

Troebelheid, doorzicht en extinctie

1. Inleiding

Troebelheidsmetingen, doorzichtmetingen en extinctiemetingen worden uitgevoerd om zaken als zwevende-stofgehalte, waterkwaliteit en onder-water-lichtklimaat te kwantificeren.

Het belang hiervan is evident: roofvissen, visetende vogels en zwemmende mensen moeten tot op zekere hoogte door het water heen kunnen kijken om te kunnen overleven of om prettig en veilig te kunnen recreëren.



DR. M. H. M. EBBEN
Rijkswaterstaat
Dienst Getijdewateren

Een gedetailleerd beeld van de plaats- en tijdsafhankelijkheid van het zwevende-stofgehalte is nodig om het slibtransport in onze wateren in kaart te kunnen brengen. Dat met slib de vaargeulen aanslibben en dat allerlei micro-verontreinigingen aan het slib hechten en ermee vervoerd worden is inmiddels genoegzaam bekend. Voor de bestudering van algen- en plantengroei onder water ten slotte is kennis van het onder-water-lichtklimaat onontbeerlijk.

Welke informatie geven troebelheids-, doorzicht- en extinctiemetingen, wat is hun onderlinge samenhang en misschien nog belangrijker: wat zijn de beperkingen van dergelijke metingen?

Een antwoord op deze vragen kan alleen gegeven worden als we de processen die licht onder water beïnvloeden goed begrijpen en als de begrippen troebelheid, doorzicht en extinctie eenduidig zijn bepaald.

2. Definities

De definities van de begrippen troebelheid, doorzicht en extinctie zoals die in dit rapport zullen worden gehanteerd, zijn:

Troebelheid:

Vertaald luidt de definitie van troebelheid volgens ISO 7027 [1]:
"Vermindering van de transparantie van een vloeistof, veroorzaakt door de aanwezigheid van niet-opgeloste stof".
Anderen [2-5] definiëren troebelheid via de Lambert Beer relatie:

$$\tau = I^{-1} \ln \left(\frac{I_0}{I_t} \right) \tag{1}$$

waarin:

Samenvatting

De samenhang van troebelheid, doorzicht en extinctie wordt beschreven op grond van de onderliggende processen: absorptie en verstrooiing van licht. De belangrijkste stoffen en processen die het lichttransport in het water beïnvloeden worden genoemd. Ook wordt ingegaan op mogelijkheden en beperkingen van de huidige meetinstrumenten voor de bepaling van troebelheid, doorzicht en extinctie. In een appendix worden de meest gebruikte troebelheids-eenheden besproken.

- τ : troebelheid
- l : de door het licht afgelegde weg
- I_0 : de invallende lichtintensiteit
- I_t : de doorgelaten lichtintensiteit

Deze formule beschrijft de exponentiële verzwakking van een bundel licht door verstrooiing in een troebel medium. Op deze manier gedefinieerd is de troebelheid gelijk aan de veel gebruikte bundel-verstrooiingscoëfficiënt b en wordt uitgedrukt in m^{-1} . Alle definities veronderstellen daarbij dat de verstrooiing door niet opgeloste deeltjes de troebeling veroorzaakt. Anders gezegd: een vloeistof met uitsluitend opgeloste stoffen (die daardoor een duidelijke kleur kan hebben) is per definitie niet troebel, maar helder. In het vervolg zullen we relatie (1) gebruiken als de definitie van troebelheid.

Doorzicht:

Doorzicht wordt gemeten met een Secchi-schijf. Uitgedrukt in meters is het doorzicht de diepte waarop de Secchi-schijf uit het zicht verdwijnt. Ook deze meet-procedure staat beschreven in de ISO-procedure [1].

Extinctie:

Extinctie is de uitdoving van licht, de afname van de lichtintensiteit. Het zal blijken dat extinctie zowel gebruikt wordt voor een evenwijdige bundel licht, zoals die gebruikt kan worden in een instrument, als voor een diffuus lichtveld zoals dat in de natuur kan voorkomen.

3. Opgeloste en niet-opgeloste stoffen

De absorptie en de verstrooiing, die samen bepalend zijn voor het lichttransport onder water, worden veroorzaakt door de in het water aanwezige stoffen. Ze kunnen verdeeld worden in opgeloste en niet-opgeloste stoffen. De belangrijkste zijn:

TABEL I – De belangrijkste opgeloste en niet-opgeloste stoffen.

Opgelost	Niet-opgelost
Water	Minerale zwevende stof
Humuszuren	Algen
	Detritus

Water is uiteraard het hoofdbestanddeel. Zuiver water is transparant voor zichtbaar licht, maar verstrooit blauw licht meer dan roder licht.

Humuszuren worden ook wel opgeloste organische stof (afmetingen $< 0,45 \mu m$), yellow substance, gelbstoff of gilvin genoemd. Niet toevallig, omdat ze licht vooral absorberen in het blauw en nabije ultraviolette deel van het spectrum. Humuszuren zijn de opgeloste afbraak-producten van organisch materiaal [6].

Minerale zwevende stof ook wel gloeirest (blijft over na sterke verhitting) genoemd, is het anorganische gesuspendeerde materiaal (bijvoorbeeld zand). Het fijne gedeelte (met diameters kleiner dan $2 \mu m$) wordt Lutum genoemd [7].

Algen zijn er in soorten en kleuren en maten, variërend van 1 tot $1000 \mu m$. Algen bevatten chlorofyl, waardoor ze kunnen fluoresceren. Phytoplankton is een synoniem.

Detritus is de verzamelnaam voor de organische zwevende stof die ontstaat in het afbraakproces van organisch materiaal.

Verder wordt nog een aantal andere begrippen gehanteerd, waarvan we hier willen noemen: Het *drooggewicht*, dat de som is van de gewichten van alle organische en anorganische zwevende stof. *Slib* zijn de kleinere ($< 25 \mu m$) niet opgeloste organische en anorganische deeltjes en *vlokken*, die bestaan uit samen-geklonterd organisch materiaal. Ze zijn in verband met hun tere constitutie niet anders dan in situ te meten. Hun grootte-verdelingen lopen sterk uiteen voor verschillende lokaties [8].

Omdat water, humus, minerale stof, algen en detritus de belangrijkste componenten zijn van de opgeloste en zwevende stof in de natuurlijke wateren, zijn verschillende modellen opgesteld om de lichtuitdoving te voorspellen op grond van de concentraties van deze stoffen [9, 10, 11]. Uit [9] blijkt dat de relatieve bijdragen die deze verschillende componenten leveren

aan de lichtuitdoving per lokatie en ook als functie van de tijd sterk kunnen variëren.

4. Absorptie en verstrooiing

Om de mogelijkheden en beperkingen van troebelheids-, doorzicht- en extinctie-metingen en de invloed van de deeltjes-eigenschappen en de golflengte van het licht te begrijpen moeten we de onderliggende natuurkundige processen, die het lichttransport onder water bepalen, kennen.

De processen die van belang zijn voor metingen met behulp van licht onder water zijn onder te verdelen in elastische en inelastische processen, waarbij respectievelijk geen en wel energie door het licht aan het medium wordt afgestaan. Als we de stoffen onderverdelen in opgeloste (moleculen, inclusief water) en niet-opgeloste (gesuspendeerde deeltjes), dan kunnen we de belangrijkste processen als volgt weergeven in de volgende tabel.

TABEL II – De belangrijkste natuurkundige processen, onderverdeeld in elastische en inelastische, voor opgeloste en niet-opgeloste stoffen.

	Opgelost	Niet opgelost
elastisch	Rayleigh verstrooiing	DiffRACTIE Refractie Reflectie
inelastisch	Absorptie Luminescentie Raman verstrooiing	Absorptie Luminescentie

Als we, zoals gebruikelijk, het lot van het licht onder water opdelen in absorptie en verstrooiing, dragen alle processen uit tabel I, met uitzondering van absorptie, bij aan de verstrooiing.

Rayleigh- en Ramanverstrooiing door moleculen zijn in de aanwezigheid van niet-opgeloste stof relatief zo zwak dat hun effect in het volgende verwaarloosbaar klein wordt verondersteld.

DiffRACTIE of buiging is een typisch golfverschijnsel. Wat er bij diffRACTIE in feite gebeurt is dat de invallende golfvronten worden vervormd door de obstructie die de buiging veroorzaakt en interfereren met zichzelf. DiffRACTIE hangt vooral sterk af van de afmeting van het deeltje ten opzichte van de golflengte van het invallende licht.

Refractie (breking), absorptie en reflectie hangen af van de (complexe) brekingsindex van het deeltje en dus van het materiaal waaruit het deeltje bestaat. Vooral de absorptie is in het algemeen sterk golflengte-afhankelijk en de voor naamste veroorzaker van de kleur van een suspensie.

Luminescentie onder te verdelen in (snelle) fluorescentie en (langzamere) fosforescentie, is een proces waarbij licht wordt geabsorbeerd en licht met een grotere golflengte weer wordt uitgezonden en wel isotroop (in alle richtingen evenveel). Een belangrijk voorbeeld waarbij fluorescentie optreedt, is in een alg die de zo opgenomen energie gebruikt voor zijn fotosynthese.

De inelastische processen, zowel voor moleculen als voor deeltjes, zijn sterk golflengte-afhankelijk door hun resonante karakter (uiteindelijk het gevolg van de molecuulstructuur). De golflengte-afhankelijkheid hangt sterk af van de stof die het proces veroorzaakt. Deze processen liggen ook ten grondslag aan meetmethoden die ons iets over de stoffensamenstelling moeten leren (bijvoorbeeld absorptie- en fluorescentie-spectroscopie).

De hoekafhankelijkheid van de verstrooiing verloopt van nagenoeg isotroop voor deeltjesdiameters die veel kleiner zijn dan de golflengte (Rayleigh-verstrooiing) via complex gelobd voor deeltjesdiameters van de orde van grootte van de golflengte naar sterk voorwaarts gepiekt voor deeltjes veel groter dan de golflengte (Fraunhofer diffRACTIE)[4].

Samenvattend

Opgeloste stoffen bepalen door hun absorptie vooral de kleur van een suspensie en verstrooien het licht veel minder sterk dan niet-opgeloste stoffen. In het volgende zal duidelijk worden dat de niet-opgeloste stoffen het medium troebel maken.

De natuurkundige processen die de verstrooiing aan een deeltje samenstellen zijn afhankelijk van de vorm, de afmetingen en de oppervlaktestructuur in verhouding tot de golflengte van het licht en de (complexe) brekingsindex die een functie is van de golflengte.

5. De samenhang van troebelheid, doorzicht en extinctie

Om een inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van optische meetinstrumenten voor onder-watarmetingen van troebelheid, doorzicht en extinctie moet de relatie tussen deze meetbare grootheden vaststaan. Eerder werden de relatie tussen zichtdiepte (doorzicht) en diffuse extinctie [12,13] en de relatie tussen extinctie en slibsamenstelling [14] bestudeerd.

Water met daarin een veelheid van opgeloste en niet-opgeloste stoffen is een verre van eenvoudig te modelleren

medium. Een nuttige indeling van grootheden is de opdeling in inherente en apparente optische grootheden (letterlijke vertaling uit het Engels) [15]:

Inherente grootheden hangen alleen af van het medium en niet van de geometrie van het lichtveld of lichtbundel, anders gezegd: niet van de manier van meten. Voorbeelden zijn de extinctie-, absorptie- en verstrooiingscoëfficiënt voor een evenwijdige bundel monochromatisch licht.

Apparente grootheden daarentegen hangen wel af van de meetomstandigheden. Voorbeelden zijn de extinctiecoëfficiënt voor diffuse straling en de reflectantie (hier niet verder gebruikt). Nauwkeurige definities van de verschillende inherente en apparente grootheden die in het volgende gebruikt zullen worden zijn belangrijk, maar ook al vaak geformuleerd. Hier worden de definities gebruikt als beschreven in [6].

Naast deze indeling moeten we ook een duidelijk onderscheid maken tussen een instrumentele evenwijdige lichtbundel en een natuurlijk diffuus lichtveld, omdat aan deze verschillende lichtomstandigheden totaal verschillende meetbare grootheden zijn gekoppeld.

De uitdoving van een evenwijdige monochromatische lichtbundel wordt gekarakteriseerd door de bundelverzwakkingscoëfficiënt c, die de som is van de bundelabsorptiecoëfficiënt a en de bundelverstrooiingscoëfficiënt b. In formulevorm:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \tag{2}$$

Alle drie de grootheden c, a en b zijn inherente optische eigenschappen en worden alle drie uitgedrukt in m⁻¹. De relatie (2) is strikt monochromatisch, anders gezegd: c, a en b zijn een functie van de golflengte van het licht. In de praktijk varieert a van 0,05 m⁻¹ voor zuiver water tot 20,0 m⁻¹ voor water in sommige meren. b kan variëren van 0,003 m⁻¹ voor zuiver water tot 50,0 m⁻¹ voor troebele meren [6].

De uitdrukking voor de uitdoving (ofwel extinctie) van een natuurlijk, diffuus lichtveld is wat minder inzichtelijk, juist omdat de diffuse extinctiecoëfficiënt geen inherente maar een apparente optische grootheid is. Met behulp van een Monte Carlo simulatie heeft Kirk [16, 17] afgeleid dat deze diffuse extinctiecoëfficiënt uit te drukken is in dezelfde a en b als:

$$K_d(\lambda) = \frac{1}{\mu_0} [a^2(\lambda) + G(\mu_0, \mu_s) \cdot a(\lambda) \cdot b(\lambda)]^{1/2} \tag{3}$$

waarin:

K_d : extinctiecoëfficiënt voor naar beneden gerichte diffuse straling.

μ_0 : cosinus van de zenith hoek van de invallende zonnestraling, na refractie, dus net onder het wateroppervlak.

μ_s : gemiddelde cosinus van het verstrooide licht.

G: verstrooiingscoëfficiënt, die de relatieve bijdrage van de verstrooiing aan de diffuse extinctiecoëfficiënt bepaalt.

Ook deze relatie is strikt monochromatisch. K is ook een functie van de golflengte. Di Toro [18] leidde een soortgelijke, maar nog eenvoudigere uitdrukking voor $K_d(a, b)$ af door enkele vereenvoudigende aannames (quasi-single scattering) voor de verstrooiingscoëfficiënt G te doen.

Het doorzicht dat bepaald wordt met behulp van een Secchi-schijf combineert een meting van de diffuse extinctie met die van de bundelextinctie. De Secchi-diepte kan uitgedrukt worden als [15]:

$$SD = \frac{I}{(c + K)} \quad (4)$$

waarin:

SD: Secchi-diepte in m.

I: Constante die onder andere afhangt van de psychofysiologie van de combinatie oog-hersenen ("eyeball optics").

c: Golflengte- en dieptegemiddelde bundelextinctiecoëfficiënt

K: Golflengte- en dieptegemiddelde extinctiecoëfficiënt voor diffuse straling.

De meting van de Secchidiepte is subjectief, omdat het menselijk oog plus de bijbehorende signaalverwerking (hersenen) deel uitmaken van het meetinstrument. Uitdrukking 4 is overigens als volgt in te zien: de diffuse verzwakkingscoëfficiënt bepaalt hoeveel zonlicht de schijf op een bepaalde diepte bereikt en de bundelverzwakkingscoëfficiënt bepaalt vervolgens hoe goed we het contrast door deze belichting kunnen zien.

Samenvattend

Uit de uitdrukkingen (2), (3) en (4) blijkt dat bundel- en diffuse extinctie en doorzicht innig verbonden zijn via a en b, de absorptie respectievelijk de verstrooiing van een evenwijdige bundel monochromatisch licht. De troebelheid van een vloeistof wordt veroorzaakt door de verstrooiing van het licht en is daarom per definitie gelijkgesteld aan de bundelverstrooiingscoëfficiënt b.

6. Instrumenten

De transmissometer

Een transmissometer meet bij benadering de bundelverzwakkingscoëfficiënt c, gemiddeld over een bepaald golflengte-interval. Altijd bij benadering, omdat voortwaartse verstrooiing nooit volledig onderdrukt kan worden en omdat de openingshoek van een detector altijd eindig groot is. Met filters kan men verschillende golflengtegebieden kiezen.

De extinctiemeter

Een voorbeeld van een instrument dat gebruikt wordt om de diffuse extinctiecoëfficiënt te meten is een statief met daarop twee lichtmeetcellen gemonteerd op een bepaalde verticale afstand van elkaar. De cellen meten de absolute lichtintensiteit in een bepaald golflengte-interval (bijvoorbeeld PAR: photo-synthetic active radiation = 400-700 nm). Het verschil van de twee meetwaarden levert de diffuse extinctiecoëfficiënt, gemiddeld over de golflengte-interval en gemiddeld over de diepte-interval. Bij een dergelijke meting wordt gebruik gemaakt van het beschikbare zonlicht. Dit is op zich de beste benadering van het natuurlijke diffuse lichtveld, maar wel een bron van een niet gering aantal meetproblemen [19]. De belangrijkste zijn de invloed van schaduwen en golven en het feit dat de signaal/ruis-verhouding afneemt met toenemende diepte, juist door de lichtextinctie.

De troebelheidsmeter

Troebelheidsmeters die beogen de concentratie vaste stof in een suspensie te meten zijn volop te koop [20]. De meeste optische troebelheidsmeters meten de transmissie van licht en lijken daarmee op transmissometers [21]. Het probleem waar al deze instrumenten mee kampen is de kalibratie. Een relatie tussen troebelheidswaarde en de concentratie vaste stof kan alleen gelegd worden na een ijking met een lokaal monster. Als de meetwaarde verandert, kan dit het gevolg zijn van een veranderende concentratie, maar ook door een verandering van de samenstelling van de zwevende stof. De instrumenten zijn niet in staat daar onderscheid tussen te maken, laat staan een samenstellingsverandering te verdisconteren.

Een apart probleem dat zich voordoet bij optische metingen aan een suspensie is het feit dat gemeten wordt aan een eindig aantal deeltjes [22]. Als het zwevende stof bestaat uit voornamelijk zeer kleine deeltjes (orde 1 μm), aanwezig in een voldoende hoge concentratie (orde 100 mg/l) is het medium ten opzichte van

typische meetvolumina van enkele cm^3 homogeen. Als er echter vooral grotere deeltjes (orde 100 μm) aanwezig zijn in lagere concentraties dan wordt het aantal deeltjes per cm^3 klein en de meetwaarde onbetrouwbaar. Een rekenvoorbeeld: Een suspensie met deeltjes van 100 μm diameter bij een concentratie van 1 mg/l (de soortelijke massa wordt 1 kg/l verondersteld) bevat bij benadering 2 deeltjes per cm^3 . De Lambert-Beer relatie die ten grondslag ligt aan alle voornoemde definities van de grootheden is dan natuurlijk niet toepasbaar als het meetvolume slechts enkele cm^3 groot is. Over de toegestane deeltjesgroottes laten de meeste specificatiesheets van troebelheidsmeters zich ook niet uit. Meetbare concentraties liggen meestal in het gebied van 0,1 mg/l tot meerdere grammen per liter.

Het mag op grond hiervan duidelijk zijn dat getalsmatige uitspraken over geldigheidsintervallen voor concentraties, deeltjesgroottes en meetnauwkeurigheden onder praktijkomstandigheden niet eenvoudig zijn.

Bij een eventuele evaluatie van een meetinstrument voor een toepassing in praktijkomstandigheden moet dit probleem altijd onder ogen worden gezien.

7. Conclusies

Uit het voorgaande leren we dat een meetinstrument voor de bepaling van de belangrijkste optische eigenschappen van een suspensie bij voorkeur zou moeten meten:

1. De bundelabsorptiecoëfficiënt a voor alle relevante golflengtes.
2. De bundelverstrooiingscoëfficiënt b voor alle relevante golflengtes.

Hiermee zouden de twee belangrijkste inherente optische eigenschappen van het medium vastliggen voor alle golflengtes. Samen met een meting van de hoekafhankelijke verstrooiing (volume-verstrooiingsfunctie $\beta(\theta)$) is dan het medium optisch nagenoeg volledig gekarakteriseerd.

De bundelverzwakkingscoëfficiënt c is in benadering te meten met een transmissometer. Door gebruik te maken van filters kan eventueel een gewenste golflengte-interval gekozen worden. Hoewel de verstrooiingscoëfficiënt b in bepaalde gevallen goed correleert met de verstrooiing onder 90 graden [23], is deze niet direct meetbaar, omdat de verstrooiing in alle richtingen plaatsvindt.

Gesuspenseerd materiaal heeft bij uitstek

een verstrooiing van licht tot gevolg. De belangrijkste ISO-procedure ter bepaling van troebelheid is hierop gebaseerd. Uit het voorgaande blijkt dat troebelheid, ofwel de concentratie zwevende stof goed correlleert met de hoeveelheid verstrooid licht, mits de invloed van de absorptie wordt verdisconteerd. Verder is opgemerkt dat de voorwaartse verstrooiing minder gevoelig is voor een veranderende grootteverdeling van de deeltjes dan een verstrooiing onder een andere hoek en bovendien groter in intensiteit. Het ligt dus voor de hand deze voorwaartse verstrooiing te gebruiken, in plaats van loodrechte of zelfs terug-verstrooiing.

In de praktijk zal een troebelheidsmeter die gebaseerd is op voorwaartse verstrooiing goed voldoen ter bepaling van de concentratie zwevende stof in het water, mits de lokale ijking geldig blijft. Omdat de drie soorten stoffen: minerale zwevende stof, algen en detritus de belangrijkste niet-opgeloste componenten zijn, zou een samenstellingsverandering gesignaleerd kunnen worden door bijvoorbeeld de totale fluorescentie mee te meten of de verstrooiingen onder verschillende (vaste) hoeken, die een afspiegeling zijn van de volume-verstrooiingsfunctie. Met de fluorescentie zou zo een verandering van de algen-concentratie worden gesignaleerd en met de hoekafhankelijke verstrooiing een belangrijke verandering van de deeltjes-grootteverdeling.

Appendix:
Troebelheidseenheden

- 1. Definitie: bepaal de afstand in een vloeistof waarbij het beeld van een kaarsvlam verdwijnt. Afstanden worden dan omgerekend in JTU eenheden met behulp van een tabel. Deze schaal heeft tegenwoordig geen praktische betekenis meer, maar de eenheid 'leeft voort'.
- 2. Definitie identiek aan JTU, Jackson gebruikte een silica-oplossing om tot deze schaal te komen.

- 3. Deze eenheid is gebaseerd op een (kwantitatief controleerbare) troebeling van water door hieraan Hexamine en Hydrazinesulfaat toe te voegen, die vervolgens reageren tot formazine. Hoewel algemeen gebruikt als norm, moet opgemerkt worden dat:
 - verschillende organisaties toch verschillende schalen gebruiken (dwz. 1000 FTU correspondeert niet altijd met dezelfde concentratie formazine).
 - De reproduceerbaarheid bij het aanmaken van de oplossing niet beter is dan 5%.
 - De oplossing slecht houdbaar is en zelfs kan klonteren.De Duitse vertaling luidt: TE/F (Trübungseinheiten Formazin)
- 4. Deze eenheid is gebaseerd op de standaard formazine-oplossing. De bundeltransmissie (noodzakelijkerwijs wordt hierbij een gedeelte van de voorwaartse verstrooiing meegemeten) is een maat voor de troebelheid.
- 5. Deze eenheid is gebaseerd op de standaard formazine-oplossing. De loodrechte verstrooiing is een maat voor de troebelheid.
- 6. De loodrechte verstrooiing is een maat voor de troebelheid.
- 7. De bekende (eenvoudige, maar subjectieve) meting van het doorzicht die gebruik maakt van het feit dat een schijf, die aan een bepaald standaardvoorschrift voldoet, op een zekere diepte in het water niet meer te onderscheiden is.

Opmerkingen:
Omrekening van de verschillende eenheden in elkaar is niet mogelijk, omdat er volgens de definities verschillende grootheden worden gemeten.

Literatuur
1. ISO 7027: 1990 (E). *International Standard, Water quality Determination of Turbidity*.
2. Penders, M. H. G. M. Penders and Vrij, A. (1990). *A turbidity study on colloidal silica particles in concentrated suspensions using the polydisperse adhesive hard sphere model*. J. Chem. Phys. 93-5 p. 3704
3. Barth, H. G. Barth (1984). *Modern methods of particle size analysis, vol.73 in Chemical Analysis, ed. P. J. Elving and J. D. Wineforder*. Wiley, New York.
4. Hulst, H. C. van de (1981). *Light scattering by*

small particles. Dover Publications Inc., New York.
5. Terence Allen. (1981). *Particle size measurement, Third Edition*. Chapman and Hall, New York.
6. Kirk, J. T. O. Kirk. (1983). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge University Press.
7. CUWVO-werkgroep 5. (1990). *Aanbevelingen voor het monitoren van de stoffen van de M-lijst uit de Derde Nota Waterhuishouding*. December, 1990.
8. Eisma, D., Bernard, P., Cadee, G. C., Itekkort, V., Kalf, J., Laane, R., Martin, J. M., Mook, W. G., Put, A. van and Schumacher, T. (1991). *Suspended-matter particle size in some West European Estuaries; Part 1: Particle size distribution*. Neth. J. of Sea Res. 28-3 p. 193.
9. Blom, G. (1991). *Slib, slibtransport en lichtklimaat in de randmeren*. LUW rapport nr. 91-15, oktober, 1991.
10. Buiteveld, H. *Uitsicht*. DBW/RIZA nota 90.058
11. Buiteveld, H. *Beschrijving van lichtextinctie in oppervlaktewater op basis van spectrale eigenschappen van stoffen*. DBW/RIZA notitie 88.058x.
12. Bakema, A. H. (1989). *Empirische licht-modellering voor een aantal Nederlandse meren*. Waterloopkundig Laboratorium, eindverslag T 387, augustus, 1988
13. Effler, S. W. (1985). *Attenuation versus transparency*. J. of Env. Eng. 111-4, p. 448
14. Duin, E. H. S. van en Kuijpers, A. M. T. (1989). *Fractiegrootteverdeling van en extinctie door zwevende stof in water in het Markermeer in 1988*. RWS DF, intern rapport 1989-27 liw.
15. Preisendorfer, R. W. (1986). *Secchi disk science: visual optics of natural waters*. Limnology and Oceanography, 31-5, p. 909.
16. Kirk, J. T. O. (1981). *Monte Carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationships between optical properties of, turbid yellow waters*. Aust. J. Mar. Freshwater Res. 32, p. 517.
17. Kirk, J. T. O. (1991). *Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field*. Limnology and Oceanography, 36-3, p. 455.
18. Di Toro, D. M. (1978). *Optics of turbid estuarine waters: approximations and applications*. Water Res. 12, p. 1059.
19. Snoek, M. *De invloed van externe factoren op extinctie-metingen*. RIZA werkdocument 91.074x.
20. Nijveldt, D. *Inventarisatie slibgehaltemeters voor Rioolwaterzuiveringsinstallaties*. Waterloopkundig Laboratorium, Werkdocument RWZI 2000 91-04W.
21. Kinderen, W. der (1982). *Slibconcentratiemeters, Experimentele vergelijking*. Waterloopkundig Laboratorium, Verslag onderzoek, M 1799 deel 1.
22. Bosman, J. J. (1981). *Optical measurements of sediment concentration; Statistical aspects of particles observation*. Report R 716 part 4. Waterloopkundig Laboratorium Delft.
23. Kirk, J. T. O. (1981). *Estimation of the scattering coefficient of natural waters using underwater irradiance measurements*. Aust. J. Mar. Freshwater Res. 32, p. 533.
24. Austin, R. W. *Problems in measuring turbidity as a water quality parameter, presented at the Environmental Protection Agency Seminar on methodology for monitoring the marine environment*. Seattle, 1973.



Troebelheidseenheden

De meest gebruikte troebelheidseenheden zijn:

Afk.	Eenheid	Opmerking	Ref.
JTU	Jacksons Turbidity Unit	1	[24]
PPM	Parts Per Million, Silica Scale	2	[24]
FTU	Formazin Turbidity Unit	3	
FAU	Formazin Attenuation Unit	4	[1]
FNU	Formazin Nephelometric Unit	5	[1]
NTU	Nephelometric Turbidity Unit	6	
m	doorzichtdiepte m.b.v. Secchi-schijf	7	[1]