

C-14038 840

TNO-rapport
TNO-MEP -- R 99/430

TNO Milieu, Energie
en Procesinnovatie

**Pilotstudie naar de mogelijkheden voor de
ontwikkeling van een populatie-dynamisch
model voor de bioassay soort
*Corophium volutator***

TNO-MEP
Business Park E.T.V.
Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

Telefoon: 055 549 34 93
Fax: 055 541 98 37
Internet: www.mep.tno.nl

Datum
15 november 1999

Auteur(s)
R.G. Jak
M.G.D. Smit
C.C. Karman

Projectnummer
30476

Trefwoorden
Populatie model
Corophium
Bioassay

Bestemd voor
RIKZ
Mw. Drs. B.J. Kater

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1999 TNO

Het kwaliteitssysteem van TNO Milieu, Energie en
Procesinnovatie voldoet aan ISO 9001.

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie is een nationaal en
internationaal erkend kennis- en contractresearch instituut
voor bedrijfsleven en overheid op het gebied van duurzame
ontwikkeling en milieu- en energiegerichte procesinnovatie.



Nederlandse Organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de Algemene
Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, zoals
gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank en de
Kamer van Koophandel te 's-Gravenhage.

Samenvatting

Dit rapport is een pilotstudie naar populatiemodellen die bruikbaar zijn om bioassayresultaten door te vertalen naar populatie-effecten. Dit rapport kan als basis dienen voor een discussie over de haalbaarheid van deze modellen.

Met de slijkgarnaal *Corophium volutator* worden bioassays uitgevoerd ter beoordeling van de verontreinigingsgraad van mariene sedimenten. In deze bioassay wordt van een in het veld bemonsterd sediment wordt het effect op de sterfte na 10 dagen blootstelling bepaald. Het is niet bekend in hoeverre de waargenomen sterfte van invloed is op populaties in het veld. Eén van de methoden om populatie-effecten te analyseren of te voorspellen is het gebruik van populatiemodellen, waarin de gereduceerde overleving in de in-vivo bioassay als additionele sterfte wordt meegenomen. Dit rapport dient als pilotstudie naar de mogelijkheden een model te ontwikkelen dat hiertoe in staat is.

Als eerste stap is een korte inventarisatie uitgevoerd van verschillende typen populatiemodellen. Hierbij is een korte beschrijving gegeven van statistische, logische en mathematische modellen. Op basis van deze inventarisatie is een voorselectie gemaakt van modellen die nader geanalyseerd worden; minimodellen en modellen voor gestructureerde populaties.

Voor de geselecteerde modeltypen zijn een aantal praktijkvoorbeelden beschreven en getoetst aan de hand van de volgende criteria:

- Het model moet in staat zijn veldpopulaties van *Corophium* dynamisch te modelleren, rekening houdend met de levenscyclus gedurende het jaar.
- In het populatie-model moeten de effecten van bioassayresultaten geïncorporeerd kunnen worden.
- De invoergegevens voor het model moeten beschikbaar zijn, of eenvoudig beschikbaar gemaakt kunnen worden.
- De uitvoergegevens van het model moeten gekalibreerd en gevalideerd kunnen worden voor een veldpopulatie (van *Corophium*).

Daarnaast verdient het aanbeveling als het model relatief eenvoudig aan te passen is voor toepassing voor andere soorten en voor stoffen.

De volgende beoordeling is gegeven voor geselecteerde beschikbare modellen:

Overzicht van de beoordeling van modellen op basis van 4 criteria. De score + geeft aan dat aan het criterium voldaan kan worden, een ± als niet optimaal aan het criterium voldaan kan worden en een - dat niet aan het criterium voldaan wordt. Met (+) - is aangegeven dat het model in principe aan het criterium voldoet maar niet voor de hier gevraagde toepassing. Voor de benodigde invoergegevens geldt in het geval van + dat de hoeveelheid invoergegevens beperkt is en eenvoudig verkregen kan worden.

Model		Criteria			
Typering	Belangrijkste auteur(s)	Dynamische modellering	Bioassay resultaten	Benodigde Invoergegevens	Kalibratie -validatie
Logistisch (OMEGA)	Hendriks	(+) -	-	-	(+) -
Vervangingswaarde	Schobben	-	+	±	-
Voedselweb (CATS)	Traas	+	+	±	±
Matrix Grote stern	Boven & Schobben	+	+	+	+
Matrix <i>Leptocheirus</i>	McGee	+	+	+	+
Fysiologisch (DEB)	'Kooijman'	(+) -	+	-	(+) -
Matrix / Fysiologisch	Klok	±	-	(+) -	+

Op basis van de evaluatie wordt voorgesteld om een matrix-model uit te werken voor *Corophium*, waarin de effecten zoals waargenomen met bioassays eenvoudig kunnen worden ingebouwd.

Een belangrijke vraag is in hoeverre de effecten van sterfte en andere effectparameters doorwerken op de populatie-omvang. Hierbij speelt de wijze van populatie-regulatie (dichtheidsafhankelijk, predatie) in het veld een grote rol. Daarnaast treden de effecten op sterfte bij hogere concentraties op dan de effecten op subletale parameters als groei en reproductie. Dit kan bij doorvertaling van de effecten van sterfte naar veldpopulaties leiden tot een onderschatting van effecten op populatieniveau.

Geconcludeerd wordt dat een matrix-model de meeste kansen voor de gevraagde toepassing lijkt te bieden. In een workshop kan de haalbaarheid van een dergelijk model worden besproken, alvorens een keuze wordt gemaakt.

Inhoud

	pagina
Samenvatting	2
1. Inleiding.....	5
1.1 Achtergrond.....	5
1.2 Doel van het model	6
1.3 Populatie dynamica <i>Corophium volutator</i>	6
1.4 Beschikbare gegevens <i>Corophium</i> populatie	8
2. Populatie-dynamische modellen.....	9
2.1 Beschrijving typen modellen	9
2.1.1 Risicoanalyse	9
2.1.2 Mathematische modellen.....	10
2.2 Bruikbare modeltypen.....	11
3. Beschikbare modellen	12
3.1 Inventarisatie modellen	12
3.2 Evaluatiecriteria	12
3.3 Bespreking modellen.....	14
3.3.1 Minimodellen.....	14
3.3.2 Modellen voor gestructureerde populaties	18
4. Discussie.....	24
4.1 Beperkingen van populatiemodellen en bioassaygegevens	24
4.2 Evaluatie beschikbare modellen	26
5. Conclusies en aanbevelingen.....	28
5.1 Conclusies	28
5.2 Aanbevelingen.....	28
5.3 Vervolg.....	29
6. Referenties.....	30
7. Verantwoording	33

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

De Slijkgarnaal (*Corophium volutator*) wordt gebruikt als toetsorganisme in één van de in-vivo sediment bioassays die zijn ontwikkeld voor de biologische beoordeling van (verontreinigde) sedimenten (Schipper & Stronkhorst, 1999). De slijkgarnaal wordt in deze bioassay gedurende 10 dagen blootgesteld aan sediment, waarna de overleving gebruikt wordt als biologische indicator voor de verontreinigingsgraad van het sediment. Alhoewel een dergelijke indicator prima gehanteerd kan worden voor de onderlinge vergelijking van verschillende typen verontreinigd sediment, is het moeilijk hieraan een directe ecologische interpretatie te geven.

Voor ecologische interpretatie van de overleving van *Corophium volutator* in de in-vivo bioassay is het noodzakelijk deze om te zetten in het succes van een populatie van deze soort. Eén van de methoden om populatie-effecten te analyseren of te voorspellen is het gebruik van populatiemodellen, waarin de sterfte in de in-vivo bioassay als additionele sterfte naast de natuurlijke sterfte wordt meegenomen. Uit de resultaten van een dergelijke modellen kan worden opgemaakt of beperkte overleving als gevolg van blootstelling aan verontreinigd sediment ook zal leiden tot een gereduceerde omvang van een populatie van *Corophium volutator*. Op deze wijze levert een model een handvat om toxicologische gegevens op kwantitatieve wijze te extrapoleren naar veldpopulaties, waarbij de onzekerheid die bij deze extrapolatie gepaard gaat verminderd wordt ten opzichte van vaste applicatiefactoren.

Alhoewel populatiemodellen reeds voor verschillende soorten beschikbaar zijn, is het niet duidelijk of deze voor *Corophium* al toegepast worden. Alvorens over te gaan tot het ontwikkelen van een nieuw model dient te worden nagegaan welke informatie reeds beschikbaar is, en welke nog verzameld dient te worden.

In deze pilotstudie wordt een verkennend onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden tot het ontwikkelen van een model voor *Corophium*, waarbij de populatie op dynamische wijze beschreven wordt. Bij de inventarisatie en beschrijving zijn twee sporen gevolgd. In de eerste plaats is een beknopt overzicht gegeven van de verschillende typen modellen die voor de dynamische modellering van populaties kunnen worden gebruikt (hoofdstuk 2). Daarnaast zijn een aantal relevante modellen die in de ecotoxicologie worden toegepast nader uitgewerkt en beoordeeld (hoofdstuk 3). Dit laatste heeft betrekking op de bruikbaarheid voor het dynamisch modelleren van *Corophium* populaties in het veld, waarbij de effecten zoals waargenomen in bioassays kunnen worden ingebouwd. Tevens wordt bediscussieerd of de uitkomsten van bioassays alleen, waarin naar sterfte

wordt gekeken, voldoende zijn om de respons van verontreinigingen op populatieniveau te kunnen voorspellen (hoofdstuk 4).

De conclusies en aanbevelingen uit dit rapport kunnen als basis dienen voor een discussie over de haalbaarheid van modellen, gericht op de beperkingen van bioassays en (on)mogelijkheden van modellen om effecten op (veld)populatie-niveau te beschrijven (hoofdstuk 5).

1.2 Doel van het model

Het te ontwikkelen model zal bruikbaar moeten zijn om de uitkomsten van bioassays (sterfte na 10 dagen) te vertalen naar effecten op een populatie in het veld.

Behalve de mogelijk een dergelijk model te ontwikkelen, dient ook nagegaan te worden of zo'n model gekalibreerd en gevalideerd kan worden met (populatie-dynamische) gegevens voor veldpopulaties. Daarbij is het nodig inzicht te hebben in de informatie die aanwezig is over veldpopulaties, of eventueel nog voor dit doel verzameld dient te worden.

Voor het toekomstig gebruik van een uit te werken model is de toepasbaarheid voor andere (bioassay-)soorten en stoffen wenselijk.

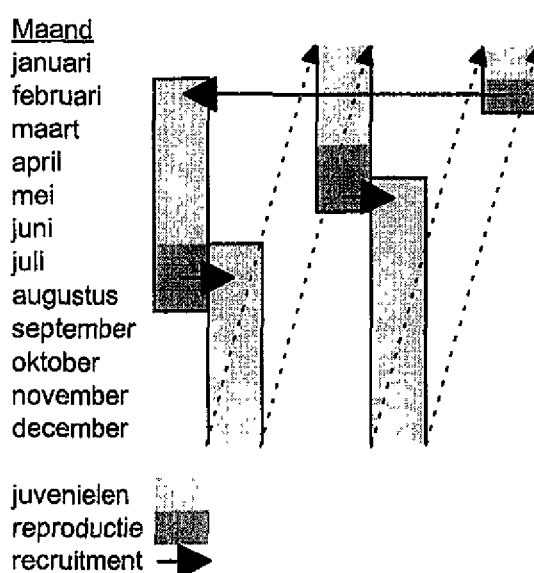
1.3 Populatie dynamica *Corophium volutator*

De populatie-ontwikkeling van *Corophium volutator* is gecompliceerd doordat zich in onze omgeving twee generaties per jaar ontwikkelen, welke elkaar deels overlappen. In feite ontwikkeld zich een beperkt aantal cohorten naast elkaar, zonder dat hierdoor een populatie met een stabiele leeftijdsopbouw ontstaat. In andere regio's kan ook sprake zijn van maar één generatie of wel drie generaties per jaar.

Slijkgarnalen hebben gescheiden geslachten (gonochorist), en mannetjes zijn vaak talrijker dan vrouwtjes (Forbes *et al.*, 1996). De meeste mannetjes verlaten hun eigen gangetje om vrouwtjes op te zoeken en eventueel te bevruchten. Dit laatste vindt plaats tijdens de vervelling, vóór het uitharden van de broedbuidel. Het aantal eieren varieert van 10 tot meer dan 70 en is afhankelijk van de grootte van de vrouwtjes (Muus, 1967). Ongeveer twee weken na de bevruchting verlaten gemiddeld ongeveer 25 tot 40 jongen het lichaam (Fish & Mills, 1979; Peer *et al.*, 1986).

In Figuur 1 is de populatieontwikkeling van *Corophium volutator* in de Nederlandse kustwateren schematisch weergegeven (op basis van Wilson &

Parker, 1996 en Ciarelli *et al.*, 1997). In februari verschijnen juvenielen die zich relatief snel ontwikkelen en in juli-augustus geslachtsrijp zijn en voor een nieuw cohort van juvenielen zorgt. De vrouwtjes sterven gewoonlijk na één of twee broedsels en blijven zelden in leven tot het volgende seizoen (Wilson & Parker, 1996). De jongen groeien op en overwinteren als subadult. In maart-april zijn ze geslachtsrijp en komt een nieuw cohort juvenielen tot ontwikkeling. Hieruit groeien de adulten op die in februari weer voor nageslacht zorgen. De consequentie is dat in het veld bijna gedurende het hele jaar zowel adulten als juvenielen kunnen worden aangetroffen. In april zijn echter vooral adulten aanwezig, in mei-juni vooral juvenielen.

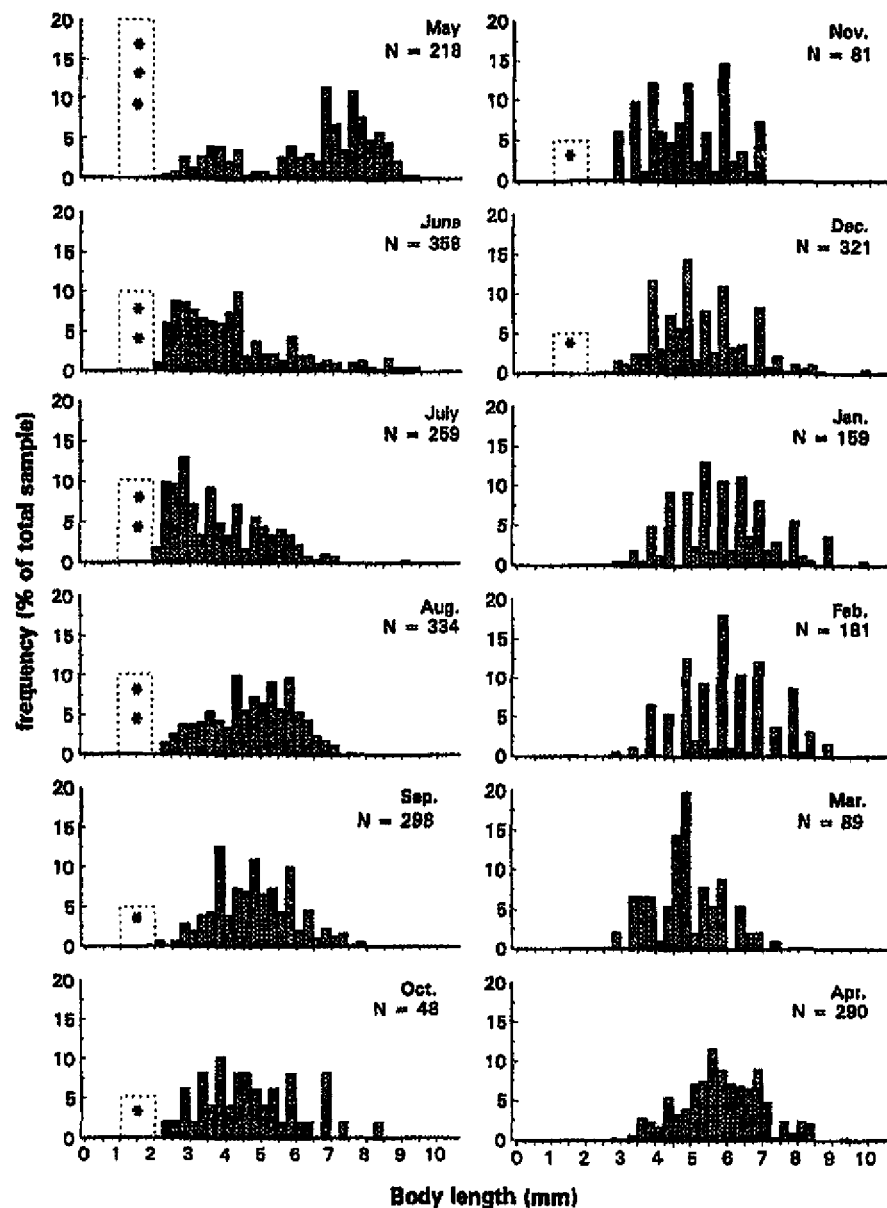


Figuur 1 Schematische weergave van de populatie-dynamiek en leeftijdsopbouw gedurende het jaar van de slijkgarnaal Corophium volutator in de Nederlandse kustwateren

Corophium volutator komt voor in getijdenezones bij sterk uiteenlopende saliniteiten. De maximale hoogte van voorkomen op getijdeplaten is gerelateerd aan de emersietijd (minimaal 10-20%), terwijl de maximum diepte van voorkomen vooral door biotische factoren bepaald wordt, zoals omwoeling van de bodem door zeepieten (Beukema & Flach, 1995). *Corophium* heeft een voorkeur voor fijne, slibrijke (voedselrijke) sedimenten. Op plaatsen waar de randvoorwaarden gunstig zijn kan de populatie dichtheidsgereguleerd zijn (intraspecifieke competitie) mits de invloed van predatoren (vogels, vis, evertibraten) gering is. Dichtheidsgereguleerde populaties bestaan uit een geringer aantal, maar grotere individuen, bij predatie-gereguleerde populaties zijn komen kleine individuen in grote dichtheden voor. Beide factoren spelen in het veld een rol (zie Jak *et al.*, 1999).

1.4 Beschikbare gegevens *Corophium* populatie

Voor de *Corophium*-populatie van de Oesterput (Oosterschelde) zijn voor de periode mei 1994 tot en met april 1995 lengte-frequentiehistogrammen en totale dichtheden beschikbaar (Figuur 2; Ciarelli *et al.*, 1997).



Figuur 2 Lengte-frequentie histogrammen van de *Corophium volutator* populatie in de Oesterput, van mei 1994 tot april 1995 (Uit: Ciarelli *et al.*, 1997). Sterretjes in de grootte-klasse tussen 1-2 mm geven aan dat er juvenielen aanwezig zijn (niet gekwantificeerd): *** = meer dan 50% van het totale monster; ** tussen 25 en 50% van het totale monster; * = juvenielen waargenomen maar niet meer dan 25% van het totale monster. N = totaal aantal verzamelde organismen (met uitzondering van de juvenielen van de kleinste grootte-klassen).

2. Populatie-dynamische modellen

2.1 Beschrijving typen modellen

2.1.1 Risicoanalyse

Voor de schatting van effecten op populaties en gemeenschappen kan gebruikt worden gemaakt van verschillende typen modellen. Door Schobben *et al.* (1992) worden voor risicoanalyse doeleinden drie type modellen onderscheiden:

1. Statistische modellen
2. Logische modellen
3. Mathematische modellen

Statistische modellen worden toegepast bij de schatting van het risico dat een populatie of gemeenschap effecten van een bepaalde blootstellingsconcentratie ondervindt. Deze modellen hebben betrekking op kansverdelingen (bijvoorbeeld de vergelijking van effect- en blootstellingsconcentraties), extrapolatie met behulp van regressiemodellen (bijvoorbeeld de schatting van de populatie-omvang gefit met stuurvariabelen), en optimalisatiemodellen (bijvoorbeeld de schatting van de populatieomvang op basis van optimaal gebruik van 'bronnen'). Statistische modellen worden vooral toegepast om een voorspelling te geven van de 'performance' van populaties of gemeenschappen op basis van stress en/of andere (stuur)variabelen. De modellen zijn statisch en geven dus geen beeld van de populatie- of gemeenschapontwikkeling in de tijd.

Logische modellen dienen om kwalitatieve inschattingen van de respons van verstoringen (stress) op populaties en gemeenschappen om te zetten in kwantitatieve responses. Voorbeelden zijn foutenbomen, expertsystemen, en rule-based modelling (waarin de richting van de respons geclassificeerd wordt). Deze modellen worden vooral gebruikt indien weinig kwantitatieve gegevens voorhanden zijn, en zijn vooral statisch. Dit type model kan niet voor de kwantitatieve (dynamische) beschrijving van populaties worden gebruikt.

Mathematische modellen trachten een verklarende (mechanistische) vereenvoudiging van de werkelijkheid te geven, waarbij vooronderstellingen worden gemaakt over de werking van processen (zoals dichtheidsafhankelijkheid, populatiegroei, interacties tussen soorten en dergelijke). Er kan onderscheid kan gemaakt worden tussen modellen op basis van differentiaalvergelijkingen, modellen op basis van differentievergelijkingen en individu-georiënteerde modellen.

Mathematische modellen hebben betrekking op een dynamische modellering van populaties en gemeenschappen en zijn daarom het meest relevant voor deze studie.

Om deze reden wordt dit type modellen verder uitgewerkt op basis van de inventarisatie van Schobben *et al.* (1992).

2.1.2 Mathematische modellen

Mathematische modellen betreffen zowel dynamische populatie- als ecosysteemmodellen. In het kader van deze studie zijn met name de populatiemodellen van belang. Een overzicht van deze populatiemodellen is weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Overzicht van mathematische modellen voor de dynamische beschrijving van populaties (naar Schobben *et al.*, 1992)

Type vergelijkingen	Kenmerk	Model
Differentiaal vergelijkingen	Homogene populaties	Minimodellen
	Onderscheid in stadia	Gestructureerde modellen
Differentie vergelijkingen	Leeftijdsklassen	Leslie-matrices
	Stadia of gewichtsklassen	Gemodificeerde Leslie-matrices
Individu georiënteerd		Individu georiënteerde modellen

2.1.2.1 Differentiaal vergelijkingen

Het type modellen op basis van differentiaalvergelijkingen geeft een continue beschrijvingen van veranderingen van variabelen in de tijd.

Minimodellen zijn eenvoudige modellen op basis van een beperkt aantal differentiaalvergelijkingen die bedoeld zijn om de algemene respons van soorten op verandering van stuurvariabelen (bijvoorbeeld voedsel of predatie) te voorspellen aan de hand van algemene aannames. Voorbeelden zijn exponentiële groei, logistische groeimodellen en Lotka-Volterra modellen. Deze modellen houden geen rekening met de demografie van populaties en bevatten (met uitzondering van prooi-predator modellen) geen term die mortaliteit expliciet beschrijft.

Modellen van gestructureerde populaties op basis van differentiaalvergelijkingen zijn in feite uitgebreide minimodellen, waarbij verschillende stadia ('compartimenten') worden onderscheiden binnen de populatie. Voor elk stadium beschrijven differentiaalvergelijkingen per tijdstap de dynamiek (aanwas, overgang naar volgende compartiment, sterfte). Deze modellen worden voornamelijk gebruikt voor soorten met een duidelijk gestructureerde populatieopbouw, waarbij de groei en voortplanting per stadium het best continu verondersteld worden. Dit is bijvoorbeeld het geval bij zooplanktonpopulaties met meerdere generaties binnen een seizoen, en vispopulaties waarbij volwassenen jaarlijks voor nakomelingen zorgen.

2.1.2.2 Differentievergelijkingen

Modellen op basis van differentievergelijkingen beschrijven veranderingen in de populatie als discrete gebeurtenissen en worden vooral toegepast op populaties

waarbij belangrijke processen, zoals reproductie of sterfte, zich vooral op een bepaald moment (van het jaar) afspelen. De populaties kunnen worden opgedeeld in leeftijdsklassen (op basis van lengte) of in levensstadia (op basis van morfologische kenmerken). Per onderscheiden groep binnen de populatie kunnen verschillende kenmerken of responses worden toegekend.

2.1.2.3 Individu-georiënteerde modellen

Individu-georiënteerde modellen worden gebruikt indien de respons van individuen van doorslaggevende betekenis is voor de populatiedynamica, bijvoorbeeld door heterogene verspreiding of lage aantallen individuen binnen een populatie. Per individu kunnen verschillende parameterwaarden worden toegekend.

2.2 Bruikbare modeltypen

Op basis van de beschrijving van de populatie-dynamica van *Corophium volutator* en het overzicht van de populatie-modellen blijkt het zinvol de aandacht vooral te richten op modellen die met een minimum aan benodigde gegevens in staat zijn tot een beschrijving van (effecten op) *gestructureerde populaties*. *Minimodellen* lijken het meest in aanmerking te komen om de effecten van *verontreinigd sediment* op 'generieke' populaties (dat wil zeggen populaties in een bepaalde stabiele geconditioneerde omgeving) te voorspellen. Modellen waarbij onderscheid wordt gemaakt in continue of discrete leeftijdsklassen of levensstadia, op basis van differentiaal- en differentiëmodellen respectievelijk, lijken het meest geschikt voor de ontwikkeling van modellen die de effecten op de dynamica van populaties in het veld kunnen modelleren (voorspelling en beschrijving).

3. Beschikbare modellen

3.1 Inventarisatie modellen

Naast de algemene beschrijving van typen modellen zoals beschreven in 2.1 is een inventarisatie uitgevoerd naar specifieke, reeds ontwikkelde, modellen die in aanmerking kunnen komen voor toepassing voor *Corophium*. Naar aanleiding van contacten met diverse experts op het gebied van populatie-modellering in relatie tot de effecten van toxische stoffen is een selectie van referenties opgesteld. Met de volgende personen is contact opgenomen: A.J. Hendriks (RIZA), J.H.M. Schobben (RIKZ), L.Maltby (University of Sheffield), B.L. McGee (U.S. Fish and Wildlife Service) en N.M. van Straalen (Vrije Universiteit, Amsterdam). De informatie uit de geselecteerde referenties wordt in paragraaf 3.3 samengevat en getoetst op bruikbaarheid aan de hand van de criteria genoemd in paragraaf 3.2.

3.2 Evaluatiecriteria

De geïnventariseerde modellen zullen op hun toepasbaarheid worden beoordeeld op basis van een aantal eisen. De belangrijkste criteria waaraan het model moet voldoen zijn:

- Het model moet in staat zijn veldpopulaties van *Corophium* dynamisch te modelleren, rekening houdend met de levenscyclus gedurende het jaar. Dit houdt in dat het model zodanig opgebouwd is dat de populatie-grootte en -opbouw gedurende perioden van het jaar kan worden geschat.
- In het populatie-model moeten de effecten van bioassayresultaten geïncorporeerd kunnen worden. Voor *Corophium* betekent dit dat de effectparameter sterfte gedurende de 10-daagse bioassay in het model kan worden opgenomen om de effecten op populatie-niveau tot uiting te laten komen.
- De invoergegevens voor het model moeten beschikbaar zijn, of eenvoudig beschikbaar gemaakt kunnen worden. Dit betekent dat de parameterwaarden voorhanden moeten zijn, of uit veldwaarnemingen (populatie-monitoring) af te leiden zijn.
- De uitvoergegevens van het model moeten gekalibreerd en gevalideerd kunnen worden voor een veldpopulatie. Met kalibratie wordt bedoeld het zodanig bijstellen van parameterwaarden dat de modeluitkomsten de gemeten waarden zo dicht mogelijk benaderen. Met validatie wordt bedoeld dat het gekalibreerde model wordt getoetst met een onafhankelijke data set. Voor deze studie is het niet relevant een onderscheid tussen deze begrippen te maken. Het gaat erom of (beschikbare) monitoringgegevens voor *Corophium* gebruikt kunnen worden voor de kwantificering of bijstelling van de parameterwaarden.

Naast de bovengenoemde criteria wordt het wenselijk geacht indien het model relatief eenvoudig aan te passen is voor toepassing voor andere soorten en voor stoffen.

Bij de bespreking van de modellen wordt bediscussieerd in welke mate aan de gestelde criteria wordt voldaan. Voorafgaand aan de beoordelingen worden de volgende opmerkingen gemaakt. Het kunnen incorporeren van de effecten uit bioassays geldt als belangrijkste randvoorwaarde. Op voorhand lijkt het duidelijk dat met een toename van de complexiteit van het model ook de hoeveelheid benodigde gegevens toe zal nemen. Indien meer beschikbare gegevens in het model gebruikt kunnen worden is het waarschijnlijk dat de uitkomsten een betere, of minder onzekere, schatting geven. Daarnaast geldt dat modellen vaak zodanig aangepast kunnen worden dat beter aan het criterium voldaan kan worden. De meeste modellen zijn namelijk niet expliciet ontwikkeld voor extrapolatie van toxiciteitsgegevens uit bioassays naar populatie-effecten. Ook kunnen criteria soms niet los van elkaar gezien worden. Als dynamische modellering niet mogelijk is, is validatie aan een (dynamische) veldpopulatie ook niet mogelijk. Omdat kalibratie in feite een vereiste is voor elk goed model, is het criterium toegespitst op de (dynamische) validatie van veldpopulaties op basis van de beschikbare gegevens gepresenteerd in 1.4.

3.3 Bespreking modellen

3.3.1 Minimodellen

3.3.1.1 Toxische effecten in model op basis van logistisch groeimodel; OMEGA

Door Hendriks & Enserink (in Hendriks, 1995) is een populatiemodel beschreven dat de reductie van de populatiegroeisnelheid berekent bij een blootstellingsconcentratie C . Het is onderdeel van het programma Optimal Modelling in Ecotoxicological Assessments; OMEGA. Het populatiemodel is afgeleid van het logistisch groeimodel en kan als volgt worden uitgedrukt:

$$\frac{r(C)}{r(0)} = \frac{\ln\left(1 + \left(\frac{C}{LC50}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right) - \ln\left(1 + \left(\frac{C}{EC50}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right)}{\ln\left(\int_0^{\infty} l(a) * m(a) * da\right)} + 1$$

Waarin:

- $r(C)$ = populatiegroeisnelheid bij (contaminant) concentratie C
- $r(0)$ = populatiegroeisnelheid bij (contaminant) concentratie = 0
- LC_{50} = mediane letale concentratie (50% overleving)
- EC_{50} = concentratie waarbij reproductie 50% is
- β = helling van dosis-respons curves
- $l(a)$ = fractie overleving van leeftijdsklasse a
- $m(a)$ = aantal nakomelingen per individu tijdens leeftijdsinterval da
- a, da = leeftijd en leeftijdsinterval

Criterion populatie-dynamica

Het model is bruikbaar voor het bepalen van de effecten van enkelvoudige stoffen op de groeisnelheid van populaties en niet op de omvang of leeftijdsstructuur van populaties. Beschrijving van de populatiefluctuaties als functie van de tijd is niet expliciet het doel van het model. De populatiegroeisnelheid wordt als het ware constant beschouwd, hetgeen relevant is voor soorten met meerdere generaties binnen een groeiseizoen, zoals watervlooien, of voor soorten met één nieuwe generatie per jaar (jaarklasse).

In zijn huidige vereenvoudigde vorm wordt geen onderscheid in verschillende levensstadia gemaakt. Het is mogelijk leeftijds-specifieke overleving en aantal nakomelingen per individu over een bepaalde tijdsinterval in te bouwen. Dit is alleen zinvol als ook dosis-respons relaties voor verschillende leeftijdsgroepen beschikbaar zijn (zie onder).

criterium bioassayresultaten

Het model is bedoeld om het effect van de concentratie van enkelvoudige stoffen op de populatie groeisnelheid te schatten aan de hand van beschikbare concentratie-respons curves voor deze stof voor de effecten op overleving en reproductie. Met bioassays wordt juist de reductie van de overleving vastgesteld bij een bepaalde onbekende blootstellingsconcentratie in het veld. In die zin is het model dus niet geschikt om resultaten uit bioassays te gebruiken.

 criterium invoergegevens

Als invoergegevens gelden de dosis-respons relaties voor contaminanten. Indien (biobeschikbare) veldconcentraties bekend zijn kunnen effecten van deze stoffen op de populatiegroeisnelheid worden geschat. Er wordt geen optimaal gebruik gemaakt van de beschikbare monitoringgegevens voor *Corophium*.

 criterium kalibratie en validatie

Het model wordt gekalibreerd aan de hand van schattingen van de populatiegroei onder niet-gecontamineerde condities. Kalibratie van het bestaande model is uitgevoerd voor aalscholvers in het veld en is ook bruikbaar voor toepassing voor andere soorten. Voor de validatie van de hier bedoelde dynamische modellering van *Corophium*-populaties in het veld is het model niet geschikt.

3.3.1.2 Vervangingswaarde model

Door Schobben *et al.* (1996) is voor een aantal 'zoutwater-AMOEBE' soorten een eenvoudig model opgesteld om de potentiële effecten van stressfactoren op de vervangingswaarde van populaties te berekenen. Het model veronderstelt dat tussen verschillende jaren de populatie-omvang (dichtheden van een stabiel populatie) niet verandert; de vervangingswaarde $V = 1$. Het model gaat voor alle soorten uit van twee stadia: het juveniele stadium en het adulte stadium. Op basis van literatuurgegevens zijn een aantal populatieparameters ingeschat, waarbij rekening gehouden is met natuurlijke sterfte, te weten:

- R = het aantal juvenielen per jaar
- C_{juv} = de jaarlijkse overleving in het juveniele stadium
- C_{ad} = de jaarlijkse overleving in het adulte stadium
- T_{juv} = de gemiddelde duur van het juveniele stadium
- T_{ad} = de maximale duur van het adulte stadium

De vervangingswaarde kan als volgt worden uitgedrukt:

$$V = (C_{juv})^{T_{juv}} * \left(\frac{(C_{ad})^{T_{ad}}}{Ln(C_{ad})} - \frac{1}{Ln(C_{ad})} \right) * R$$

Aan de hand van de gevonden parameterwaarden en de ranges daarin en uitgaande van een vervangingswaarde van 1 (stabiële populaties), is de set van parameterwaarden gefit. Effecten van toxische stoffen en andere stressfactoren

worden verdisconteerd door reductie van de juveniele, dan wel adulte overleving. Door de eenvoudige opzet van het model is het eenvoudig toe te passen voor verschillende soorten.

criterium populatie-dynamica

Het model is niet bedoeld om de jaarlijkse dynamiek van populaties te beschrijven, sterker nog, het gaat uit van gelijke populatie-omvang gedurende het jaar.

criterium bioassayresultaten

Het model is bedoeld om de effecten van stress op de verschillende levensstadia door te laten werken op de populatie-omvang, uitgedrukt in een relatieve maat (de vervangingswaarde). De effecten van bioassays zijn dus eenvoudig in een dergelijk model te verwerken. De geldigheid van de extrapolatie van de 10-daagse bioassay mortaliteit naar mortaliteit voor het de gehele periode van het juveniele en geslachtsrijpe stadium is echter de vraag.

criterium invoergegevens

Voor de invoergegevens wordt uitgegaan van generieke (literatuur) gegevens voor het beperkte aantal populatie-dynamische parameters. In feite zijn alle parameters die relevant zijn voor reproductie-effecten (zoals reductie van het aantal eieren, reductie van het aantal nakomelingen, sterfte bij juvenielen) samengevat in de parameter sterfte juvenielen. Effecten op afzonderlijke subletale (reproductie) effecten zijn daardoor moeilijk toe te passen, effecten op sterfte van adulten zijn echter eenvoudig te gebruiken. Er wordt geen optimaal gebruik gemaakt van de beschikbare monitoringgegevens voor *Corophium*.

criterium kalibratie en validatie

De parameters die in het model gebruikt worden zijn niet of nauwelijks op jaarbasis te verifiëren met veldgegevens voor soorten met een korte generatie-cyclus. Alleen de populatiegrootte is relatief eenvoudig vast te stellen, hetgeen voor de evaluatie van effecten van toxische stoffen voldoende kan zijn. Op deze wijze wordt echter voorbijgegaan aan eventuele effecten op de populatie-opbouw.

3.3.1.3 Voedselweb model; CATS

Door Traas en anderen (zie bijv. Traas *et al.*, 1996; Traas *et al.*, 1998) is een 'familie' van dynamisch modellen ontwikkeld dat toegepast wordt voor de analyse van effecten van toxische stoffen op voedselwebben (CATS: Contaminants in Aquatic and Terrestrial ecoSystems). Met deze modellen kan het gedrag van stoffen (en bioaccumulatie) en de effecten daarvan op ecosysteem worden geschat. De modellen zijn gebaseerd op de wet van behoud van massa en bestaat uit een set van differentiaalvergelijkingen. Dit geldt zowel voor de massa van de stoffen, als voor de biomassa. Voor het model wordt de respons van organismen uitgedrukt in de ontwikkeling van biomassa van functionele groepen. Deze functionele groep kan ook een enkele soort zijn. Voor een soort (functionele groep) wordt de biomassa beschreven met een massa-balans vergelijking op basis van het

logistisch groeimodel (Traas *et al.*, 1996), waarbij de biomassa tot stand komt door assimilatie of productie en door verliesfactoren (respiratie, predatie, sterfte). Voor dierlijke organismen geldt de volgende vergelijking:

$$\frac{dD}{dt} = \text{Assimilatie} - \text{Respiratie} - \text{Predatie} - \text{Mort}_{\text{nat}} - \text{Mort}_{\text{tox}}$$

Naast de natuurlijke sterfte (Mort_{nat}) wordt ook sterfte door toxische stoffen (Mort_{tox}) in het model betrokken. Deze sterfte wordt geschat aan de hand van een sigmoïde dosis-respons curve op basis van bekende acute toxiciteitsgegevens voor een soort, gecorrigeerd voor de blootstellingsduur (Traas *et al.*, 1998). De mortaliteit μ als gevolg van de toxische stof wordt dan als volgt vastgesteld:

$$\mu = \frac{1}{D} \ln \left(1 + \left(\frac{c}{a} \right)^b \right)$$

Met:

- D = duur van het experiment
- c = concentratie van de toxische stof
- a = LC_{50}
- b = helling van de dosis-respons curve

criterium populatie-dynamica

De biomassa van de populatie wordt dynamisch beschreven. Er wordt hierbij echter geen onderscheid gemaakt in verschillende (leeftijd- of grootte)klassen.

criterium bioassayresultaten

Het model incorporeert de gegevens uit toxiciteitsexperimenten als invoer voor de voorspelling van de populatie-respons. Deze toxiciteitsgegevens hebben dus betrekking op enkelvoudige stoffen. Het model kan waarnemingen uit bioassays wel incorporeren door daarvoor de sterftefactor μ (Mort_{tox}) te gebruiken. Aanname daarbij is dat de mortaliteit uit de bioassay rechtstreeks kan worden geëxtrapoleerd naar de mortaliteit over de gehele levensduur.

criterium invoergegevens

Als invoer zijn dynamische gegevens nodig over de voedselbeschikbaarheid en verliesfactoren, zoals door predatie. Voor de te modelleren populatie(s) worden gegevens over dichtheden gebruikt. Er wordt geen gebruik gemaakt van de grootteverdeling van de organismen binnen een populatie. In die zin wordt geen optimaal gebruik gemaakt van de beschikbare monitoringgegevens van *Corophium*.

criterium kalibratie en validatie

Het model is gekalibreerd met metingen uit modelecosystemen (microcosms)

waaraan, naast de controle systemen, verschillende concentraties pesticiden zijn toegevoegd. Voor de validatie van het model zijn naast de omvang en dynamiek van de *Corophium*-populatie ook gegevens nodig over sturende factoren als voedselbeschikbaarheid en predatie.

3.3.2 Modellen voor gestructureerde populaties

3.3.2.1 Matrix model Grote stern

Door van Boven & Schobben (1993) is een Leslie matrix-model opgesteld voor de Grote Stern, met het doel de populatie-aantallen op kwantitatieve wijze te voorspellen. De Leslie-matrix gaat uit van een populatie die is onderverdeeld in verschillende leeftijdsklassen of stadia. Elke klasse wordt gekarakteriseerd door een specifieke sterfte en vruchtbaarheid, welke door stuurvariabelen, zoals toxische concentraties, kunnen worden beïnvloed. De belangrijkste aanname hierbij is dat de sterfte en reproductie evenredig zijn met de aantallen per klasse (en dus niet dichtheids-afhankelijk zijn). Door Boven & Schobben (1993) wordt aangegeven dat onder enkele aannames verschillende eigenschappen van de populatie bepaald worden, zoals de stabiele populatieopbouw, de snelheid waarmee de stabiele populatieopbouw wordt bereikt, de reproductieve waarde van individuen uit verschillende leeftijdsklassen, de levensverwachting van individuen van verschillende leeftijden, de verwachte gemiddelde leeftijd in een populatie en de fractie dode individuen dat men per leeftijdsklasse verwacht te vinden.

Door Boven & Schobben (1993) is het matrix-model uitgebreid met dichtheidsafhankelijkheid, waardoor de populatie niet alleen maar exponentieel toe- of af zal nemen, maar realistischere fluctuaties zal vertonen. Het model gaat uit van dichtheden per jaar, en voorspelt dus de dynamiek van populaties tussen jaren, hetgeen voor vogels een relevante tijdschaal is. Het model is daarnaast ook uitgewerkt voor den aantal andere vogelsoorten, vissen en zeezoogdieren (Schröder & Schobben, 1997).

criterium populatie-dynamica

Het model zoals hierboven beschreven is in staat om de dynamiek van de populatie-omvang op jaarbasis te modelleren. Ook voor organismen met een kortere levenscyclus is het model bruikbaar om het aantalsverloop van verschillende grootte- of leeftijdsklassen dynamisch te modelleren.

criterium bioassayresultaten

De effecten zoals waargenomen in bioassays kunnen gebruikt worden door de sterfte term voor het relevante stadium (of stadia) aan te passen, waardoor de fractie van een bepaalde klasse die de opeenvolgende klasse bereikt kleiner wordt. Ook hier is het weer de vraag of een bioassay de mortaliteit voor alle verschillende stadia adequaat kan voorspellen.

criterium invoergegevens

Als invoer gegevens worden gebruikt het aantal jongen (broedsucces) dat per tijdseenheid (jaar) geproduceerd wordt en de mortaliteit (gebaseerd op literatuur over ringgegevens). Voor *Corophium* zou de sterfte uit het verloop van de aantallen en grootte-frequentie geschat kunnen worden. Door het onderscheid in verschillende levensstadia kan goed gebruik gemaakt worden van de beschikbare monitoringgegevens voor *Corophium*.

 criterium kalibratie en validatie

Het model kan gekalibreerd/gevalideerd worden met dynamische gegevens over de populatie-aantallen en -structuur van veldpopulaties.

3.3.2.2 Matrix-model voor de bioassay amphipode *Leptocheirus*

Door McGee en Spencer (McGee & Spencer, in prep.; Spencer & McGee, in prep.) is een populatie-model ontwikkeld dat de effecten van bioassays met de amphipode *Leptocheirus plumulosus* beschrijft. *L. plumulosus* heeft een kortere levenscyclus dan *Corophium volutator*. Onder laboratoriumcondities wordt binnen 25 dagen het volwassen stadium bereikt, door een vrouwtje worden meerdere broedsels geproduceerd (tot 40 jongen per broed) en hebben een levensduur die meer dan 100 dagen kan bedragen.

Het model karakteriseert de populatie-dynamica aan de hand van een stadium-gestructureerd matrix model (cf. Caswell, 1989) met 4 stadia: eieren, nakomelingen, juvenielen en adulten. Verschillende transitie matrices zijn opgesteld die veranderingen in mortaliteit, groei en fecunditeit beschrijven voor de verschillende seizoenen. Met andere woorden, voor 7 perioden in het jaar is op basis van veldwaarnemingen (tijdseries van stadium-dichtheden) een schatting gemaakt van de populatie-parameters die in 7 matrices zijn gebruikt. De studie geeft tevens aan wat de gevoeligheid is van de verschillende 'vital rates' voor de populatie groeisnelheid.

Het model kan als volgt worden uitgedrukt:

$$\begin{aligned} e_{t+1} &= P_e \cdot e_t + F \cdot a_t \\ r_{t+1} &= P_r \cdot r_t + G_e \cdot e_t \\ J_{t+1} &= P_j \cdot j_t + G_j \cdot r_t \\ a_{t+1} &= P_a \cdot a_t + G_a \cdot r_t \end{aligned}$$

Met e , r , j en a zijn de dichtheden van respectievelijk eieren, nakomelingen, juvenielen en adulten, en $t+1$ en t de successieve tijdstappen. P_i is de kans dat een individu in stadium i overleeft en in stadium i blijft, G_i is de kans dat een individu overleeft en doorgroeit naar het volgende stadium, en F is de eiproductie per adult.

criterium populatie-dynamica

Het model is opgesteld om populaties dynamisch te modelleren op basis van een beperkt aantal onderscheiden stadia: eieren, nakomelingen, juvenielen en adulten. Het model maakt onderscheid in 7 'seizoenen' per jaar, waarvoor verschillende parameterwaarden gelden.

 criterium bioassayresultaten

Het model maakt expliciet gebruik van de resultaten van 10-daagse toxiciteitstesten met natuurlijke sedimenten en voldoet dus optimaal aan het gestelde criterium. De vraag is echter in hoeverre de bioassay de mortaliteit over de gehele levensduur voorspelt. In de bioassays wordt gebruik gemaakt van juvenielen. Er is aangenomen dat er geen extra sterfte optreedt in het adulte stadium. Een andere aanname is dat de organismen het gevoeligst zijn gedurende de zomer. De effecten met de bioassays zijn bepaald onder deze zomercondities ('worst case').

 criterium invoergegevens

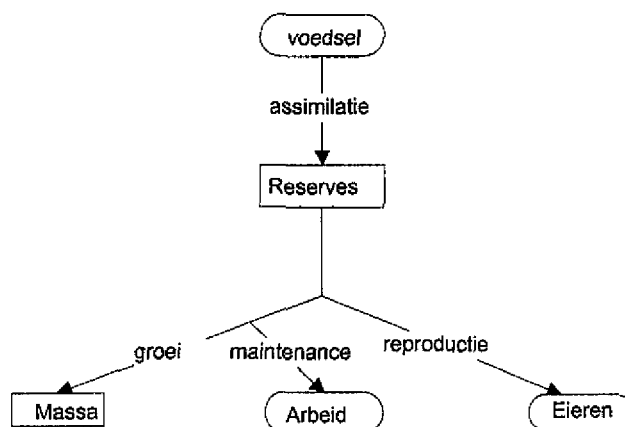
Het model is gekalibreerd met een veldpopulatie van *Leptocheirus*. Als invoer gegevens zijn veldmonitoringsgegevens betreffende dichtheden en grootteklasseverdelingen gebruikt, welke min of meer overeenkomen met die beschikbaar zijn voor *Corophium*. De invoergegevens (parameterwaarden) zijn opgesteld voor de periode van een week. De mortaliteit die in bioassays over een periode van 10 dagen wordt bepaald, is gecorrigeerd naar 7 dagen. Gesteld mag worden dat het model optimaal gebruik kan maken van de beschikbare monitoringgegevens voor *Corophium*.

 criterium kalibratie en validatie

Het model is gekalibreerd aan een veldpopulatie. Een jaarlijkse groei snelheid (λ) van 1.02 werd vastgesteld, wat impliceert dat de populatie stabiel is tussen verschillende jaren. Door de sterfte aan te passen met de overleving zoals waargenomen in bioassays werden λ -waarden lager dan één bereikt, hetgeen tot uiting kwam in de populatiegrootte van de corresponderende (deel-)gebieden.

3.3.2.3 Fysiologische modellen; DEB

Van Haren (1995) heeft een populatie model ontwikkeld voor de nematode *Globodera pallida* op basis van de DEB theorie (zie Kooijman & Bedaux, 1996). Deze theorie beschrijft de allocatie van energie budgetten naar basale processen binnen een organisme. Het DEB model kan dus beschouwd worden als een individu-georiënteerd model. De belangrijkste processen waarvoor mechanistische veronderstellingen zijn opgesteld zijn assimilatie, groei, reproductie en onderhoud (maintenance) in relatie tot voedselopname. Figuur 3 geeft de genoemde processen weer met hun onderlinge samenhang.



Figuur 3 Allocatie van uit voedsel verworven energie over de belangrijkste levensprocessen. (Uit Kooijman & Bedaux, 1996).

Criterion populatie-dynamica

Het model geeft op basis van het voedsel aanbod en de intraspecifieke competitie binnen een populatie de lengte verdeling binnen de nematoden populatie en een schatting van de populatie omvang aan het eind van de aardappel groei tijd. Het voedsel aanbod wordt gekarakteriseerd door de groei van aardappelplanten, waarbij rekening wordt gehouden met het negatieve effect van nematoden op de plant. Het model is niet bedoeld om dynamische populaties te beschrijven.

Criterion bioassay resultaten.

Het model is niet ontwikkeld om resultaten van bioassays in te incorporeren. Populatie omvang wordt geschat op basis van voedsel aanbod en intraspecifieke competitie. In principe kunnen de effecten van toxische stoffen op de allocatie van energie worden bepaald. De sterfte die uit bioassays wordt verkregen is ook dan niet toe te passen.

Criterion invoer gegevens

De invoergegevens voor het model zijn eigenschappen van individuen welke bepaald kunnen worden onder laboratoriumcondities. Deze eigenschappen als groei en reproductie kunnen geëxtrapoleerd worden om populatie dynamica in het veld te voorspellen. Deze gegevens passen echter niet bij monitoring-gegevens betreffende de dynamica van veldpopulaties.

Criterion kalibratie en validatie

Voor kalibratie kunnen gegevens van experimentele studies worden gebruikt, voorhanden. Op basis van populatieomvang in veld situaties is het mogelijk het model te valideren.

Het beschreven model is niet geschikt voor het voorspellen van populatie gegevens van *Corophium*. De DEBtheorie als zodanig is echter wel geschikt voor het opstellen van een dergelijk model. Parameters die de populatie dynamica

bepalen zijn onder andere groei, sterfte en reproductie. Het is mogelijk om de energiebudgetten beschikbaar voor deze processen met de DEBtheorie te definiëren. Toxische stoffen hebben een invloed op de allocatie van energie budgetten en derhalve een impact op de performance van de populatie. Op basis van door Kooijman en Bedaux gepubliceerd werk (1996) zou een dergelijk model voor *Corophium* ontwikkeld kunnen worden. Het is echter niet mogelijk met de DEBtheorie om met de parameter sterfte alleen een inschatting te maken van de populatie dynamica.

3.3.2.4 Matrix-model gecombineerd met fysiologisch model: effecten van koper op de worm *Lumbriculus*

Door Klok & Roos (1996) is een combinatie gemaakt van een individu-gebaseerd fysiologisch model (Dynamic Energy Budget model) met een grootte-gestructureerd matrix model (Caswell, 1989). Met dit model zijn de effecten van koper op de voeding en het metabolisme van de terrestrische worm *Lumbriculus rubellus* gebruikt om de groei en reproductie te kunnen voorspellen. Hierbij is gebruik gemaakt van toxiciteitsgegevens betreffende de effecten op de individuele groei en reproductie. Als referentie dient een maximale populatie-groeisnelheid, in afwezigheid van toxische stress. Daarnaast is aangenomen dat er optimale condities aanwezig zijn, dat wil zeggen een overvloed aan voedsel en de afwezigheid van predatoren.

Het beschreven model komt min of meer overeen met het matrix-model voor *Leptocheirus*, waarbij de individuele groei, reproductie en overleving zijn beschreven conform het Dynamic Energy Budget (DEB-)model.

criterium populatie-dynamica

Het model is niet ontworpen om de populatie-dynamiek van een soort te modelleren, maar om de effecten op de populatie-groeisnelheid te bepalen.

criterium bioassayresultaten

In het model wordt uitgegaan van de beschikbaarheid van toxiciteitsgegevens van enkelvoudige soorten op relevante parameters (sterfte, groei). In principe is het mogelijk dat ook de effecten zoals waargenomen in bioassays in het model ingebouwd worden, analoog aan het matrix-model voor *Leptocheirus* (zie boven). Door kalibratie met een veldpopulatie op een schone lokatie kunnen de effecten van toxische stoffen worden geschat (met de aanname dat andere stressfactoren gelijk zijn). Hiertoe dient de populatiegroeisnelheid op verschillende lokaties bepaald te worden. In feite geldt dit principe voor alle andere modellen ook.

criterium invoergegevens

Het model maakt gebruik van laboratorium toxiciteitsgegevens als invoer. Daarnaast is gebruik gemaakt van aannames ten aanzien van levenscyclus parameters, zoals de maximale levensduur. In plaats van deze aannames kan ook gebruik worden gemaakt van gegevens voor veldpopulaties.

criterium kalibratie en validatie

Het model kan gekalibreerd en gevalideerd worden met gegevens over de leeftijds- of groottesamenstelling van veldpopulaties. Door de toepassing van zowel een fysiologisch- als een matrixmodel neemt de onzekerheid van de schattingen toe. Hierdoor kan het effect zoals waargenomen in bioassays klein worden ten opzichte van de onzekerheid.

4. Discussie

4.1 Beperkingen van populatiemodellen en bioassaygegevens

Een belangrijke vraag is of de gegevens uit bioassays voldoende zijn om de effecten van toxische stoffen op veldpopulaties kunnen verklaren dan wel voorspellen. De mortaliteit van adulten, de parameter die met bioassays wordt vastgesteld, is slechts één van de parameters die belangrijk zijn voor de beschrijving van de populatie-dynamica. Andere relevante parameters zijn leeftijd van eerste reproductie, grootte van het broedsel, aantal nakomelingen, tijdsduur van de reproductieve periode, en juveniele overleving (Sibly, 1996). Daarnaast wordt de omvang van een populatie op een bepaalde lokatie nog bepaald door predatie, competitie, emigratie en immigratie. De populatie-groeisnelheid wordt, als integrale maat voor de effecten van toxische stoffen op de verschillende 'vital rates' (parameters die de populatie groeisnelheid beïnvloeden), beschouwd als een betere en ecologisch relevantere maat voor het bepalen van de response op toxische stress dan de afzonderlijke parameters.

Het vaststellen van al de afzonderlijk parameters die de populatie-groeisnelheid bepalen is zelfs onder laboratoriumcondities een moeilijke taak. Organismen met een korte levenscyclus vormen waarbij de gewenste parameters eenvoudig te scoren zijn met behulp van een 'life table response experiment' (Caswell, 1989). Voor *Corophium* is deze aanpak complex en voor het gebruik in bioassays niet relevant. Logischer lijkt het een selectie te maken van die parameters die de populatiegroei voor het grootste deel bepalen. Dit zijn niet per se de parameters die het gevoeligst zijn voor toxische stoffen. De gevoeligheid van een populatie wordt niet alleen bepaald door de intrinsieke gevoeligheid voor toxische stoffen, maar ook door het type levenscyclus. Zo blijkt de leeftijd van eerste reproductie zeer belangrijk voor populaties met een hoge reproductie, en vruchtbaarheid en overleving voor stabielere, langzaam groeiende populaties (Stearns, 1992). Grote effecten van (toxische) stress op bepaalde populatie parameters hoeven de populatie groei snelheid dus niet sterk te beïnvloeden. Andersom kunnen kleine effecten op een bepaalde parameter grote consequenties hebben voor de populatiegroei (zie bijvoorbeeld Kammenga *et al.*, 1996). Overigens hebben vele studies aangetoond dat de effecten op de populatie-groeisnelheid een minder gevoelige parameter is dan de effecten op parameters op individu-niveau (Maltby, in prep.). Ook Forbes & Calow (1999) concluderen uit een theoretische beschouwing en een analyse van ecotoxicologische gegevens dat er geen consistent patroon is met betrekking tot de meest gevoelige parameter voor toxische stress en de doorwerking op de populatie-groeisnelheid.

Uit een analyse van de bruikbaarheid van demografische analyse om de populatie-effecten van toxische stoffen vast te stellen concluderen Van Straalen en Kammenga (1998) dat biomassa productie een goed alternatief zou kunnen

vormen, te meer daar het een ecologisch relevante maat is, verbonden aan het trofisch functioneren van het organisme. In dat geval zou een bioassay echter alle mogelijk effecten die de biomassa van een populatie kunnen beïnvloeden moeten dekken. Dit betekent dat een test eigenlijk ten minste een generatie-tijd zou moeten duren om in staat te zijn om alle effecten op de populatie, geïntegreerd in de biomassa, te kunnen waarnemen. Dit lijkt een bruikbare methode voor kortlevende populaties, maar niet voor *Corophium*.

Een belangrijk vraag is of *Corophium*-populaties daadwerkelijk beïnvloed worden door verhoogde mortaliteit zoals die in bioassays wordt vastgesteld. Dit hangt af van de wijze waarop de omvang van de populatie gereguleerd wordt. Indien toxische stoffen de mortaliteit verhogen van populaties waarvan de omvang bepaald wordt door het voedselaanbod, dan zal de productie-snelheid, gevolgd door de populatie-groeisnelheid, toenemen waardoor het toxische effect gecompenseerd wordt. De populatie-omvang zal na een herstelperiode ongeveer gelijk blijven. Indien de populatie door predatoren gereguleerd wordt zal een verhoogde mortaliteit leiden tot een verlaging van de populatie-omvang. Voor *Corophium* geldt dat zowel competitie om voedsel en/of ruimte als predatie gedurende verschillende perioden van het jaar regulerend kunnen zijn voor de populatie-omvang (zie Jak *et al.*, 1999). Tevens blijkt het levensstadia van invloed op de gevoeligheid voor predatie: hoe groter het organisme, hoe groter de kans op predatie. Populaties die predatie-gereguleerd zijn bestaan daardoor uit veel kleine individuen. Bij afwezigheid van predatoren ontstaat een populatie opbouw gedomineerd door een geringer aantal grote individuen, die blijkbaar een sterkere concurrentie-positie hebben (voor ruimte en/of voedsel) dan kleine individuen.

Hoewel er momenteel veel inzicht is ontwikkeld met betrekking tot de effecten op individuele populatie-parameters en de consequenties op populatieniveau blijven nog een groot aantal vragen open (Maltby, in prep.). De meest modellen zijn ontwikkeld voor laboratorium-populaties onder continue omgevingscondities, met een bekende toxische stof als stressfactor (bv. Calow *et al.*, 1997).

Op basis van bovenstaande informatie kan worden betwijfeld of op basis van alleen de parameter 'sterfte' de effecten op populatie-niveau kunnen worden geschat. Ook effecten van contaminanten op andere populatie-parameters zouden geschat moeten worden. Tevens is er nog relatief weinig aandacht geschonken aan de extrapolatie van individuen getest in het laboratorium naar populaties in het veld. De meest aandacht is geschonken aan de doorvertaling van (getoetste) effectparameters op individu niveau naar effecten op de (gemodelleerde) populatie-groeisnelheid.

Deze kritische noten gelden voor modellen in het algemeen en dienen naast de evaluatie van de beschikbare modellen meegenomen te worden. Voordat aan de ontwikkeling van een volledig model wordt begonnen lijkt het zinvol om de effecten op sterfte voor de populatie-omvang te onderzoeken met een eenvoudig

model. Een analyse van de 'life-history' van *Corophium* kan duidelijk maken of sterfte of andere vital rates de belangrijkste invloed op de populatie-dynamica hebben.

Voor de doorvertaling van bioassaygegevens naar veldpopulaties is het ook belangrijk inzicht te hebben in welke (toxische) stress verantwoordelijk is voor de waargenomen effecten op de overleving van *Corophium*. Voor vele stoffen treden effecten op de overleving pas op bij concentraties die al ernstige effecten op sub-letale parameters teweegbrengen. Voor *Corophium* bestaat nog geen overzicht omtrent de gevoeligheid voor verschillende stoffen en stofgroepen. Het is daarom zinvol om een inventarisatie van ecotoxicologische gegevens uit te voeren.

Daarnaast kunnen ook andere stressfactoren (zoals saliniteit, zuurstofconcentratie, predatie, voedselbeschikbaarheid) bijdragen aan een verhoging van de gevoeligheid voor toxische stoffen ten opzichte van de standaardcondities voor bioassays. Zowel abiotische als biotische factoren bepalen in het veld het succes van *Corophium*-populaties. Door Jak *et al.* (1999) is reeds een literatuurstudie uitgevoerd naar het belang van verschillende stressfactoren voor *Corophium*-populaties.

4.2 Evaluatie beschikbare modellen

De beoordeling van de modellen die in 3.3 beschreven zijn is samengevat in Tabel 2.

Tabel 2 Overzicht van de beoordeling van modellen op basis van 4 criteria. De score + geeft aan dat aan het criterium voldaan kan worden, een ± als niet optimaal aan het criterium voldaan kan worden en een - dat niet aan het criterium voldaan wordt. Met (+) - is aangegeven dat het model in principe aan het criterium voldoet maar niet voor de hier gevraagde toepassing. Voor de benodigde invoergegevens geldt in het geval van + dat de hoeveelheid invoergegevens beperkt is en eenvoudig verkregen kan worden.

Model		Criteria			
Typering	Belangrijkste auteur(s)	Dynamische modellering	Bioassay resultaten	Benodigde Invoergegevens	Kalibratie -validatie
Logistisch (OMEGA)	Hendriks	(+) -	-	-	(+) -
Vervangingswaarde	Schobben	-	+	±	-
Voedselweb (CATS)	Traas	+	+	±	±
Matrix Grote stern	Boven & Schobben	+	+	+	+
Matrix <i>Leptocheirus</i>	McGee	+	+	+	+
Fysiologisch (DEB)	'Kooijman'	(+) -	+	-	(+) -
Matrix / Fysiologisch	Klok	±	-	(+) -	+

De modellen die gebaseerd zijn op Leslie-matrices lijken het meest in aanmerking te komen voor het dynamisch beschrijven van *Corophium*-populaties. Deze modellen maken onderscheid in een aantal relevante levensstadia, die elk

gekenmerkt worden door een parameterset waarin ook 'sterfte' is opgenomen. Dit maakt het eenvoudig de effecten uit bioassays door te vertalen. Het is relevant om dichtheidafhankelijkheid in het model te betrekken, zoals is uitgewerkt voor het 'Grote stern model'. De levenscyclus van de amphipode *Leptocheirus* komt het meest overeen met die van *Corophium*. Het beschreven model is ook specifiek ontwikkeld voor het incorporeren van bioassay gegevens, en is gekalibreerd en gevalideerd met veldgegevens omtrent de leeftijdsopbouw. Er kan ook optimaal gebruikt worden van de beschikbare monitoringgegevens voor *Corophium*. Ook de combinatie van een matrix model met een fysiologisch model is veelbelovend. Een nadeel kan zijn dat de hoeveelheid parameters en aannames in het model de onzekerheid verhogen.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- De effectparameter "sterfte" is waarschijnlijk onvoldoende om effecten van toxische stress op populaties volledig te kunnen verklaren en te voorspellen.
- De invloed van toxische stoffen is slechts één van de factoren die in het veld de populatie-omvang bepalen. Om de effecten van toxische stoffen, zoals waargenomen met bioassays, op populaties te kunnen verklaren is ook kwantitatieve informatie nodig over de effecten van andere stress-factoren en de wijze waarop de populatie-omvang gereguleerd wordt.
- De populatie-dynamica van *Corophium* leent zich voor gebruik van modellen op basis van differentie-vergelijkingen (discrete stadia); maar informatie (bv. toxiciteitsgegevens) zijn vaak niet beschikbaar voor verschillende stadia, en worden ook niet gescoord met bioassays.
- Er blijken diverse bruikbare modellen te bestaan om de effecten van bioassays te extrapoleren naar populaties in het veld. De mate van het gewenste niveau van 'realisme' (generieke populatie of specifieke populatie) zal bepalend zijn voor de keuze van een model

5.2 Aanbevelingen

- Het stadium gestructureerde matrix-model van McGee en Spencer voor de amphipode *Leptocheirus plumosus* is opgesteld voor de extrapolatie van bioassay gegevens naar veldpopulaties, en komt dus overeen met de voor dit rapport gestelde vraag. Het model lijkt zonder meer toepasbaar voor *Corophium volutator*, hoewel de populatiegroei van *Corophium* aanmerkelijk lager is. Voor een succesvolle uitwerking van het model en kalibratie ervan zijn aanvullende gegevens nodig met betrekking tot de monitoring van de populatie(s) en effecten van het sediment
- Een analyse van de 'life-history' van *Corophium* kan duidelijk maken welke 'vital rates' de grootste invloed op de populatie groei hebben.
- Een toetsing van de uitkomsten van een dergelijk model is min of meer mogelijk door het vergelijken van populaties afkomstig van lokaties die identiek zijn met uitzondering van de contaminantenlast. De populatie-dynamica dient gevolgd te worden en getoetst te worden aan 'de' voorspelling van het model. Het model kan voor de specifieke situaties gekalibreerd worden

- De benodigde monsterfrequentie voor *Corophium* om een goede beschrijving van de dynamica van de populatie te geven dient nog onderzocht te worden. Voor het toepassen van een matrixmodel dient naast de dichtheid ook de populatie-opbouw (grootteklassen) vastgesteld te worden.
- Indien een matrix-model niet haalbaar blijkt te zijn lijkt een model dat generieke voorspellingen van de toxische effecten op populaties kan maken het beste alternatief. In een dergelijk model kunnen de effecten van toxische stoffen in een model worden toegepast dat van een aantal 'default' waarden is voorzien met betrekking tot populatie-dynamische parameters. Een spreiding in deze parameterwaarden op basis van beschikbare veldstudies maakt het mogelijk de range van de uitkomsten op veldpopulatie-niveau te voorspellen.

5.3 Vervolg

- Met een eenvoudig model, bijvoorbeeld die voor de 'vervangingswaarde', kan de betekenis van de effectparameter 'sterfte' voor de populatie-omvang worden geschat.
- In een workshop kunnen de bevindingen en stellingen van dit rapport bediscussieerd worden en kan eventueel een keuze gemaakt worden voor het uit te werken model (of de modellen).
- Voorgesteld wordt een matrix-model uit te werken voor *Corophium*.
- Met behulp van een ecologisch profiel voor *Corophium* (en/of aanverwante soorten) kan inzicht worden verkregen in de populatie-dynamische parameterwaarden die in populatiemodellen kunnen worden gebruikt. Met een ecotoxicologisch profiel kunnen effecten aan veldconcentraties gerelateerd worden, welke kan helpen bij de interpretatie van de gegevens voor de hierboven genoemde veldpopulaties.

6. Referenties

Beukema J.J. & E.C. Flach (1995): Factors controlling the upper and lower limits of intertidal distribution of two *Corophium* species in the Wadden Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 125:117-126.

Boven R.M. van & J.H.M. Schobben (1993): Risico-analyse voor een indicator-soort van het zeemilieu: De populatiedynamica van de Grote stern in Nederland. RWS rapport DGW-93.006.

Calow P., R.M. Sibly & V. Forbes (1997): Risk assessment on the basis of simplified life-history scenarios. *Environ. Toxicol. Chem.* 16:1983-1989.

Caswell H. (1989): *Matrix Population Models. Construction, analysis, and interpretation.*

Sinauer Associates inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts, USA.

Ciarelli S., A.P.M.A. Vonck & N.M. van Straalen (1997): Reproducibility of spiked-sediment bioassays using the marine benthic amphipod, *Corophium volutator*.

Mar. Environ. Res. 43:329-343.

Fish J.D. & A. Mills (1979): The reproductive biology of *Corophium volutator* and *C. arenaria* (Crustacea: Amphipoda).

J. Mar. Biol. Ass. U.K. 59:355-368.

Forbes M.R., J.S. Boates, N.L. McNeil & A.E. Brison (1996): Mate searching by males of the intertidal amphipod *Corophium volutator* (Pallas).

Can. J. Zool. 74(8):1479-1484.

Forbes V.E. & P. Calow (1999): Is the per capita rate of increase a good measure of population-level effects in ecotoxicology?

Environ. Toxicol. Chem. 18:1544-1556.

Haren R.J.F. van (1995): Application of dynamic energy budgets to xenobiotic kinetics in *Mytilus edulis* and population dynamics of *Globodera pallida*.

Thesis Free University Amsterdam.

Hendriks A.J. (1995): Concentrations of microcontaminants and response of organisms in laboratory experiments and Rhine Delta field surveys. Monitoring and modelling instruments in applied research and management.

Thesis University of Utrecht & RWS RIZA nota 95.035.

Jak R.G., N.H.B.M. Kaag & E.M. Foekema (1999): Literatuurstudie naar de tolerantiegrenzen voor omgevingsfactoren bij de bioassaysoorten *Corophium volutator* en *Nereis virens*.

TNO-Rapport TNO-MEP R 99/407.

Kammenga J.E., M. Busschers, N.M. van Straalen, P. Jepson & J. Bakker (1996): Stress-induced fitness reduction is not determined by the most sensitive life-cycle trait.

Functional Ecol. 10:106-111.

Klok C. & A.M. de Roos (1996): Population level consequences of toxicological influences on individual growth and reproduction in *Lumbriculus rubellus* (Lumbricidae, Oligochaeta). Ecotox. Environ. Saf. 33:118-127.

Kooijman S.A.L.M. & Bedaux (1996). The analysis of aquatic toxicity data. VU press Amsterdam.

Maltby M. (in prep.): Linking individual-level responses and population consequences.

McGee B.L. & M. Spencer (in prep): Evaluating population-level effects of sediment toxicity to the benthic amphipod *Leptocheirus plumulosus*. Environ. Toxicol. Chem. 18: (in prep).

Muus B.J. (1967): The fauna of Danish estuaries and lagoons. Distribution and ecology of dominating species in the shallow reaches of the mesohaline zone. Medd. Danm. Fisk. Havunders. Ny Ser. 5:1-316.

Peer D.L., L.E. Linkletter & P.W. Hicklin (1986): Life history and reproductive biology of *Corophium- volutator* (Crustacea: Amphipoda) and the influence of shorebird predation on population structure in Chignecto Bay, Bay of Fundy, Canada.

Neth. J. Sea Res. 20(4):359-374.

Sibly R.M. (1996): Effects of populations on individual life histories and population growth rates.

In: Ecotoxicology. A Hierarchical Treatment, ed. M.C. Newman & C.H. Jagoe. pp. 63-74. Freshwater Biological Association, Ambleside, UK.

Schobben H.P.M., J.H.M. Schobben, R.M. van Boven & M.C.Th. Scholten (1992): Introductie van methoden voor kwantitatieve ecologische risicoanalyse gericht op AMOEBE-soorten. Rapportage in het kader van RAM. TNO-RAM rapport nr.2. TNO-rapport R 92/291.

Schobben H.P.M., C.C. Karman, J.H.M. Schobben, R.G. Jak & N.H.B.M. Kaag (1996): Ecologische informatie over RAM-soorten.
TNO-Rapport R96/210.

Schröder S.E. & J.H.M. Schobben (1997): Populatiemodellen voor geselecteerde AMOEBE-soorten.

Spencer M. & B.L. McGee (in prep): A field-based model for the estuarine sediment toxicity test organism *Leptocheirus plumulosus*.
Mar. Environ. Res. (Submitted).

Stearns S.C. (1992): The Evolution of Life Histories.
Oxford University Press, Oxford, UK.

Straalen N.M. van & J.E. Kammenga (1998): Assessment of ecotoxicity at the population level using demographic parameters.
In: Ecotoxicology, ed. G. Schüürmann & B. Markert. pp 621-644. John Wiley and Sons, Inc.

Traas T.P., J.H. Janse, T. Aldenberg & Th.C.M. Brock (1998): A food web model for fate and direct and indirect effects of Dursban 4E (active ingredient chlorpyrifos) in freshwater microcosms.
Aquat. Ecol. 32:179-190.

Traas T.P., J.A. Stäb, P.R.G. Kramer, W.P. Cofino & T. Aldenberg (1996): Modelling and risk assessment of tributyltin accumulation in the food web of a shallow freshwater lake.
Environ. Sci. Technol. 30:1227-1237.

Wilson W.H. & K. Parker (1996): The life history of the amphipod, *Corophium volutator*: The effects of temperature and shorebird predation.
J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 196:239-350.

7. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

RWS-RIKZ, Veldstation Jacobahaven
Drs. B.J. Kater
Jacobaweg 2
4493 MX Kamperland

Namen en functies van de projectmedewerkers:

R.G. Jak	Projectleider
M.G.D. Smit	Wetenschappelijk medewerker
C.C. Karman	Wetenschappelijk medewerker

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

-

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

Juli 1999 t/m oktober 1999

Ondertekening:



R.G. Jak
Projectleider
15 november 1999

Goedgekeurd door:



M.C.Th. Scholten
Afdelingshoofd
15 november 1999