste en geleverde prestatie van het gehanteerde monitoringssysteem vast te stellen (hoe goed en hoe betrouwbaar moet het systeem zijn). Zo ligt de benodigde en de aanwezige effectiviteit niet expliciet vast. De te nemen maatregelen voor het geval dat de monitoringresultaten (ongewenste) voorschrijdende uitzetting zouden laten zien, waren uitgewerkt in een beslisschema. De onzekerheid over de effectiviteit van het monitoringssysteem had tot gevolg dat geconstateerde afwijkingen zouden kunnen leiden tot onzekerheid over zowel de toestand van het viaduct als onzekerheid over het monitoringssysteem.

De case geeft aan dat toepassing van de HERMES aanpak bij het monitoringontwerp in dit geval er toe geleid zou hebben dat aan de meting grenswaarden met te nemen acties gekoppeld zouden worden om de betrouwbaarheid van de meetresultaten te evalueren. De daarmee bepaalde effectiviteit van de meetmethode zou samen met het gehanteerde expansiemodel dan direct tot de aanwezige toestand vertaald kunnen worden.

De case heeft verder laten zien dat de gestelde "HERMES vragen" resulteren in het vastleggen van het "wat, wanneer, waarom, hoe" van het monitoringontwerp. Hierdoor wordt de monitoringaanpak op kwaliteit getoetst én gedocumenteerd in de vorm van "ijkpunten".

5.2 Voorbeeld: Vergelijking monitoringsstrategieën bij betonligger

Bij het opstellen van een rationele monitoringsstrategie moeten vele keuzes gemaakt worden. Hierbij kan gedacht worden aan

- de keuze tussen direct repareren of monitoren,
- de keuze tussen verschillende monitoringssystemen
- het vaststellen van interventie niveau's (de gemeten waarde waarbij reparatie noodzakelijk geacht wordt).

Voor rationele monitoring moeten deze keuzes met voldoende rationaliteit gemaakt worden, zodat een optimaal resultaat behaald wordt.

In deze case is de HERMES basis-filosofie toegepast op de monitoring van een gewapend betonnen ligger op twee steunpunten. De beslissing voor de optimale strategie is uitgewerkt op basis van beschikbare realistische gegevens. Het degradatiemechanisme in deze case, betreft de corrosie van wapening, waarbij als gevolg van de corrosie scheurvorming in de betondekking ontstaat.

Het doel is de betrouwbaarheid van deze ligger zeker te stellen [de Wit, 2000] door selectie van van de optimale monitoringstrategie, rekening houdend met de daaraan verbonden onzekerheden.

Op basis van de beschikbare gegevens is een voorspelling gemaakt van de betrouwbaarheid gedurende de levensduur. De vereiste betrouwbaarheid bleek niet gewaarborgd te zijn. Er zijn dus aanvullende maatregelen noodzakelijk. Vervolgens is het effect van twee monitoringstrategieën op de betrouwbaarheid uitgewerkt; één op basis van visuele inspecties en één op basis van metingen; daarbij als eerste stap de meting van de betondekking en de carbonatatie diepte, later gevolgd door een tweede stap met een electrochemische halfcelmeting.

De betrouwbaarheid van de constructie gedurende de levensduur is berekend, rekening houdend met de (gestelde) nauwkeurigheid en de detectiekans van de gehanteerde technieken. Hieruit volgt dat de betrouwbaarheid boven het benodigde minimumniveau gehouden kan worden. De gehanteerde inspectietermijn is daarbij bepaald uit het voorspelde conditieverloop gebruikmakend van de feitelijke “a-posteriori” gegevens.

De studie laat op basis van rationele (HERMES) criteria zien dat een “eenvoudige” strategie op basis van visuele inspecties even effectief kan zijn dan een ogenschijnlijk meer geavanceerde met metingen. Daarnaast geeft de studie aan dat het voor een harde vergelijking nodig is om de feitelijk aanwezige onzekerheden met een betrouwbaarheidsberekening door te rekenen.

6 Afsluiting en handreiking

In het ontwikkelingstraject HerMes is eerst een algemene opzet van rationele monitoring geschetst. Daarna is ervaring met verschillende aspecten hierin opgedaan door de verschillende case studies uit te werken. Deze case studies hebben geleid tot verbeteringen in de algemene opzet. Hoewel deze kennis nog niet volledig is, is de ontwikkeling wel zover dat deze voor de praktijk zeer bruikbare componenten bevat.

Om de algemene monitoringsfilosofie voor de praktijk toepasbaar te maken is de thans beschikbare kennis uitgewerkt in twee praktijkgerichte documenten:

- een procesbeschrijving (document 01.01.07-09)
- een checklist (document 01.01.07-08)

De procesbeschrijving geeft aan hoe een monitoringsproject rationeel opgezet kan worden. Deze bevat de fasering van het monitoringsproject en per fase weer aandachtspunten die chronologisch doorlopen moeten worden. Hierbij is ruime aandacht besteed aan de rationaliteit en de relaties met eerdere fasen en/of aandachtspunten. Deze procesbeschrijving is gericht op voor organisaties, die concrete monitoringsprojecten uitwerken en uitvoeren.

De checklist geeft aan hoe (een onderdeel van) een monitoringsproject op zijn rationaliteit beoordeeld kan worden. Deze checklist is bedoeld voor de opdrachtgever van een monitoringsproject. Bij het opzetten van de checklist is verondersteld dat deze opdrachtgever zelf niet de specialistische kennis bezit om het monitoringsproject uit te werken (daarom besteedt hij het werk intern of extern) uit aan een deskundige organisatie. De checklist moet hem echter wel in staat stellen het geleverde ontwerp of systeem op volledigheid en rationaliteit te beoordelen.

Referenties

[CUR 1997]

Civieltechnisch Centrum Uitvoering en Regelgeving

CUR-publicatie 190, 'Kansen in de civiele techniek, Deel 1: probabilistisch ontwerpen in theorie'

Gouda, maart 1997

[Hölscher, 2002]

Hölscher, P.

Invloed monitoring op betrouwbaarheid zettingsprognoses / Toepassing isotachen model

rapport GeoDelft, 710107.0087, oktober 2002

[DC Basisrapport HERMES, 2002]

Koelewijn, A.R. P. Hölscher, G.H. Wijnants

Monitoringsfilosofie HerMes; Waarom, Wat, Waar, Wanneer en in Welke mate meten & verwerken.

DelftCluster rapport 01.01.07-05, december 2002

[Koelewijn, 2000]

Koelewijn, A.R.

Monitoringsfilosofie - toepassing op de macrostabiliteitsproef in het Proefvak Actuele Sterkte

rapport GeoDelft, 71.01.07.01, oktober 2000

[Koelewijn, 2000b]

Koelewijn, A.R.

Monitoringsfilosofie – toepassing op referentiebaan No-Recess

Delft Cluster rapport 01.01.07.02, december 2000

[Siemes, Postema, 2002]

A.J.M. Siemes, F.J. Postema,

Monitoraanpak HERMES: Voorbeeld: Monitoren viaducten met ASR

Delft Cluster rapport 01.01.07.03, September 2002

[Wijnants, Brinkman, 2002]

G.H. Wijnants, Brinkman, J.

Projectoverzicht risicobeheersing vanuit de toetsende rol

rapport TNO Bouw, 2002-CI-R2074

[de Wit, 2000]

Vergelijking van monitoringsstrategieën op basis van HERMES-monitoringsfilosofie

Case studie: gewapend betonnen ligger

rapport TNO Bouw, 2000-CON-DYN-R2101, november 2000

General Appendix: Delft Cluster Research Programme Information

This publication is a result of the Delft Cluster research-program 1999-2002 (ICES-KIS-II), that consists of 7 research themes:

- ▶ Soil and structures, ▶ Risks due to flooding, ▶ Coast and river , ▶ Urban infrastructure,
- ▶ Subsurface management, ▶ Integrated water resources management, ▶ Knowledge management.

This publication is part of:

Research Theme	:	Soil and structures	
Baseproject name	:	Measuring, Monitoring and Exploration	
Project name	:	Monitoringsfilosofie Hermes	
Projectleader/Institute		dr. ir. P. Hölscher	GeoDelft
Project number	:	01.01.07	
Project duration	:	01-03-2000	- 31-12-2002
Financial sponsor(s)	:	Delft Cluster	
		GeoDelft	
		TNO Bouw	
		Bouwdienst Rijkswaterstaat	
		Dienst Weg- en waterbouwkunde	
		project organisatie HSL-Zuid	
		Waardse Alliantie	
Project participants	:	GeoDelft	
		TNO Bouw	
Total Project-budget	:	€ 571.000	
Number of involved PhD-students	:	0	
Number of involved PostDocs	:	0	

Delft Cluster is an open knowledge network of five Delft-based institutes for long-term fundamental strategic research focussed on the sustainable development of densely populated delta areas.



Keverling Buismanweg 4
 Postbus 69
 2600 AB Delft
 The Netherlands

Tel: +31-15-269 37 93
 Fax: +31-15-269 37 99
info@delftcluster.nl
www.delftcluster.nl

Theme Managementteam: Ground and Construction

Name	Organisation
rr. ir. P. van den Berg	GeoDelft
prof. dr. ir. J. Rots	TNO-Bouw

Projectgroep

During the execution of the project the researchteam included:

Name	Organisation
1 ir. F. J. Postema	Rijkswaterstaat Bouwdienst
2 dr. B.G.H.M. Wichman	Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde
3 ir. R.J. Aartsen	Projectorganisatie HSL Zuid
4 ir. W.O. Molendijk	Waardse Alliantie
5 dr. ir. P. Hölscher	GeoDelft
6 ir. G.H. Wijnants	TNO Bouw

Other Involved personnel

The realisation of this report involved:

Name	Organisation
1 dr.ir. P. Hölscher	GeoDelft
2 ir. G.H. Wijnants	TNO-Bouw