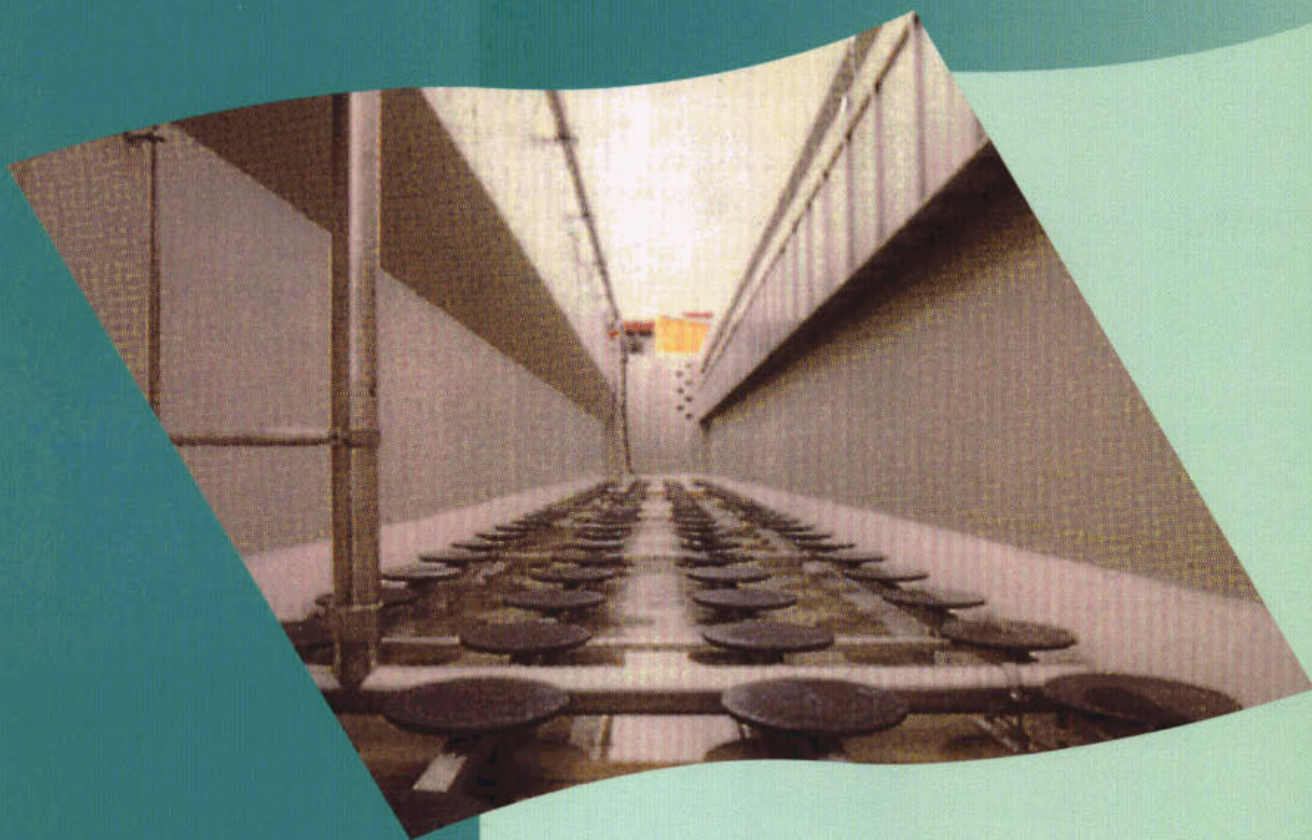


1999-24_procedure-keuze-beluchtingssysteem

stowa

lichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

Procedure voor de keuze van het beluchtingssysteem



99 24

**Procedure voor de keuze van het
beluchtingssysteem**

99 24

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon 030 232 11 99
Fax 030 232 17 66
E-mail stowa@stowa.nl
ISBN 90.5773.074.x

INHOUDSOPGAVE

blz.

	Ten geleide	
	SAMENVATTING	3
1	INLEIDING	5
1.1	Beluchtingssystemen	5
1.2	Doel van de studie	5
1.3	Leeswijzer	5
2	BELUCHTINGSAPPARATUUR	7
2.1	De verschillende typen beluchtingssystemen	7
2.2	Bellenbeluchting	8
2.2.1	Compressoren	8
2.2.2	Beluchtingselementen	10
2.3	Oppervlaktebeluchting	12
3	THEORETISCHE ACHTERGRONDEN	15
3.1	Berekening van de zuurstofvraag	15
3.2	Berekening van de zuurstofinbrengcapaciteit	15
3.2	Berekening van de luchtinbrengcapaciteit bij bellenbeluchting	17
3.4	Zuurstofinbrengrendement	18
3.4.1	Bellenbeluchting	19
3.4.2	Oppervlaktebeluchting	19
3.4.3	Vergelijking energieverbruik bellen- en oppervlaktebeluchting	20
3.5	Berekening van het vereiste motorvermogen	20
4	PROCESTECHNOLOGISCHE EN OPERATIONELE ASPECTEN	21
4.1	Werkwijze	21
4.1.1	Procestechnologische aspecten	21
4.1.2	Operationele aspecten	22
4.1.3	Wegingsfactoren	22
4.2	Procestechnologische aspecten	23
4.2.1	Alfa-factor	23
4.2.2	Specifieke zuurstofinbrengcapaciteit	24
4.2.3	Zuurstofinbrengrendement	26
4.3	Operationele aspecten	27
4.3.1	Bedrijfszekerheid	27
4.3.2	Onderhoud en levensduur	28
4.3.3	Inpasbaarheid	31
4.3.4	Ervaring	31
4.4	Wegingsfactoren	32

5	PROCEDURE VOOR DE KEUZE VAN HET BELUCHTINGSSYSTEEM	34
5.1	Beslissingsmodel	34
5.1.1	Kostenberekening	35
5.1.2	Multi-criteria-analyse	35
5.2	Voorbeeld voor een rwzi van 50.000 i.e.	39
5.3	Gevoeligheidsanalyse	41
5.3.1	Invloed van de procestechnologische aspecten	41
5.3.2	Invloed van de grootte van de rwzi	42
5.3.3	Kwalitatieve aspecten	44
6	CONCLUSIES	45
7	REFERENTIES	46
8	BEGRIPPENLIJST	48

BIJLAGEN

- BIJLAGE 1: Voorkomen van beluchtingssystemen op rwzi's in Nederland
- BIJLAGE 2: Berekeningsmethodiek voor de zuurstofvraag
- BIJLAGE 3: Bijzondere aspecten bij het verbeteren van de zuurstofinbrengcapaciteit
- BIJLAGE 4: Beschrijving van de kostenberekeningsmethodiek van de beluchtingssystemen in het beslissingsmodel
- BIJLAGE 5: Voorbeeld beslissingsmodel op basis van de individuele wegingsfactoren van de waterbeheerders
- BIJLAGE 6: Handleiding voor het gebruik van het beslissingsmodel

Ten geleide

De keuze van het beluchtingssysteem vormt doorgaans een vast onderwerp bij systeemkeuzestudies en voorontwerpen van rwzi's. Naast technische en technologische inpasbaarheid, investeringskosten en bedrijfsvoeringskosten wordt de voorkeur voor een bepaald systeem mede bepaald door persoonlijke ervaringen en kwalitatieve aspecten als complexiteit en flexibiliteit. Bij de berekening van de investerings- en exploitatiekosten blijkt vaak geen duidelijk onderscheid voor de systemen 'oppervlaktebeluchting' en 'bellenbeluchting' aanwezig, zodat de keuze vaak wordt bepaald door kwalitatieve aspecten en persoonlijke voorkeuren.

Het steeds weer opnieuw opstellen van de berekenings- en beoordelingsprocedure vraagt onnodig tijd en geld. Dit rapport biedt de waterkwaliteitsbeheerder een gestandaardiseerde procedure voor de keuze van het beluchtingssysteem. De procedure omvat een beslissingsmodel waarmee via een multi-criteria-analyse tot een meer eenduidige keuze van een beluchtingssysteem kan worden gekomen. Het beslissingsmodel kan worden toegepast met behulp van het spreadsheetprogramma op de bijgeleverde diskette.

Het onderzoek werd uitgevoerd door HASKONING Ingenieurs- en Architectenbureau (projectteam bestaande uit ir. J. Kruit, ir. E.G. Wypkema en dr. ir. A. Visser). Voor de begeleiding van het project zorgde een commissie bestaande uit ir. F.T. van Breukelen (voorzitter), ing. L.A. van Efferen, ing. J.A. Nieuwlands, ir. P.J. Roeleveld en ir. P.C. Stamperius.

Een schriftelijk enquête onder de waterkwaliteitsbeheerders heeft een essentiële rol gespeeld bij het tot stand komen van het beslissingsmodel. De STOWA is de waterkwaliteitsbeheerders die hebben gereageerd zeer erkentelijk voor hun medewerking. Daarnaast gaat dank uit naar de leveranciers van beluchtingsapparatuur, die waardevolle informatie hebben aangeleverd voor de totstandkoming van dit rapport.

Utrecht, november 1999

De directeur van de STOWA

ir. J.M.J. Leenen

SAMENVATTING

Bij systeemkeuzestudies en voorontwerpen van rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) wordt doorgaans de vraag gesteld welk beluchtingssysteem moet worden toegepast: oppervlaktebeluchting of bellenbeluchting.

De procedure die leidt tot een keuze voor een beluchtingssysteem dient nog steeds voor iedere rwzi opnieuw te worden gemaakt. In de onderhavige studie is deze procedure gestandaardiseerd om zo te komen tot een beslissingsmodel dat moet leiden tot een meer eenduidige keuze van een beluchtingssysteem.

Voor het opzetten van zo'n beslissingsmodel is in een inventarisatie gevraagd naar de aspecten die in de praktijk moeten worden afgewogen om tot de keuze van een beluchtingssysteem te komen. Hierbij is, naast de kosten, onderscheid gemaakt tussen procestechnologische en operationele aspecten. De inventarisatie van bovengenoemde aspecten heeft plaatsgevonden aan de hand van een enquête onder alle waterbeheerders en het opvragen van relevante informatie bij de leveranciers van beluchtingssystemen. De belangrijkste uitkomsten zijn:

- de waterbeheerders beoordelen de bedrijfszekerheid als het belangrijkste aspect bij de keuze van een beluchtingssysteem. Daarna volgen met afnemend belang: exploitatiekosten, inpasbaarheid, onderhoud, en duurzaamheid. De ervaring met een beluchtingssysteem wordt niet als belangrijk ondervonden;
- waterbeheerders en leveranciers hanteren praktisch gelijke waarden voor alfa-factor, zuurstofinbrengrendement en energieverbruik;
- bij de waterbeheerders bestaat nog relatief weinig inzicht in de onderhoudskosten van beluchtingssystemen. De leveranciers kunnen een redelijke inschatting maken van de onderhoudskosten; een toetsing daarvan in de praktijk is tot op heden niet uitgevoerd.

Aan de hand van de uitkomsten van de inventarisatie is een beslissingsmodel opgezet voor een standaardprocedure bij de keuze van een beluchtingssysteem. In het beslissingsmodel wordt op basis van een kostenberekening en kwalitatieve aspecten een multi-criteria-analyse uitgevoerd. In de kostenberekening worden de investerings- en exploitatiekosten van beluchtingssystemen bepaald en vergeleken. Uit de kostenberekening blijkt dat de totale exploitatiekosten van een beluchtingssysteem voornamelijk worden bepaald door de energiekosten (60-80 %). De onderhoudskosten bedragen slechts circa 5 % van de exploitatiekosten. De multi-criteria-analyse die in het beslissingsmodel gehanteerd wordt, is gebaseerd op het toekennen van een wegings- en een scoringsfactor. De wegingsfactor is gebaseerd op het toekennen van een zeker gewicht aan een aspect. De scoringsfactor is een "objectief" gegeven. De totale waardering van een aspect is het product van de wegings- en scoringsfactor. De wegingsprocedure is in onderstaande matrix weergegeven.

Kwalitatieve aspecten	Wegingsfactor (0-4)	Bellenbeluchting		Puntbeluchting	
		Scoringsfactor (1-5)	Waardering	Scoringsfactor (1-5)	Waardering
Exploitatiekosten Bedrijfszekerheid Onderhoudsgemak Inpasbaarheid Duurzaamheid, energie Duurzaamheid,geur/geluid Ervaring Vervangbaarheid Grootte van de zuivering	a	b	a x b ↓	c	a x c ↓
Totale waardering			Som		Som

Het beluchtingssysteem met de hoogste totale waardering heeft de voorkeur.

Op basis van de actuele ervaringen van waterbeheerders, informatie van leveranciers van beluchtingssystemen en literatuurgegevens wordt in het beslissingsmodel uitgegaan van de volgende standaardwaarden:

Aspecten	Wegingsfactor	Scoringsfactor	
		Bellenbeluchting	Puntbeluchting
Exploitatiekosten	9	5	$10 * f_b/f_p - 5$
Bedrijfszekerheid	4	4	5
Inpasbaarheid	2	5	5
Onderhoudsgemak	2	3	5
Duurzaamheid energie	2	5	kW_p/kW_b^{**}
Duurzaamheid geluid/geur	2	5	5
Ervaring	1	5	5
Vervangbaarheid	1	3	5
Capaciteit	1	5	5

* f_p = exploitatiekosten puntbeluchting, f_b = exploitatiekosten bellenbeluchting

** kW_p = energieverbruik puntbeluchting, kW_b = energieverbruik bellenbeluchting

Bij toepassing van het beslissingsmodel blijkt op basis van de gehanteerde standaardwaarden geen duidelijke voorkeur voor een beluchtingssysteem in relatie tot de ontwerpcapaciteit van de rwzi. De exploitatiekosten van beide systemen zijn in dit verband nagenoeg gelijk. Dit betekent dat eventuele wijzigingen van de standaardwaarden voor de wegingsfactoren als gevolg van specifieke omstandigheden of inzichten doorslaggevend kunnen zijn in de keuze.

1 INLEIDING

1.1 Beluchtingssystemen

Bij systeemkeuzestudies en voorontwerpen van rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) wordt doorgaans de vraag gesteld welk beluchtingssysteem moet worden toegepast: oppervlaktebeluchting of bellenbeluchting. De keuze tussen deze twee zal afhankelijk zijn van de bestaande infrastructuur, procesconfiguratie, investeringskosten, exploitatiekosten en de voorkeur van de waterbeheerder. Deze voorkeur lijkt vaak gebaseerd te zijn op ervaringen in het eigen beheersgebied. Naast genoemde aspecten kunnen aspecten zoals complexiteit en flexibiliteit een rol spelen. De keuze wordt altijd genomen aan de hand van een beoordelingstabel waarin bovenstaande aspecten kwalitatief worden gewaardeerd, bijvoorbeeld met +, 0 of -. Hierbij wordt zelden een multicriteria-analyse uitgevoerd.

Bij berekening van de investerings- en exploitatiekosten is vaak geen duidelijk onderscheid tussen de twee systemen aanwijsbaar, zodat de keuze wordt bepaald op basis van kwalitatieve aspecten en voorkeuren.

1.2 Doel van de studie

De huidige berekenings- en beoordelingsprocedure dient voor iedere rwzi opnieuw te worden gemaakt. Het doel van dit project is de procedure te standaardiseren. Het uiteindelijke resultaat is een beslissingsmodel waarbij zowel de kostenberekening wordt gemaakt als kwalitatieve aspecten, voorzien van weegfactoren, worden meegenomen in een multicriteria-analyse. Dit leidt tot een meer eenduidige keuze voor één van beide systemen: oppervlaktebeluchting of bellenbeluchting. Door de weegfactoren en de scoringsfactoren variabel te maken kan elke waterbeheerder eventueel een eigen voorkeur inbrengen.

1.3 Leeswijzer

Het onderhavig rapport bevat de volgende onderdelen:

- een overzicht van de verschillende typen beluchtingssystemen die worden toegepast (hoofdstuk 2 en bijlage 1);
- de theoretische achtergronden van beluchtingssystemen (hoofdstuk 3 en bijlagen 2 en 3);
- de procestechnologische en operationele aspecten van beluchtingssystemen, (hoofdstuk 4);
- een beschrijving van het beslissingsmodel zoals dat in deze studie is opgesteld, inclusief een gebruikershandleiding (hoofdstuk 5 en bijlagen 4, 5 en 6). In bijlage 6 wordt tevens een visualisatie van het model Microsoft Excel 97 weergegeven.

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van verschillende beluchtingssystemen zoals deze bij het zuiveren van communaal water worden toegepast. De theoretische achtergronden van beluchtingssystemen, waaronder de berekening van de zuurstofvraag, de zuurstofinbrengcapaciteit en het zuurstofinbrengrendement worden in hoofdstuk 3 beschreven. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de procestechnologische en operationele aspecten van beluchtings-systemen zoals deze in dit onderzoek naar voren zijn gekomen. In hoofdstuk 5 wordt een beschrijving gegeven van het beslissingmodel. De opzet en werkwijze van het model worden beschreven en aan de hand van enkele voorbeelden toegelicht. In hoofdstuk 6 worden de conclusies en aanbevelingen uit dit onderzoek gegeven.

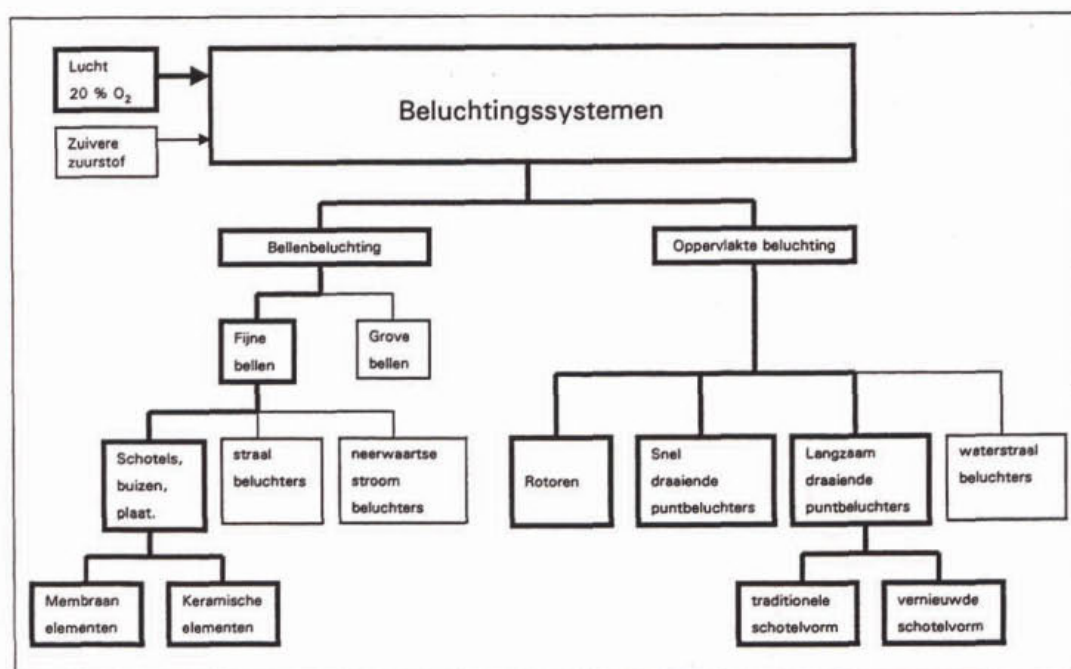
Het is mogelijk, afhankelijk van het doel van de lezer, direct naar de desbetreffende hoofdstukken te gaan. Hierbij hoeft geen kennis te worden genomen van de overige hoofdstukken.

De verschillende typen beluchtingssystemen

Er zijn diverse methoden om zuurstof in een vloeistoffase te brengen. Deze methodes zijn:

- het actief inbrengen van lucht in de vloeistoffase (bellenbeluchting);
- het actief vergroten van het water/lucht oppervlak (oppervlaktebeluchting, waterstraalbeluchting en cascadebeluchting);
- het percoleren van water in een luchtfase (trickling filters, zoals oxidatiebedden);
- het toevoeren van zuurstof door planten (algenvijvers, rietvelden).

In deze studie zal alleen aandacht worden besteed aan de mechanische systemen die worden toegepast in het actiefslibproces bij het zuiveren van communaal afvalwater. Dit zijn fijne bellenbeluchting en oppervlaktebeluchting door middel van rotoren, langzaam draaiende en snel draaiende puntbeluchters (zie figuur 1). Dit betekent dat 'straalbeluchters' en 'neerwaartse stroombeluchters', grove bellenbeluchting en waterstraalbeluchters niet in beschouwing worden genomen. Deze systemen zijn wel bij de industrie in gebruik, het gaat hierbij om specifieke toepassingen. Het voorkomen van de beluchtingssystemen bij de waterkwaliteitsbeheerders in Nederland is weer-gegeven in bijlage 1.



Figuur 1. Overzicht beluchtingssystemen bij toepassing in actiefslibsystemen, de vetgedrukte systemen worden nader behandeld

Naast het toevoeren van lucht wordt er soms voor gekozen om zuivere zuurstof te gebruiken. Dit kan in speciale gevallen interessant zijn, zoals bij ruimtegebrek en behandeling van industrieel afvalwater met zeer hoge vuilconcentraties. In normale situaties wegen de extra kosten voor het aanmaken van zuivere zuurstof echter niet op tegen de voordelen. Het gebruik van zuivere zuurstof zal in dit kader dan ook niet verder worden behandeld.

In de volgende paragrafen zullen de principes van bellenbeluchting en oppervlaktebeluchting kwalitatief worden behandeld. Een beschouwing over de inzet van "Oxycaps" bij oppervlaktebeluchting zal niet aan de orde komen.

2.2 Bellenbeluchting

Er zijn verschillende manieren om luchtbellen in water te brengen. De meest toegepaste vorm is om met behulp van compressoren de lucht in het water te verdelen. Deze verdeling vindt plaats door middel van membraan- of keramische beluchtingselementen. Hieronder zullen de principes van de belangrijkste hoofdtypen compressoren kort worden besproken. Daarna zullen de principes van de genoemde beluchtingselementen aan de orde komen.

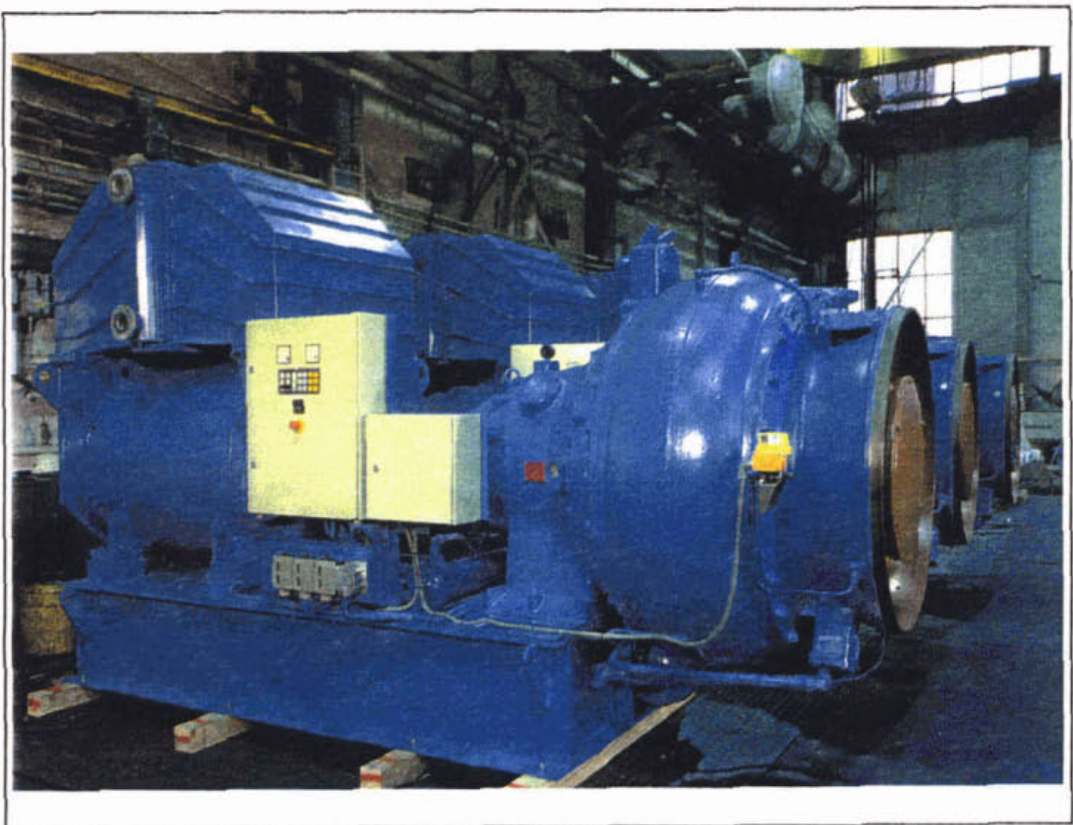
2.2.1 Compressoren

Met een compressor kan omgevingslucht worden aangezogen en worden samengeperst. De samengeperste lucht kan via deze drukopbouw, normaal 500 à 600 mbar, in het actief-slibmengsel worden gebracht. Er kunnen twee hoofdtypen compressoren worden onderscheiden:

- centrifugaalcompressoren;
- rootscompressoren.

Centrifugaalcompressoren

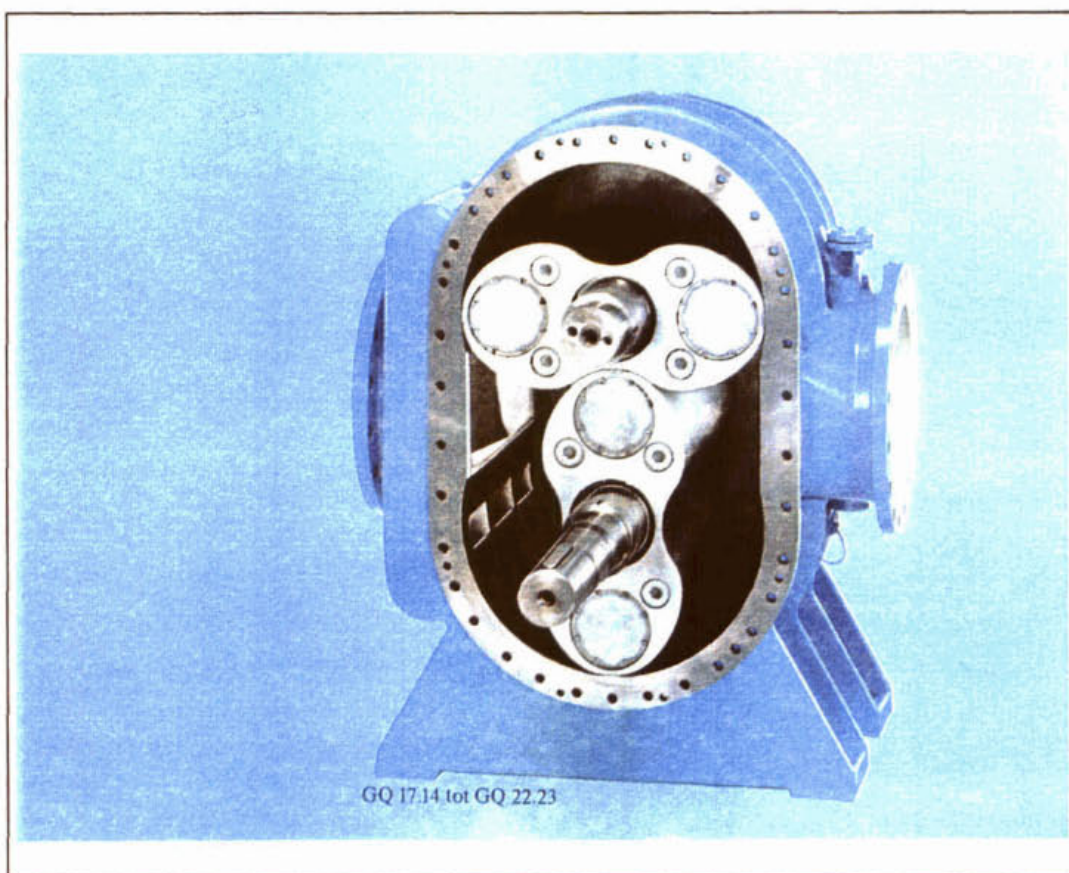
Centrifugaalcompressoren werken volgens het waaier-principe: een ronddraaiende waaier geeft de lucht snelheid. Hierdoor ontstaat drukopbouw in de lucht. De machine bestaat uit een luchtaanzuigfilter/geluiddemper en een centrifugaalcompressor met elektromotor. Het luchtdebiet wordt geregeld door een schoepverstelling. De schoepen bevinden zich rondom de waaier. Hierdoor kan bij een constant toerental van de elektromotor de gewenste luchthoeveelheid worden geregeld. Het luchtdebiet kan door de schoepverstelling worden geregeld van 45 tot 100% van de geïnstalleerde capaciteit. Een frequentie-omvormer ten behoeve van de regeling van het toerental van de elektromotor is derhalve niet nodig. Een voorbeeld van een centrifugaalcompressor is in figuur 2 weergegeven.



Figuur 2. Een voorbeeld van een centrifugaalcompressor.

Rootscompressoren

Rootscompressoren werken volgens het verdringerprincipe: twee of drie-lobbige rotoren persen de lucht door de machine heen. De machine bestaat uit een luchtaanzuigfilter/geluiddemper en twee drie-lobbige rotoren. Het luchtdebiet wordt geregeld door een frequentiegeregelde elektromotor. Hiermee kan het luchtdebiet worden geregeld van 20 tot 100% van de geïnstalleerde capaciteit. Een voorbeeld van een rootscompressor is in figuur 3 weergegeven.



Figuur 3. Een voorbeeld van een rootscompressor.

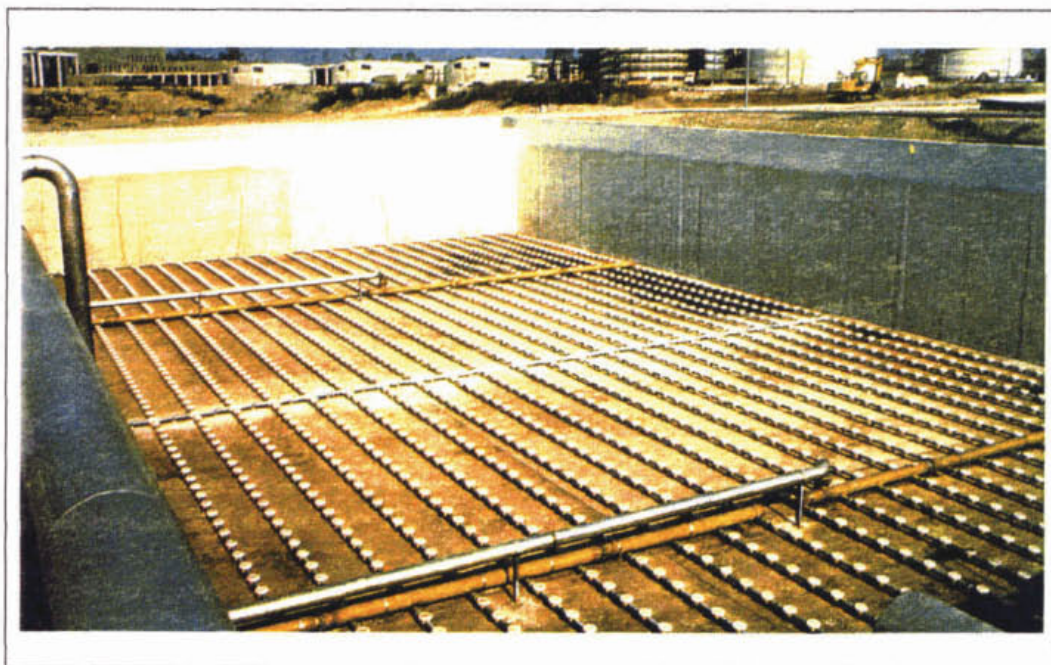
Vergelijking van centrifugaal- en rootscompressoren

Een tiental jaar geleden hadden centrifugaal blowers een hoger energieverbruik dan rootsblowers. Tegenwoordig zijn eerstgenoemde compressoren uitgevoerd met pre-rotatie, waardoor het smoorverlies, en het daarmee gepaard gaande extra energieverbruik, wordt vermeden. Qua energieverbruik zijn de twee compressortypen tegenwoordig gelijkwaardig. Centrifugaal blowers kunnen tot een diepte van ongeveer zes meter van de beluchtingsruimte worden toegepast en zijn gelimiteerd in hun capaciteit. Rootsblowers hebben een ongelimiteerde diepte en capaciteit.

2.2.2 Beluchtingselementen

Nadat de lucht voor de compressoren op druk is gebracht wordt die lucht via beluchtingselementen in de procesruimte gebracht. Het principe van beluchtingselementen is gebaseerd op de volgende grondslag: hoe kleiner de luchtbel, hoe beter de luchtinbreng en daarmee hoe hoger het energetisch rendement. Daarom wordt tegenwoordig op rwzi's vooral fijne bellenbeluchting toegepast. Er zijn twee typen elementen; membraan- en keramische elementen. Beide typen kunnen worden uitgevoerd in schotel-, buis- of plaatvorm.

Figuur 4 geeft een voorbeeld van bellenbeluchtingselementen zoals deze toegepast worden.



Figuur 4. Een voorbeeld van fijne-bellenbeluchtingselementen.

Membraanbeluchtingselementen

Bij membraanbeluchtingselementen wordt een membraan met kleine insneden op een schotel, buis of plaat gespannen. Door de luchtdruk wordt het membraan iets opgeblazen, waardoor de insneden open komen te staan en door luchtinblaas bellen ontstaan. In onbeluchte toestand zijn de elementen dicht, zodat het water niet terugstroomt in het luchtverdeelsysteem. Na enkele jaren bedrijfsvoering kunnen de membranen oprekken of verstarren, waardoor het zuurstofinbrengrendement verslechtert. De membranen moeten dan ook gemiddeld eens in de 5 à 7 jaar worden vervangen. Daarnaast kunnen de insneden vervuilen, waardoor het inbrengrendement ook zal verslechteren. Dit effect kan worden geminimaliseerd door het periodiek toedienen van chemicaliën in de luchtstroom (bijvoorbeeld mierenzuur) en/of toepassing van periodieke maximale beluchting per element, onafhankelijk van de actuele zuurstofvraag ("airbumping-procedure").

Keramische elementen

Bij keramische elementen wordt de lucht door kleine poriën geblazen. Het keramisch materiaal is star, waardoor in onbeluchte toestand het verdeelsysteem volloopt met water en slib.

Er is dan veel extra druk nodig om het systeem weer watervrij te krijgen. Daarnaast kunnen de elementen inwendig vervuilen door het aanwezige slib. Hierdoor worden keramische elementen alleen toegepast indien er sprake is van continue beluchting. Tevens zijn de keramische elementen gevoelig voor "scaling", het ontstaan van neerslagen op het materiaal, waardoor het inbrengrendement verslechtert. Dit kan worden geminimaliseerd door één tot twee maal per jaar gasvormig zoutzuur of mierenzuur in het beluchtingssysteem te spuiten.

Keramische elementen hebben gemiddeld een circa 10% hogere zuurstofinbreng per kW ingebracht vermogen, in vergelijking met membraanelementen. In geval van het optreden van "scaling" wordt dit ondanks regelmatig onderhoud gereduceerd tot circa 5%.

Uitvoeringstype

In de uitvoeringsvorm van de elementen (schotel, buis of plaat) geven schotels over het algemeen de beste zuurstofoverdracht. Voor membraanbeluchters is de plaatbeluchter iets minder stevig, omdat de krachten op het membraan niet evenredig over de aanhechting zijn verdeeld, waardoor er een verhoogde kans op scheuring bestaat. De schotelvorm lijkt derhalve de voorkeur te genieten. Echter, buiselementen worden ook regelmatig toegepast.

2.3 Oppervlaktebeluchting

In Nederland worden verschillende oppervlaktebeluchtingssystemen toegepast:

- rotores;
- langzaamdraaiende puntbeluchters; (met traditionele schoepen, zoals de Simcar® en de Landy®, en met nieuwe schoepen zoals de Hubair®);
- sneldraaiende puntbeluchters (zoals de Aquaturbo®).

De laatstgenoemde beluchter wordt tot op heden bij een normale bedrijfsvoering bij rwzi's nauwelijks toegepast.

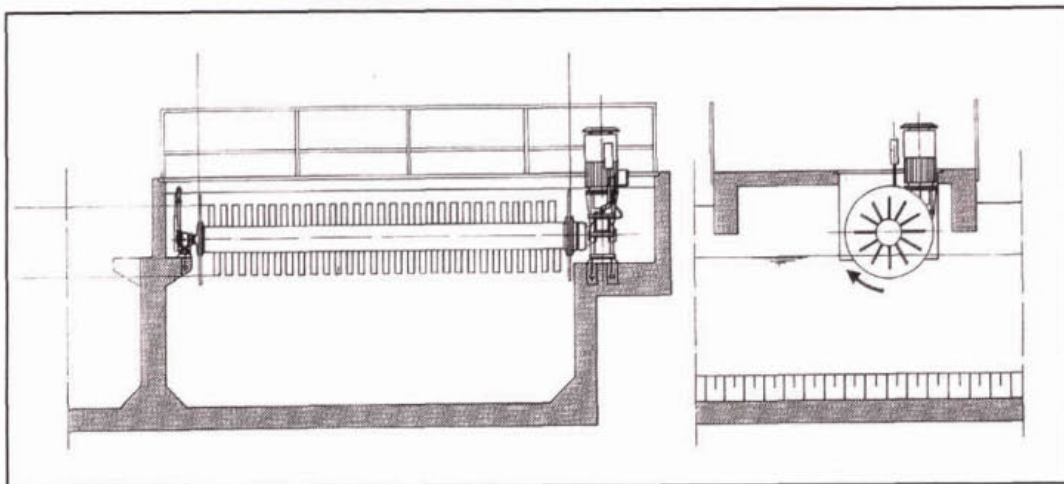
Oppervlaktebeluchting kan door de volgende (deel)processen plaatsvinden:

- het vergroten van het water-lucht oppervlak door spatten;
- het verversen van het water-lucht oppervlak door turbulentie;
- het insluiten van luchtbelletjes door turbulentie.

Elk type oppervlaktebeluchting maakt meer of minder gebruik van bovenstaande (deel)processen. Zo wordt bij snel draaiende puntbeluchters vooral gebruik gemaakt van spatten en bij langzaam draaiende puntbeluchters een combinatie van spatten, luchtinvang en oppervlakteverversing. Hieronder zullen de principes van bovengenoemde oppervlaktebeluchtingssystemen worden vermeld.

Rotoren

Rotoren zijn cilinders die horizontaal door het water draaien. Aan de cilinders zijn metalen plaatjes (mammoetrotoren) bevestigd. De draaiing van de rotor wordt via een tandwielkast vanuit een motor gegenereerd (zie figuur 5).



Figuur 5. Principeschema van een rotor

Sneldraaiende puntbeluchters

De sneldraaiende oppervlaktebeluchters zijn platte ronddraaiende schotels met verticale schoepen. Deze beluchters worden in Nederland alleen in specifieke gevallen toegepast, zoals bij calamiteiten van de bestaande beluchting en aanvulling op de bestaande beluchting. Ze kunnen echter eenvoudig in bestaande systemen worden aangebracht, omdat ze drijven en alleen met spankabels op hun plaats worden gehouden. Bij dit type beluchter is geen tandwielkast nodig; de rotatiesnelheid is zo hoog dat de beluchter rechtstreeks op de motor is aangesloten. Het principeschema van een sneldraaiende puntbeluchter is weergegeven in figuur 6.

Langzaamdraaiende puntbeluchters

Langzaamdraaiende puntbeluchters zijn conische schotels die in het water ronddraaien. De vorm van de schotel bepaald het hoofdproces van beluchten en het inbrengrendement. De nieuwe typen schotels zijn ten opzichte van de vorige generaties door de uitvoeringsvorm in staat meer turbulentie in het water te brengen, waardoor de zuurstofoverdracht verbetert. De draaiing van de schotels wordt vanaf de motor via een tandwielkast overgebracht (zie figuur 7).



Figuur 6. Principeschema van een sneldraaiende puntbeluchter



Figuur 7. Principeschema van een langzaamdraaiende puntbeluchter

Voor het berekenen van de gewenste capaciteit van een beluchtingssysteem is het noodzakelijk de zuurstofvraag te berekenen en op basis hiervan het zuurstofinbrengcapaciteit vast te stellen.

3.1 Berekening van de zuurstofvraag

Er is een aantal methoden om de zuurstofvraag te berekenen:

- via BZV, N_{Kj} -balans en endogene verademingssnelheid;
- via CZV-balans en N_{Kj} -balans.

Binnen deze methoden zijn nog variaties mogelijk in kentallen en benaderingswijze. De belangrijkste methoden zijn weergegeven in bijlage 2.

3.2 Berekening van de zuurstofinbrengcapaciteit

Als op basis van de geselecteerde methode de zuurstofvraag is vastgesteld, kan de zuurstofinbrengcapaciteit worden berekend. De berekende zuurstofvraag wordt omgerekend naar de vereiste zuurstofinbrengcapaciteit van een beluchtingssysteem onder standaardcondities. De standaardcondities zijn schoon, zuurstofvrij water, bij een druk van 101,3 kPa en een temperatuur van 10°C. De zuurstofinbrengcapaciteit en de zuurstofvraag zijn als volgt gerelateerd:

$$O_2 \text{ inbrengcapaciteit} = O_2 \text{ vraag} * \beta / \alpha \quad (\text{kg/d}) \quad (1)$$

Waarin:

- α = alfa-factor (-), de correctiefactor voor het toepassen van de zuurstofinbrengcapaciteit in een mengsel van actiefslib en afvalwater ten opzichte van schoon water;
- β = beta-factor of deficietfactor (-), de correctiefactor aangaande het verschil in zuurstofopname bij een zuurstofconcentratie van 0 mg/l en de gewenste zuurstofconcentratie.

Alfa-factor

De alfa-factor (α) wordt beïnvloed door factoren die de zuurstofinbrengcapaciteit ten opzichte van de standaardcondities verslechteren, te weten:

- *Diffusiesnelheid*. In vuilwater/actief-slib is de diffusiesnelheid lager dan in schoon water. Dit is het gevolg van gesuspendeerde vaste stof;
- *Oppervlaktetension*. De oppervlaktetension in vuilwater/actief-slib is hoger dan in schoon water. Als gevolg hiervan is de bel groter en de overdracht minder;
- *Vervuiling en veroudering van de elementen*. Vervuiling kan voor verstopping of hechting van de bel aan het element zorgen, waardoor de zuurstofoverdracht minder is. Dit speelt vooral bij keramische elementen een rol.

Veroudering speelt vooral bij membraanbeluchters een rol. De elasticiteit van het materiaal neemt af, waardoor de poriën vergroten (vergroting belgrote) of verkleinen (vergroting tegendruk) en eventueel scheuringen kunnen optreden.

De alfa-factor is per beluchtingssysteem verschillend. Voor de berekening van de zuurstofinbrengcapaciteit in een laagbelast actief-slibstelsysteem worden de volgende alfa-factoren gehanteerd:

- bellenbeluchting : 0,6 - 0,7;
- puntbeluchting : 0,8 - 0,9;
- roteren : 0,9;
- snelle puntbeluchting : 0,9.

Bij bellenbeluchting loopt de alfa-factor in de tijd terug als gevolg van vervuiling en veroudering van het membraan. Bij membraanelementen (Stenstrom, Kessever, EPA) en keramische elementen kan dit binnen een bedrijfsjaar resulteren in een alfa-factor lager dan 0,5. Bij de huidige membraanelementen wordt voor de eerste 5 jaar een gemiddelde α hoger dan 0,65 gegarandeerd in laagbelaste actief-slibsystemen (Flygt, 1999; Entec, 1999; Pöpel, 1997). Daarna kan de alfa-factor verder teruglopen. Afhankelijk van de snelheid waarmee dit proces verloopt, moeten de elementen binnen 5 tot 10 jaar worden vervangen. Als gemiddelde levensduur wordt 7 jaar aangehouden (Flygt, 1999; Merrem André de la Porte, 1999; Entec, 1999). De levensduur van keramische elementen is gemiddeld 20 jaar.

In hoeverre beluchtingselementen een verslechterde zuurstofinbrengcapaciteit vertonen, kan met een praktijkproef van circa een half jaar worden onderzocht (Flygt, 1999).

Bijzondere condities waarbij een afwijkend lagere alfa-factor wordt gehanteerd zijn de eerste reactoren van propstroomsystemen bij toepassing van bellenbeluchting. Voor een beluchte selector wordt aangeraden een alfa-factor van 0,3 te hanteren (Stenstrom, 1981) en over een propstroomsysteem zonder voordenenitrificatie wordt aangeraden een alfa-factor van 0,5 tot 0,8 aan te houden (Chambers, 1992; Entec, 1999; Nopon, 1999) en met denitrificatie van 0,65 tot 0,8 (Entec, 1999; Nopon, 1999).

Bètafactor

De bèta-factor (β) wordt beïnvloed door de actuele temperatuur en de gewenste zuurstofconcentratie. Deze factor wordt berekend volgens:

$$\beta = C_s / (C_s - C_a) \quad (2)$$

Waarin:

C_s = maximale oplosbaarheid van zuurstof bij de maximale temperatuur (mg/l);

C_a = actuele zuurstofconcentratie (mg/l).

De maximale zuurstofconcentratie C_s is een functie van de temperatuur, de luchtdruk en de zoutconcentratie. Bij diepe tanks neemt door de verhoogde luchtdruk onder in de tank de maximale oplosbaarheid toe. Hierdoor kan in diepe tanks de zuurstofoverdracht beter verlopen dan onder traditionele condities (circa 4 m). Een beschouwing van de zuurstofoverdracht in diepe tanks is gegeven in bijlage 3.

De te hanteren actuele zuurstofconcentratie (C_a) varieert tussen 0,5 en 2 mg/l. Indien bij piekaanvoer wordt geaccepteerd dat de zuurstofconcentratie tot 0,5 mg/l daalt, kan voor C_a 0,5 mg/l worden aangehouden om overdimensionering te voorkomen. Indien verwacht wordt dat deze situaties regelmatig voorkomen en de kans op lichtslibvorming groot is, wordt aangeraden 2 mg/l aan te houden.

3.3 Berekening van de luchtinbrengcapaciteit bij bellenbeluchting

Voor het ontwerp van een bellenbeluchtingssysteem moet de zuurstofinbrengcapaciteit worden omgezet naar een luchtinbrengcapaciteit. De luchtinbrengcapaciteit wordt als volgt berekend:

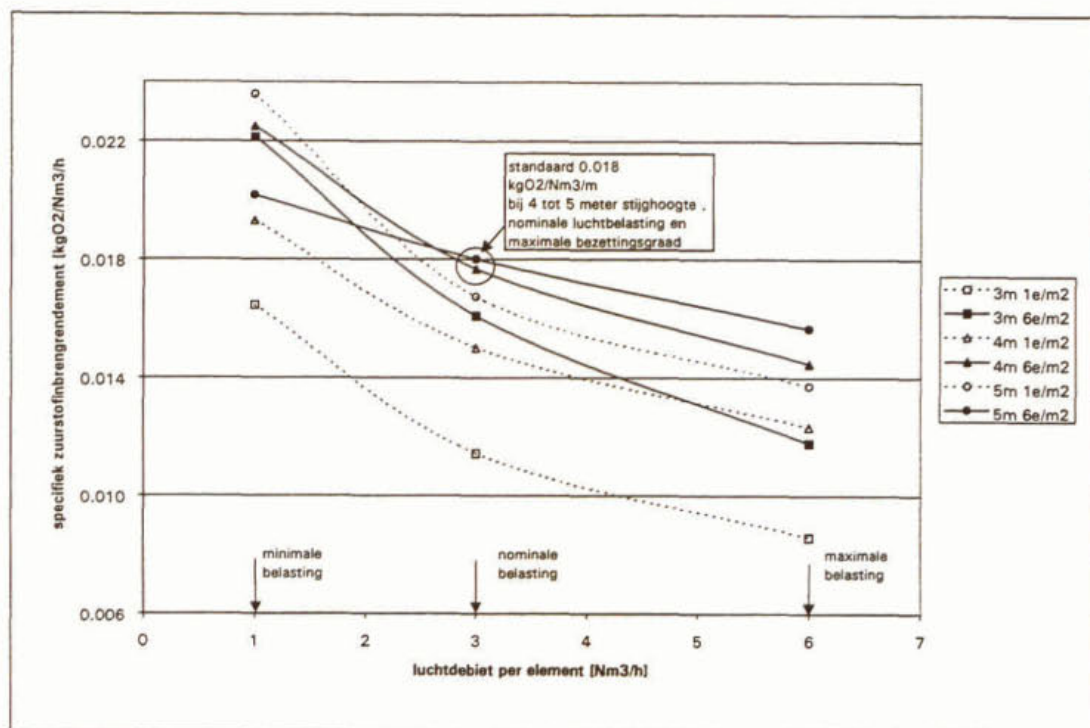
$$L = \frac{O_2 \text{ inbrengcapaciteit}}{ZI * SH} \quad (3)$$

waarin L = luchtinbrengcapaciteit (Nm^3/h);
 ZI = specifieke zuurstofinbrengcapaciteit ($\text{kgO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}^1$);
 SH = stijghoogte (m).

De specifieke zuurstofinbrengcapaciteit is afhankelijk van:

- het luchtdebiet per beluchtingselement;
- het aantal beluchtingselementen per m^2 ;
- het type beluchtingselement;
- de horizontale vloeistofstroom;
- de stijghoogte.

De invloed van bovenstaande factoren op de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit is weergegeven in figuur 8. Voor de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit wordt standaard $0,018 \text{ kg O}_2/\text{Nm}^3/\text{m}^1$ (5% per meter stijghoogte) aangehouden bij een optimale bezetting van de beluchtingselementen (opgave door leverancier), 50% van het maximale luchtdebiet van het element, geen horizontale vloeistofstroom en een stijghoogte tot 5 meter. Het effect van een horizontale vloeistofstroom en van een stijghoogte boven 5 meter is in bijlage 3 beschreven.



Figuur 8. Invloed van verschillende factoren op de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit (Flygt, 1999)

3.4

Zuurstofinbrengrendement

Het zuurstofinbrengrendement van beluchtingssystemen wordt uitgedrukt in kg O_2 per kW. Het is belangrijk te definiëren waar het energieverbruik wordt gemeten; voor of na de tandwielkast, motor, frequentieomvormer en kabel, en of de situatie in schoon water of de actuele situatie wordt bedoeld. Onduidelijkheid over de juiste definitie zorgt ervoor dat de opgegeven en gehanteerde rendementen door de leveranciers en waterbeheerders zeer verschillend kunnen zijn.

In principe wordt door de leveranciers het zuurstofinbrengrendement in schoon water aan de motoras opgegeven. Voor het berekenen van het energieverbruik dient dit rendement standaard te worden verminderd met 10% voor het energieverlies over de motor en met 5% voor het energieverlies over de frequentieomvormer, indien aanwezig.

Indien in de praktijk het zuurstofinbrengrendement wordt gemeten, dan is dit in principe de ingebrachte hoeveelheid zuurstof in vuil water per kW opgenomen vermogen voor de motor en eventuele frequentieomvormer. Deze waarde ligt ten opzichte van de door leveranciers opgegeven rendementen:

- 50% lager bij bellenbeluchting, 15% energieverlies over de motor bij $\alpha = 0,7$ en $\beta = 1,2$;
- 65% lager bij puntbeluchting, 15% energieverlies over de motor bij $\alpha = 0,9$ en $\beta = 1,2$.

Hieronder zal nog specifiekere worden ingegaan op het zuurstofinbrengrendement van bellenbeluchting en oppervlaktebeluchting.

3.4.1 Bellenbeluchting

Bij bellenbeluchting wordt het zuurstofinbrengrendement bepaald door de volgende factoren:

- de benodigde luchtdruk, bepaald door de stijghoogte en de weerstand over het beluchtingselement, de regelklep en de luchtleiding;
- de efficiëntie van de zuurstofoverdracht;
- de stroomsnelheid van het actief-slibmengsel;
- het rendement van de compressor en de motor.

Voor fijne-bellenbeluchting wordt door de leverancier van beluchtingselementen onder optimale zuurstofoverdracht een zuurstofinbrengrendement van 4 - 5 kg O₂/kW (Flygt, 1999) opgegeven in schoon water aan de motoras (nominale elementbelasting; optimale bezettingsgraad; 5 meter stijghoogte). Het hieruit te berekenen energieverbruik op basis van de zuurstofbehoefte ligt 10% tot 15% hoger (het rendement over de motor en eventuele frequentieomvormer). Het zuurstofinbrengrendement op basis van de zuurstofvraag bedraagt dan 2,0 - 2,5 kg O₂/kW ($\alpha=0,7$; $\beta=1,2$, motorrendement plus frequentieomvormers circa 85%).

Het zuurstofinbrengrendement van bellenbeluchting kan ook worden berekend op basis van de benodigde druk, het luchtdebiet en het daarbij benodigde asvermogen van de compressor. Op basis van gegevens van de leveranciers van compressoren wordt een rendement berekend van gemiddeld 4 - 4,3 kg O₂/kW aan de motoras (18 g O₂/Nm³/m; 100 mbar drukverlies over leiding en elementen; 5 meter stijghoogte). De hogere rendementen, opgegeven door de leveranciers van beluchtingselementen, worden dus veroorzaakt onder aanname van een hoger inbrengrendement en een minimaal drukverlies in de luchtleiding en over de elementen. Voor het ontwerp dient het opgegeven zuurstofinbrengrendement bij systeemkeuzes van beluchtingssystemen voor de praktijksituatie te worden gecorrigeerd met een factor van circa 0,8 ten gevolge van het motorrendement.

3.4.2 Oppervlaktebeluchting

Bij oppervlaktebeluchting wordt het zuurstofinbrengrendement bepaald door de volgende factoren:

- de efficiëntie van zuurstofoverdracht;
- het rendement over de tandwielkast en motor.

Door de leveranciers van langzaamdraaiende puntbeluchters en rotoren wordt het zuurstofinbrengrendement opgegeven aan de as van de motor.

Dit rendement bedraagt:

- 2-2,2 kg O₂/kW voor de vernieuwde typen puntbeluchters (Hubert 1999);

- 1,6-1,8 kg O₂/kW voor de traditionele puntbeluchters en rotoren (Hubert 1999, Pöpel 1977).

Door de leverancier van sneldraaiende puntbeluchters wordt het zuurstofinbrengrendement opgegeven op basis van het opgenomen vermogen. Dit rendement bedraagt 1,4-1,6 kg O₂/kW (Dirkse Milieutechniek).

3.4.3 Vergelijking energieverbruik bellen- en oppervlaktebeluchting

Een reële vergelijking tussen de zuurstofinbrengrendementen van bellen- en oppervlaktebeluchting is alleen goed mogelijk op basis van het energieverbruik. Bij fijne bellenbeluchting met een zuurstofinbrengrendement van 18 g O₂/Nm³/m, 5 meter stijghoogte, 600 mbar tegendruk bedraagt het energieverbruik 0,5 kW/kg O₂. Bij rotoren en langzaamdraaiende puntbeluchting (traditioneel) met een zuurstofinbrengrendement van 1,7 kg O₂/kW bedraagt het energieverbruik 0,9 kW/kg O₂. Bij de vernieuwde puntbeluchters met een zuurstofinbrengrendement van 2,1 kg O₂/kW bedraagt het energieverbruik 0,7 kW/kg O₂. Bij sneldraaiende puntbeluchting met een zuurstofinbrengrendement van 1,5 kg O₂/kW bedraagt het energieverbruik 0,9 kW/kg O₂.

Uit bovenstaande blijkt dat de vernieuwde types puntbeluchters gemiddeld 40% meer energie verbruiken dan bellenbeluchting. In de praktijk zal bij het toepassen van bellenbeluchting ook voortstuwingsenergie worden gebruikt. Hierdoor moet het genoemde energieverbruik voor het bellenbeluchtings-systeem worden gecorrigeerd tot 0,55 kW/kg O₂. Het specifieke energieverval tussen bellen- en puntbeluchting zal derhalve circa 25% bedragen.

3.5 **Berekening van het vereiste motorvermogen**

De berekening van het vereiste motorvermogen van puntbeluchting kan eenvoudig berekend worden door de zuurstofinbrengcapaciteit te vermenigvuldigen met het zuurstofinbrengrendement. Bij toepassing van bellenbeluchting is de berekening van het vereiste motorvermogen van de compressoren complexer en kan worden bepaald volgens (Westphal, 1995):

$$P = Q \cdot \Delta p / \eta_{vol} + Q \cdot \Delta p \cdot R / \eta_{vol} \quad (4)$$

Waarin:

- P = motorvermogen (kW);
- Q = benodigd luchtdebiet (m³/s);
- Δp = drukverschil (N/m² of mbar*100);
- η_{vol} = volumetrische werkingsgraad. Deze varieert tussen de 0,85 en 0,55 waarbij deze kleiner wordt bij een grotere tegendruk en groter bij een hoger toerental. In principe kan 0,8 worden aangehouden (-);
- R = verlies in de compressor, respectievelijk 0,03 tot 0,08 voor een directe aandrijving en bandaandrijving (-).

Werkwijze

Ten behoeve van het opzetten van een beslissingsmodel is het noodzakelijk te inventariseren welke aspecten in de praktijk worden afgewogen om tot een keuze van een beluchtingssysteem te komen. Hierbij kan, naast de kosten, onderscheid worden gemaakt tussen procestechnologische en operationele aspecten.

De inventarisatie van bovengenoemde aspecten heeft plaatsgevonden aan de hand van een enquête aan alle waterbeheerders en het opvragen van relevante informatie bij de leveranciers van beluchtingssystemen. Het reactiepercentage van de enquête aan de waterbeheerders was 70% zodat een goed beeld geschetst kan worden van de uitgangspunten, wegingsfactoren en ervaringen van de waterbeheerders. De verschillende disciplines binnen de waterbeheerders waaraan een reactie is gevraagd waren:

- technologie;
- werktuigbouwkunde;
- beheer en onderhoud.

Daarnaast hebben vrijwel alle belangrijke leveranciers in Nederland gereageerd op de enquête.

Door te weinig ervaring of respons van de waterbeheerders op het gebied van snelle oppervlaktebeluchters (één respons) en rotoren (geen respons) zullen deze verder buiten beschouwing worden gelaten. Echter de procedure voor de keuze van het beluchtingssysteem is, met inachtneming van het al dan niet opnemen van specifieke randvoorzieningen, zonder meer toe te passen op laatstgenoemde beluchtingssystemen.

Procestechnologische aspecten

In hoofdstuk 3 zijn de volgende procestechnologische aspecten reeds aan de orde gekomen:

- alfa-factor;
- bèta-factor;
- zuurstofinbrengrendement;
- energieverbruik.

Aan de waterbeheerders is gevraagd welke uitgangspunten zij voor bovenstaande aspecten hanteren en of ze deze via praktijkmetingen hebben geverifieerd. Op deze wijze kan een gemiddelde en een bandbreedte voor de uitgangspunten worden verkregen en kan verificatie van de gehanteerde uitgangspunten plaatsvinden. De bandbreedte van de waarden kan worden gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse van het beslissingsmodel. De gemiddelde gehanteerde uitgangspunten zullen als standaardwaarden worden gebruikt in de voorbeelden van het beslissingsmodel. De waterbeheerders kunnen bij het gebruik van het beslissingsmodel hun eigen specifieke waarden opgeven.

4.1.2 Operationele aspecten

Er is een aantal vragen over de praktijkervaring met de beluchtingssystemen gesteld. De geïnterviewde aspecten zijn onder andere:

- exploitatiekosten;
- inpasbaarheid;
- onderhoud en levensduur;
- bedrijfszekerheid;
- ervaring.

De resultaten van de antwoorden op de vragen met betrekking tot onderhoud en levensduur zijn gebruikt voor de kostenberekeningen in het beslissingsmodel. Hiertoe zijn de gegevens uitgebreid met de uitgangspunten van de leveranciers. De resultaten van de bedrijfszekerheid, inpasbaarheid en ervaring zijn gebruikt in de afwegingsmethodiek van het beslissingsmodel.

4.1.3 Wegingsfactoren

Van een aantal aspecten, waarvan bekend is dat ze een rol spelen in de afweging, is gevraagd hoe belangrijk ze worden gevonden voor het maken van een keuze. De aspecten die aan de waterbeheerders werden voorgelegd, kunnen als volgt worden omschreven:

- De *exploitatiekosten* zijn de som van afschrijvings-, energie- en onderhoudskosten, inclusief de kosten die nodig zijn voor randvoorzieningen ten behoeve van geur-, geluid- en arbo-eisen;
- Het *onderhoudsgemak* geeft aan hoe gemakkelijk het systeem te onderhouden is en hoeveel tijd de beluchting of beluchtingstank tijdens onderhoudswerkzaamheden uit bedrijf moet;
- De *bedrijfszekerheid* wordt bepaald door de frequentie en duur van storingen. Hoe eenvoudig zijn de storingen te verhelpen en leiden storingen tot overschrijding van de effluentkwaliteit;
- De *inpasbaarheid* is de mate waarin een beluchtingssysteem voldoet indien vorm, diepte en afdekking van de tank reeds zijn vastgelegd;
- De *ervaring* met een bepaald systeem is gerelateerd aan de werknemers van de waterbeheerder;
- De *grootte van de zuiveringsinrichting* wordt bepaald door de zuiveringscapaciteit en de daarbij behorende personeelsbezetting;
- De *capaciteit* van de benodigde apparatuur;
- De *vervangbaarheid* wordt bepaald door de frequentie aan te geven van hoe vaak het systeem of onderdelen hiervan vervangen moet worden, en door de duur van de uitbedrijfname van het beluchtingssysteem of de beluchtingstank in zijn geheel;
- De *duurzaamheid* als maat voor het gebruik van energie en grondstoffen en de productie van reststoffen;
- Het *bereik* geeft inzicht in de maximale zuurstofinbrengcapaciteit per apparatuur.

Een waardering voor een eventuele gevoeligheid van de slibbezinkingseigenschappen in relatie tot het type beluchtingssysteem is niet aan de orde gesteld. De slibbezinkingseigenschappen zijn direct gerelateerd aan de procesconfiguratie en niet aan het type beluchtingssysteem.

Het belang dat door de waterbeheerder aan ieder aspect kon worden gegeven is:

- 1 = niet belangrijk;
- 2 = neutraal;
- 3 = redelijk belangrijk;
- 4 = belangrijk;
- 5 = zeer belangrijk.

Het gemiddelde belang van een aspect is ten behoeve van het beslissingsmodel omgezet naar een wegingsfactor conform tabel 1. Uitgangspunten bij het genereren van de wegingsfactor zijn:

- belangrijke aspecten moeten bij kleine verschillen doorslaggevend kunnen zijn;
- neutrale aspecten moeten alleen doorslaggevend zijn als belangrijke aspecten niet onderscheidend zijn;
- niet belangrijke aspecten worden niet meegewogen.

Tabel 1: Omrekeningstabel van het belang van de waterbeheerders naar een wegingsfactor

Omschrijving	Gemiddelde belang	Wegingsfactor
Niet belangrijk	< 2,5	0
Neutraal	2,5-3,5	1
Redelijk belangrijk	3,5 - 4	2
Belangrijk	4 - 4,5	3
Zeer belangrijk	> 4,5	4

4.2 Procestechnologische aspecten

4.2.1 Alfa-factor

In tabel 2 staan de alfa-factoren vermeld zoals deze momenteel worden toegepast voor de berekening van de zuurstofinbrengcapaciteit van laagbelaste actief-slibinstallaties.

Tabel 2: De toegepaste alfa-factoren

Type beluchting	Waterbeheerders		Leveranciers
	gemiddeld	minimaal - maximaal	reikwijdte
Bellenbeluchting	0,70	0,5 - 0,8	0,6-0,8
Puntbeluchting	0,80	0,7 - 0,9	0,8-0,9

Afwijkingen van de standaard toegepaste alfa-factor komen weinig voor, maar voorbeelden hiervan zijn :

- een Schreiber®-installatie : 0,7 in plaats van 0,5 als minimum;
- voor vetrijk afvalwater : 0,6 in plaats van 0,8.

De leveranciers geven geen garanties voor alfa-factoren. Tussen leveranciers van beluchtingselementen is er wel een verschil in het omgaan met het verdisconteren van veroudering van de apparatuur. Soms introduceert men hiervoor een aparte factor ("Fouling-factor"), terwijl dit normaal gesproken in de opgegeven alfa-factor is verdisconteerd.

Met betrekking tot de gemeten alfa-factoren blijkt dat tot nu toe weinig praktijkmetingen zijn verricht door de waterbeheerders. Enkele meetresultaten zijn ter illustratie weergegeven in tabel 3.

Tabel 3: Gemeten alfa-factoren

RWZI	Type beluchting	alfa-factor	Opmerkingen
Kralingseveer	puntbeluchting	0,68	op basis van berekend O ₂ -verbruik
Nieuwgraaf	bellenbeluchting	0,73 - 0,79	in proefinstallatie
Bath	bellenbeluchting	0,2 - 0,8	over lengte van een propstroom
Dongen	bellenbeluchting	0,5	

Uit tabel 2 blijkt dat een grote mate van overeenstemming bestaat tussen de leveranciers en de waterbeheerders met betrekking tot de toe te passen alfa-factor. Er zijn echter in Nederland weinig directe metingen uitgevoerd ter verificatie van de gehanteerde alfa-factor. Op basis van onderzoeken in het buitenland (Groves, 1992; EPA, 1989; Pöpel, 1977) kan worden gesteld dat de gemiddelde waarden die de beheerders hanteren goede uitgangspunten vormen.

4.2.2 Specifieke zuurstofinbrengcapaciteit

Het toegepaste specifieke zuurstofinbrengcapaciteit voor de berekening van de luchtinbrengcapaciteit staat vermeld in tabel 4.

Tabel 4: Specifieke zuurstofinbrengcapaciteit bij bellenbeluchting (g O₂/Nm³.m¹)

Waterbeheerders			Leveranciers
Gemiddeld	95 % interval	minimaal - maximaal	reikwijdte
16,5	15 - 18	10 - 20	15-25

Een aantal waterbeheerders past een correctie toe op de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit. Het aantal per variabele is weergegeven in tabel 5. In de regel is sprake van een positieve correctie, dat wil zeggen een hogere inbrengcapaciteit.

Tabel 5: Aantallen waterbeheerders die wel of geen correctie op de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit toepassen

Variabele	Correctie op de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit	
	ja	nee
Type element : membraan/keramisch	4	6
Type: buis/schotel/plaat	2	8
Elementendichtheid	3	7
Debiet per element	4	6
Horizontale vloeistofsnelheid	4	7
Stijghoogte	2	9

De gehanteerde capaciteiten door de waterbeheerders en de leveranciers hebben een grote variatie (25%). Toch wordt er maar door 50% van de waterbeheerders een correctie toegepast en ligt het 95% interval van de toegepaste capaciteiten aan de ondergrens van de door de leverancier opgegeven capaciteiten.

Door de waterbeheerders zijn enkele metingen van de specifieke zuurstofinbrengcapaciteiten verricht. De resultaten hiervan zijn gegeven in tabel 6.

Tabel 6: Gemeten specifieke zuurstofinbrengcapaciteiten ($\text{g O}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$) in vergelijking tot de gegarandeerde capaciteiten door de leveranciers

RWZI	Specifieke zuurstofinbrengcapaciteiten	
	gemeten	gegarandeerd
Leiden	20 - 22	16
Haarlem	23 - 25	16
Alphen	24	18,5
Zeewolde	18	17,9

De gemeten capaciteiten liggen in de reikwijdte van de door de leveranciers opgegeven capaciteiten en liggen boven de door de waterbeheerders gehanteerde capaciteiten (zie tabel 4). De metingen zijn meestal kort na het inregelen van de rwzi uitgevoerd zodat er niet of nauwelijks sprake is geweest van vervuiling van de elementen. Het hanteren van een lage specifieke zuurstofinbrengcapaciteit heeft twee consequenties:

- vanwege de introductie van een extra reservefactor wordt voldoende beluchtingscapaciteit geïnstalleerd, maar dit kan resulteren in overcapaciteit;
- voor het berekenen van het energieverbruik worden wellicht te ongunstige uitgangspunten gehanteerd.

Bij verschillende rwzi's wordt voortstuwing (horizontale vloeistofstroom) toegepast. In Hoofdstuk 3 en bijlage 3 zijn de effecten hiervan op de specifieke zuurstofinbrengcapaciteit reeds aan de orde gekomen. Tabel 7 geeft de specifieke voortstuwingsenergie die momenteel door de waterbeheerders wordt toegepast.

Tabel 7: Specifieke voortstuwingsenergie (W/m³)

Gemiddelde voortstuwingsenergie	95 % interval	Minimaal – Maximaal
2,2	1,4 - 2,9	1,35 - 4

Bij gebruik van tegenstroom-bellenbeluchting met behulp van voortstuwing kan een hoger specifieke zuurstofinbrengcapaciteit worden verkregen. Door de leveranciers wordt er een positieve correctie op de capaciteit toegepast indien er sprake is van een horizontale vloeistofstroming. Deze correcties liggen in de orde van grootte van 0 tot 30% afhankelijk van de specifieke situatie.

Op basis van de aangereikte gegevens van leveranciers en waterbeheerders kunnen de volgende maximale specifieke zuurstofinbrengcapaciteiten ten behoeve van het ontwerp toegepast worden:

- bellenbeluchting zonder voortstuwing: 18 g O₂/Nm³.m;
- bellenbeluchting met voortstuwing: 24 g O₂/Nm³.m.

4.2.3 Zuurstofinbrengrendement

Het zuurstofinbrengrendement bij de toepassing van bellen- en puntbeluchting is weergegeven in tabel 8. De grote spreiding van het rendement wordt veroorzaakt door de onduidelijkheid in het rendement dat wordt bedoeld (zie paragraaf 3.4) en of dit wordt gebruikt voor bepaling van het motorvermogen of voor het energieverbruik. De gemiddelde zuurstofinbrengrendementen van de waterbeheerders zijn redelijk in overeenstemming met de theorie op basis van de zuurstofvraag. Door de leveranciers opgegeven rendementen zijn meestal gebaseerd op het opgenomen vermogen aan de motoras. Voor het reële energieverbruik moet, zoals ook reeds in hoofdstuk 3 is aangegeven, op het inbrengrendement 10% in mindering worden gebracht voor de motor en 5% voor een eventuele frequentieomvormer.

Tabel 8: Gehanteerde zuurstofinbrengrendementen (kg O₂/kW)

Type beluchting	Waterbeheerders		Leveranciers
	gemiddeld	minimaal - maximaal	reikwijdte
Bellenbeluchting	3,4	2,5 - 4,0	3,0 - 4,5
Puntbeluchting	1,8	1,5 - 2,0	1,8 - 2,0

Tabel 9 geeft de resultaten van de door de waterbeheerders gemeten rendementen weer.

Tabel 9: Gemeten zuurstofinbrengrendement in vergelijking met de opgegeven rendementen door de leverancier

RWZI	Type beluchting	Zuurstofinbrengrendement kg O ₂ /kW	
		gemeten	opgegeven
Vlieland	Puntbeluchting	1,4	1,8
Nijverdal	Puntbeluchting	2,1	1,8
Nieuwveer	Puntbeluchting	1,95	1,95
Leiden	Bellenbeluchting	4,4	
Alphen	Bellenbeluchting	4,5	3,7

De hoge rendementen op de RWZI Alphen en RWZI Leiden zijn te danken aan een 20% hoger zuurstofinbrengrendement dan opgegeven (0,022 in plaats van 0,018 g O₂/Nm³.m¹).

4.3 Operationele aspecten

4.3.1 Bedrijfszekerheid

De bedrijfszekerheid van een beluchtingssysteem wordt in het algemeen als één van de belangrijkste aspecten ervaren. Tabel 10 geeft de storingsfrequentie weer van verschillende beluchtingssystemen. Deze storingen hebben overigens nooit geleid tot een overschrijding van de effluenteisen, zodat ze meer iets zeggen over het onderhoudsgemak.

Tabel 10: Indicatieve storingsfrequentie en de tijdsduur van uit bedrijf zijn

Aantal rwzi's	Type beluchting	Storingsfrequentie Aantal keren per jaar	Duur beluchting buiten bedrijf uur/jaar
12	Bellenbeluchting		
	- keramische elementen	0 - 5	0 - 20
9	- membraan elementen	0 - 5	0 - 10
10	Puntbeluchting	0 - 2	0 - 5

Tabel 10 geeft aan dat de storingsfrequentie van de verschillende beluchtingssystemen, zowel het aantal keren dat een storing optreedt als de tijd dat een beluchtingssysteem buiten bedrijf is, voor alle drie beluchtingssystemen laag is. Absoluut is de storingsfrequentie bij puntbeluchters het laagst en zij scoren daarmee hoger op het onderhoudsgemak.

De bedrijfszekerheid bij de rwzi's hangt samen met de volgende procesconfiguraties:

- de aanwezigheid van meerdere straten; het uit bedrijf gaan van één straat leidt niet direct tot overschrijding van de effluenteisen;
- het ophaalbare beluchtingselement; de beluchting kan hierdoor gedeeltelijk in bedrijf blijven;
- opstelling van een "extra" compressor als stand-by; indien een storing aan een compressor optreedt schakelt de reservecompressor in.

4.3.2 Onderhoud en levensduur

Onderhoud en levensduur zijn aspecten die de jaarlijkse exploitatiekosten mede bepalen. Bij de waterbeheerders is er op dit moment relatief weinig inzicht in de kosten van het onderhoud aan beluchtingssystemen.

Op de vraag welke kosten in termen van hoeveelheid mensdagen en materiaalkosten per jaar begroot worden, bleek dat:

- deze kosten niet apart worden begroot;
- deze kosten niet nauwkeurig kunnen worden aangegeven.

In een aantal gevallen werd een ruwe schatting doorgegeven. Bij de reeds in gebruik zijnde rwzi's heeft men een iets beter inzicht in de kosten die verbonden zijn met onderhoud en vervanging van beluchtingssystemen. Ook hier blijkt dat de opgegeven kosten in de meeste gevallen een schatting zijn. Slechts in een enkel geval werd bijgehouden welke kosten en manuren gemaakt waren met betrekking tot het reguliere onderhoud aan het beluchtingssysteem.

Om een inschatting van de onderhoudskosten te maken zijn de opgaven door de leveranciers van de verschillende onderdelen als uitgangspunt genomen. Tabel 11 geeft de indicatieve onderhoudsposten weer volgens de leveranciers.

Tabel 11: Indicatief aantal manuren en materiaalkosten per jaar voor onderhoud aan beluchtingssystemen volgens de leveranciers

Type beluchting	Onderdelen	Man-uren	Eenheid	Materiaal-kosten	Eenheid
Bellenbeluchting	compressor	16-24	h/j/compressor	1.000-2.500	f/j/compressor
	keramische elementen	16-32	h/j	0,5-1	% investering
	membraan elementen	4-8	h/j	0,5-1	% investering
Oppervlakte-beluchting	puntbeluchter	4-6	h/j/puntbeluchter	25-100	f/j/puntbeluchter

Uit tabel 11 blijkt dat de onderhoudskosten bij toepassing van bellenbeluchting hoger zijn dan bij toepassing van puntbeluchting. Slechts bij een enkele rwzi bleek er een goede registratie te zijn van het aantal uren en de materiaalkosten die aan onderhoud besteed waren. Tabel 12 vergelijkt de kosten berekend volgens de opgave van de leveranciers conform tabel 11, en de werkelijk geregistreerde kosten en manuren voor de rwzi Groenendijk.

Tabel 12: Onderhoudskosten berekend volgens opgave leveranciers en de werkelijk gemaakte kosten (Bron: Hoogheemraadschap Schieland, rwzi Groenendijk)

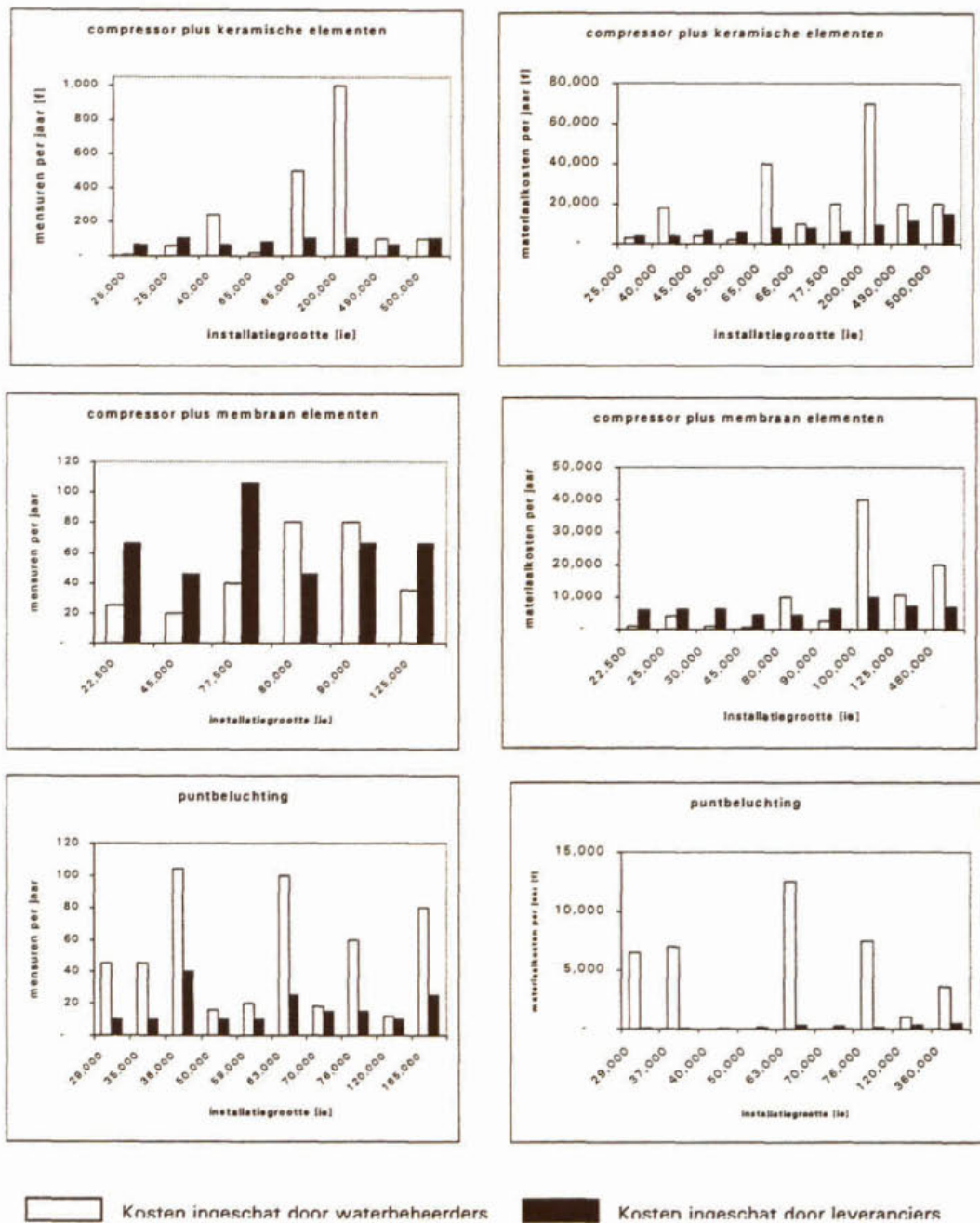
Type beluchting	Manuren (h/j)		Materiaalkosten (f/j)	
	leverancier	werkelijk	leverancier	Werkelijk
Oppervlaktebeluchting	12-18	18	75-300	0

Uit een vergelijking op andere rwzi's tussen de geschatte kosten en de berekende kosten volgens de leverancier blijkt dat er grote verschillen kunnen optreden. Figuur 9 geeft de opgegeven ingeschatte, en de volgens de richtlijnen van de leveranciers berekende manuren voor regulier onderhoud aan systemen met punt- en bellenbeluchting.

Uit figuur 9 (zie volgende pagina) blijkt het volgende:

- er is geen eenduidige relatie tussen de onderhoudskosten (zowel mensuren als materiaalkosten) en de installatiegrootte;
- voor bellenbeluchting met keramische elementen treden tussen de berekende en de ingeschatte uren die nodig zijn voor onderhoud grote verschillen op. In die gevallen waar het aantal uren zeer hoog werd ingeschat (500 en 1.000 manuur per jaar) bleek dat er problemen waren met verstoppingen van de elementen waardoor relatief meer onderhoud nodig was;
- voor bellenbeluchting met membraanelementen bestaat een redelijke mate van overeenstemming tussen de berekende en de ingeschatte manuren;
- voor systemen met puntbeluchting blijkt in een aantal gevallen significant meer uren voor onderhoud ingeschat te worden dan wordt berekend;
- de ingeschatte materiaalkosten zijn voor puntbeluchting in het algemeen significant hoger dan de berekende kosten;
- voor systemen met bellenbeluchting is er een redelijke overeenkomst tussen de berekende en de ingeschatte kosten.

In het beslissingsmodel worden de onderhoudskosten berekend volgens de methodiek van de leveranciers. De kengetallen zoals in tabel 11 gegeven, zijn naar eigen inzicht aan te passen. Naast onderhoud is met betrekking tot de exploitatiekosten van een systeem ook de levensduur van verschillende onderdelen van een beluchtingssysteem belangrijk. Tabel 13 geeft de levensduur van de verschillende beluchtingssystemen zoals aangegeven door de leveranciers, ervan uitgaande dat regulier onderhoud aan de systemen gepleegd wordt.



Figuur 9: Per jaar door de waterbeheerders en leveranciers ingeschatte manuren en materiaalkosten

Tabel 13: Gemiddelde levensduur van beluchtingssystemen zoals aangegeven door de leveranciers

Type beluchting	Onderdelen	Gemiddelde levensduur	Eenheid
Bellenbeluchting	compressor	20	j
	membraanelementen	7	j
	keramische elementen	20	j
Oppervlaktebeluchting	puntbeluchter	20	j

4.3.3 Inpasbaarheid

De inpasbaarheid geeft aan in welke mate een beluchtingssysteem toegepast kan worden indien vorm en grootte van de aëratietank bekend zijn. Voor bellenbeluchting speelt dit geen belangrijke rol daar dit een zeer flexibel systeem is. Voor puntbeluchting moet er rekening mee worden gehouden dat extra civiele investeringskosten mede afhankelijk zijn van de vorm van de aëratietank, en dat het energetisch rendement voor rechthoekige tanks lager is dan voor ronde of ovale tanks.

4.3.4 Ervaring

Bij de momenteel in bedrijf zijnde rwzi's wordt voornamelijk bellenbeluchting, puntbeluchting, of een combinatie hiervan toegepast. In het algemeen is de ervaring dat zowel het gekozen beluchtingssysteem alsmede de verschillende onderdelen voldoen. Tabel 14 geeft de resultaten van de ervaringen met de in bedrijf zijnde beluchtingssystemen weer.

Tabel 14: Ervaringen van de verschillende waterbeheerders met de huidige in bedrijf zijnde beluchtingssystemen

Type beluchting	aantal	Systeem voldoet		
		wel	niet	reden
Oppervlaktebeluchting	17	15	2	onvoldoende capaciteit in hoogseizoen
Bellenbeluchting	26	22	4	
Waarvan:				
- Membraanelementen	14	14	0	
- Keramische elementen	12	8	4	- te frequente vervuiling elementen; - intermitterende beluchting onmogelijk; - beluchting niet optimaal te regelen met het oog op denitrificatie.

Uit tabel 14 blijkt dat:

- beluchtingssystemen waarbij gebruik wordt gemaakt van puntbeluchters of bellenbeluchting met membraanbeluchtingselementen, goed voldoen;
- de toepassing van bellenbeluchting met keramische beluchtingselementen minder wordt gewaardeerd vanwege de neiging tot verstopping van de elementen en de geringere flexibiliteit bij denitrificatie en intermitterende beluchting.

4.4

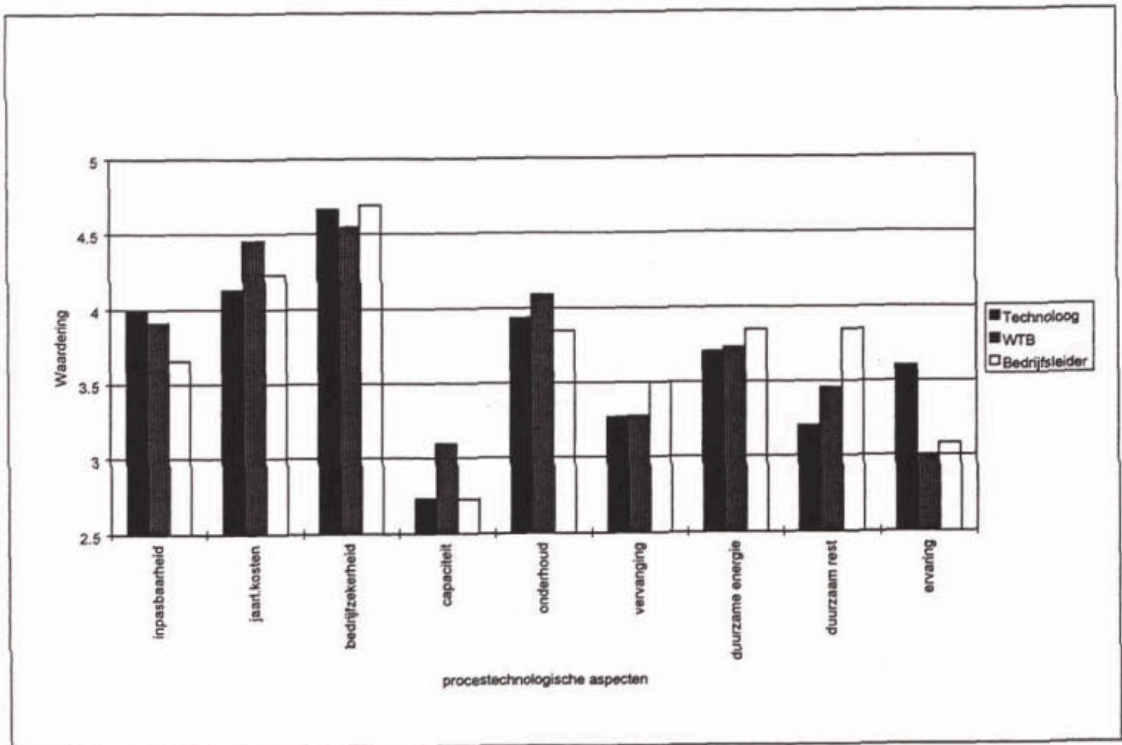
Wegingsfactoren

Door de diverse waterbeheerders is in het kader van deze studie het belang aangegeven van een aantal aspecten voor/bij de keuze van een beluchtingssysteem en/of onderdelen daarvan. De resultaten hiervan zijn weergegeven in bijlage 5. In tabel 15 is het gemiddelde belang weergegeven. Hierbij is tevens de toegekende wegingsfactor, volgens tabel 1, vermeld. De beoordeling tussen de waterbeheerders onderling laat kleine verschillen zien, maar de rangorde is bijna overal gelijk. Het belang was niet of nauwelijks verschillend tussen de verschillende vakdisciplines. Het belang per aspect per vakdiscipline is weergegeven in figuur 10.

Tabel 15: Belang aangegeven door de waterbeheerders en wegingsfactoren

Aspecten	Belang waterbeheerder		Wegingsfactor
Bedrijfszekerheid	4,6 ± 0,1	Zeer Belangrijk	4
Exploitatiekosten	4,3 ± 0,2	Belangrijk	3
Inpasbaarheid	3,9 ± 0,3	Redelijk Belangrijk	2
Onderhoud	3,9 ± 0,3		
Duurzaamheid energie	3,8 ± 0,3		
Duurzaamheid geluid, geur	3,5 ± 0,2		
Vervanging	3,3 ± 0,3	Neutraal	1
Ervaring	3,3 ± 0,3		
Capaciteit	2,8 ± 0,3		

Uit tabel 15 blijkt dat de bedrijfszekerheid en de exploitatiekosten het belangrijkste worden gevonden bij de keuze van een beluchtingssysteem. Opvallend is dat ervaring met een systeem neutraal wordt beoordeeld. Er is ook gevraagd om het belang aan te geven bij de keuze van de verschillende installatieonderdelen (puntbeluchters, compressoren, beluchtingselementen). Het blijkt dat bij de keuze van beluchtingselementen onderhoud en vervanging een belangrijke rol spelen en bij de keuze van puntbeluchters en compressoren de capaciteit en het regelbereik.



Figuur 10. Waardering voor de verschillende aspecten door de vakdisciplines technologie, werktuigbouw en beheer en onderhoud

PROCEDURE VOOR DE KEUZE VAN HET BELUCHTINGSSYSTEEM

Voor de procedure voor de keuze van het beluchtingssysteem is gekozen voor een beslissingsmodel. De opzet van het model wordt hierna uitgelegd, waarna werkwijze en gevoeligheden van het model nader worden toegelicht aan de hand van een voorbeeld. Uiteindelijk is het beslissingsmodel gebruikt om de keuze van het beluchtingssysteem voor toepassing bij rwzi's inzichtelijk te maken. Een korte handleiding voor het gebruik van het beslissingsmodel wordt uiteengezet in bijlage 6.

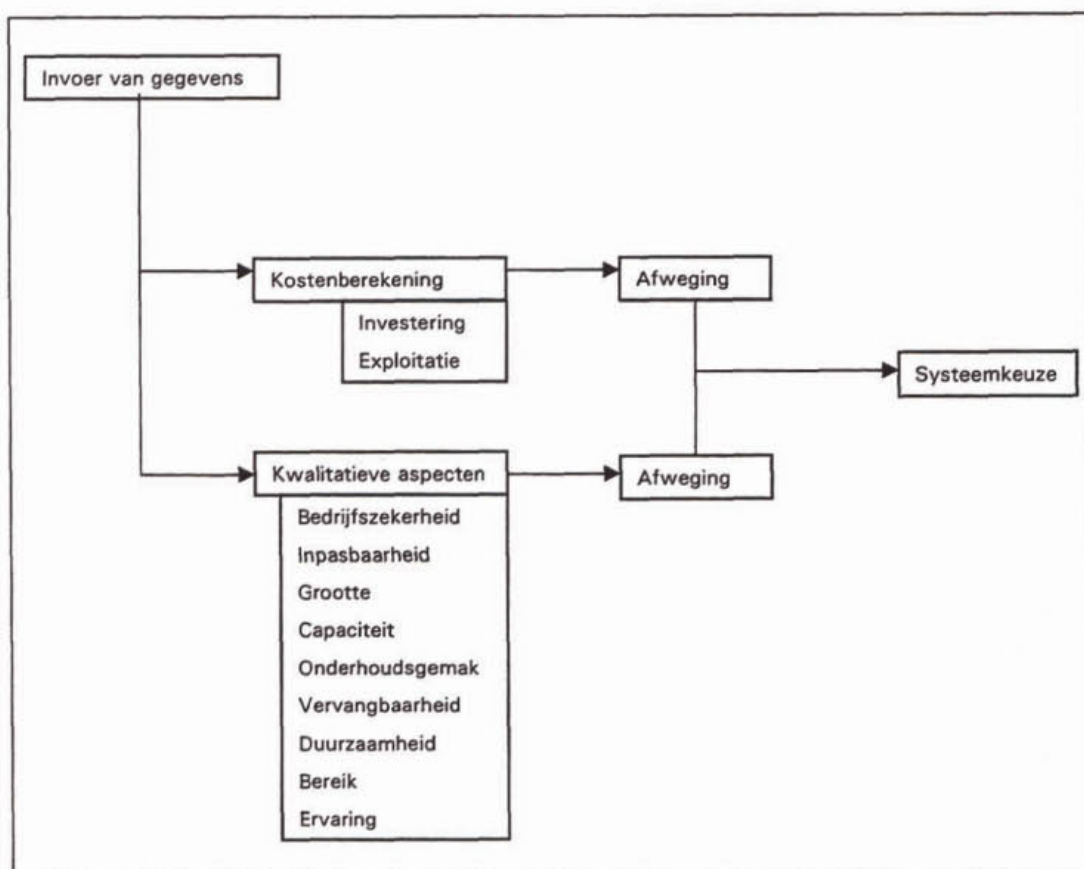
5.1

Beslissingsmodel

Het beslissingsmodel "keuze beluchtingssystemen" is opgebouwd uit twee delen:

- een kostenberekening waarbij de investerings- en exploitatiekosten van bellenbeluchting en puntbeluchting worden bepaald en vergeleken;
- een multi-criteria-analyse waarin de kwalitatieve en kwantitatieve factoren worden afgewogen.

Het beslissingsmodel is schematisch weergegeven in figuur 11.



Figuur 11: Schematische weergave van het beslissingsmodel

De beschrijving van de kostenberekeningsmethodiek van de beluchtings-systemen in het beslissingsmodel is weergegeven in bijlage 4.

5.1.1 Kostenberekening

De kostenberekening omvat de investerings- en exploitatiekosten verbonden aan een beluchtingssysteem. Deze kosten worden berekend op basis van een set invoergegevens.

Het model gaat uit van standaardwaarden voor aspecten als energieverbruik en alfa-factor, die gebaseerd zijn op de uitkomsten van de enquête en literatuurstudie, zoals besproken in hoofdstuk 4. Met de invoergegevens worden de volgende berekeningen uitgevoerd:

- dimensionering van het beluchtingssysteem voor de verschillende configuraties:
 - * bellenbeluchting met en zonder voortstuwing;
 - * puntbeluchting in ronde en ovale tanks met en zonder voortstuwing;
 - * puntbeluchting in rechthoekige tanks.
- berekening van de investeringskosten. Voor bellenbeluchting omvat dit de beluchtingselementen, de luchtleidingen, drie compressoren (2+1) met een geluidsomkasting en een compressorgebouw. De reservestelling voor de compressor is voorzien om het systeem vergelijkbaar te krijgen in bedrijfszekerheid. Voor de puntbeluchting omvat dit de schoepen, de tandwielkast en de motor inclusief omkasting. Bij puntbeluchting zijn daarnaast de volgende civiele kosten opgenomen:
 - * ovale bouw, een dek met geleidingswanden bij de beluchter en een brug;
 - * ronde bouw, idem ovale bouw en scheidingswand in de tank;
 - * rechthoekige bouw, een dek en een brug.
- berekening van de exploitatiekosten van de verschillende beluchtings-systemen als som van de jaarlijkse kapitaalslasten, onderhoudskosten en energiekosten. De berekening van de onderhoudskosten is gebaseerd op de in hoofdstuk 4 gegeven opgave van de leveranciers. Deze laatste kosten kunnen echter ook naar eigen inzicht worden gewijzigd. De volledige kostenberekeningsmethodiek is in bijlage 4 gegeven.

5.1.2 Multi-criteria analyse

Theorie

Naast een kostenberekening wordt de keuze voor een beluchtingssysteem bepaald door verschillende aspecten tegen elkaar af te wegen. De methodiek is gebaseerd op het toekennen van een gewicht die aan een zeker aspect wordt toegekend; de wegingsfactor. Deze wegingsfactoren zijn reeds in hoofdstuk 4 aan de orde gekomen. Hiernaast wordt aan ieder aspect een scoringsfactor toegekend. De waardering van een aspect is het product van de wegingsfactor en de scoringsfactor. De scoringsfactor is een "objectief" gegeven.

Een waterbeheerder heeft bijvoorbeeld alleen maar ervaring met bellenbeluchting en totaal geen ervaring met puntbeluchting. In dat geval krijgt de ervaring met bellenbeluchting een maximale scoringsfactor en met puntbeluchting een minimale scoringsfactor.

In het beslissingsmodel zijn er voor de aspecten 5 wegingsfactoren gedefinieerd :

- 0 = niet belangrijk
- 1 = neutraal
- 2 = redelijk belangrijk
- 3 = belangrijk
- 4 = zeer belangrijk

Het toekennen van een wegingsfactor is een subjectieve daad. In het beslismodel wordt een indicatie gegeven op basis van de uitkomsten van de enquête. Deze indicaties zijn als standaardwaarden gebruikt voor de voorbeelden in dit rapport.

In het beslismodel zijn voor de scoringsfactor 5 scores gedefinieerd:

- 1 = slecht
- 2 = matig
- 3 = voldoende
- 4 = ruim voldoende
- 5 = goed

Het toekennen van een scoringsfactor is een objectieve daad. In het beslismodel wordt een indicatie voor de scoringsfactoren gegeven. De indicaties zijn ook gebruikt in de voorbeelden. In tabelvorm wordt de volgende matrix verkregen.

Tabel 16: Waardering van de kwalitatieve aspecten

Kwalitatieve aspecten	Wegings- factor (0-4)	Bellenbeluchting		Puntbeluchting	
		Scorings- factor (1-5)	Waardering	Scorings- factor (1-5)	Waardering
Bedrijfszekerheid	a	b	a x b	c	a x c
Onderhoudsgemak					
Inpasbaarheid					
Duurzaamheid, energie					
Duurzaamheid,geur/geluid					
Ervaring					
Vervangbaarheid					
Grootte van de zuivering					
Totale waardering			Som		Som

Het verschil in de totale waardering van de beluchtingssystemen geeft de voorkeur voor een gegeven systeem, gebaseerd op kwalitatieve aspecten. Deze moeten in een tweede afwegingsprocedure worden afgewogen tegen de kosten. Dit geschiedt om voor de exploitatiekosten voor zowel bellen- als puntbeluchting een wegingsfactor en een scoringsfactor toe te kennen. De

toe te kennen wegingsfactor is geheel vrij en ligt vaak in de orde van grootte van de som van wegingsfactoren van de kwalitatieve aspecten.

In tabelvorm wordt de volgende matrix verkregen:

Tabel 17: Waardering van de exploitatiekosten

Parameters	Wegings-factor	Bellenbeluchting		Puntbeluchting	
		Scorings-factor	Waardering	Scorings-factor	Waardering
Exploitatiekosten	a	b	$a \times b$	c	$a \times c$

Tenslotte worden alle waarderingen bij elkaar opgeteld. De variant met de hoogste totale waardering bepaalt de voorkeur.

Wegingsfactor

In hoofdstuk 4 is reeds beschreven hoe belangrijk de verschillende kwalitatieve aspecten bij de afweging worden bevonden. Deze wegingsfactoren kunnen in het model worden ingevuld of besloten kan worden om de wegingsfactoren tijdens de ontwerpfase opnieuw vast te stellen.

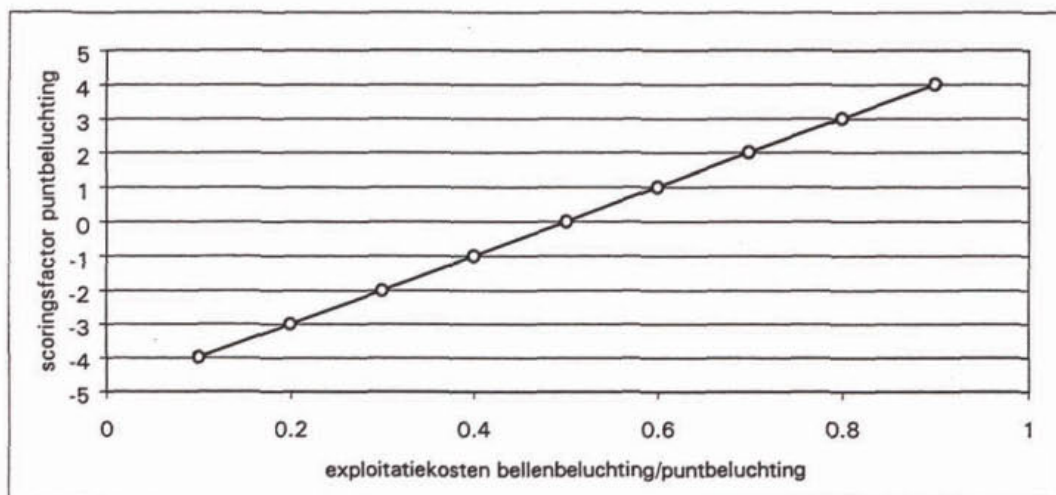
De wegingsfactor van de exploitatiekosten bedraagt in diverse multicriteria-analyses (Novem, 1996 en Qasim, 1994) 60 tot 100% van de som van de wegingsfactoren van de procestechnologische en operationele aspecten. Daar de som van de wegingsfactoren van de diverse aspecten per waterbeheerder kan verschillen, is de wegingsfactor van de exploitatiekosten in het beslissingsmodel naar wens in te vullen als percentage van de som van de wegingsfactoren van de overige aspecten. In dit rapport wordt als standaardwaarde voor de wegingsfactor van de exploitatiekosten 60% van de som van de overige factoren aangehouden, daar de waterbeheerders de jaarlijkse kosten niet als zeer belangrijk hebben beoordeeld.

Scoringsfactor

Voor de afweging tussen de beluchtingssystemen is het ook van belang in hoeverre de aspecten tussen de systemen verschillen. De scoringsfactoren zijn op basis van praktijkervaringen door het projectteam als volgt bepaald:

- bedrijfszekerheid; door een reservecompressor te voorzien zijn membraanbeluchting en puntbeluchting even bedrijfszeker (score 4 à 5);
- inpasbaarheid; in principe zijn beide systemen altijd inpasbaar, maar dit heeft financiële consequenties. Deze financiële consequenties zitten verdisconteerd in het beslissingsmodel (score 5);
- grootte van de zuivering; de toepasbaarheid van beide beluchtings-systemen is onafhankelijk van de grootte van de zuivering (score 5);

- onderhoudsgemak; membraanbeluchtingssystemen hebben beperkt onderhoud (score 3 à 4), puntbeluchters zijn bijna onderhoudsvrij (score 4 à 5):
- vervangbaarheid; membraanbeluchters en puntbeluchters kunnen worden vervangen, maar hiervoor moet de tank tijdelijk gedeeltelijk buiten bedrijf. Membraanbeluchters moeten echter vaker vervangen worden dan puntbeluchters (score 4 à 5);
- duurzaamheid van het energieverbruik; het energieverbruik wordt in het model berekend, zodat het verschil in energieverbruik kan worden berekend in de score (score bellenbeluchting = 5, score puntbeluchting = $5 * (kW_b / kW_p)$, waarin kW het vereiste energievermogen in kW is;
- ervaring; dit is voor elke waterbeheerder verschillend. Bij veel ervaring score 5, bij weinig ervaring score 1 tot 5, afhankelijk van het vertrouwen of ervaring van derden.
- exploitatiekosten; de exploitatiekosten worden in het model berekend. Bellenbeluchting krijgt een score van 5. Puntbeluchting krijgt een score gebaseerd op de verhouding in de jaarlijkse kosten tussen beide systemen. De formule voor het bepalen van de score van puntbeluchting is $(10 * F_{bel} / F_{pnt} - 5)$ waarbij F staat voor de exploitatiekosten. Figuur 12 geeft de relatie tussen de score van een puntbeluchtingssysteem en de verhouding in exploitatiekosten tussen bellen- en puntbeluchting.



Figuur 12. Omzetting van de exploitatiekosten van bellen- en puntbeluchting in scoringsfactoren

Standaardwaarden

Uitgaande van de resultaten zoals in paragraaf 4.3 besproken wordt in het beslissingsmodel in dit rapport uitgegaan van de standaard wegings- en scoringsfactoren zoals weergegeven in tabel 18.

Tabel 18: Standaard wegings- en scoringsfactoren in het beslissingsmodel

Aspecten	Wegingsfactor	Scoringsfactor	
		Bellenbeluchting	Puntbeluchting
Exploitatiekosten	9	5	$10 * f_b / f_p - 5$
Bedrijfszekerheid.	4	4	5
Inpasbaarheid.	2	5	5
Onderhoudsgemak	2	3	5
Duurzaamheid energie	2	5	kW_p / kW_b^{**}
Duurzaamheid geluid/geur	2	5	5
Ervaring	1	5	5
Vervangbaarheid	1	3	5
Capaciteit	1	5	5

* f_p = exploitatiekosten puntbeluchting, f_b = exploitatiekosten bellenbeluchting

** kW_p = energieverbruik puntbeluchting, kW_b = energieverbruik bellenbeluchting

5.2

Voorbeeld voor een rwzi van 50.000 i.e.

In het beslissingsmodel wordt een keuze gemaakt tussen bellen- en puntbeluchting. Deze keuze is gebaseerd op een afweging van de kwalitatieve parameters ten opzichte van de exploitatiekosten van een systeem. In tabel 19 zijn de ontwerpcriteria voor het voorbeeld gegeven. Tabel 20 geeft de berekende kosten voor het voorbeeld uit tabel 19.

Uit tabel 20 blijkt dat de exploitatiekosten van de beluchting voor een groot deel bepaald worden door de energiekosten. Naast de kostenfactor worden in het beslissingsmodel ook kwalitatieve aspecten meegenomen in de beslissing. In principe geschiedt de besluitvorming langs de volgende lijnen:

- berekening van de exploitatiekosten van de beluchtingssystemen;
- afwegen van de kwalitatieve aspecten;
- afwegen van de resultaten van de kwalitatieve aspecten tegen de exploitatiekosten.

Tabel 21 geeft een afweging van de kwalitatieve aspecten voor een rwzi van 50.000 i.e. Op basis van de totale waardering van de kwalitatieve aspecten conform tabel 21 zou in dit geval puntbeluchting een voorkeur hebben boven bellenbeluchting. Het verschil is echter relatief gering. De voorkeur uit de kwalitatieve afwegingen moet worden afgewogen tegen de exploitatiekosten zoals gegeven in tabel 19. Dit geschiedt door een wegingsfactor en scoringsfactor toe te kennen aan de kosten. Deze afweging is weergegeven in tabel 22.

Volgens tabel 22 is er na afweging van de kosten een lichte voorkeur voor puntbeluchting.

Tabel 19: Ontwerpcriteria van het voorbeeld

Ontwerpcriteria	Waarde	Eenheid
Algemeen parameters		
- grootte	50.000	i.e.
- grootte aeratietank	13.500	m ³
- waterdiepte aeratietank	5	m
- configuratie aeratietank	ovaal	-
- zuurstofvraag maximaal	8.020	kgO ₂ /d
gemiddeld	5.400	kgO ₂ /d
Gegevens exploitatie		
- rentevoet	6	%
- energieprijis	0,15	f/kW
- personeelskosten	65	f/h
Bellenbeluchting		
- alfa-factor	0,7	-
- energieverbruik	4,5	kg O ₂ /kW
- inbrengrendement	18	g O ₂ /m ³ .h
- voortstuwing	ja	-
- onderhoud compressor	20	h/ compressor/j
	1.750	f/compressor/j
- onderhoud beluchtingselementen	8	h/j
	0,75	% van de investering
- levensduur compressor	20	j
- levensduur beluchtingselementen	7	j
Puntbeluchting		
- alfa-factor	0,9	-
- energetisch rendement	2,0	kg O ₂ /kW
- voortstuwing	nee	-
- onderhoud	4	h/puntbeluchter/j
	50	f/ puntbeluchter/j
- levensduur puntbeluchter	20	j

Tabel 20: De investerings- en de exploitatiekosten zoals berekend in het beslissingsmodel voor een rwzi van 50.000 i.e.

Beluchtingssysteem	Kostenpost	Kosten	Eenheid
Puntbeluchting	Investering	380.000	f
	Exploitatie		
	- kapitaallasten	34.000	f/j
	- onderhoud	620	f/j
	- energie	196.000	f/j
	Totaal	231.000	f/j
Bellenbeluchting	Investering	657.000	f
	Exploitatie		
	- kapitaallasten	65.000	f/j
	- onderhoud	12.000	f/j
	- energie	150.000	f/j
	Totaal	227.000	f/j

Tabel 21: Afweging procestechnologische en operationele aspecten

Aspecten	Wegings- factor	Scoringsfactor (0-10)		Waardering	
		Bellen	punt	Bellen	Punt
Bedrijfszekerheid	4	4	5	16	20
Onderhoudsgemak	2	3	5	6	10
Inpasbaarheid	2	5	5	10	10
Duurzaamheid, energie	2	5	2,9	10	5,8
Duurzaamheid,geur/geluid	2	5	5	10	10
Ervaring	1	3	5	3	5
Vervangbaarheid	1	5	5	5	5
Grootte van de zuivering	1	5	5	5	5
Totale waardering kwalitatieve aspecten				65	71

Tabel 22: Afweging kosten versus kwalitatieve aspecten voor de keuze van een beluchtingssysteem voor een rwzi van 50.000 i.e.

Aspecten	Wegingsfactor	Scoringsfactor		Totale waardering	
		Bellen	Punt	Bellen	Punt
Kosten	9	5	4.8	45	43
Overigen aspecten	(zie tabel 21)	zie tabel 21	zie tabel 21	65	71
Totale waardering				110	114

5.3 Gevoeligheidsanalyse

De in het beslissingsmodel toegepaste ontwerpaspecten voor alfa-factor, zuurstofinbrengcapaciteit en energieverbruik hebben in meer of minder mate invloed op deze exploitatiekosten. Deze invloeden worden geïllustreerd aan de hand van het voorbeeld.

Omdat uit de praktijk blijkt dat de grootte van de rwzi mede bepalend is voor de keuze van het beluchtingssysteem zijn ter indicatie installatiegroottes van 25.000 tot 250.000 i.e. doorgerekend.

Daarnaast is gekeken naar de voorkeur van de waterbeheerders voor het voorbeeld op basis van de door hen ingevulde wegingsfactoren.

5.3.1 Invloed van procestechnologische aspecten

Per beluchtingssysteem kunnen de alfa-factor, het zuurstofinbrengrendement en het daaraan gekoppelde specifieke zuurstofinbrengrendement verschillen. Tabel 23 geeft het bereik van de totale waardering van puntbeluchting, indien één van de procestechnologische aspecten fluctueert tussen een minimum en maximum terwijl de overige parameters gelijk blijven. Hierbij is de bandbreedte aangehouden zoals uit de inventarisatie naar voren is gekomen.

Tabel 23: Bereik van de totale waardering van puntbeluchting zoals berekend in het beslissingsmodel voor bellen- en puntbeluchting, voor een rwzi van 50.000 i.e.

Beluchtungs-Systeem	Procestechnologische aspecten	Waarde	Eenheid	Totale waardering
Puntbeluchting	alfa-factor zuurstofinbrengrendement	0,8 – 0,9 1,6 – 2	- kg O ₂ /kW	104-114 95-114
Bellenbeluchting	alfa-factor zuurstofinbrengrendement en specifiek zuurstofinbrengcapaciteit	0,6 – 0,8 3 – 4,5 15 – 18	- kg O ₂ /kW en kg O ₂ /Nm ³ /h	105-126 114-145

Op basis van de gelijkblijvende totale waardering voor bellenbeluchting van 110 kan uit tabel 23 geconcludeerd worden dat de ontwerpuitgangspunten de doorslag kunnen geven bij het bepalen van de voorkeur voor bellen- en puntbeluchting. De ontwerpuitgangspunten dienen dan ook met zorg gekozen te worden. Aandachtspunt hierbij is de mate van zekerheidsstelling die plaatsvindt voor aan de ene kant de geïnstalleerde capaciteit en aan de andere kant het reële energieverbruik.

5.3.2 Invloed van de grootte van de rwzi

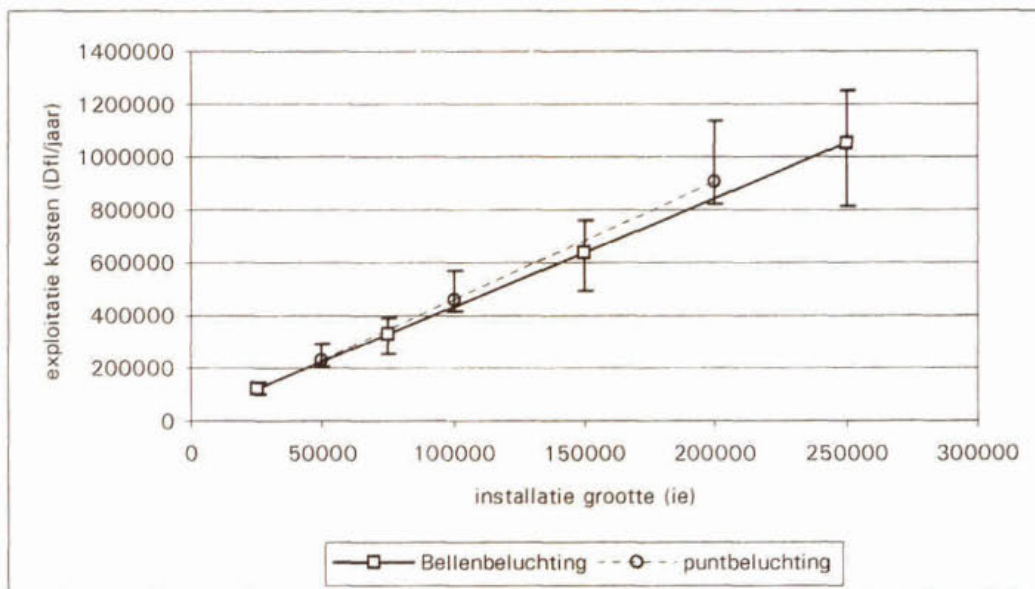
Ter indicatie zijn voor installatiegroottes van 25.000 tot 250.000 i.e., de exploitatiekosten berekend op basis van de uitgangspunten en de voorgestelde standaardwaarden voor de invoerparameters volgens bijlage 4. De berekening is uitgevoerd voor een omloopsysteem met een waterdiepte van 5 meter, uitgerust met bellenbeluchting mét en puntbeluchting zónder separate voortstuwing (conform het voorbeeld van paragraaf 5.2). De resultaten staan, inclusief de spreiding in de exploitatiekosten, weergegeven in figuur 13. De spreiding in de exploitatiekosten wordt veroorzaakt door de variaties in het zuurstofinbrengrendement en de specifieke energieprijzen.

Uit figuur 13 blijkt dat er geen significant verschil is tussen de exploitatiekosten voor het toepassen van een bellenbeluchtungs- en puntbeluchtingssysteem. De exploitatiekosten worden bij puntbeluchting voor 80% bepaald door het energieverbruik, voor 19% door rente en afschrijving en voor 1% door onderhoud (zie figuur 14). Bij bellenbeluchting bedraagt het aandeel in de exploitatiekosten respectievelijk 65%, 30 % en 5%.

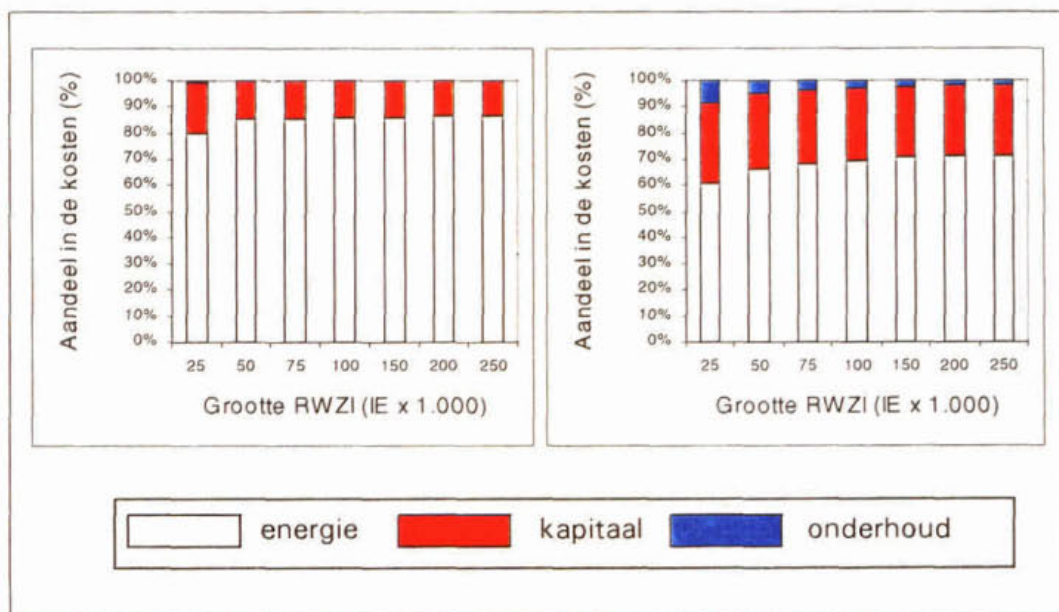
De exploitatiekosten worden dus voornamelijk bepaald door het energieverbruik, waarbij het hogere energieverbruik bij puntbeluchting wordt gecompenseerd door lagere kosten voor rente en afschrijving. Met meeweging van de exploitatiekosten resulteert dit voor het voorbeeld in een voorkeur voor puntbeluchting beneden de 140.000 i.e. en een voorkeur voor bellenbeluchting boven de 140.000 i.e. (zie figuur 15).

De uitkomsten zijn gevoelig voor de uitgangspunten voor de berekening van de energiebehoefte (alfa-factor en zuurstofinbrengrendement) en de

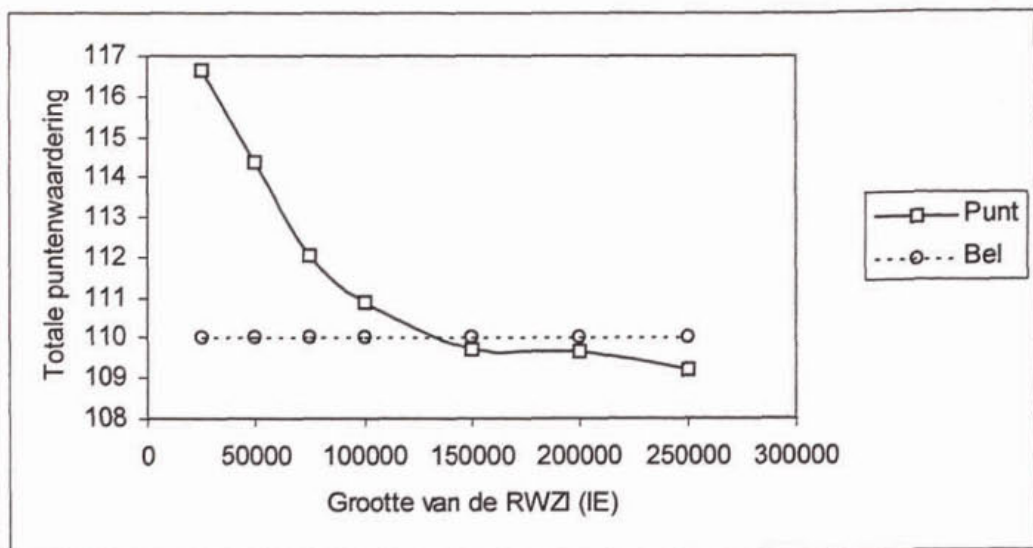
energieprijs, en beperkt gevoelig voor de investering, het rentepercentage en de afschrijvingstermijnen.



Figuur 13: Berekende exploitatiekosten als functie van de installatiegrootte, inclusief de spreiding in de exploitatiekosten.



Figuur 14: Opbouw van de exploitatiekosten bij puntbeluchting (links) en bellenbeluchting (rechts)



Figuur 15: Totale waardering van de multicriteriaanalyse voor puntbeluchting en bellenbeluchting als functie van de grootte van de installatie.

5.3.3 Kwalitatieve aspecten

De kwalitatieve aspecten, bedrijfszekerheid, onderhoudsgemak, ervaring, vervangbaarheid en energetische duurzaamheid, zijn belangrijk voor de gevoeligheid van de multi-criteria-analyse. Immers: de grootte van de rwzi, de inpasbaarheid en de duurzaamheid van geur en geluid zijn in score gelijkwaardig. Omdat bedrijfszekerheid en het onderhoudsgemak als belangrijker worden ervaren dan energetische duurzaamheid bestaat er zonder weging van de kosten een lichte voorkeur voor puntbeluchting. Deze voorkeur geldt voor 8 van de 9 waterbeheerders (zie bijlage 5).

Uit de verrichtte studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Op basis van de verkregen informatie van de waterbeheerders en de leveranciers van beluchtingssystemen, aangevuld met literatuurgegevens, is het goed mogelijk om een beslissingsmodel op te stellen met standaardwaarden voor de kosten en procestechnologische en operationele aspecten. In het beslissingsmodel wordt een multi-criteria-analyse uitgevoerd. Toepassing van het beslissingsmodel leidt tot een meer eenduidige procedure voor de keuze van het beluchtingssysteem.
2. De resultaten van het beslissingsmodel geven aan dat er geen duidelijke voorkeur kan worden uitgesproken aangaande het beluchtingssysteem in relatie tot de ontwerpcapaciteit van de rwzi. De exploitatiekosten tussen beide beluchtingssystemen zijn weinig onderscheidend. Dit betekent dat eventuele wijzigingen van de standaardwaarden voor de wegingsfactoren, ten gevolge van specifieke omstandigheden of inzichten, doorslaggevend kunnen zijn in de keuze. Indien het energieaspect belangrijker wordt gevonden, dan zal de voorkeur worden gegeven aan bellenbeluchting. Bij een zwaardere weging van onderhoudsgemak zal bij kleinere rwzi's de voorkeur worden gegeven aan puntbeluchting.
3. De energiekosten zijn bij de gehanteerde procestechnologische uitgangspunten in het beslissingsmodel bepalend voor de totale exploitatiekosten van een beluchtingssysteem: circa 60 en 80% voor respectievelijk bellenbeluchting en puntbeluchting. De onderhoudskosten bedragen slechts circa 5 % van de exploitatiekosten en zijn daarom niet belangrijk met betrekking tot de keuze van het beluchtingssysteem.
4. Bij de keuze van een beluchtingssysteem is voor de waterbeheerders de bedrijfszekerheid het belangrijkste. Daarna volgen met afnemend belang: exploitatiekosten, inpasbaarheid, onderhoud en duurzaamheid. De ervaring met een beluchtingssysteem wordt niet als belangrijk ondervonden.
5. Leveranciers en waterbeheerders hanteren praktisch gelijke waarden voor alfa-factor, zuurstofinbrengrendement en energieverbruik van beluchtingssystemen.
6. Bij de waterbeheerders bestaat nog relatief weinig inzicht in de kosten voor het onderhoud van beluchtingssystemen. De leveranciers kunnen een redelijke inschatting verschaffen van de onderhoudskosten; een toetsing daarvan in de praktijk is tot op heden uitgebleven.

REFERENTIES

1. Da Silva-Deronzier, G., et al (1994) Influence of a horizontal flow on the performance of a fine-bubble diffused air system. Wat. Sci. Tech. Vol 30, No 4, pp 89-96.
2. Pöpel, H.J., M. Wagner, F. Weidmann (1998); Saerstoffeintrag und -ertrag in tiefe belebungsbecken. GWF wasser abwasser 139 nr 4, pp 189-196.
3. Stenstrom, M.K., R.G.Gilbert (1981) Effects of alpha, beta and theta factor upon the design, specification and operation of aeration systems.
4. STOWA, (1995) Evaluatie van het HSA-model voor toepassing in Nederland, rapport 95-19.
5. Chambers, B. (1992) ; Design methodology for optimisation of aeration efficiency in activated sludge plants, Med. Fac. Landbouw Univ. Gent, 57/4a, 1631-1642.
6. Stenstrom, M.K., Gilbert, R.G. (1981); Effects of alpha, beta and theta factor upon the design specification and operation of aeration systems; Water Research vol. 15, pp 643 to 654.
7. Groves, K.P., et al (1992); Evaluation of Oxygen transfer efficiency and alfa-factor on a variety of diffused aeration systems, Water Environment Research vol. 64, nr. 5, 1992.
8. Kessener, H.S., Ribbius, F.J. (1935); Practical activated sludge research, Institute of sewage purification, Part I, 50.
9. Pöpel, H.J. (1977); Beluchttingsprocessen, H₂O (10), 1977, 123-131.
10. EPA (1989), design manual fine pore aeration systems, 1989, EPA/625/1-89/023.
11. Merrem André de la Porte (1999), schriftelijke reactie van N. Elsinga.
12. Dirkse Milieutechniek (1999), schriftelijke reactie van R. Dirkse.
13. Entec Holland (1999), schriftelijke reactie van M. Hayboom.
14. Geveke Werktuigbouw (1999), schriftelijke reactie van H. Stokman.
15. Aerzen Nederland (1999), schriftelijke reactie van A. Besseling.
16. Samson Rotating (1999), schriftelijke reactie van F. Krämer.
17. Flygt, ITT Industries (1999), schriftelijke reactie van Mombers.

18. Hubert USF(1999), schriftelijke reactie van P. Demmer.
19. CBS Waterkwaliteitsbeheer deel B (1996), zuivering van afvalwater
20. Westphal G. (1995), Leistungseintrag in Belebungsbecken, eine grundlegende Darstellung. Korrespondenz Abwasser 42, pp 1353-1358.
21. Novem (1996), Biologische waterzuivering met een tweeslibsoortensysteem. Haalbaarheidsstudie naar het A₂/N-proces. Reeks Schone Technologie DV₃.ST.03.
22. Qasim, S.R. (1994), Wastewater treatment plants, planning, design and operation. Technomic publishing, Lancaster, Basel.

BEGRIPPENLIJST*Alfa-factor*

De correctiefactor voor het toepassen van de zuurstofinbrengcapaciteit in een mengsel van actiefslib en afvalwater ten opzichte van schoon water.

Bèta-factor

De correctiefactor voor het verschil in zuurstofopname bij een zuurstofconcentratie van 0 mg/l en de gewenste zuurstofconcentratie.

Energieverbruik

De hoeveelheid opgenomen energie van een beluchtingssysteem die benodigd is om 1 kg O₂ onder standaardcondities in zuurstofvrij schoon water te brengen.

Luchtinbrengcapaciteit

De hoeveelheid lucht die een beluchtingssysteem per uur onder staande condities in zuurstofvrij schoon water kan brengen.

Operationele aspecten

Bedrijfszekerheid, onderhoudsgemak, vervangbaarheid en ervaring.

Procestechnologische aspecten

Inpasbaarheid, duurzaamheid energie, duurzaamheid geur en geluid en capaciteit.

Scoringsfactor

De score (matig, voldoende, goed) die men aan een aspect van het betreffende systeem geeft. De scoringsfactor is een objectieve beoordeling van de prestatie van het te beoordelen systeem op het te beoordelen aspect.

Specifieke zuurstofinbrengcapaciteit

De hoeveelheid zuurstof die onder standaardcondities in zuurstofvrij schoon water door één normaal kubieke meter lucht per meter stijghoogte (kg O₂/Nm³/m) kan worden gebracht.

Totale waardering

De optelsom van de waarderingen van de aspecten.

Waardering

Het product van de wegingsfactor en de scoringsfactor.

Wegingsfactor

Het gewicht dat aan een aspect in de afweging wordt gegeven. De wegingsfactor is een afspiegeling van het belang dat men aan dat aspect hecht en is subjectief.

Zuurstofinbrengcapaciteit

De hoeveelheid zuurstof die een beluchtingssysteem per uur in zuurstofvrij schoon water kan brengen, bij een druk van 101,3 kPa en een watertemperatuur van 10 °C of 20 °C (standaardcondities).

Zuurstofinbrengrendement

De hoeveelheid zuurstof die onder standaardcondities in zuurstofvrij schoon water wordt gebracht per kW opgenomen vermogen (kg O₂/kW).

Zuurstofvraag

De hoeveelheid zuurstof die benodigd is voor substraat en endogene ademhaling, nitrificatie en directe oxidatie van chemische stoffen zoals Fe²⁺ en S²⁻.

BIJLAGE 1

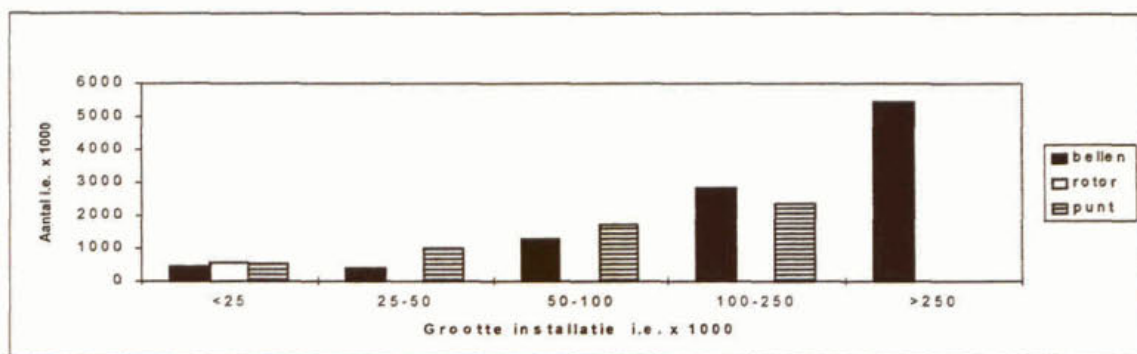
VOORKOMEN VAN BELUCHTINGSSYSTEMEN OP RWZI'S IN NEDERLAND

BIJLAGE 1

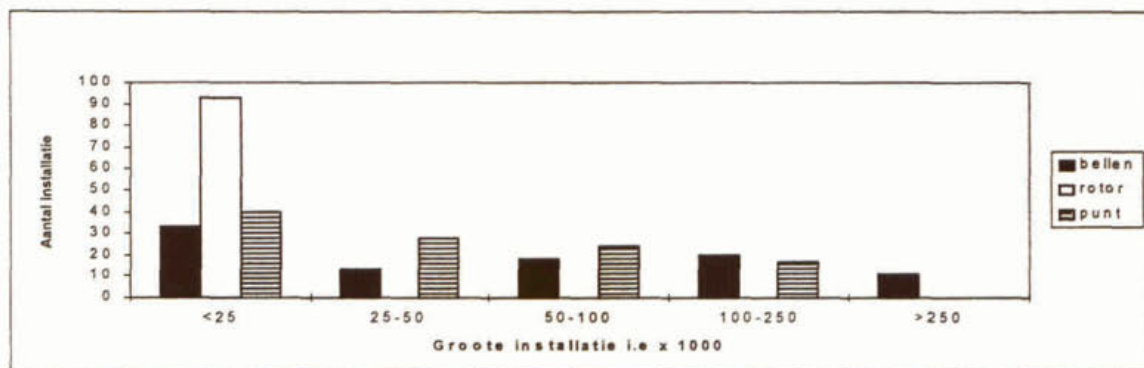
Voorkomen van beluchtingssystemen

Het voorkomen van de verschillende beluchtingssystemen op rwzi's in Nederland is een weergave van de voorkeuren uit het recente verleden. Op basis van de CBS-gegevens van 1996 (CBS) kan een onderscheid worden gemaakt tussen rotoren (oxidatiesloten), puntbeluchters (Carrousels) en bellenbeluchtingssystemen (aëratietanks). Systemen met een gecombineerd bellenbeluchtingssysteem zijn niet meegenomen.

De grootte van de rwzi, gerelateerd aan het aantal i.e.'s en het aantal rwzi's, zijn weergegeven in respectievelijk de figuren 16 en 17.



Figuur 16: De grootte van de rwzi gerelateerd aan het aantal i.e.'s voor bellenbeluchting, rotoren en puntbeluchting



Figuur 17: De grootte van de rwzi gerelateerd aan het aantal installaties voor bellenbeluchting, rotoren en puntbeluchting

Uit bovenstaande figuren kan het volgende worden afgeleid:

- binnen Nederland wordt bij de zuivering van rioolwater voornamelijk punt- en bellenbeluchting toegepast. Rotoren worden vrijwel alleen toegepast bij kleine rwzi's;
- naarmate de rwzi's groter worden, vindt er een verschuiving plaats van de toepassing van puntbeluchting naar bellenbeluchting. Bij grote rwzi's (> 250.000 i.e.) wordt vrijwel uitsluitend bellenbeluchting toegepast.

BIJLAGE 2

BEREKENINGSMETHODIEKEN VOOR DE ZUURSTOFVRAAG

BIJLAGE 2

Berekening van de zuurstofvraag via het BZV en de endogene verademingsmethode

De methode van de berekening van de zuurstofvraag via het BZV en endogene verademing kan worden beschouwd als de traditionele methode. Deze methode wordt ook toegepast in het HSA-model.

De berekening van de zuurstofvraag is als volgt:

$$O_t = [BZV \bullet 0,5 \bullet PF1 + b \bullet V \bullet Ga + (Nni \bullet 4,57 - Nd \bullet 2,86) \bullet PF2 + Or] \bullet PF3$$

Waarin:

- O_t = totale zuurstofvraag (kg O_2 /d);
- BZV = verwijderde BZV-vracht (kg BZV/d);
- b = endogene verademingssnelheid (kg O_2 / kg d.s.d);
- V = totale aërobe en anoxische volume (m^3);
- G_a = droge-stofgehalte (kg/ m^3);
- N_{ni} = te nitrificeren stikstofvracht (kg/d);
- N_d = te denitrificeren stikstofvracht (kg/d);
- O_r = zuurstofvraag oxideerbare componenten zoals Fe^{2+} en S^{2-} (kg/d);
- PF1 = piekfactor over de substraatademhaling voor het dag/nachtritme;
- PF2 = piekfactor over de stikstofverwijdering voor het dag/nachtritme;
- PF3 = piekfactor over de totale zuurstofvraag voor de daggemiddelde aanvoer.

1) Endogene ademhalingsfactor b

Dit is een functie van de fractie heterotrofe organismen en de temperatuur. Standaard wordt voor laagbelast actiefslib een endogene verademingsnelheid van 0,08 kg O_2 /kg ds.d (exclusief chemisch slib) aangehouden met de volgende temperatuurscorrectie:

$$b = 0,08 \cdot 1.072^{(t-20)}$$

In het Stowa-rapport "Evaluatie van het HSA-model voor de toepassing in Nederland" wordt de endogene ademhalingsfactor berekend als functie van de fractie heterotrofe organismen volgens:

$$b = 0,08 \cdot 1.073^{(t-15)} \cdot fh$$

fh = fractie heterotrofe organismen

2. Te nitrificeren stikstofvracht N_{ni}

Deze wordt berekend door van de ingaande N_{kj} -vracht de uitgaande N_{kj} -vracht in het effluent en spuislib af te trekken. In formulevorm is de te nitrificeren stikstofvracht N_{ni} (kg/d):

$$N_{ni} = N_{kj \text{ in}} - N_{kj \text{ effluent}} - N_{kj \text{ spuislib}}$$

Waarin:

$N_{kj \text{ in}}$ = de ingaande N_{kj} -vracht na voorbezinking en inclusief retourstromen (kg N/d);

$N_{kj \text{ effluent}}$ = de uitgaande N_{kj} -vracht in het effluent is opgebouwd uit ammonium, niet afbreekbare stikstof en stikstof in het uitspoelende slib. Voor laagbelaste actiefslibinstallaties wordt 3,5 mg N_{kj} in het effluent aangehouden (kg N/d);

$N_{kj \text{ spuislib}}$ = voor de stikstofvracht in het spuislib wordt de slibproductie maal de stikstofconcentratie aangehouden. Beide worden berekend met het HSA-model bij de maximale temperatuur (standaard 20 °C) (kg N/d).

3) Te denitrificeren stikstofvracht N_d

Dit is de geoxideerde hoeveelheid stikstof plus nitraat in het influent min nitraat in het effluent. De hoeveelheid nitraat in het effluent kan worden berekend met het HSA-model bij de maximale temperatuur. Als minimale nitraatconcentratie wordt 3 mg/l aangehouden.

4) Zuurstofvraag bij intermitterende beluchting

Bij intermitterende beluchting, waarbij tijdens de beluchtingsfase alleen genitificeerd wordt dient geen correctie voor denitrificatie meegenomen te worden en dient voor de nitrificatie een correctie voor de beluchtingstijd te worden toegepast (T_{ni} in uren per dag), de piekfactor over de nitrificatie vervalt dan:

$$O_t = BZV \cdot 0,5 \cdot PF1 + b \cdot V \cdot Ga + (N_{ni} \cdot 4,57) \cdot 24 / T_{ni} + Or \cdot PF3$$

5) Zuurstofvraag bij methanoldosering

Er zijn situaties waarbij al het snel afbreekbare substraat wordt verademd met nitraat, zoals bij voorgeschakelde denitrificatie bij een lage BZV/N-verhouding met methanoldosering in een denitrificerende ruimte. In dat geval moet de zuurstofvraag als volgt worden berekend:

$$O_t = (b \cdot V_{ae} \cdot Ga + N_{ni} \cdot 4,57 \cdot PF2) \cdot PF3$$

Waarin:

Vae = het aërobe beluchtingsvolume.

Indien een andere C-bron dan methanol wordt gebruikt, dan zal de endogene verademingssnelheid groter worden en moet de zuurstofbehoefte op de traditionele wijze worden berekend, waarbij de C-bron bij het influent-BZV moet worden opgeteld.

6) Piekfactor substraatademhaling en stikstofverwijdering (PF1 en PF2)

Als functie van de grootte van de rwzi en de aanvoerlengte treedt in de nacht een periode op met niet of nauwelijks aanvoer van afvalwater. Dit betekent dat de hoeveelheid afvalwater over de rest van de dag binnenkomt. Daar in de endogene verademingssnelheid meestal enige reserve is ingebouwd en de substraatademhaling bij piekbelasting vaak wordt uitgesteld, is onder normale omstandigheden een piekfactor voor de substraatademhaling niet noodzakelijk ($PF1 = 1$). De zuurstofvraag voor de stikstofverwijdering moet echter voor de aanvoertijd worden gecorrigeerd volgens $PF2 = 24/\text{aanvoertijd (h/d)}$. Bij intermitterende nitrificatie en denitrificatie moet een extra piekfactor op de nitrificatie worden toegepast van 24/nitrificatietijd (uur) per dag.

7) Piekfactor over de totale zuurstofvraag (PF3)

Een ontwerp van een rwzi wordt meestal gebaseerd op een gemiddelde aanvoer. Op deze gemiddelde aanvoer zit meestal een variatie van 30%, zodat de maximaal daggemiddelde aanvoer normaliter een factor 1,15 boven de gemiddelde aanvoer ligt. Als piekfactor over de totale zuurstofvraag wordt dan ook meestal 1,1 of 1,2 aangehouden. Of deze piekfactor ook moet worden toegepast hangt af van:

- op welke belasting gedimensioneerd wordt ten opzichte van de maximale belasting;
- welke maximale belasting tijdens de levensduur van het beluchtingssysteem op zal treden ten opzichte van de ontwerpbelasting. Om deze reden wordt deze piekfactor vaak op 1 gezet.

Berekening van de zuurstofvraag via CZV-methode

Voor de berekening van de zuurstofvraag met de CZV-methode is geen endogene verademingsfactor nodig, maar moet wel een goede inschatting worden gemaakt van het spuislib uitgedrukt in CZV. De berekening van de zuurstofbehoefte voor nitrificatie en denitrificatie is identiek aan de BZV-methode. De CZV-methode wordt als volgt uitgevoerd:

$$Ot = [(CZV_{ox} - S_s) + S_s * PF2 * 0,75 + (N_{ni} * 4,57 - N_d * 2,86) * PF2] * PF3$$

Waarin:

CZVox = de oxideerbare hoeveelheid CZV [kg/d]

Ss = de hoeveelheid snel afbreekbaar CZV [kg/d]

0,75 = zuurstofvraag van snel afbreekbaar CZV

1) De oxideerbare hoeveelheid CZV (CZVox)

De oxideerbare hoeveelheid CZV is het verschil tussen de ingaande CZV en de uitgaande hoeveelheid CZV via het effluent en het slib:

$$CZV_{ox} = CZV_{inluent} - CZV_{effluent} - CZV_{slib}$$

Bij laagbelaste actiefslibinstallaties kan worden uitgegaan van een CZV in het effluent van circa 30 tot 50 mg/l. Bij een hoog percentage industrieel afvalwater kan dit hoger liggen.

Voor de uitgaande CZV-vracht in het slib kan bij standaard afvalwater bij laagbelast actiefslib zonder voorbezinking een verhouding van 1 kg CZV/kg ds. worden aangehouden. In andere gevallen kan op basis van een organische-stofanalyse van het slib volgens $OS \cdot 1,42 = CZV$ het CZV worden bepaald (waarin OS = organische-stofgehalte).

2) De hoeveelheid snel afbreekbaar CZV (Ss)

Voor standaard huishoudelijk afvalwater varieert deze hoeveelheid tussen 10 en 20% van het influent-CZV, afhankelijk van de rottingsgraad van het influent.

BIJLAGE 3

BIJZONDERE ASPECTEN BIJ HET VERBETEREN VAN DE ZUURSTOFINBRENGCAPACITEIT

BIJLAGE 3

Aspecten bij het verbeteren van de zuurstofinbrengcapaciteit

In deze bijlage zullen twee bijzondere aspecten worden behandeld die worden toegepast om de zuurstofinbrengcapaciteit te verbeteren namelijk:

- het toepassen van diepere tanks bij bellenbeluchting;
- het toepassen van tegenstroombellenbeluchting.

1. Diepere tanks

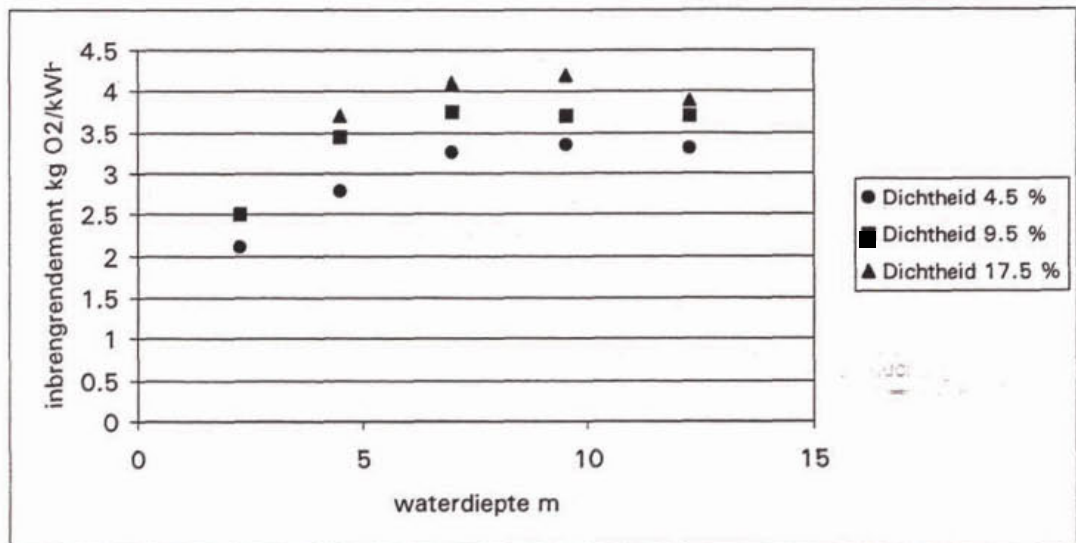
Er bestaat een tendens om de beluchtingsreactoren dieper te bouwen. Een traditionele waterdiepte is 4 meter. In Nederland wordt vaak tot 6 meter waterdiepte gebouwd. Vooral in het buitenland en bij de industrie is 8 tot 12 meter waterdiepte steeds meer gangbaar. Bij langzaamdraaiende puntbeluchting is de maximale diepte 6 meter. Door toepassing van een stijgbuis kan dit worden verhoogd tot ongeveer 8 meter (schachtbeluchting).

Het voordeel van het op grote waterdiepte bouwen is de besparing op het benodigde grondoppervlak. Daarnaast kan een grote waterdiepte, bij toepassing van bellenbeluchting, energiewinst opleveren. Deze winst is optimaal wanneer een diepte van circa 5,5 meter wordt toegepast. Tot circa 5 meter stijghoogte is de zuurstofoverdracht per meter stijghoogte constant. In principe komt dit doordat bij grotere stijghoogte de zuurstofbenutting wordt gecompenseerd door de hogere druk onderin de reactor. Boven de 5 meter loopt de zuurstofinbreng terug als gevolg van coalescentie van bellen en een verlaagde zuurstofconcentratie in de bel. Daarom dient voor dieptes boven de 5 meter de zuurstofinbrengcapaciteit apart beschouwd te worden. De invloed van de stijghoogte op de zuurstofinbrengcapaciteit bij verschillende dichtheden van de beluchting staat weergegeven in figuur 18. Het effect is per beluchtingsdichtheid gelijk. Tot een diepte van 5 meter neemt het rendement rechtlijnig toe, van 5 tot 10 meter vlak de toename volledig af, waarna het rendement weer afneemt (Pöpel 1998).

2. Tegenstroombellenbeluchting

Bij tegenstroombellenbeluchting vindt een laminaire horizontale stroming plaats door een bellenbeluchtingszone. Hierdoor verkleint en vervormt de luchtbel, waardoor een groter lucht/wateroppervlak ontstaat. Bovendien ververst het water rond de bel sneller. Door toepassing van tegenstroombellenbeluchting verbetert het zuurstofinbrengrendement met een toenemende horizontale vloeistofsnelheid. Bij vloeistofsnelheden boven 0,6 m/s wordt de stroming turbulent en verslechtert het zuurstofinbrengrendement.

De verbetering van het zuurstofinbrengrendement is niet evenredig met het luchtdebiet per element en de elementdichtheid. Dit betekent dat bij lage luchtdebieten en elementbezetting het effect van tegenstroom groter is dan bij hoge luchtdebieten. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in opwaartse kracht van de verticale waterstroom ten gevolge van de bellenbeluchting.



Figuur 18: Het effect van de diepte op het zuurstofinbrengrendement van bellenbeluchting. Gegevens uit Pöpel 1998.

Tegenstroombellenbeluchting versterkt het effect dat er bij een laag luchtdebiet per element en een lage elementdichtheid een betere zuurstofoverdracht wordt verkregen. Met tegenstroombellenbeluchting kan daarom worden uitgegaan van een standaard rendement van 0,018 g O₂/Nm³/m en kan bij een optimale configuratie en omloopsnelheden boven 0,3 m/s zelfs tot 0,024 g O₂/Nm³/m bereikt worden (Da Silva, Flygt).

Het introduceren van een laminaire stroming vergt echter voortstuwingsenergie. Hierdoor is er een optimum in het energetisch inbrengrendement bij een bepaalde vloeistofsnelheid. De benodigde energie voor voortstuwing is afhankelijk van:

- de reactorconfiguratie;
- het aantal overgangen van onbeluchte naar beluchte zones;
- de intensiteit van de beluchting.

In het algemeen kan voor omloopsystemen worden gesteld dat de benodigde voortstuwingsenergie 1 W/m³ bedraagt zonder bellenbeluchting en 1,5 W/m³ met bellenbeluchting.

BIJLAGE 4

BESCHRIJVING VAN DE KOSTENBEREKENINGSMETHODIEK VAN DE BELUCHTINGSSYSTEMEN IN HET BESLISSINGSMODEL

BIJLAGE 4

Beschrijving van de kostenberekenningsmethodiek van de beluchtings-systemen in het beslissingsmodel

In het beslissingsmodel moet een keuze worden gemaakt tussen beluchting gebaseerd op bellen- of puntbeluchting. Deze keuze wordt gebaseerd op:

- een kostenvergelijking tussen beide systemen;
- een afweging tussen kwalitatieve aspecten;
- een definitieve afweging tussen beide genoemde afwegingsprocedures.

1. Kostenberekening voor een bellenbeluchtingssysteem:

$$\text{- O}_2\text{-inbreng} = \text{O}_2\text{-vraag,max} * \beta/\alpha$$

Waarin:

$$\text{O}_2\text{-inbreng} = \text{zuurstofinbrengcapaciteit (kg/dag);}$$

$$\text{O}_2\text{-vraag,max} = \text{maximale zuurstofvraag (kg/dag);}$$

$$\alpha = \text{alfa-factor voor bellenbeluchting;}$$

$$\beta = \text{deficiet factor } (C_s/(C_s-C_a));$$

$$C_s = \text{maximale oplosbaarheid van zuurstof (mg/l);}$$

$$C_a = \text{actuele zuurstofconcentratie (mg/l).}$$

$$\text{- L} = \text{O}_2\text{-inbreng} / (Zl \bullet Sh) * 1/24$$

Waarin:

$$L = \text{luchtinbrengcapaciteit (m}^3\text{/uur);}$$

$$Zl = \text{specifieke zuurstofinbrengcapaciteit;}$$
$$(\text{kg O}_2\text{/m}^3\text{.m stijghoogte);}$$

$$Sh = \text{stijghoogte (m).}$$

De luchtinbrengcapaciteit wordt berekend voor een systeem met en zonder voortstuwing.

$$\begin{aligned} \text{- Investering} &= \text{Som van de prijzen voor:} \\ &\text{- compressors;} \\ &\text{- elektriciteit, instrumentatie, bekabeling} \\ &\text{van de compressor;} \\ &\text{- beluchtingselementen en leidingwerk;} \\ &\text{- compressorgebouw;} \\ &\text{- voortstuwers.} \end{aligned}$$

Waarin:

Prijs compressors. Uitgaande van het gegeven dat één compressor stand-by staat is op basis van de gegevens van de leveranciers de volgende prijs geschat voor een systeem van drie compressoren.

$$\text{Compressor (f)} = 23.500 + 18,5 \bullet \text{luchtinbrengcapaciteit}$$

Prijs voor instrumentatie en bekabeling als percentage van compressorprijs

$$E+I = 0,4 * \text{compressor}$$

Prijs voor beluchtingselementen en leidingwerk geschat op basis van de gegevens van de leveranciers.

<i>Beluchtingselementen:</i>	14,--	<i>f per m³/uur.</i>
<i>Leidingwerk:</i>	27,50	<i>f per m³/uur bij maximale dichtheid elementen;</i>
	31,50	<i>f per m³/uur bij minimale dichtheid elementen.</i>

Richtprijs compressorgebouw voor drie compressoren f 95.400,--.

Richtprijs voor voortstuwars f 5.000,-- per kW geïnstalleerd.

Geïnstalleerd voortstuwingsvermogen = volume aeratietank *
geïnstalleerd vermogen (kW/m³).

- Exploitatiekosten

Exploitatiekosten = kapitaallasten (f) + onderhoud (f) + energie (f)

Kapitaallasten:

Aanname is een afschrijving op annuïteitbasis.

$$a = p / (1 - 1 / (1 + p)^n) \quad \begin{array}{l} a = \text{annuïteit;} \\ p = \text{rentevoet;} \\ n = \text{afschrijvingstermijn (jaren).} \end{array}$$

$$\text{Kapitaallasten (f/jaar)} = a \cdot \text{investering (f)}.$$

Bij de afschrijving wordt in het model onderscheid gemaakt tussen beluchtingselementen en overige kapitaalgoederen.

Onderhoudskosten:

Aanname is dat er drie compressoren worden geplaatst waarvan één als stand-by.

$$\text{Onderhoudskosten (f/jaar)} = \text{manuren (f/jaar)} + \text{materiaalkosten (f/jaar)}$$

$$\text{Manuren} = (3 \cdot \text{MU-c} + \text{MU-be}) \cdot \text{MUP}$$

Waarin:

MU-c = aantal manuren per jaar per compressor voor onderhoud;

MU-be = aantal manuren per jaar voor onderhoud beluchtingselementen;

MUP = kostprijs manuur (f/manuur).

$$\text{Materiaalkosten} = 3 \bullet \text{MA-c} + \text{MA-be}$$

Waarin:

MA-c = materiaalkosten per jaar per compressor nodig voor onderhoud;

MA-be = materiaalkosten per jaar voor onderhoud beluchtingselementen.

In het model worden Mu-c, Mu-be, MUP en Ma-c als invoer parameter beschouwd. De materiaalkosten MA-be worden als percentage van de investering genomen.

Energiekosten

$$E = (\text{O}_2\text{-behoefte, gem} / (\text{ER-B} \cdot 24) \text{ voortstuwingsvermogen}) \cdot 24 \cdot 365 \cdot \text{EP}$$

Waarin:

E = energiekosten (f);

O₂-behoefte, gem = O₂-vraag, gem * β/α;

O₂-vraag, gem = gemiddelde zuurstofvraag (kg/dag);

ER-B = zuurstofinbrengrendement (kg O₂/kWh);

EP = energieprijs (f/kW).

Het rendement voor wel/geen voortstuwing moet worden ingevoerd. Bij alternatieve voortstuwing worden de extra kosten voor energieconsumptie meegerekend.

2. Kostenberekening voor een puntbeluchtingssysteem:

$$\text{- O}_2\text{-inbreng} = \text{O}_2\text{-vraag, max} \cdot \beta/\alpha$$

$$\text{- kW-geïnstalleerd} = \text{O}_2\text{-inbreng} \cdot 1/24 \cdot 1/\text{ER-P}$$

Waarin:

ER-P = zuurstofinbrengrendement puntbeluchters (kg O₂/kW).

ER-P wordt opgegeven voor verschillende vormen van de aeratietank (rechthoekige of ronde en ovaalvormige tank). In het model worden de kosten van puntbeluchting voor deze drie vormen doorberekend.

- Investering = som van de prijzen voor:
puntbeluchters;
elektriciteit, instrumentatie en bekabeling;
civiele werken.

Prijs puntbeluchters. Op basis van de gegevens van de leveranciers is de volgende prijs geschat.

$$\text{Prijs puntbeluchters} = 25.500 + \text{kW-geïnstalleerd} \cdot 715$$

Prijs voor elektriciteit, instrumentatie en bekabeling als percentage van prijs puntbeluchters

$$E+I = 0,4 \bullet \text{puntbeluchters}$$

De prijs van civiele werken is gerelateerd aan het aantal puntbeluchters.

$$\text{Prijs civiel} = \text{aantal puntbeluchters} \cdot CP$$

CP = civiele prijs per puntbeluchter

Voor rechthoekige tanks (afdekking en brug): f 42.150,--.

Voor ronde tanks (scheidingswand door hele tank, afdekking en brug): f 86.630,--.

Voor ovale tanks (scheidingswand bij beluchter, afdekking en brug): f 64.200,--.

Het aantal benodigde puntbeluchters wordt geschat op basis van het aantal kW-geïnstalleerd. Er wordt standaard gezocht naar twee puntbeluchters. Indien echter het gewenste vermogen dusdanig is dat er meer dan twee puntbeluchters van 132 kW nodig zijn dan worden er, uitgaande van 132 kW puntbeluchters, meerdere puntbeluchters gekozen.

- Exploitatiekosten

De exploitatiekosten van puntbeluchting worden bepaald zoals omschreven bij bellenbeluchting

BIJLAGE 5

VOORBEELD VAN EEN BESLISSINGSMODEL OP BASIS VAN DE INDIVIDUELE WEGINGSFACTOREN VAN DE WATERBEHEERDERS

BIJLAGE 5

Voorbeeld van een beslissingsmodel op basis van de individuele wegingsfactoren van de waterbeheerders

Bepaling van de totale waardering van de procestechnologische en operationele aspecten per waterbeheerder

Gebruikte scoringsfactoren op basis van het voorbeeld in paragraaf 5.2:

	Bellenbeluchting	Puntbeluchting
Bedrijfszekerheid	4	5
Onderhoudsgemak	3	5
Inpasbaarheid	5	5
Duurzaamheid energie	5	2.9
Duurzaamheid geluid en geur	5	5
Ervaring	5	5
Vervangbaarheid	3	5
Capaciteit	5	5

Bepaling van de wegingsfactoren van de individuele waterbeheerder:

	Waterbeheerder									
Enquete resultaten	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Inpasbaarheid	4.7	4.0	3.3	3.7	3.2	4.3	4.3	4.3	4.3	3.7
Jaarl.kosten	4.7	4.3	3.8	3.7	4.2	4.3	4.7	4.0	4.0	4.3
Bedrijfszekerheid	4.7	4.3	5.0	4.3	5.0	4.7	5.0	4.7	5.0	4.7
Grootte	2.3	3.0	3.7	3.0	3.2	3.7	2.3	1.7	3.0	3.3
Onderhoud	4.0	4.0	3.5	4.7	3.8	3.3	4.3	4.3	3.0	4.0
Vervanging	4.0	4.0	2.5	3.3	3.0	3.3	4.3	3.7	3.7	3.0
Duurzame energie	3.7	4.0	3.5	4.0	4.0	4.3	4.7	4.7	3.0	4.0
Duurzaam rest	3.7	4.0	3.8	3.3	4.0	3.7	3.0	3.3	3.3	4.0
Ervaring	2.8	3.0	3.3	3.0	3.5	3.7	3.7	2.0	4.0	2.7
Wegingsfactoren										
Inpasbaarheid	4	3	1	2	1	3	3	3	3	2
Bedrijfszekerheid	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4
Grootte	0	1	2	1	1	2	0	0	1	1
Onderhoud	3	3	2	4	2	1	3	3	1	3
Vervanging	3	3	1	1	1	1	3	2	2	1
Duurzame energie	2	3	2	3	3	3	4	4	1	3
Duurzaam rest	2	3	2	1	3	2	1	1	1	3
Ervaring	1	1	1	1	2	2	2	0	3	1
Som wegingsfactoren	19	20	15	16	17	18	20	17	16	18

Resultaten van de totale waardering:

Beheerder	Totale waardering		Verschil totale waardering(punt-bel)	
	bel	punt	Voorkeur bel	Voorkeur punt
			Bel-punt	Punt-bel
A	79	89		10
B	85	94		9
C	62	71		9
D	70	71		1
E	70	81		11
F	75	88		13
G	87	94		7
H	72	79		7
I	67	78		11
J	74	84		10

Bepaling van de totale waardering inclusief exploitatiekosten voor installaties van 100.000 en 50.000 i.e.

50.000 i.e.	Scoringsfactor exploitatiekosten	
	Bellenbeluchting	Puntbeluchting
Scoringsfactor	5	4.9
Investering	657.104	384.965
Exploitatiekosten	227.163	230.592

Grote installatie	Wegingsfactor Exploitatiekosten	Totale waardering Inclusief exploitatiekosten		Totaal waarderingsverschil	
		Bel	Punt	Voorkeur bel Bel-punt	Voorkeur punt Punt-bel
50,000 i.e.					
A	11.4	140	144		4
B	12	151	152		1
C	9	111	114		3
D	9.6	120	118	2	
E	10.2	127	130		3
F	10.8	133	140		7
G	12	149	152		3
H	10.2	125	128		3
I	9.6	117	124		7
J	10.8	134	136		2

100.000 i.e.	Scoringsfactor exploitatiekosten	
	Bellenbeluchting	Puntbeluchting
Scoringsfactor	5	4.5
Investering	1.185.802	734.020
Exploitatiekosten	433.461	458.053

Grootte installatie	Wegingsfactor exploitatiekosten	Totale waardering		Totaal scoreverschil	
100,000 i.e.		Inclusief exploitatiekosten		Voorkeur bel	Voorkeur punt
		Bel	Punt	Bel-punt	Punt-bel
A	11.4	136	139		3
B	12	145	147		2
C	9	107	111		4
D	9.6	118	114	4	
E	10.2	121	126		5
F	10.8	129	136		7
G	12	147	147	0	0
H	10.2	123	124		1
I	9.6	115	121		6
J	10.8	128	132		4

BIJLAGE 6

HANDLEIDING VOOR HET GEBRUIK VAN HET BESLISSINGSMODEL

BIJLAGE 6

Handleiding bij het gebruik van het beslissingsmodel

1) Bepaling van de wegings- en scoringsfactoren

Er zijn drie methoden voor het bepalen van de wegingsfactoren:

- direct door de groep die betrokken is bij het ontwerp en beheer van beluchtingssystemen;
- indirect door bepaling van het belang dat conform de methode in § 4.4 wordt omgezet in wegingsfactoren. De indirecte bepaling kan het best individueel gebeuren door de betrokken vakdisciplines;
- gebruik van het gemiddelde van de waterbeheerders zoals toegepast in het voorbeeld van § 5.2.

De scoringsfactoren dienen bepaald te worden door de experts van de betreffende vakdisciplines, bijvoorbeeld:

- bedrijfszekerheid: bedrijfsleider, beheer- en onderhoudskundige;
- onderhoudsgemak: bedrijfsleider, beheer- en onderhoudskundige en werktuigbouwkundige;
- ervaring: technoloog, bedrijfsleider, beheer- en onderhoudskundige, werktuigbouwkundige;
- vervangbaarheid: bedrijfsleider, beheer- en onderhoudskundige, werktuigbouwkundige.

Bij de scoringsfactoren voor energetische duurzaamheid en exploitatiekosten kan de zwaarte die wordt toegekend aan het verschil worden aangepast door af te vragen welk verschil als slecht wordt beoordeeld. Bij bepaling van de scoringsfactor wordt geadviseerd § 5.1.2 als leidraad te nemen. Natuurlijk kunnen ook scoringsfactoren, zoals toegepast in het voorbeeld van § 5.2, worden toegepast.

2) Bepaling van de procestechnologische aspecten

O₂-vraag, gemiddeld:

- Dit aspect wordt gebruikt voor het bepalen van het energieverbruik; gebruik een reëel getal op basis van de gemiddelde belasting en een gemiddelde temperatuur.

O₂-vraag, maximaal:

- Dit aspect wordt gebruikt voor het bepalen van de capaciteit van het beluchtingssysteem. Vul hier de ontwerp-O₂-vraag in, inclusief eventueel gewenste reserve.

α -factor:

- Vul de gemiddelde α -factor in over de levensduur van de apparatuur.

Temperatuur, O₂-concentratie:

- Deze aspecten worden gebruikt voor het bepalen van de deficiëtfactor en daarmee voor de zuurstofinbrengcapaciteit. Gebruik de waarden onder normale (gemiddelde) omstandigheden als een goede inschatting van het energieverbruik wordt verlangd.

Zuurstofinbrengrendement:

- Dit aspect wordt gebruikt voor het bepalen van het energieverbruik. Gebruik het rendement bij de gemiddelde O₂-vraag.

Specifieke zuurstofinbrengcapaciteit:

- Dit aspect wordt gebruikt voor het bepalen van de luchtbehoefte. Gebruik de capaciteit bij de maximale O₂-vraag. Het aantal elementen wordt in het model bepaald op basis van de nominale belasting van de elementen. Indien bij de maximale O₂-vraag een hogere elementbelasting wordt verlangd, dient dit in het model te worden aangepast.

Onderhoudskosten:

- Wijzig de gegeven parameters als er door specifieke omstandigheden meer onderhoud wordt verwacht, bijvoorbeeld bij snelle verstopping door specifieke afvalwatercomponenten of extra reistijd bij onbemande installaties. Besteed hier niet teveel denktijd aan omdat het onderhoud maar een zeer beperkt aandeel van de exploitatiekosten bepaalt.

Energieprijs:

- De energieprijs is het belangrijkste aspect in de exploitatiekosten. Neem in principe de verwachte prijs over 10 jaar (helft van de levensduur). Vooral voor kleinere installaties kan daarbij de energiehelling van belang zijn.

Procedure Keuze beluchtingssysteem - STOWA

- **Handleiding**
- **Invoerblad**
- **Bellenbeluchting**
- **Puntbeluchting**
- **Tabellen**
- **Uitvoer**

= verborgen blad
= verborgen blad
= verborgen blad

Om beveiliging op te heffen : <tools> , <protection>, unprotect. Een password is niet nodig.

1) Vul in werkblad Invoer gele cellen in

- = verborgen blad
= verborgen blad
= verborgen blad

Kosten van bellenbeluchting en puntbeluchting
De gemaakte afweging, multi-criteria-analyse tussen beide systemen

Procedure Keuze beluchtingssysteem - STOWA
Invoerblad

[illegible][illegible]

Puntbeluchting			
Energierendementen			
Bassin -- rond/ovaal	2	kg O2/kw	1.8
Bassin -- rechthoekig	1.8	kg O2/kw	1.6
Voorstuwing	nee	ja/nee	
Voorstuwing geïnstall. verm.	222	W/m3	1-1.5
Vermogen geïnstalleerd		Kw	geïnstalleerd vermogen onder gegeven invoercondities
Onderhoudskosten			
Puntbeluchter PB	4	Manuren	uur/PB.jaar
	50	Materialen	NLG/PB.jaar
Puntbeluchter PB	20	levensduur	jaren
Voorstuwing	20	levensduur	jaren

Wegingsfactoren Jaarlijkse Kosten = som kapitaal lasten + onderhoudskosten + kosten energieverbruik					
Toegekend Gewicht		standaard waarde toegekend gewicht		Score	
Bellenbeluchting		toegekend gewicht		Puntbeluchting	
9		9		4.8	
5		Investering		386319	
657052		Jaarlijkse kosten (JK)		230710	
227159				NLG	
				NLG	
Jaarlijkse kosten					

Wegingsfactoren kwalitatieve factoren						
Toegekend Gewicht		Standaard Toegekend gewicht	Score	Bellenbeluchting	Puntbeluchting	standaard scoringswaarden
				bellenbeluchting	Puntbeluchting	Puntbeluchting
Bedrijfszekerheid	4	4		4	5	4
Onderhoudsgemak	2	2		3	5	3
Inpasbaarheid	2	2		5	5	5
Duurzaamheid	2	2		5	3	
Duurzaamheid	2	2		5	5	5
geluid en geur	1	1		5	5	5
Ervaring	1	1		3	5	3
Vervangbaarheid	1	1		5	5	5
Capaciteit	1	1		5	5	5
Totale score kwalitatieve parameters		15	65	71		

Totale score Jaarlijkse kosten en kwalitatieve parameters		
Bellenbeluchting	110	Puntbeluchting
		114

Procedure Keuze beluchtingssysteem - STOWA Uitvoerblad

Tabel 1 Algemene Gegevens			
	Bellenbeluchting	Puntbeluchting	
Aantal i.e.	50000	50000	ie
Volume aeratie tank	13500	13500	m3
Configuratie aeratie tank	ovaal	ovaal	
Zuurstofvraag	8020	8020	kg O ₂ /dag
	Gemiddeld	5400	kg O ₂ /dag
Toepassing voorstuwing	ja	nee	

Tabel 2 Kostenvergelijking punt- en bellenbeluchting			
	Bellenbeluchting	Puntbeluchting	
I Investering	657052	386319	NLG
II Exploitatie	227159	230710	NLG/jaar
Wε Kapitaalkosten	65450	33681	NLG/jaar
Onderhoud	11644	620	NLG/jaar
Energie	150065	196409	NLG/jaar

Tabel 3 Multi-criteria-analyse bellen- en puntbeluchting			
omschrijving	Waardering Bellenbeluchting	Waardering Puntbeluchting	
Jaarlijkse kosten	45	44	
Bedrijfszekerheid	16	20	
Onderhoudsgemak	6	10	
Inpasbaarheid	10	10	
Duurzaam energie	10	5.71	
Duurzaam geluid/geur	10	10	
Ervaring	5	5	
Vervangbaarheid	3	5	
Grootte van de installatie	5	5	
Totale score	110	114	