

Drinkwater, lekker belangrijk!



gecertificeerde
NLT module
voor vwo

Colofon



De module Drinkwater, lekker belangrijk is bestemd voor de lessen Natuur, Leven en Technologie (NLT). De module is op 10-09-2009 gecertificeerd door de Stuurgroep NLT voor gebruik op het vwo in domein H, Materialen, proces- en productietechnologie. Het certificeringsnummer van de module is 3122-42-VH.



De originele gecertificeerde module is in pdf-formaat downloadbaar via ► <http://www.betavak-nlt.nl>.

Op deze website staat uitgelegd welke aanpassingen docenten aan de module mogen maken, voor gebruik in de les, zonder daardoor de certificering teniet te doen.

De module is gemaakt in opdracht van het Landelijk Ontwikkelpunt NLT. Deze module is ontwikkeld door

- Hofstad Lyceum Den Haag, Tony van Mechelen en Rob Diependaal.
- Chr. Gymnasium Sorghvliet Den Haag, Joke van Welzen en Ton van der Velde.

Experts:

- Technische Universiteit Delft, Jasper Verberk, Anke Grefte en Aonne Kerkstra.

Aangepaste versies van deze module mogen alleen verspreid worden, indien in dit colofon vermeld wordt dat het een aangepaste versie betreft, onder vermelding van de naam van de auteur van de wijzigingen.

Materialen die leerlingen nodig hebben bij deze module zijn beschikbaar via het vaklokaal NLT:

► <http://www.vaklokaal-nlt.nl/>

© 2009. Versie 1.0

Het auteursrecht op de module berust bij Stichting Leerplan Ontwikkeling (SLO). SLO is derhalve de rechthebbende zoals bedoeld in de hieronder vermelde creative commons licentie.

De auteurs hebben bij de ontwikkeling van de module gebruik gemaakt van materiaal van derden en daarvoor toestemming verkregen. Bij het achterhalen en voldoen van de rechten op teksten, illustraties, enz. is de grootst mogelijke zorgvuldigheid betracht. Mochten er desondanks personen of instanties zijn die rechten menen te kunnen doen gelden op

tekstgedeeltes, illustraties, enz. van een module, dan worden zij verzocht zich in verbinding te stellen met SLO.

De module is met zorg samengesteld en getest. Landelijk Ontwikkelpunt NLT, Stuurgroep NLT, SLO en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module. Ook aanvaarden Landelijk Ontwikkelpunt NLT, Stuurgroep NLT, SLO en auteurs geen enkele aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit (het gebruik van) deze module.



Voor deze module geldt een

Creative Commons Naamsvermelding-Niet-commercieel-Gelijk delen 3.0

Nederland Licentie

► <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl>

Voorwoord

Voor jullie is het vanzelfsprekend dat er schoon en veilig drinkwater uit de kraan komt. Maar beelden zoals de foto op de voorkant van deze module laten zien dat dat wereldwijd niet het geval is. Niet voor niets is het beschikbaar maken van voldoende betrouwbaar drinkwater één van de belangrijkste doelen van ontwikkelingshulp.

Zelfs in hoog ontwikkelde landen zoals Nederland staan de onderzoeksontwikkelingen op het gebied van drinkwaterproductie niet stil. Zo worden er nog voortdurend nieuwe zuiveringstechnieken geïntroduceerd, bijvoorbeeld membraanfiltratie. Een van de redenen daarvoor is dat met steeds meer soorten verontreinigingen rekening gehouden moet worden, bijvoorbeeld met medicijnresten die via afvalwater in het oppervlaktewater terecht kunnen komen. Op de Technische Universiteit Delft bij de afdeling Civiele Techniek verricht men dan ook nog voortdurend onderzoek.

Inhoudsopgave

1 Waar gaat de module over?.....	8
2 Het belang van drinkwater	9
2.1 Beschikbaarheid water.....	9
2.2 Wereldwijd drinkwaterverbruik	11
2.3 Drinkwatervoorziening	15
2.4 Drinkwatervoorziening en gezondheid	19
3 Van bron tot kraan in Nederland	22
3.1 Globale opzet van de drinkwatervoorziening	22
3.2 Drinkwaterbronnen	23
3.3 Variaties in het zuiveringsproces.....	25
4 Afzonderlijke zuiveringstechnieken	31
4.1 Beluchting en ontgassing	31
4.2 Filtratie	33
4.3 Ontharden en ontzuren	38
4.4 Actief-koolfiltratie	41
4.5 Coagulatie en vlokvorming	41
4.6 Desinfectie	42
5 Distributie	45
5.1 Transport.....	45
5.2 Opslag	46
5.3 Distributienet.....	46
5.4 Drukverschillen.....	47
6 Bekkens	51
6.1 Soorten bekkens	51
6.2 Zelfreiniging	52
6.3 Propstroming of volledige menging?	52
6.4 Afsterving van bacteriën	54
7 Expertopdrachten	60
Bijlage 1 Expertopdracht Beluchting	63
B1.1 Theorie.....	63
B1.2 Onderzoek	68
B1.3 Opschalingsopdracht.....	68
B1.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling.....	71
B1.5 Presentatie	71
Bijlage 2 Expertopdracht Filtratie	72
B2.1 Theorie.....	72
B2.2 Onderzoek	77
B2.3 Opschalingsopdracht.....	84
B2.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling.....	86
B2.5 Presentatie	86

Bijlage 3 Expertopdracht Opharding	87
B3.1 Theorie.....	88
B3.2 Onderzoek	90
B3.3 Opschalingsopdracht.....	95
B3.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling.....	96
B3.5 Presentatie	96
Bijlage 4 Expertopdracht Distributie	97
B4.1 Theorie.....	97
B4.2 Onderzoek	104
B4.3 Opschalingsopdracht Trantsportsysteem en Distributienet	105
B4.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling.....	107
B4.5 Presentatie	107
Bijlage 5 URL-lijst	108

1 Waar gaat de module over?

De module start met globale informatie over het belang van drinkwater wereldwijd.

Daarna wordt schematisch duidelijk gemaakt hoe de drinkwaterproductie in Nederland is opgezet. Drinkwater wordt gemaakt uit grondwater of uit oppervlaktewater. Hier zijn allerlei zuiveringstechnieken voor nodig. In hoofdstuk 4 worden de afzonderlijke zuiveringstechnieken stuk voor stuk besproken. Jullie gaan kennismaken met vooral de technologische aspecten van de drinkwatervoorziening.

Als drinkwater geproduceerd is, moet het nog naar de fabrieken en de huishoudens. Dat gaat via transportleidingen en een distributienet zoals beschreven wordt in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 2 t/m 5 kunnen jullie geheel zelfstandig doorwerken. Over deze hoofdstukken kun je een kennistoets verwachten. Vraag de details aan je docent.

Een belangrijk doel van deze module is om jullie iets te leren van het ingenieursdenken. En daar komt altijd wiskunde bij kijken. Een ingenieur gaat eerst rekenen voordat hij aan een technisch ontwerp begint. Hoofdstuk zes gaat over bekkens, dat zijn grote reservoirs waarin drinkwater wordt opgeslagen als voorraad. In die bekkens vinden allerlei processen plaats waardoor het water schoner wordt. Dit heet natuurlijke zelfreiniging. Dat zegt je nu nog niks maar daar kun je flink aan rekenen en er komt een stukje pittige wiskunde aan te pas. Voor leerlingen met wiskunde-A is het verstandig tijdig hulp te vragen bij je (wiskunde)docent.

Dan valt er wat te kiezen, jullie gaan in een groepje van 3 of 4 leerlingen een expertopdracht uitvoeren. Er zijn vier van dergelijke expertopdrachten. Hierin komen naast wiskundige, vooral ook scheikundige en natuurkundige aspecten aan de orde. Het zijn verdiepingsopdrachten waarin jullie één zuiveringstechniek gaan onderzoeken. Jullie zullen als een ingenieur gaan denken: onderzoek doen, er aan rekenen en dan de onderzoekopstelling opschalen naar een installatie op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

De module wordt afgesloten met een presentatie (mondeling of schriftelijk) over de resultaten van onderzoek en opschaling. Vraag je docent aan welke eisen de presentatie moet voldoen en hoe je beoordeeld wordt.

2 Het belang van drinkwater

Doelen

- Uitleggen waarom het hebben van voldoende drinkwater niet vanzelfsprekend is, ondanks de grote hoeveelheid water op aarde.
- De hydrologische kringloop beschrijven.
- Verschillen in waterverbruik per land met enkele getallen illustreren en deze verschillen kunnen verklaren.
- Noemen welke typen drinkwatervoorzieningen er zijn in verschillende soorten gebieden.
- Het belang van goede sanitatie uitleggen.
- Het belang van een goede drinkwaterkwaliteit uitleggen.

2.1 Beschikbaarheid water

Water is de belangrijkste vloeistof op aarde, zonder water is er op aarde geen leven mogelijk. Als mens kun je wel een maand zonder eten, maar nog geen week zonder water. Dat geeft het belang van toegankelijk schoon water aan.

Het totale aardoppervlak bedraagt 510 miljoen km². Hiervan is zo'n 73% water (figuur 1).



Figuur 1: het aardoppervlak bestaat voor het grootste gedeelte uit water.

De totale hoeveelheid water op aarde bedraagt 1.600 miljoen km³, ofwel een laag met een gemiddelde dikte over het gehele aardoppervlak van 3,1 km (figuur 2).

Soort water	Hoeveelheid	
	(miljoen km ³)	(m)
Totale hoeveelheid water	1.600	3.100
- chemisch gebonden	230	450
- zout water	1.330	2.610
- ijs en sneeuw	30	59
- damp	0,015	0,03
Totale hoeveelheid zoet water	8,2	16,1
- in de ondergrond	8,0	15,7
- in meren en rivieren	0,2	0,4

Figuur 2: water op aarde.

Ondanks de miljarden liters in de wereldzeeën is slechts een honderdste procent van al het water toegankelijk voor mensen, dieren en planten. Schoon water is schaars, vandaar dat wij alle zeilen moeten bijzetten om ons schone water te behouden.

Slechts 0,5% van al het water op aarde is aanwezig in de vorm van zoet grond- en oppervlaktewater. Van dit zoete water bevindt zich meer dan de helft in de diepe ondergrond (meer dan 800 m diep). In meren en rivieren is 0,2 miljoen km³ water aanwezig, overeenkomend met 40.000 m³ per wereldbewoner.

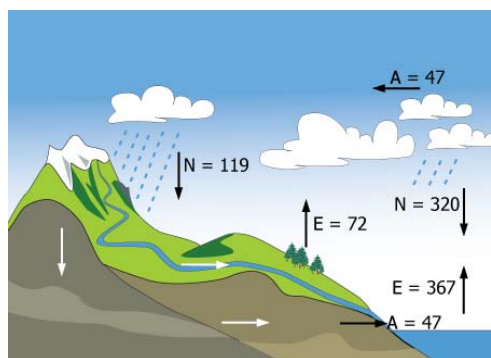
Wanneer al het zoete water gelijkmatig over de wereld verdeeld zou zijn, zou er geen groot waterprobleem zijn. Maar de verdeling over de wereld is in het geheel niet gelijkmatig. In Nederland hebben we water genoeg. In woestijngebieden waar zelden regen valt en er geen rivieren zijn, is er een groot watertekort.

Voor de productie van drinkwater wordt nagenoeg uitsluitend gebruik gemaakt van water dat een beperkte hoeveelheid opgeloste stoffen bevat, dat ook wel '**zoet water**' wordt genoemd. Deze keuze wordt ingegeven door de hoge kosten van het verwijderen van zouten uit water. Ontzouting van brak (grond)water of zeewater wordt voor de productie van drinkwater alleen toegepast wanneer zoet water schaars is, in aride (droge) gebieden zoals Saudi-Arabië en Libië en op toeristische eilanden zoals Malta, Bermuda en Aruba.

Hydrologische kringloop

Water is voortdurend in beweging. Water kan van hoedanigheid veranderen (verontreinigd raken) of in een andere aggregatietoestand overgaan (damp, ijs), maar het blijft water.

Water is ten gevolge van verdamping in de atmosfeer aanwezig in de vorm van waterdamp. Wanneer waterdamp opstijgt, condenseert de waterdamp op een gegeven ogenblik en vormen zich wolken. Via de wolken komt het water in de vorm van sneeuw, regen of hagel op het landoppervlak terecht. Daarnaast kan water ook condenseren als mist, dauw of ijzel.



Figuur 3: hydrologische kringloop en balans (hoeveelheden in 1000 km³/jaar).
N = neerslag, E = verdamping en A = transport.

Gedeeltelijk komt het gecondenseerde water terecht in meren, beken en rivieren, maar ook verdampt er water, stroomt water over het terreinoppervlak af en infiltreert water in de ondergrond. Rivieren voeren water af naar de zee, grondwater stroomt door de bodem naar lager gelegen plaatsen en bereikt uiteindelijk ook de zee. Vanuit de zee verdampt er weer water (figuur 3). De wateraanvoer van zee naar het land (en omgekeerd) is 47.000 km³ per jaar.

Vanuit de hydrologische kringloop krijgt Nederland heel veel water. Het grootste deel van het water in Nederland komt van over de grenzen. De rivieren de Rijn en de Maas voeren per jaar 110 km³ water aan. Soms is de afvoer van de rivieren zelfs zo groot dat ze buiten hun oevers treden, denk aan de overstromingen van de Rijn en de Maas in 1993 en 1995. Aan neerslag valt in Nederland per jaar 30 km³. Hiervan verdampt een groot gedeelte, de rest infiltreert in de ondergrond of stroomt af via grondwater en het oppervlaktewater naar uiteindelijk de Noordzee. De jaarlijkse aanvoer in Nederland van 110 km³ per jaar komt overeen met meer dan 7.000 m³ per inwoner, elk jaar. De hoeveelheid water die door de waterleidingbedrijven gebruikt wordt voor de productie van drinkwater bedraagt 1,2 km³ per jaar, ofwel ongeveer 1% van de jaarlijkse wateraanvoer in Nederland.

2.2 Wereldwijd drinkwaterverbruik

Drinkwater speelt in de wereld een uiterst belangrijke rol. Het wordt door sommigen ook wel het goud van de 21^e eeuw genoemd, zoals olie dat was in de 20^e eeuw. De beschikbare watervoorraad wordt namelijk relatief steeds kleiner omdat de mens het water op allerlei manieren verontreinigt

en verbruikt. De vraag naar schoon drinkwater zal in de toekomst bovendien alleen maar toenemen. Het is dan ook van groot belang dat er een balans gevonden wordt tussen de economische behoeften van de snel groeiende maatschappij en de behoefte aan een schoon milieu.

Drinkwater wordt geconsumeerd door huishoudens en industrie. Ook de irrigatie van landbouwgrond levert een grote bijdrage aan de waterconsumptie. Voor het produceren van 1 kg tarwe is bijvoorbeeld 750 liter water nodig (figuur 4). Ter vergelijking: voor drinkwater is de algemeen geaccepteerde richtlijn dat iedereen beschikking moet hebben over minimaal 20 liter water per dag afkomstig van een bron niet verder dan 1 kilometer van huis.

1 kg product	Liters water nodig
Tarwe	715-750
Mais	540-630
Sojabonen	1650-2200
Rijst	1550
Rundvlees	50.000-100.000
Wol	170.000

Figuur 4: waterverbruik voor landbouw (bron: CSIRO, Australië).

Voor het gebruik van water als drinkwater verdient naast de beschikbare hoeveelheid water ook de waterkwaliteit aandacht. Het is vanzelfsprekend dat drinkwater moet voldoen aan hoge eisen voordat het veilig gedronken kan worden. De **Wereldgezondheidsorganisatie (WHO)** heeft hiervoor richtlijnen opgesteld, aan de hand waarvan landen hun eisen bepalen. In Nederland zijn deze eisen erg scherp zodat wij kraanwater te allen tijde kunnen drinken. In het buitenland is dat lang niet altijd het geval. Het drinken van onveilig water kan ernstige gevolgen hebben voor de gezondheid, omdat ziekteverwekkende **micro-organismen** (bacteriën, virussen) zich in water schuil houden. Diarree is een veel voorkomende klacht, die het grootste effect heeft op kinderen. Kindersterftecijfers zijn hoger in landen met slechte drinkwatervoorzieningen en slechte sanitaire omstandigheden (**sanitatie**). Door ziekte missen kinderen schooldagen waardoor ze later minder kans op werk hebben. Deze indirecte effecten op armoede van slechte drinkwatervoorziening zijn weergegeven in figuur 5.

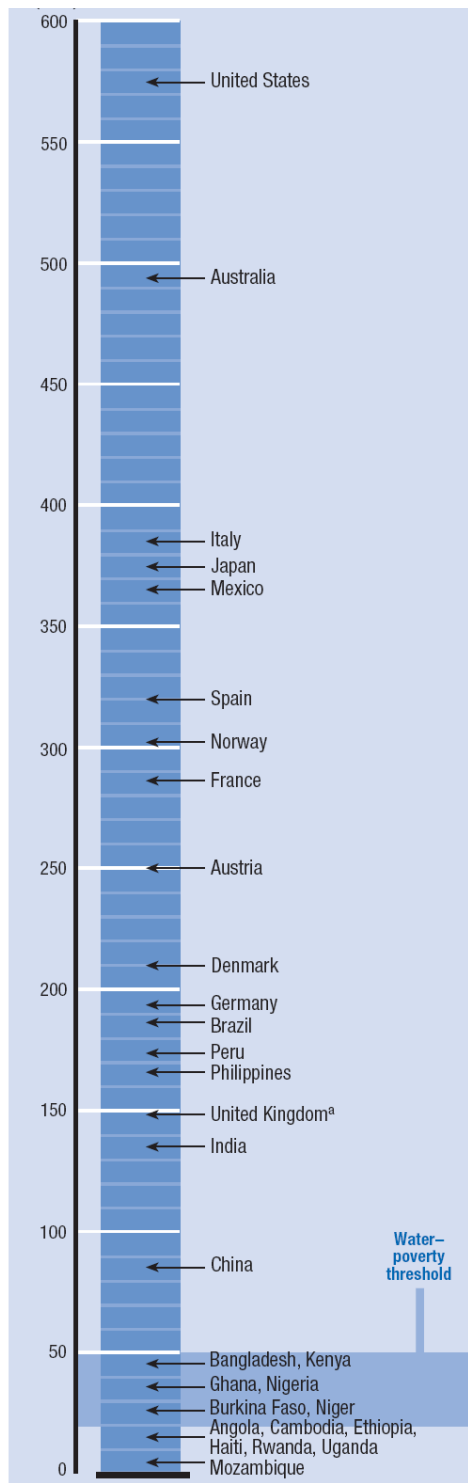


Figuur 5: drinkwater en de cyclus van armoede (bron: WHO/UNICEF).

1. Bron: de schoonheid van water

De Verenigde Naties hebben 2008 uitgeroepen tot **International Year of Sanitation**. Hiermee moet de problematiek van hygiëne en schoon water in de derde wereld op de kaart komen. Wereldwijd missen 2,6 miljard mensen goede sanitaire voorzieningen. Door deze onhygiënische toestanden overlijden er dagelijks 7500 mensen - van wie tweederde nog geen vijf jaar oud - aan één van de vele watergerelateerde ziektes. Kroonprins Willem-Alexander introduceerde bij de Nederlandse aftrap van het VN-jaar het woord sanitatie, een verbastering van het Engelse sanitation. Volgens hem gaat dit begrip veel verder dan alleen maar goede sanitaire voorzieningen. "Het gaat vooral om de bewustwording van en educatie over het nut en de noodzaak van goede hygiënische leefomstandigheden. En het gaat erom een gezond en waardig leven te kunnen leiden, waardoor verdere ontwikkeling niet langer een utopie hoeft te zijn", aldus de kroonprins.

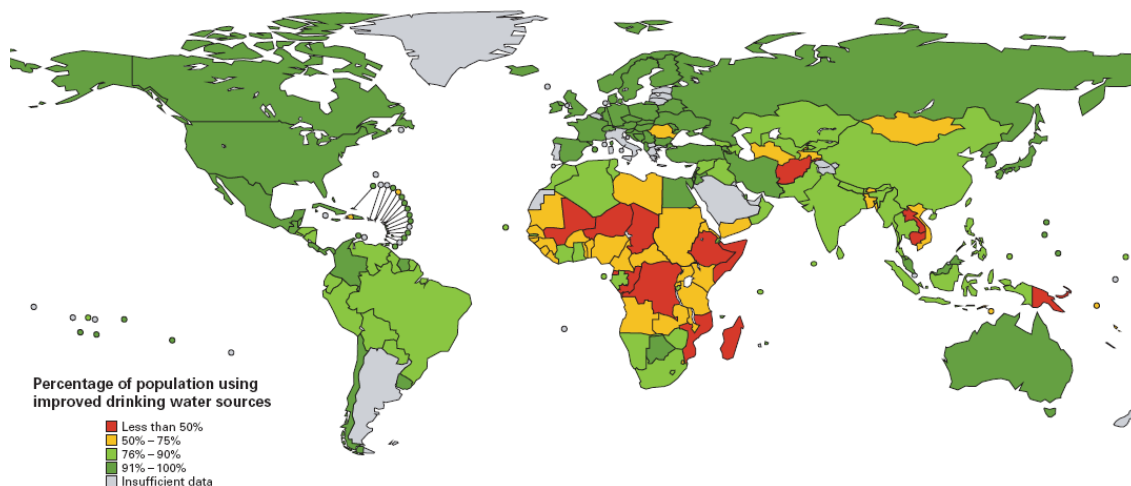
(bron: Chemische Feitenlijkheden, **55**, 244, maart 2008)



Figuur 6: gemiddeld waterverbruik in liter per persoon per dag per land (bron: FAO/UNDP).

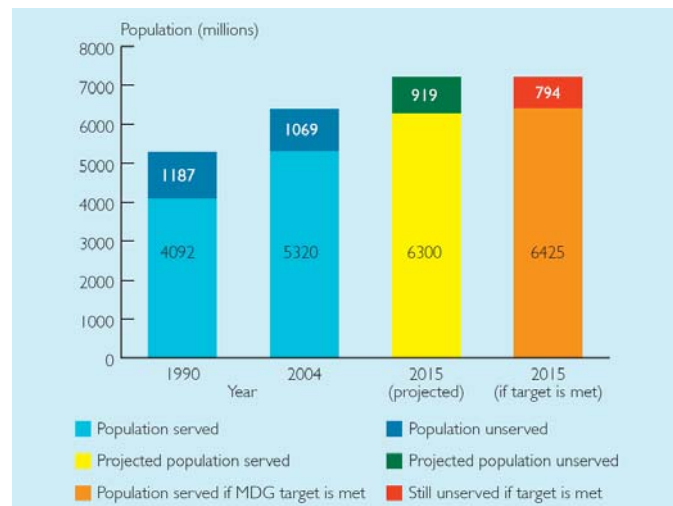
De wereldwijde ongelijkheid tussen rijke en arme landen in waterverbruik is weergegeven in figuur 6. Het gemiddelde waterverbruik, in huishoudens en industrie, is voor de meeste Europese landen tussen 200 en 300 liter per persoon per dag. In de Verenigde Staten is dit 575 liter per persoon per dag, in de stad Phoenix, Arizona, midden in de woestijn, is dit zelfs meer dan 1.000 liter per persoon per dag. Dit wordt veroorzaakt doordat grote oppervlaktes aan tuinen besproeid worden in deze woestijnstad. Ter vergelijking, in het Afrikaanse land Mozambique ligt het gemiddelde lager dan 10 liter per persoon per dag.

In Nederlandse huishoudens wordt drinkwater gebruikt voor verschillende doeleinden: toilet doorspoelen, (af)wassen, douchen, tuin sproeien, auto wassen, etc. In landen met grotere waterschaarste wordt schoon water alleen gebruikt om te drinken. Het verzamelen van dit water kost vaak veel moeite, omdat het tegen relatief hoge prijzen gekocht moet worden of omdat er lange afstanden voor gelopen moeten worden. De minimale internationale norm is 100 liter per dag per familie. Dit weegt 100 kg en dat is een zware last om voor twee tot drie uur te dragen, in het bijzonder voor jonge meisjes. Op de wereldkaart in figuur 7 is het percentage van de bevolking aangegeven dat toegang heeft tot verbeterde drinkwaterbronnen. Om aangemerkt te worden als 'verbeterde' drinkwaterbron moet een bron schoon drinkwater leveren, maar ook op maximaal 30 minuten loopafstand gelegen zijn. De roodgekleurde landen (< 50%) zijn voornamelijk te vinden in Afrika, maar ook in Aziatische landen als Cambodja en Laos is de drinkwatervoorziening slecht.



Figuur 7: drinkwatervoorziening wereldwijd in 2002 (bron: WHO/UNICEF).

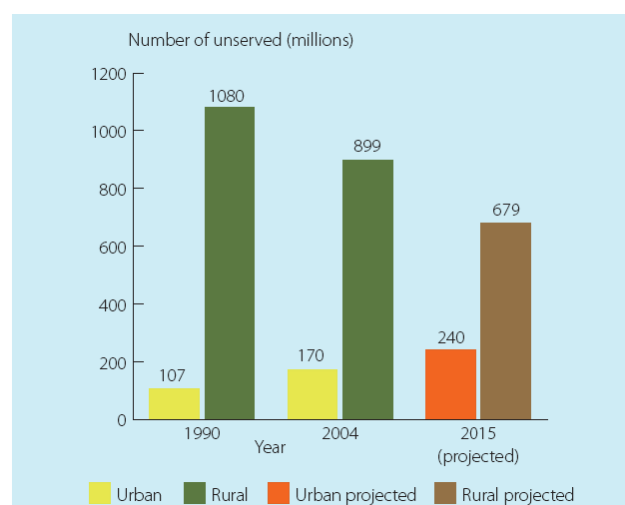
Om de wereldwijde drinkwatervoorziening te verbeteren, hebben de Verenigde Naties het volgende opgenomen in de Millennium Ontwikkelingsdoelen: “halvering van het aantal mensen dat geen toegang heeft tot drinkwater in het jaar 2015”. Dit doel heeft ertoe geleid dat drinkwatervoorziening bovenaan de politieke agenda is komen te staan. Een groot aantal rijke landen heeft aan de hand van dit doel besloten te investeren in drinkwatervoorziening in armere landen. Deze investeringen hebben ertoe geleid dat er veel mensen zijn bereikt, maar er moet voldoende aandacht worden gegeven aan grondwaterputten en zuiveringsinstallaties om de goede waterkwaliteit te behouden. Investeringsen zullen pas effect hebben als er langetermijnprojecten opgezet worden, waarbij intensieve samenwerking met de plaatselijke bevolking onontbeerlijk is. Het jaar 2015 komt steeds dichterbij en daarom wordt er momenteel veel werk verzet om in kaart te brengen wat de vorderingen zijn. Figuur 8 geeft het aantal mensen weer dat wel en geen toegang heeft tot schoon drinkwater tussen 1990 en 2015. Tussen 1990 en 2004 zijn er zo’n 118 miljoen mensen voorzien van veilig drinkwater, terwijl er nog een geschatte 1,1 miljard bereikt moeten worden om het drinkwaterdoel te bereiken in 2015.



Figuur 8: het aantal mensen met en zonder toegang tot drinkwater (bron: WHO/UNICEF).

2.3 Drinkwatervoorziening

In veel ontwikkelingslanden bevinden zich gigantische uitgestrekte en moeilijk bereikbare plattellandsgebieden. Het is ondenkbaar dat deze gebieden met een lage bevolkingsdichtheid aangesloten worden op een landelijk drinkwaterleidingnetwerk. Het aanleggen en onderhouden van zulke systemen is zeer kostbaar. Veel mensen trekken van het platteland naar de stad om geld te verdienen, maar helaas is de drinkwatervoorziening in de steden niet altijd beter. In de stad is een drinkwaterleidingnetwerk minder kostbaar omdat de mensen er dicht op elkaar wonen. De lengte van de leidingen is hierdoor veel korter. Toch is het mogelijk dat er ook in de buitenwijken van een stad door overbevolking niet voldoende of slechte kwaliteit drinkwater is. Ondanks de wereldwijde trek naar de steden, blijft de bevolking zonder drinkwatervoorziening op het platteland het grootst. In figuur 9 is dit contrast tot aan 2015 weergegeven.

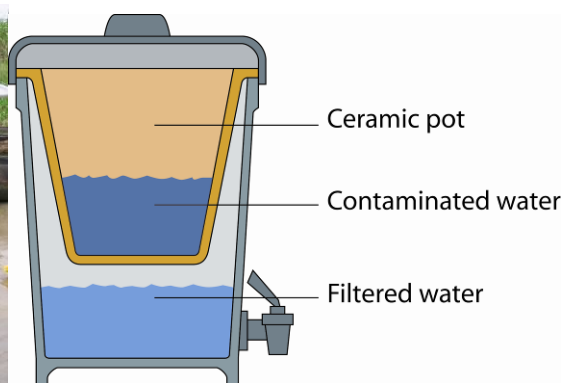


Figuur 9: wereldwijde bevolking zonder toegang tot drinkwater op het platteland (rural) en in de stad (urban) (bron: WHO/UNICEF).

In sommige dorpen, gelegen nabij grote steden, zijn gedeelde tappunten waar mensen water af kunnen nemen. Echter, de meeste gebieden zijn zo afgelegen dat mensen hun water zelf moeten verzamelen. Deze mensen zijn aangewezen op oppervlaktewater, grondwater en/of regenwater. Het grootste probleem met oppervlaktewater is dat het vaak microbiologisch onbetrouwbaar is, doordat mensen dit water ook gebruiken voor andere doeleinden, bijvoorbeeld om zich te wassen. Hierdoor is het water niet van constante kwaliteit. Toch wordt dit water in dorpen al generaties lang als drinkwater gebruikt (figuur 10). Om de kwaliteit van het drinkwater in deze dorpen te verbeteren, zou er een centrale waterzuiveringsinstallatie gebouwd kunnen worden, of er zouden kleine filters per huishouden aangeboden kunnen worden. Een huishoudfilter dat op veel locaties wereldwijd geproduceerd wordt is het *keramische potfilter* (figuur 11).



Figuur 10: rivierwater als drinkwaterbron.



Figuur 11: het keramische potfilter (contaminated betekent besmet).

In tegenstelling tot oppervlaktewater is grondwater doorgaans van constante kwaliteit doordat het lange verblijftijden in de ondergrond kent. De microbiologische betrouwbaarheid van het opgepompte water hangt sterk af van het type put dat aangelegd wordt. Een gegraven, ondiepe en open put heeft als nadeel dat er gemakkelijk verontreinigingen van boven inkomen. Een gesloten put tot op grotere diepte voorkomt dit probleem. Het gebruik van een handpomp zorgt dat water naar de oppervlakte gebracht kan worden zonder dat het verontreinigd wordt (figuur 12). Het grootste nadeel van grondwater is dat er door de *anaerobe* (zuurstofloze) condities deeltjes in oplossing kunnen raken, zoals Fe^{2+} , Mn^{2+} en As^{3+} . Met name die laatste twee vormen een grote bedreiging voor de volksgezondheid in sommige plattelandsgebieden.

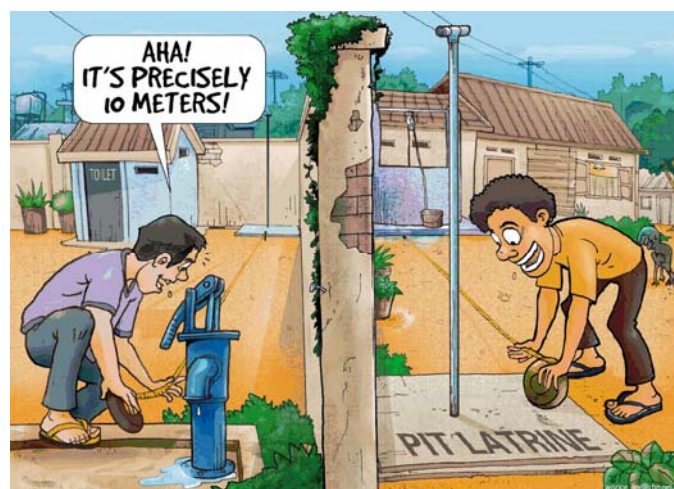


Figuur 12: ondiepe, gegraven put in Benin (Afrika) en een diepe, gesloten grondwaterput in Bangladesh (Azië).

In sommige gebieden zijn oppervlaktewater en grondwater niet voorradig of van onvoldoende kwaliteit en dan kan regenwateropvang uitkomst bieden. Regenwater dat in de moesson valt op daken of andere verharding kan verzameld worden in grote tanks en gedurende het droge seizoen afgetapt worden. Een nadeel van regenwater is dat vervuiling mee kan komen van de daken, waardoor de kwaliteit van het opgevangen water verslechtert.

Drinkwatervoorziening in de stad

De verontreiniging van oppervlaktewater en grondwater is op het platteland lang niet zo problematisch als in de stad. Als de bevolkingsdichtheid hoog is, zitten mensen al snel in elkaars afval(water). Figuur 13 illustreert dit doordat buurmannen proberen hun latrine en waterput op voldoende afstand (minimaal 10 meter) van elkaar aan te leggen, maar daardoor elkaars bron besmetten. Om besmetting van drinkwater te voorkomen, hebben stedelingen geen eigen bron, maar wordt water centraal gezuiverd waarna het via een distributienetwerk door de stad wordt verspreid.

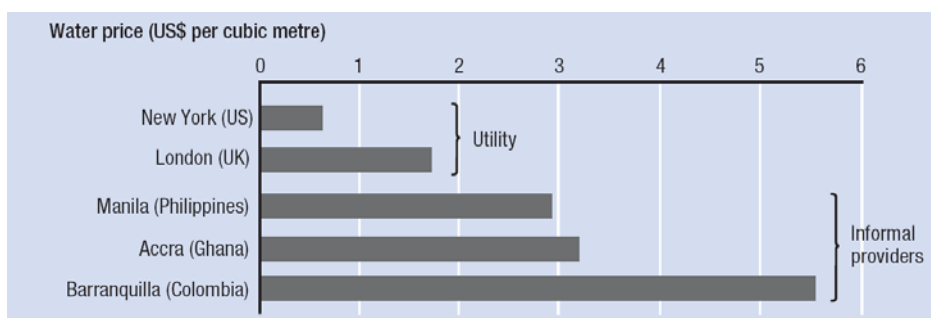


Figuur 13: minimaal 10 meter afstand tussen latrine en waterput (bron:WSP).

In stedelijke gebieden wonen mensen dicht op elkaar waardoor de distributie van behandeld drinkwater minder kostbaar is dan op het platteland. Dit neemt niet weg dat er zich in steden nog steeds grote problemen voor kunnen doen om mensen daadwerkelijk 24 uur per dag van schoon drinkwater te voorzien. In leidingnetwerken moet bijvoorbeeld voldoende waterdruk aanwezig zijn om alle tappunten te bereiken. In de praktijk komt het vaak voor dat tappunten aan de rand van het netwerk geen water ontvangen als andere gebruikers dichterbij het pompstation de kraan open hebben staan. Dit heeft als gevolg dat sommige delen van de stad alleen 's nachts watertoevoer hebben. Een bijkomend probleem bij onvoldoende waterdruk in de pijpleiding is dat vervuild water van buitenaf kan infiltreren. Hierdoor kan schoon drinkwater in de leiding worden besmet met bijvoorbeeld langsstromend afvalwater.

Een alternatieve manier om drinkwater te distribueren in de steden is door middel van 'waterjongens' of ezelkarren. In dat geval trekken verkopers de buitenwijken in met karren geladen met watertanks. De waterkwaliteit is in deze tanks lang niet altijd gegarandeerd, maar door slimme wagenontwerpen kan hierin nog veel verbeterd worden.

Men zou wellicht verwachten dat, door de slechte waterkwaliteit en lagere loonkosten, drinkwater in ontwikkelingslanden goedkoper is dan in het Westen. Figuur 14 geeft de waterprijzen weer in een aantal grote steden ter wereld. Daarin is duidelijk te zien dat de prijzen in New York en Londen veel lager liggen dan in Accra en Manila. De voornaamste reden hiervoor is dat er in ontwikkelingslanden vaak tussenpersonen zitten tussen bron en tap zoals de 'waterjongens' of een beheerder van een tappunt. Deze tussenpersonen vragen vaak een flink percentage bovenop het basistarief. Is drinkwater dus toch het goud van de 21^{ste} eeuw?



Figuur 14: waterprijzen US\$ per m³ (bron: UNDP).

2. Bron: recht op schoon water moet mensenrecht worden

DEN HAAG - Het recht op water moet worden erkend als mensenrecht. Landen moeten wettelijk vastleggen dat elke burger recht heeft op minstens 20 liter schoon water per persoon per dag. Voor de armsten moet drinkwater gratis zijn. Dit pleidooi doet het VN-ontwikkelingsfonds UNDP in het donderdag verschenen Human Development Report 2006. Volgens UNDP kost de 'mondiale crisis' in water en sanitair (toiletten) jaarlijks 1,8 miljoen kinderen het leven. Diarree is de op een na grootste 'moordenaar' van kinderen. Maar anders dan oorlogen en natuurrampen leidt de watercrisis niet tot internationale actie, aldus het rapport. UNDP spreekt van een 'stille ramp', die eenzijdig de armen treft.

In veel steden in het Zuiden betalen zij vele malen meer voor hun water dan de rijken en de middenklasse, die als eersten een aansluiting krijgen op de (goedkope) waterleiding. Sloppenbewoners zijn afhankelijk van peperdure waterverkopers en tussenpersonen. Ook op het platteland trekken de armen aan het kortste eind bij de verdeling van water. (..)

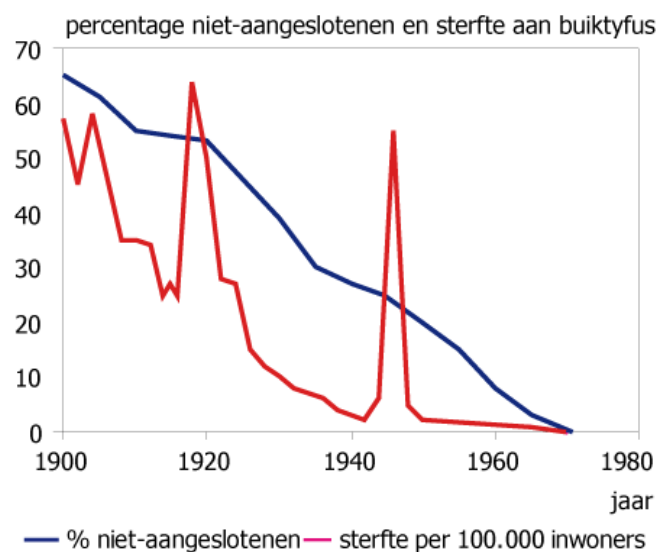
Volgens het ontwikkelingsfonds speelt water een sleutelrol om de andere zeven Millenniumdoelen voor armoedebestrijding te bereiken. Kinderen die ziek zijn omdat ze vies water hebben gedronken, gaan niet naar school, net zo min als meisjes die dagelijks uren moeten lopen met emmers water. Schoon water en wc's met spoeling leveren de 'gezondheid en waardigheid' die nodig zijn om aan armoede en seksongelijkheid te ontsnappen. (..)

(bron: Volkskrant 10-11-2006)

2.4 Drinkwatervoorziening en gezondheid

Een ziekte die in de 19^e eeuw in Nederland vaak voorkwam en vele tientallen duizenden doden tot gevolg had is **buiktyfus**. De ziekteverwekkende bacterie leeft uitsluitend in de mens, maar kan enige tijd in een waterig milieu overleven. Na een incubatietijd van 2-3 weken ontstaat veelal een ernstig ziektebeeld, gekenmerkt door hoge koorts, malaise, sufheid en vaak diarree. Kenmerkend is verder de relatief langzame pols. Een relatief gering aantal buiktyfusbacteriën is in staat de infectie te bewerkstelligen. De besmetting is fecaal - oraal en kan behalve via (drink)water ook via de handen, vliegen en de bodem plaatsvinden. Tot begin 20^e eeuw vond in Nederland bovendien vaak besmetting plaats via melk. Boeren spoelden hun melkbussen grondig uit, maar deden dit vaak in sloten waar ook de afvoeren op uitkwamen, waardoor de melk besmet raakte. Zonder behandeling sterft ongeveer 15% van de patiënten waarbij

veel afhankelijk is van de weerstand van de patiënt. Moderne geneesmiddelen hebben dit sterftepercentage weten terug te dringen tot 3% van de patiënten met buiktyfus. Tegenwoordig, in de 21^e eeuw, krijgen mensen in Nederland geen buiktyfus meer. Doordat in Nederland de afvoer van fecaliën gescheiden van drinkwater en voedsel plaatsvindt. De uitbreiding van de drinkwatervoorziening in Nederland, het percentage niet-aangeslotenen, liep in de 20^e eeuw parallel met de vermindering van het aantal dodelijke gevallen van buiktyfus (figuur 15). Zo zie je dat de openbare drinkwatervoorziening een belangrijke rol heeft gespeeld in de ontwikkeling van de moderne samenleving. De levering van goed en betrouwbaar drinkwater vanaf ongeveer 1850 heeft er voor gezorgd dat de volksgezondheid in Europa en Noord-Amerika aanzienlijk is verbeterd.



Figuur 15: relatie buiktyfus en % niet-aangeslotenen op drinkwatervoorziening in Nederland.

1. Opdracht

1.1 Drinkwaterverbruik

- Zoek op wat het drinkwaterverbruik in Nederland is. Hoeveel water wordt voor welke doeleinden gebruikt? Wat is de plaats van Nederland in figuur 6?
- Vraag de waterrekening aan je ouders en bereken hoeveel drinkwater per jaar thuis gebruikt wordt en hoeveel liter per persoon per dag dat is.

Bepaal zelf eens hoeveel liter drinkwater je gebruikt als je onder de douche staat.

1.2 Schoon drinkwater wereldwijd

- Iedereen is het erover eens: schoon drinkwater hoort beschikbaar te zijn voor iedereen op aarde. In Zuid-Afrika is dit opgenomen als mensenrecht (zie bron 2). Zou de situatie snel beter worden als dit ook in andere landen ter wereld ingevoerd wordt? Licht je antwoord toe.

- b. Eén van de Millenniumdoelstellingen omvat de halvering van het aantal mensen dat geen toegang heeft tot schoon drinkwater. Op welke andere doelstellingen heeft schoon drinkwater ook invloed? Kijk eens op ►URL1
- c. Niet in alle landen ter wereld verloopt de verbetering van drinkwatervoorziening even voorspoedig. Onderzoek (in een groep) de stand van zaken voor een land en bespreek de verschillen ten opzichte van andere landen.
- In hoeverre zijn de Millenniumdoelen bereikt? Kijk eens op ►URL2-3.
 - Noem een aantal actuele drinkwaterprojecten. Kijk eens op ►URL4-6.

Andere websites die kunnen helpen in de zoektocht:

- United Nations Development Programme, ►URL7
- The United Nations World Water Development Report, ►URL8
- IRC, International Water and Sanitation Centre, ►URL9
- IS, Internationale Samenwerking, ►URL10.

1.3 Gezondheid

In figuur 15 zie je twee hoge pieken in de sterfte per 100.000 inwoners. Verklaar deze pieken.

1.4 Drinkwaterdistributie

Nederland kende vanaf het einde van de 2^e wereldoorlog een ongekende welvaartsgroei. Toch duurde het tot pakweg 1970 voordat het percentage niet-aangeslotenen gelijk aan nul was. Verklaar dit.

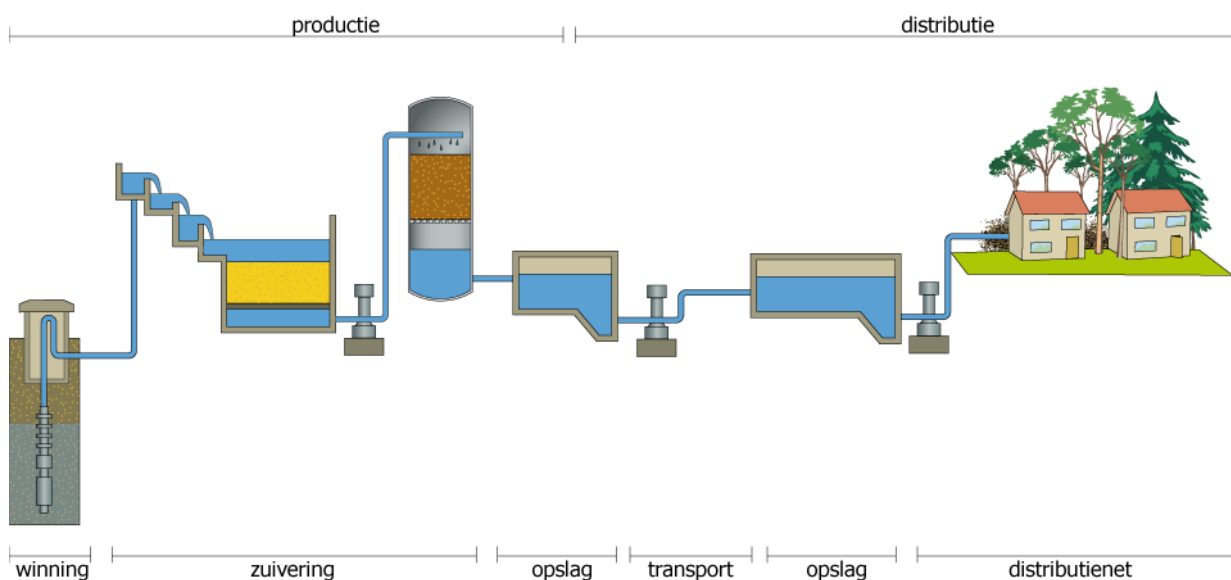
3 Van bron tot kraan in Nederland

Doelen

- De globale opzet van de Nederlandse drinkwaterproductie beschrijven of schematisch tekenen.
- De verschillende bronnen voor drinkwater noemen en de belangrijkste verschillen daartussen beschrijven.
- Per bron de belangrijkste soorten verontreinigingen en bijbehorende zuiveringstechnieken noemen.
- Beschrijven hoe duininfiltratie in zijn werk gaat.

3.1 Globale opzet van de drinkwatervoorziening

De openbare drinkwatervoorziening bestaat uit verschillende fases, zoals schematisch is weergegeven in figuur 16.



Figuur 16: onderdelen drinkwatervoorziening.

De drinkwaterproductie bestaat uit winning van '**ruw water**', wat grondwater uit de bodem of oppervlaktewater uit rivieren, kanalen en meren kan zijn. Daarna vindt er zuivering plaats om water met de juiste drinkwaterkwaliteit te kunnen leveren. Als de productie op grote afstand ligt van het zogenaamde voorzieningsgebied wordt het water eerst getransporteerd, via transportpompen en transportleidingen.

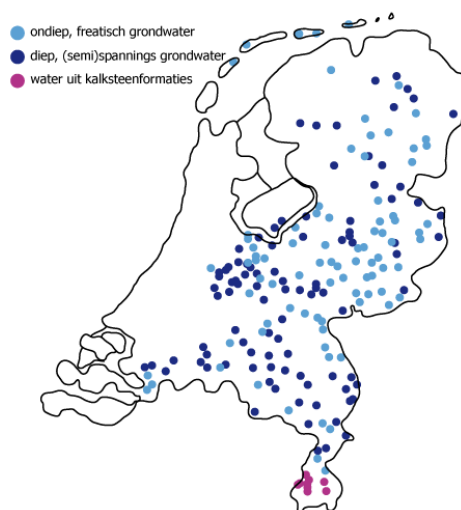
Voor het opvangen van de dagelijkse variatie in het waterverbruik worden **distributiereservoirs** (paragraaf 5.2) gebruikt. Vanuit deze reservoirs wordt het drinkwater met behulp van distributiepompen onder druk gebracht voor levering aan het voorzieningsgebied. In dit gebied is een fijnmazig distributienet aanwezig, een stelsel van grote en kleine

leidingen, dat het drinkwater bij de afnemers thuis aflevert. In distributienetten zijn soms watertorens aanwezig om drukschommelingen te beperken.

3.2 Drinkwaterbronnen

Grondwater

Door de Nederlandse waterleidingbedrijven wordt op ongeveer 200 locaties drinkwater uit **grondwater** geproduceerd (figuur 17). De winning van het grondwater vindt hierbij bijna altijd plaats in een '**grondwaterbeschermingsgebied**', ook wel **waterwingebied** genoemd (figuur 18). De geproduceerde hoeveelheden per locatie liggen hierbij tussen 0,05 en 25 miljoen m³ per jaar.



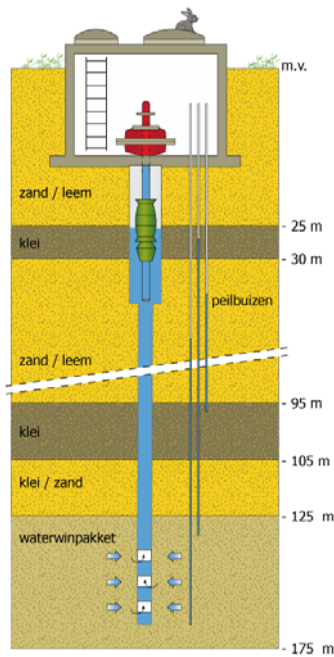
Figuur 17: productielocaties voor de drinkwatervoorziening met grondwater.



Figuur 18: aanduiding van een grondwaterbeschermingsgebied.

Grondwater verblijft doorgaans jaren in de ondergrond. Hierdoor is het water microbiologisch betrouwbaar en vrijwel constant van kwaliteit. Ook is grondwater constant van temperatuur. Door deze eigenschappen is voor de drinkwaterproductie uit grondwater slechts een beperkte zuivering nodig. In uitzonderlijke gevallen is zelfs helemaal geen zuivering nodig zoals op enkele locaties op de Veluwe.

Grondwater kan in substantiële hoeveelheden worden gewonnen indien een omvangrijke poreuze ondergrond aanwezig is en toestroming vanaf het oppervlak mogelijk is. Voor de drinkwaterproductie is het hierbij van belang dat de laag in de grond waar het grondwater zich bevindt, min of meer afgesloten is van de bovengrond. Op deze wijze wordt voorkomen dat het grondwater verontreinigd wordt. Ter beperking van besmetting wordt bovendien de omgeving van de winning als 'waterwingebied' aangemerkt. Een waterwingebied is gebonden aan strenge regels voor wat betreft



Figuur 19: diepe verticale winning (geboorde put).

bodemgebruik en toepassing van gevaarlijke stoffen zoals olie, bestrijdingsmiddelen, en dergelijke. Het is gebruikelijk om voor de bepaling van het waterwingebied uit te gaan van een minimale verblijftijd in de ondergrond van 50 jaar.

Grondwater wordt op verschillende manieren gewonnen. In de eenvoudigste uitvoering kan het vrij uitstromende grondwater simpelweg worden verzameld. In de meest gecompliceerde uitvoering moet het grondwater vanuit diepten tot 1.500 m worden gewonnen.

De meest toegepaste methode voor de winning van diep grondwater is winning met geboorde buisvormige putten (figuur 19). Dergelijke putten hebben een diameter van 0,1 tot 1,5 m en een diepte van enkele tientallen tot enkele honderdtallen meters.

Oppervlaktewater

Oppervlaktewater is in Nederland bijna altijd in grote hoeveelheden beschikbaar, en kan ook relatief eenvoudig in grote hoeveelheden worden gewonnen.

Vergeleken met grondwater vertoont oppervlaktewater in rivieren een veel grotere variatie in beschikbare hoeveelheid en kwaliteit. Schiet één van beide tekort, dan is voorraadvorming van het oppervlaktewater in reservoirs noodzakelijk om de periode van onderbroken inname te overbruggen. Het rivierwater kan tijdelijk van slechte kwaliteit zijn door bijvoorbeeld een catastrofale verontreiniging van het rivierwater door scheepvaart of lozing van industrieel afvalwater.

Oppervlaktewater kent in de natuurlijke omgeving verschillende verschijningsvormen, zoals rivieren, meren en zeeën. Oppervlaktewateren vormen nagenoeg nooit een afgesloten compartiment. Er is altijd interactie met het grondwater in de directe omgeving via kwel en infiltratie. Daarnaast wordt een oppervlaktewatercompartiment altijd doorstroomd met water, dat uiteindelijk in zee zal uitmonden.

Winning van oppervlaktewater is relatief eenvoudig. Toch zullen aparte voorzieningen gerealiseerd moeten worden om het water vanaf de gewenste plaats te onttrekken en om afkalving van oevers te voorkomen. Voor elke soort oppervlaktewater zijn andere voorzieningen voor de winning noodzakelijk. Bij rivierwater treedt sterkte turbulentie op, waardoor er innige menging van het water plaatsvindt en de kwaliteit van het water over de dwarsdoorsnede niet veel zal variëren. Bij meren zal de watersamenstelling weinig over de hoogte variëren, maar zal wel het

gehalte aan zwevende stof dichtbij de waterspiegel (door algen) en vlakbij de bodem (door opwarrelend slib) wat hoger zijn. Waterwinning uit meren zal op enige afstand van de oever plaatsvinden. Bij rivieren moet de waterinlaat op zo'n hoogte geplaatst worden dat ook bij de allerlaagste rivierstand water gewonnen kan worden.

3.3 Variaties in het zuiveringsproces

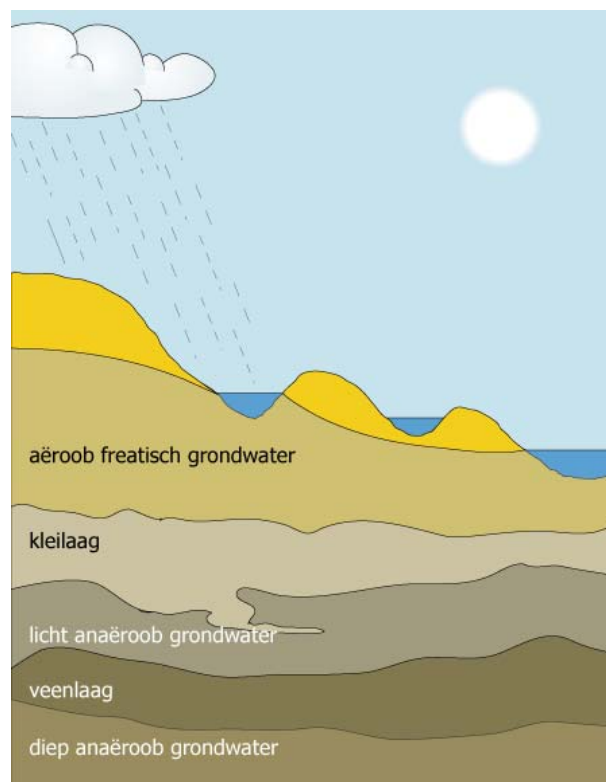
Grondwater

Voor de zuivering van grondwater is het gunstig dat grondwater van zeer constante kwaliteit is. Per locatie kunnen echter grote verschillen optreden in de watersamenstelling. Deze samenstelling is afhankelijk van de natuurlijke omgeving waaruit het grondwater wordt gewonnen en de weg die het water heeft afgelegd om daar te komen.

Voor de zuivering van grondwater kan globaal een onderscheid worden gemaakt in de volgende twee soorten grondwater, zie figuur 20:

- **aeroob (zuurstof houdend) grondwater**
- **anaeroob (zuurstofloos) grondwater.**

Het verschil in zuurstofgehalte is zeer belangrijk en heeft grote gevolgen voor de wijze van waterzuivering.



Figuur 20: plaatsen waar aeroob- en anaeroob grondwater in de bodem voorkomen.

Aeroob grondwater

Aeroob grondwater heeft meestal een open grondwaterspiegel en staat daarmee in open verbinding met de atmosfeer. Indien de organische bodemprocessen beperkt blijven, wordt het water niet zuurstofloos (anaeroob). De zuivering van aeroob grondwater is eenvoudig. Vaak volstaat een geringe beluchting.

Anaeroob grondwater

Licht **anaeroob grondwater** wordt gevonden wanneer het grondwater zich onder een afsluitende laag bevindt. Dit grondwater kenmerkt zich door het ontbreken van zuurstof en de aanwezigheid van ionen zoals ammonium (NH_4^+), ijzer (Fe^{2+}) en mangaan (Mn^{2+}). De zuivering van anaeroob grondwater bestaat vaak uit beluchting gevolgd door een snelle zandfiltratie, ook wel **natfiltratie** genoemd (figuren 21 en 22). De beluchting is noodzakelijk voor de inbreng van zuurstof en de verwijdering van koolstofdioxide (CO_2). De zuurstof wordt gebruikt voor de oxidatie van Fe^{2+} tot Fe^{3+} en is tevens nodig bij de omzetting van ammonium (NH_4^+) tot nitraat (NO_3^-) en van Mn^{2+} tot MnO_2 . Na de beluchting volgt een snelfiltratie. In het snelfilter worden de aanwezige Fe^{3+} -ionen met OH^- -ionen omgezet in $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -vlokken, die vervolgens afgefiltereerd worden. Mangaan wordt gedeeltelijk chemisch en gedeeltelijk biologisch omgezet, terwijl ammonium volledig biologisch wordt omgezet. De omzetting van ammonium vindt plaats door **nitrificerende bacteriën**.

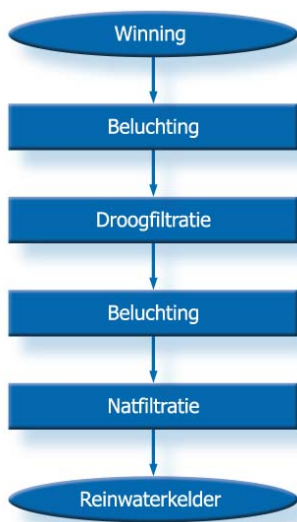


Figuur 21: zuivering van anaeroob grondwater.



Figuur 22: beluchting en natfiltratie bij pompstation Noord-Bergum (Friesland).

Bij de verwijdering van ammonium wordt veel zuurstof verbruikt. Wanneer het ammoniumgehalte groter is dan 3 mg/L is de hoeveelheid zuurstof die nodig is voor de verwijdering van ammonium groter dan de hoeveelheid zuurstof die in water op kan lossen, de verzadigingsconcentratie. Daarom worden dan additionele zuiveringsprocessen gebruikt zoals droogfiltratie. Een droogfilter is een filter, dat gevuld is met zandkorrels met een diameter van 0,8 tot 4 mm. Op het filter is geen laag water aanwezig, zoals bij natfiltratie wel het geval is. Bij een droogfilter stroomt het water langs de korrels naar beneden. Tegelijkertijd stroomt er lucht mee. De

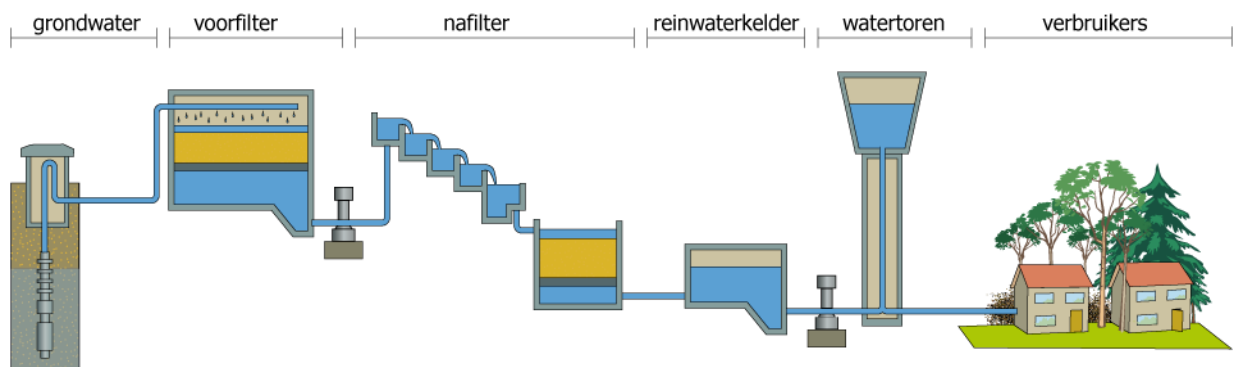


zuurstof in deze lucht vult de zuurstof uit het water die door bacteriën gebruikt is aan. Op deze manier kan meer dan 3 mg/L ammonium omgezet worden zonder dat zuurstofloosheid in het filter optreedt.

De droogfiltratie wordt gevolgd door een natfiltratie, omdat in een droogfilter veelal uitspoeling optreedt van afgezet materiaal. Wanneer deze stoffen het droogfilter verlaten, worden ze afgefilterd in een snelfilter en komen niet in het drinkwater terecht.

Voor elke filtratiestap is een beluchtingsfase aanwezig zodat de zuurstofconcentratie hoog is voordat het water het filter instroomt en koolstofdioxide verwijderd wordt (figuren 23 en 24).

Figuur 23: zuivering van diep anaeroob grondwater.



Figuur 24: grondwaterzuivering met dubbele beluchting/ filtratie.

Oppervlaktewater

Bij de productie van drinkwater uit oppervlaktewater worden twee systemen onderscheiden:

- rechtstreekse productie uit oppervlaktewater
- productie uit oppervlaktewater via infiltratie.

Mondiaal gezien is rechtstreekse productie van drinkwater de meest toegepaste vorm van drinkwaterproductie. Dit komt vooral doordat de meeste grote steden zich nu eenmaal hebben kunnen ontwikkelen dankzij hun ligging aan de oever van een grote rivier.

Het nadeel van oppervlaktewater is echter dat de temperatuur en het zoutgehalte varieert over de dag en dat het besmet kan zijn met **pathogene** (ziekteverwekkende) micro-organismen. Verder kan, zelfs na zuivering, nagroei en afzetting in het waterleidingnet plaatsvinden.

Daarom wordt oppervlaktewater soms geïnfiltreerd in duingebieden. Door het oppervlaktewater te infiltreren wordt de kwaliteit verbeterd. Dit betekent dat de pathogene micro-organismen gedood worden en het water

biologisch en chemisch meer in evenwicht met de natuur komt zodat geen afzetting en nagroei meer plaatsvinden. Ook de temperatuur neemt een min of meer constante waarde aan en de zoutconcentraties in het water worden eveneens min of meer constant.

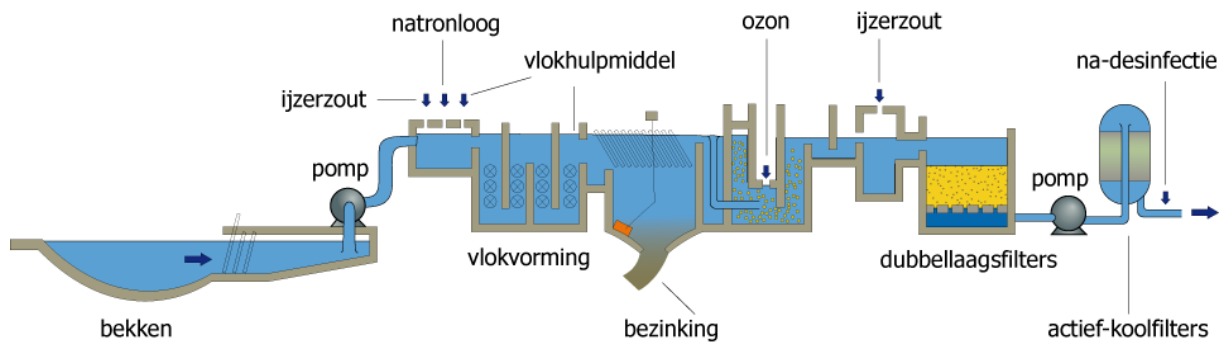
Rechtstreekse productie uit oppervlaktewater

In Nederland bevinden zich 8 zuiveringslocaties waar oppervlaktewater direct wordt gezuiverd tot drinkwater (figuur 25). Inwoners van de stad Rotterdam, het oostelijk gedeelte van Amsterdam, het gebied rondom Andijk, Zeeuws-Vlaanderen en een gedeelte van de stad Groningen drinken drinkwater dat rechtstreeks bereid is uit oppervlaktewater.



Figuur 25: rechtstreekse productie van drinkwater uit oppervlaktewater in Nederland.

Elk water en dus ook elke zuivering is weer anders. Een paar voorbeelden: Andijk kampt gedurende de zomer met hoge gehalten aan algen, die moeilijk te verwijderen zijn. Ook in de waterleidingplas van Amsterdam kan algengroei gemakkelijk optreden doordat deze plas ondiep is. Om algengroei te beperken wordt de plas fosfaatvrij gemaakt. De Biesboschbekkens zijn diep en worden continu gemengd waardoor de algengroei wordt beperkt. Doordat het water ongeveer drie maanden in het bekken verblijft, heeft het Biesboschwater een zeer lage troebelings. De resterende troebelings is dan echter moeilijk te verwijderen. In figuur 26 staat een voorbeeld van een oppervlaktewaterzuivering.



Figuur 26: voorbeeld van een productie van drinkwater uit oppervlaktewater met directe zuivering.



Figuur 27: infiltratiepanden in de Nederlandse duingebieden.

Productie uit oppervlakte water via infiltratie

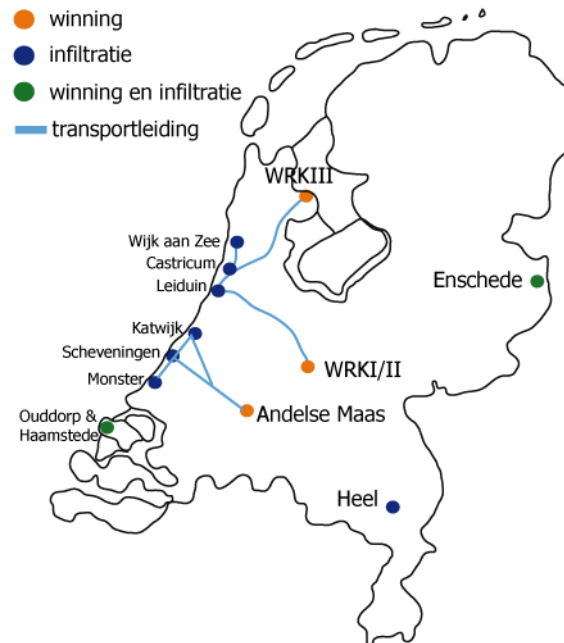
In de Nederlandse duingebieden worden veel meertjes aangetroffen zoals in figuur 27 te zien is. Deze meertjes zijn vaak infiltratiepanden van waterleidingbedrijven. Deze waterleidingbedrijven gebruiken de duinen al heel lang om drinkwater te produceren. Oorspronkelijk werden de duinen alleen gevoed door regenwater en werd het duinwater gebruikt door de plaatselijke bevolking. Nadat in 1853 een leiding van het duingebied van Zandvoort naar Amsterdam was aangelegd, werd

ook de stad Amsterdam voorzien van duinwater. De onttrokken hoeveelheid water werd steeds groter. Het gevolg was dat in de jaren '50 bij sommige putten zout water werd opgepompt. Daarom is men vanaf die tijd voorgezuiverd oppervlaktewater gaan infiltreren in de duinen met het doel het zoute water terug te dringen en de zoetwaterbel te behouden. Op die manier kan men blijven beschikken over lekker en betrouwbaar duinwater.

Het infiltratiewater is meestal afkomstig van de grote rivieren en het IJsselmeer. Na de inname wordt het water voorgezuiverd om aangroei van leidingen en vervuiling van de infiltratiegebieden te voorkomen. Na de voorzuivering vindt transport van het 'halffabrikaat' plaats over grote afstanden van wel 60 - 90 kilometer. Vervolgens wordt het voorgezuiverde oppervlaktewater in de duinen geïnfilteerd. De infiltratiegebieden functioneren hierbij vooral als opslagsysteem voor de overbrugging van perioden met verontreiniging van het oppervlaktewater, en voor afvlakking van fluctuaties in de kwaliteit. Na terugwinning wordt het duinwater nagezuiverd, omdat het water tijdens bodempassage anaeroob is geworden en er Fe^{2+} , Mn^{2+} en NH_4^+ in opgelost is. Vervolgens wordt het water naar het reservoir bij het distributiegebied getransporteerd. Van daaruit wordt het voorzieningsgebied van water voorzien.

De infiltratiegebieden vinden we voornamelijk langs de kust (figuur 28). Dit komt omdat in de Randstad het grondwater te zout is en de meeste grote

steden dicht bij de kust te vinden zijn, waardoor de vraag naar water juist daar groot is. Daarnaast is het zand van de duinen geschikt voor infiltratie en kan zodoende voldoende drinkwater met een goede kwaliteit verkregen worden.



Figuur 28: de locaties waar infiltratiewater wordt gewonnen voorgezuiverd, getransporteerd, geïnfilteerd, teruggewonnen en nagezuiverd.

2. Vraag: drinkwaterproductie

- Beschrijf de globale opzet van de drinkwaterproductie.
- Wat is het verschil tussen transport en distributie?
- Noem de twee bronnen van drinkwater in Nederland.
- Noem van iedere bron van drinkwater een voordeel en een nadeel.
- Geef aan in welk deel van Nederland vooral de ene bron en in welk deel vooral de andere bron wordt gebruikt. Licht je antwoord toe.
- Noem de twee verschillende soorten grondwater en geef het verschil aan.
- Wat heeft dat verschil voor consequenties voor de waterzuivering?
- Welke twee systemen van productie van drinkwater uit oppervlaktewater worden onderscheiden?
- Geef van beide systemen een voorbeeld hoe de productie en zuivering tot stand komt.
- Leg uit hoe het komt dat het drinkwater in het Westen van ons land vooral uit het oppervlaktewater wordt gemaakt en niet uit grondwater.

4 Afzonderlijke zuiveringstechnieken

Doelen

- Aangeven onder welke omstandigheden water met een te lage zuurstofconcentratie kan ontstaan en met behulp van een evenwichtsbeschouwing uitleggen hoe het gehalte aan zuurstof en andere gasen in water zal veranderen bij intensief contact met de lucht.
- Cascadebeluchting beschrijven.
- Alle zuiveringstechnieken noemen die gevolgd worden door filtratie.
- Aangeven wat het doel en de werking van die zuiveringstechnieken is.
- De verschillen tussen snelfiltratie en langzame zandfiltratie noemen.
- Uitleggen wat hard water is, hoe het ontstaat, wat de nadelen van hard water zijn en wat je tegen hard water kunt doen.
- Uitleggen hoe zuurhoudend water ontstaat, de nadelen van zuurhoudend water noemen en drie methoden beschrijven om water te ontzuren.
- Uitleggen waarvoor actief-koolfiltratie nodig is en deze techniek beschrijven.
- Uitleggen wat colloïdale deeltjes zijn en waarom deze verwijderd moeten worden.
- Coagulatie en vlokvorming beschrijven.
- Uitleggen wanneer welk type zuivering nodig is om water voldoende te ontdoen van schadelijke bacteriën.

In dit hoofdstuk worden de verschillende zuiveringsstappen toegelicht. Beluchting en ontgassing is een zuiveringsstap die vooral gebruikt wordt bij grondwater of infiltratiewater. Coagulatie en vlokvorming wordt alleen toegepast in de zuivering van oppervlaktewater. De overige stappen kunnen zowel bij grondwater als bij oppervlaktewater toegepast worden, afhankelijk van de waterkwaliteit van de gebruikte bron.

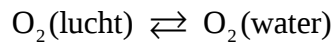
4.1 Beluchting en ontgassing

Beluchting

Grondwater kan gewonnen worden uit verschillende grondlagen. Als het water diep onder de grond gewonnen wordt onder een afsluitende kleilaag kan er geen zuurstof vanuit de lucht in het water komen. Zuurstof die in het water zit wordt verbruikt door organismen of wordt omgezet door rottingsprocessen. Hierbij kunnen CO_2 , CH_4 en H_2S ontstaan. Ook vinden er reacties plaats waarbij onder andere Fe^{2+} , Mn^{2+} en NH_4^+ (ammonium) ontstaan. Deze ionen komen in het grondwater terecht, terwijl er geen zuurstof meer in het water aanwezig is.

Het is belangrijk dat er zuurstof in drinkwater zit, dit geeft een frisse smaak aan het water. Om zuurstofloos water weer zuurstofrijk te maken,

wordt het water nadat het uit de grond onttrokken is, belucht. Het water wordt intensief gemengd met lucht waardoor het zuurstofgehalte in het water toeneemt. Dit noemen we beluchting. Dit proces gaat spontaan omdat er een verdelingsevenwicht ontstaat tussen zuurstof in de lucht en zuurstof in het water:



met als evenwichtsconstante (verdelingsconstante):

$$K = \frac{[\text{O}_2]_{(\text{water})}}{[\text{O}_2]_{(\text{lucht})}} \quad (1a)$$

Deze formule kun je ook weergeven als:

$$K = \frac{c_{\text{O}_2(\text{water})}}{c_{\text{O}_2(\text{lucht})}} \quad (1b)$$

Hierbij is c de verzadigingsconcentratie van zuurstof in mg/L.

In figuur 29 zijn de verzadigingsconcentraties van zuurstof in water weergegeven voor verschillende temperaturen.

Temperatuur (°C)	Verzadigingsconcentratie O ₂ (mg/L)
5	12,8
10	11,3
15	10,2
20	9,2

Figuur 29: verzadigingsconcentraties van O₂ in water na beluchting.

Ontgassing

Ontgassing is het proces waarbij water intensief in contact gebracht wordt met lucht om het gehalte aan in het water opgeloste gassen te verminderen. Het gaat hierbij om het verlagen van de gehalten aan CO₂, CH₄, H₂S en vluchtige organische verbindingen. In dit proces is er sprake van uitwisseling van gassen, waarbij beluchting/ absorptie (gas in water) en ontgassing/ desorptie (gas uit water) altijd gelijktijdig optreden.

Het voor de beluchting/ ontgassing noodzakelijke intensieve contact tussen lucht en water kan met verschillende systemen worden verkregen. De keuze voor een bepaalde uitvoeringsvorm wordt voor een belangrijk deel bepaald door de gassen die verwijderd moeten worden. Slechts één uitvoeringsvorm wordt hier als voorbeeld nader uitgelegd.

Cascadebeluchting

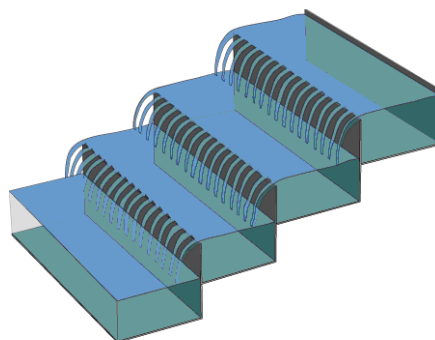
Uit de natuur is bekend dat door water te laten stromen, het zuurstofgehalte van het water wordt verhoogd. Om de opname van zuurstof en de afgifte van opgeloste gassen te bevorderen is intensieve menging van de lucht en het water noodzakelijk.

Bij **cascadebeluchting** wordt water intensief gemengd met lucht door het water vanaf een bepaalde hoogte van de ene opvangbak naar de andere te laten vallen (figuren 30 en 31).

Drinkwaterbedrijven in Nederland vinden een zuurstofgehalte van 8,0 mg/L wenselijk.



Figuur 30: cascadebeluchting met verdeling in vele stralen bij pompstation Heel (Limburg).



Figuur 31: principe cascadebeluchting met inslag van luchtballen.

3. Vraag: beluchting

- Geef met behulp van half-reacties de totale reactievergelijking voor de omzetting van Fe^{2+} tot Fe^{3+} tijdens het beluchten. Hoewel dat niet blijkt uit de gegevens in Binas tabel 48 verloopt deze reactie toch.
- Zoek in Binas tabel 44 de oplosbaarheid op van de gassen zuurstof en koolstofdioxide bij 20 °C en verklaar het verschil in oplosbaarheid.
- Bereken met behulp van figuur 29 de zuurstofconcentratie in mmol/L van water na beluchting bij 20 °C, met andere woorden: welke zuurstofconcentratie kan bij de drinkwaterbereiding worden bereikt?
- Verklaar het verschil tussen het antwoord bij b en bij c.

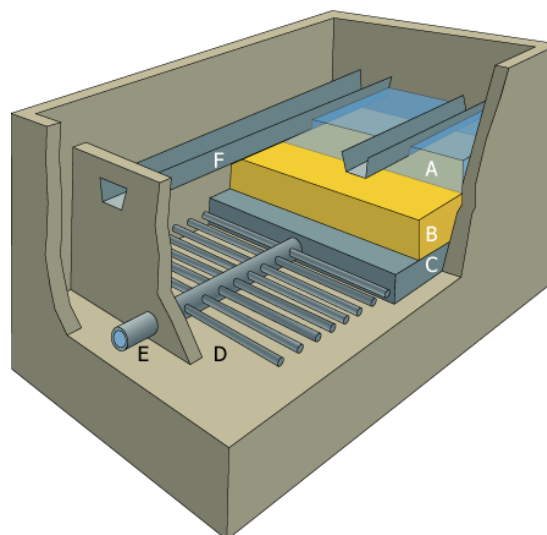
4.2 Filtratie

Filtratie wordt bij de bereiding van drinkwater gebruikt om het ruwe water te ontdoen van zwevende verontreinigingen die niet ‘vanzelf’ door bezinking uit het water kunnen worden verwijderd. Filtratie is een fysisch scheidingsproces dat gebruik maakt van het verschil in deeltjesgrootte. Een drinkwaterfilter bestaat veelal uit een laag zand of ander poreus materiaal waar het water door naar beneden stroomt (**filtraat**) waarbij de

zwevende of colloïdale deeltjes die groter zijn dan de poriën tussen de zandkorrels worden tegengehouden en in het filter achterblijven (**residu**). Gaat het om nanodeeltjes dan wordt membraanfiltratie toegepast. Filtratie wordt vrijwel altijd in combinatie met andere zuiveringsstappen toegepast zoals actief-koolfiltratie, opharden, infiltratie, coagulatie en vlokvorming. Deze processen worden na paragraaf 4.2 apart behandeld. Drie soorten uitvoeringsvormen van filtratie worden nu eerst besproken.

Snelfiltratie

Een open **snelfilter** bestaat in principe uit een bak (figuur 32) met een oppervlak van 10 tot 100 m². Het te behandelen water stroomt met grote snelheid (2 - 5 mm/s of 7 - 18 m/u) door een filterbed omlaag. Deze snelheid is alleen te bereiken door grove korrels (0,6 - 2 mm) toe te passen, waardoor de verontreinigingen uit het ruwe water zich tot op grote diepten kunnen afzetten en een grote vuilberging wordt verkregen. Het filterbed wordt ondersteund door een drainagesysteem dat tevens voor afvoer van het gefiltreerde water (**effluent**) zorgt.



- A - raw water
- B - sand layer
- C - gravel layer
- D - perforated drainage pipes
- E - effluent
- F - discharge gutter for backwashing

Figuur 32: onderdelen van een snelfilter.

Door de grote filtreersnelheid zal snel verstopping optreden en moet het filter reeds na één tot enkele dagen worden schoongemaakt. De schoonmaak moet zich over de volle hoogte van het filterbed uitstrekken. Dit wordt gerealiseerd door een terugspoelsysteem waarbij spoelwater van onder af met grote snelheid (10 - 20 mm/s of 15 - 30 m/u) door het filterbed wordt gepompt. Hierdoor zet het filterbed uit en raken de afgezette verontreinigingen los van de korrels en worden dan met het spoelwater tot buiten het filter afgevoerd , figuur 33.



Figuur 33: terugspoelen van een snelfilter.

Bij grondwater vindt snelfiltratie na de beluchting plaats (figuren 23 en 24 uit hoofdstuk 3). Het snelfilter heeft echter veel meer het karakter van een ‘reactor’, dan van een ‘filter’. Grondwater wordt namelijk gewonnen uit zandlagen, waardoor het reeds geheel vrij is van zwevende stof. Het zand bij grondwaterfiltratie is vooral materiaal waarop bacteriën en reactieproducten zich kunnen hechten. In grondwaterfilters

vinden diverse chemische en biologische processen plaats. In het natfilter reageren Fe^{3+} -ionen met OH^- -ionen tot $\text{Fe}(\text{OH})_3$ vlokken, die vervolgens afgefiltereerd worden. Mn^{2+} wordt gedeeltelijk chemisch en gedeeltelijk biologisch omgezet, terwijl NH_4^+ (ammonium) volledig biologisch wordt omgezet door nitrificerende bacteriën

Oppervlaktewater wordt primair door coagulatie, vlokvorming en bezinking gezuiverd (zie paragraaf 4.5). Een volkomen helder water kan op deze wijze echter niet worden verkregen en snelfiltratie is nu nodig om de laatste rest aan troebeling weg te nemen. Dit vraagt om een fijner filtermateriaal (0,5 - 0,8 mm), dat in geringere laagdikten kan worden toegepast en met kleinere filtratiesnelheden (1 - 2 mm/s).

Langzame zandfiltratie

Als laatste stap in het zuiveringsproces van oppervlaktewater wordt **langzame zandfiltratie** al zo’n 180 jaar toegepast. Een langzaam zandfilter bestaat uit een bak met een diepte van 3 à 4 m en een oppervlak van enkele honderden tot enkele duizenden m^2 (figuur 34) waar het water onder invloed van de zwaartekracht zeer langzaam doorheen stroomt (0,05 mm/s). Van boven naar beneden bevinden zich in deze bak

- een laag ruw water van 1 à 2 m hoog
- het filterbed met een laag fijn zand van 0,8 tot 1,3 m dik
- afvoerbuizen (het drainagesysteem) die uitmonden in een reinwaterkanaal dat over de volle breedte langs het filter loopt.

Door de geringe filtersnelheid verstopt het filter maar langzaam en kan het weken tot maanden dienst doen alvorens schoonmaak noodzakelijk is. Door het gebruik van fijn filtermateriaal met een korrelgrootte kleiner dan 0,15 à 0,3 mm en uiterst nauwe poriën, worden de zwevende deeltjes voornamelijk door zeven uit het ruwe water verwijderd. Door de fijne korrelgrootte is dit proces tot het oppervlak van het filter beperkt en



Figuur 34: langzame zandfiltratie Weesperkarspel (Amsterdam).

verstopping vindt dan ook alleen in de allerbovenste centimeters van het filterbed plaats. De hierdoor veroorzaakte hydraulische weerstand kan worden weggenomen en de capaciteit van het filter worden hersteld door deze bovenste laag ter dikte van 0,5 tot 2 cm, de '**Schmutzdecke**', te verwijderen. Vroeger gebeurde dit met de hand, tegenwoordig zijn hiervoor allerlei gemechaniseerde systemen ontwikkeld.

Een belangrijk doel van langzame zandfiltratie is schadelijke bacteriën uit het water te verwijderen. Ondanks de voortreffelijke waterkwaliteit welke

met langzame zandfiltratie kan worden verkregen, worden er in de westerse wereld geen nieuwe langzame zandfilters meer gebouwd. De installaties zijn namelijk duur in aanleg, duur in exploitatie en vereisen enorme terreinoppervlakken, terwijl in de westerse wereld hygiënisch water ook door desinfectie (zie paragraaf 4.6) met UV-straling, ozon of chloor, kan worden verkregen. In ons land wordt chloor alleen in geval van nood gebruikt, in andere westerse landen wordt chloor wel gebruikt voor desinfectie.

In ontwikkelingslanden ligt de situatie echter omgekeerd. Ruimte en ongeschoolde arbeiders voor filterschoonmaak zijn hier nog volop voorhanden. De bouw van een zandfilter kan met lokale kennis, bouwmaterialen en arbeidskrachten uitgevoerd worden. Door de hygiënische betrouwbaarheid kan desinfectie achterwege blijven en hoeft geen chloor te worden geïmporteerd. In ontwikkelingslanden lijden langzame zandfilters helaas onder het imago dat zij verouderd zouden zijn en om die redenen niet meer in ontwikkelde landen worden toegepast.

Membraanfiltratie

Membraanfiltratie is een nog relatief jonge zuiveringstechniek in ontwikkeling. Bij membraanfiltratie wordt het water door een minuscule dun folie geperst. De poriegrootte van dit folie wordt zodanig gekozen dat het de ongewenste stoffen tegenhoudt. Dit kunnen zijn zwevende deeltjes, colloïdale deeltjes (10^{-6}m) en opgeloste deeltjes. Vanwege de fijnheid van de poriën is een zeer groot filteroppervlak vereist en zijn relatief hoge drukken nodig. Om het benodigde grondoppervlak van een membraanfiltratie-installatie te beperken worden de membranen op ingenieuze wijze opgerold (figuur 35).

Membraanfiltratie processen worden in 2 groepen verdeeld. **Ultrafiltratie** is geschikt om zwevende stoffen en bacteriën tegen te houden, maar opgeloste stoffen passeren het membraan wel. De orde grootte van de

poriën van ultrafiltratie membranen is $10^{-6} - 10^{-8}$ m. **Nanofiltratie** wordt gebruikt om opgeloste stoffen tegen te houden. Deze membranen zijn niet geschikt om zwevende stoffen tegen te houden, omdat deze de fijne kanaaltjes verstoppen.

Op een aantal locaties in Nederland wordt grondwater gewonnen dat veel organische stof bevat en daardoor een gelige kleur heeft, deze kleur wordt veroorzaakt door humuszuren.

In dat geval wordt het water onder hoge druk door een membraan geperst, waarbij grote moleculen worden tegengehouden. Naast humuszuren worden hierbij ook tweewaardige ionen effectief tegengehouden, waaronder dus Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} en Ca^{2+} . De grootste installatie in Nederland met nanofiltratie van anaëroob grondwater staat in Zwolle (figuur 35).



Figuur 35: anaerobe nanofiltratie voor de drinkwatervoorziening van Zwolle (Overijssel).

4. Opdracht

4.1 Filtratie

- Leg uit wanneer een snelfilter gereinigd moet worden en waarom een snelfilter in zijn geheel gereinigd moeten worden. Verwerk in je antwoord de rol van het debiet en de capaciteit van het filter.
- Noem vier verschillen tussen snelfiltratie en langzame zandfiltratie.

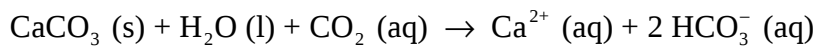
4.2 Membraanfiltratie

- Hoe groot zouden de poriën in een membraan (in nm) maximaal mogen zijn om de ionen tegen te kunnen houden, uitgaande van de gegevens in Binas tabel 40A?
- Bedenk een verklaring waarom de poriën in werkelijkheid groter mogen zijn.
- Teken schematisch het principe van een membraanfiltratie en laat daarin zien hoe de ionen en de colloïdale deeltjes worden tegengehouden en andere (kleinere) deeltjes wel door de poriën van het membraan kunnen.

4.3 Ontharden en ontzuren

Ontharden

Hard water is water met een flinke concentratie aan Ca^{2+} , Mg^{2+} en HCO_3^- ionen. In natuurlijk water is het gehalte Mg^{2+} meestal laag, $< 0,5 \text{ mmol/L}$. Maar Ca^{2+} en HCO_3^- komen vaak in grote hoeveelheden voor in grondwater, een belangrijke bron voor de bereiding van drinkwater. De ionen komen in het water terecht doordat in kalkhoudend bodemgesteente de aanwezige calciumzouten onder invloed van koolstofdioxide in grondwater oplossen, bijvoorbeeld volgens de volgende reactie:



De soort grond waaruit water gewonnen wordt, is dus bepalend voor de hardheid van het water, een kalkrijke bodem levert hard water op, een kalkarme zacht water. Koolstofdioxide is vaak in verhoogde hoeveelheden in de bodem aanwezig ten gevolge van biologische afbraakprocessen van organisch materiaal, vooral in aeroob grondwater.

Drinkwater van goede kwaliteit is niet te hard, het totale gehalte Ca^{2+} en Mg^{2+} mag niet meer dan $2,5 \text{ mmol/L}$ zijn en het gehalte HCO_3^- niet meer dan $2,0 \text{ mmol/L}$. Te hard water komt echter regelmatig voor, met name in kalkrijke gebieden, zoals Zuid-Limburg en bepaalde delen van de Achterhoek. In die streken wordt ontharding meestal standaard toegepast bij de bereiding van drinkwater.

Te hard water heeft namelijk een aantal nadelen:

- Het leidt tot kalkafzetting op apparatuur, vooral op verwarmingselementen. Dit kan schade aan de apparatuur tot gevolg hebben en veroorzaakt bovendien een hoger energiegebruik ten gevolge van de warmte-isulerende eigenschap van de kalkaanslag.
- Het vermindert de waswerking van zeep, doordat de calciumionen in het harde water een neerslagreactie geven met de negatieve zeepionen.

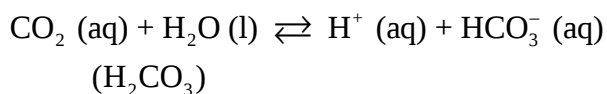
Ontharding bij de drinkwaterproductie verloopt als volgt: men mengt het te harde water met een sterke base zoals natronloog, waardoor het goed oplosbare calciumwaterstofcarbonaat gedeeltelijk wordt omgezet in het slecht oplosbare calciumcarbonaat. Men laat het mengsel vervolgens door een zogenaamd **gefluidiseerd bed** van zandkorrels (korrelreactor) stromen. Het gevormde calciumcarbonaat zet zich dan af op de zandkorrels.



Figuur 36: korrelreactor voor de ontharding van grondwater in Limburg.

Ontzuren

Grondwater heeft vaak een hoog gehalte aan opgeloste koolstofdioxide ('koolzuur'), als gevolg van allerlei biologische afbraakprocessen van organisch materiaal in de ondergrond. Koolstofdioxide is redelijk goed oplosbaar in water doordat zich het volgende ionisatie- evenwicht instelt:



Hoe lager de temperatuur van het water, des te hoger de maximale CO_2 concentratie (zie Binas tabel 44). Omdat grondwater niet in direct contact staat met de lucht, kan daarin de CO_2 concentratie zelfs nog verder oplopen, het water is dan oververzadigd met CO_2 .

Koolzuurrijk grondwater wordt in kalkarme (niet basische) grond niet geneutraliseerd en is door de lage pH te agressief om als drinkwater te gebruiken. Het zou bijvoorbeeld lood- en koperionen kunnen vrijmaken uit leidingen. Daarom moet zulk grondwater ontdaan worden van het teveel aan CO_2 zodat het ontzuurd wordt.

Verwijdering van CO_2 kan op de volgende manieren gebeuren:

- beluchting/ontgassing
- opharding, dat is filtratie over een bed van stukjes marmer of schelpen (CaCO_3)
- gedoseerd toevoegen van een basische oplossing zoals natronloog of kalkwater.

De keuze van de ontzuringsmethode wordt hoofdzakelijk bepaald door de gewenste waterkwaliteit. Drinkwater moet namelijk niet alleen een

voldoende lage CO_2 concentratie hebben en een pH van 7-8, maar moet volgens de wet ook minimaal 1-2 mmol/L HCO_3^- bevatten.

Bij **ontzuren door beluchting/ontgassing** wordt het water in contact gebracht met de buitenlucht, zodat zich een evenwicht kan instellen tussen opgelost en gasvormig CO_2 . Hierdoor zal de concentratie in oplossing dalen tot de verzadigingswaarde, ongeveer 1 mg/L. Gevolg is dat het hierboven weergegeven ionisatie-evenwicht naar links zal verschuiven, zodat ook de concentratie HCO_3^- zal afnemen. Ontzuring door beluchten is dan ook alleen maar geschikt als methode wanneer de HCO_3^- concentratie hoog genoeg is.

Bij **ontzuren door opharding** stroomt het koolzuurrijke water door een filterbed gevuld met materiaal dat hoofdzakelijk uit calciumcarbonaat bestaat. Deze base reageert met de opgeloste CO_2 , waardoor de pH stijgt. Ook de concentraties Ca^{2+} en HCO_3^- zullen toenemen en daarmee de hardheid van het water. De verhoging van de HCO_3^- concentratie is de belangrijkste reden om deze methode toe te passen.

Bij **ontzuren door gedoseerd toevoegen van een basische oplossing** wordt opgelost CO_2 omgezet in HCO_3^- .

De gedoseerde hoeveelheid moet precies in overeenstemming zijn met de om te zetten hoeveelheid CO_2 . Bij onderdosering blijft het water te zuur, bij overdosering treedt oververzadiging op en ontstaat een neerslag van CaCO_3 (ontharding). Dosering van een base wordt daarom alleen toegepast voor ontzuring wanneer een kleine pH verhoging gewenst is.

De beide andere ontzuringsmethoden zijn eenvoudiger in bedrijfsvoering en goedkoper.

5. Opdracht

5.1 Ontharden

- Geef de reactievergelijking van het onthardingsproces met behulp van natronloog.
- Zoek op wat de hardheid van het drinkwater in jouw woonplaats of gemeente is via ►URL11.

De waterhardheid wordt aangegeven in Duitse hardheidsgraden dH (1 dH = 7,1 mg Ca^{2+} per liter).

- Geef twee voorbeelden van gemeenten in Nederland waar de hardheid van het drinkwater heel anders is dan in jouw woonplaats.
- Zoek op of de hardheden die je gevonden hebt bij vraag 27) en 28) kloppen met de bodemsamenstelling in die gebieden.

5.2 Ontzuren

- Geef de reactievergelijking van het ontzuren door opharding zoals in de tekst beschreven.
- Geef de reactievergelijking van ontzuren door dosering van de base natronloog.

Andere veel gebruikte zuiveringstechnieken worden in paragraaf 4.4. tot en met 4.6 kort toegelicht.

4.4 Actief-koolfiltratie

Actief-koolfiltratie is een zuiveringstechniek waarbij de te verwijderen deeltjes zich ten gevolge van vanderwaalskrachten vasthechten aan een oppervlak (**adsorptie**). Apolaire organische stoffen, waaronder bestrijdingsmiddelen, pesticiden en organische microverontreinigingen die met de andere filtermethoden niet kunnen worden verwijderd, worden geadsorbeerd aan korrelvormige koolstofdeeltjes die door hun poreuze structuur een zeer groot oppervlak hebben ($400 \text{ m}^2/\text{g}$).

Een actief-koolfilter-systeem vertoont verder grote gelijkenis met de eerder behandelde snelfiltratie (figuur 37). Als het filterbed is verzadigd met de te absorberen stof, wordt het filtermateriaal verwijderd. Actief kool kan weer worden geregenereerd. Bij hoge temperatuur worden de verontreinigingen deels ontleed, en deels vervluchtigd.



Figuur 37: actief-koolfiltratie te Weesperkarspel (Amsterdam).

6. Vraag

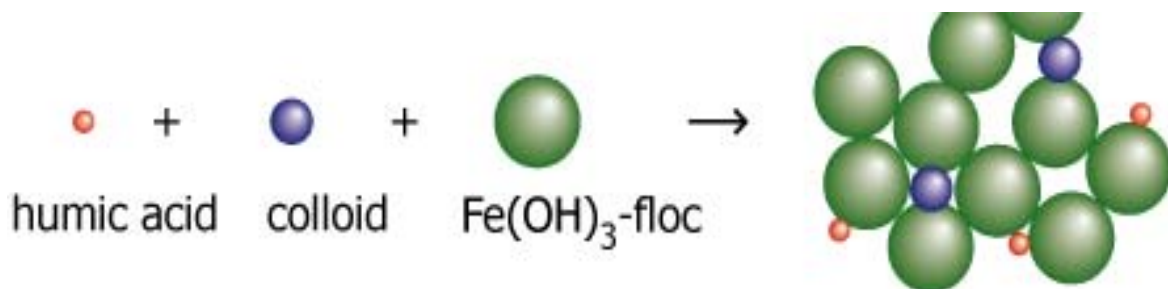
Leg uit waarom het regenereren van de actieve kool zonder zuurstof moet plaatsvinden.

4.5 Coagulatie en vlokvorming

Het oppervlaktewater uit rivieren en meren wordt opgeslagen in zogenaamde **bekkens**. Door de lange verblijftijd in een bekken is het water

ontdaan van bezinkbare stoffen. Naarmate de zwevende deeltjes kleinere afmetingen hebben, neemt de bezinkingssnelheid echter af. Als de deeltjesgrootte in de buurt van $1\ \mu\text{m}$ ($10^{-6}\ \text{m}$) of daaronder komt blijven de deeltjes gewoon zweven. Zulke deeltjes worden **colloïdale deeltjes** genoemd en zijn aan de buitenkant negatief geladen. Ze zullen als gevolg daarvan elkaar onderling afstoten (Coulombkracht), zodat samenkleven onmogelijk is en ze niet vanzelf uit het water verwijderd kunnen worden. Deze deeltjes geven aan water ongewenste kleur en troebelheid. Om colloïdale deeltjes te verwijderen worden meestal ijzer- of aluminiumzouten aan het water toegevoegd. In de praktijk gebruikt men meestal FeCl_3 of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. De Fe^{3+} of Al^{3+} ionen heffen de negatieve lading van de colloïdale deeltjes op. Hierdoor kunnen ze, als ze met andere deeltjes botsen, aangroeien tot grotere deeltjes. Deze deeltjes worden **vlokken** genoemd en kunnen worden verwijderd. Ook **humuszuren** (humic acid) zijn betrokken bij dit vlokformingsproces (figuur 38). Dit zijn stoffen die ontstaan bij de afbraak van plantaardig en dierlijk materiaal.

Dit totale proces van ijzer- of aluminiumzouten aan het water toevoegen waardoor de colloïdale deeltjes met andere neutrale deeltjes in botsing komen wordt **coagulatie** en **vlokvorming** genoemd.



Figuur 38: schematische weergave coagulatie- en vlokformingsproces.

7. Vraag

Leg uit op welke twee manieren de vlokken, die tijdens het vlokformingsproces zijn gevormd, uit het water kunnen worden verwijderd.

4.6 Desinfectie

Hygiënisch betrouwbaar drinkwater mag slechts een uiterst geringe hoeveelheid E-colibacteriën bevatten. Volgens de EU-voorschriften minder dan 1 per 100 mL, in veel landen aangescherpt tot minder dan 1 per 300 mL. Door zijn herkomst voldoet grondwater van nature aan deze eis. Oppervlaktewater daarentegen bevat zelfs onder gunstige omstandigheden 10 tot 1000 E-colibacteriën per liter, welk aantal door lozing van huishoudelijk afvalwater gemakkelijk tot 10.000 à 1.000.000 per liter

water kan oplopen. Daarom moet er een aanzienlijke reductie van het aantal E-colibacteriën plaatsvinden tijdens de zuivering.

Desinfectie door duininfiltratie

Voor oppervlaktewater met niet al teveel E-colibacteriën per liter is langzame zandfiltratie voldoende om hygiënisch betrouwbaar drinkwater te verkrijgen. Een aantal gemeenten dat drinkwater wint uit rivierwater maakt daarom gebruik van duininfiltratie. Na een kleine zuivering om het ergste vuil uit het rivierwater te halen wordt het via pijpleidingen naar duingebieden getransporteerd, waar het via infiltratiegeulen in de bodem zakt. De kwaliteit van het oppervlaktewater wordt hierdoor verbeterd. Ziekte verwekkende micro-organismen worden gedood en het water wordt biologisch gereinigd. Na een verblijftijd van twee maanden is de samenstelling van het water constant. Daarna is betrouwbaar drinkwater beschikbaar.

Soms is de bovenbeschreven zuiveringstechniek niet voldoende. Bovendien is er bij nieuw te bouwen zuiveringsinstallaties vaak niet genoeg ruimte om langzame zandfilters te bouwen. In deze gevallen zijn er ook andere (moderne) desinfectiemethodes: desinfectie met ozon, desinfectie met chloor en uv-desinfectie.



Figuur 39: ozongenerator.

Desinfectie met ozon

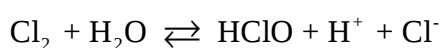
Wanneer alleen op de kwaliteit van het drinkwater wordt gelet, is ozon het meest aantrekkelijke desinfectiemiddel (figuur 39). Ozon ontleedt namelijk gemakkelijk in zuurstof en losse zuurstofatomen (radicalen), beide gewaardeerde bestanddelen in drinkwater. De zeer reactieve zuurstofradicalen (oxidator) zorgen voor desinfectie, omdat ze reageren met al het organisch materiaal (reductor), ook dat van bacteriën.

Het bezwaar tegen het gebruik van ozon is de kostprijs, vooral bij water dat grote hoeveelheden organisch materiaal bevat.

Desinfectie met chloor

Chloor was vroeger het meest gebruikelijke desinfectiemiddel. In ons land wordt chloor alleen in geval van nood gebruikt, in andere westerse landen wordt chloor wel gebruikt voor desinfectie.

Als chloor opgelost is in water, stelt zich het volgende evenwicht in:



Het gevormde HClO kan gemakkelijk het protoplasma van bacteriën bereiken en ze daardoor vernietigen.

Chloor is zo goedkoop dat hieruit geen economische problemen voortvloeien, wel kunnen de daling van de pH en de stijging van het chloridegehalte minder prettig zijn. Ook kan het water uit de kraan bij de afnemers thuis nog enkele tienden mg/L aan chloor bevatten. Dit water heeft nu een duidelijke chloorsmaak. In Europa wordt dat als onaangenaam ervaren, maar voor de Amerikanen is het bewijs geleverd dat het water hygiënisch betrouwbaar is. Is de chloorsmaak niet aanvaardbaar, dan kan het na oxidatie en desinfectie overblijvende chloor door filtratie over actief kool worden verwijderd.

Een ernstig bezwaar van het gebruik van chloor is de vorming van trichloormethaan en andere ongewenste nevenproducten. Deze ontstaan bij de reactie met humuszuren die altijd in oppervlaktewater aanwezig zijn.



Figuur 40: Uv-desinfectie na actief-koolfiltratie bij oeverfiltratie in Heel (Limburg).

Uv-desinfectie

Bestraling van water waarin micro-organismen aanwezig zijn met ultraviolet (uv) licht leidt tot vernietiging van het DNA van de micro-organismen. Deze vernietiging blokkeert verdere stofwisseling en celvermeerdering. Om dit effect te verkrijgen moeten de organismen geraakt worden door voldoende straling van de juiste golflengte. De grootste gevoeligheid treedt op bij 254 nm. De uv-straling wordt gemaakt met behulp van uv-lampen geplaatst in een contactkamer waar het te behandelen water doorheen stroomt (figuur 40). De meeste uv-lampen hebben een levensduur van 6.000 - 10.000 branduren. Uv-desinfectie is een relatief eenvoudige en

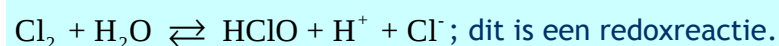
goedkope wijze van desinfectie.

Bij zuivering van grondwater komt uv-desinfectie na actief-koolfiltratie.

8. Opdracht: desinfectie

- Zoek via internet twee waterleidingbedrijven op, die gebruik maken van duininfiltratie.

Als chloor opgelost is in water, stelt zich het volgende evenwicht in:



- Geef de beide half-reacties die tot bovenstaande totaalreactie leidt.
- Noem van de vier beschreven desinfectieermethodes één voordeel en één nadeel.

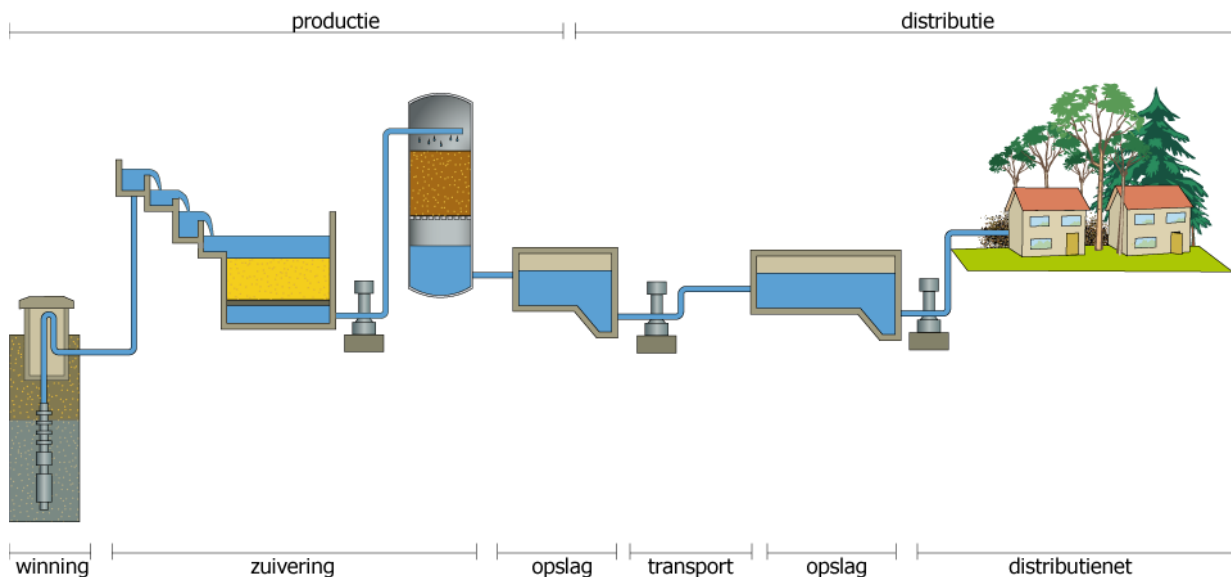
5 Distributie

Doelen

- Beschrijven uit welke onderdelen systemen voor transport, opslag en distributie van drinkwater zijn opgebouwd en de functie van deze onderdelen aangeven.
- Het belang van de juiste druk in waterleidingen met behulp van voorbeelden en berekeningen uitleggen.

5.1 Transport

Als een drinkwaterproductielocatie op grote afstand van het voorzieningsgebied ligt, dan wordt een **transportsysteem** toegepast (figuur 41).

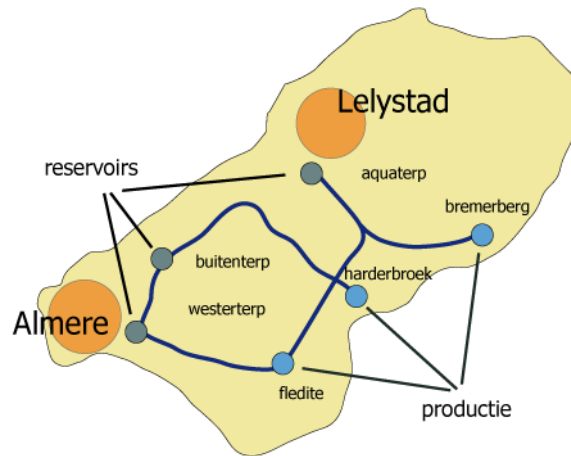


Figuur 41: onderdelen drinkwatervoorziening.

Transportsystemen bestaan niet alleen uit leidingen, maar ook uit pompstations waarin de transportpompen staan opgesteld die het water weer op druk brengen zodat het verder vervoerd kan worden (figuur 42). Figuur 43 geeft een overzicht van het transportsysteem in Flevoland tussen de drie productielocaties en de opslagreservoirs bij de steden. In totaal ligt bij de Nederlandse waterleidingbedrijven ongeveer 500 km transportleiding, met een diameter tussen 40 en 100 cm. De druk in een transportsysteem wordt alleen bepaald door de hoogteligging van het opslagreservoir en de weerstand in de leidingen.



Figuur 42: transportpompen voor drinkwater.



Figuur 43: transportsysteem in de provincie Flevoland.

5.2 Opslag

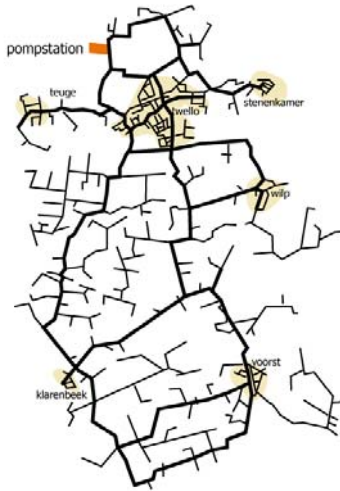
Drinkwater wordt in het distributiegebied in reservoirs opgeslagen. In de praktijk worden deze reservoirs ook vaak **reinwaterkelders** genoemd, omdat ze dikwijls in de grond zijn ingegraven. Deze reservoirs zorgen voor de afvlakking van de dagelijkse fluctuatie van drinkwater door het verbruik van de afnemers. Op die manier zijn productie en transport op een min of meer constante capaciteit afgestemd. De benodigde inhoud van de reservoirs is globaal 25% van het dagverbruik, ofwel de productie van ongeveer 6 uur. Op de Nederlandse productielocaties is dan ook meestal een opslagcapaciteit van 1.500 tot 10.000 m³ drinkwater aanwezig. De reservoirs zijn uiteraard afgesloten om de drinkwaterkwaliteit te handhaven. Voor de ‘beademing’ van deze reservoirs worden veelal speciale luchtfilters toegepast. In figuur 44 zijn de reservoirs op de productielocatie Berenplaat van de drinkwatervoorziening van Rotterdam duidelijk waarneembaar. Zoals je ziet nemen ze veel plaats in.



Figuur 44: de ronde en vierkante reservoirs van de productielocatie Berenplaat (Zuid-Holland).

5.3 Distributienet

Vanuit de reservoirs wordt het drinkwater met hogedrukpompen in het distributienet gepompt. Figuur 45 geeft een impressie van een distributienet voor een waterleidingbedrijf in een landelijk gebied in



Figuur 45: een distributienet in een landelijk gebied.

Gelderland. Vanuit het pompstation lopen leidingen naar de verschillende dorpen en woonkernen, waarbij in iedere straat met één of meer woningen een waterleiding ligt.

In Nederland ligt ruim 100.000 km waterleiding. In het distributienet kunnen leidingdiameters voorkomen tot 180 cm (Rotterdam), maar het grootste deel heeft een diameter tussen 7,5 en 15 cm.

5.4 Drukverschillen

Om te zorgen dat het water uit de kraan stroomt en niet druppelt, heb je een zekere minimale waterdruk nodig. Het criterium in Nederland is een minimale druk van 20 m waterkolom, dit is 200 kPa, bij de huisaansluiting. In de

drinkwaterwereld wordt de druk niet in kPa uitgedrukt maar in meters hoogte van een waterkolom met dezelfde druk. Zo is de druk p van een waterkolom met hoogte h gelijk aan het product van de dichtheid van water, de zwaartekrachtsversnelling en h ; in formule samengevat, wordt dat :

$$p = \rho \cdot h \cdot g \quad (2)$$

3. Achtergrondinformatie: afleiding formule

$$p = \frac{F_g}{A} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$F_g = m \cdot g$$

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot h \cdot A$$

$$F_g = \rho \times h \times A \times g$$

$$p = \frac{\rho \cdot h \cdot A \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g$$

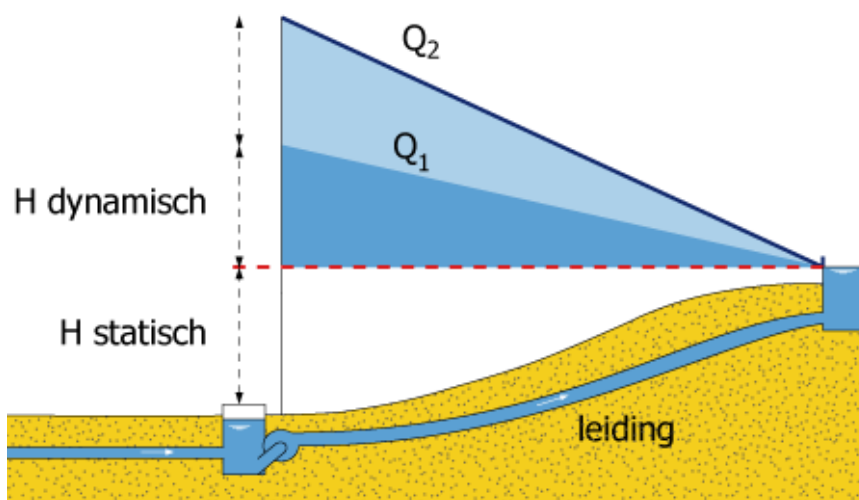
waarin:

- p = druk van de waterkolom in pascal (Pa)
- F_g = kracht uitgeoefend door het water in newton (N)
- A = wateroppervlak in vierkante meter (m²)
- m = massa van het water in kilogram (kg)
- V = volume van het water in kubieke meter (m³)
- ρ = dichtheid van water (998 kg/m³)
- g = zwaartekrachtsversnelling (9,81 m/s²)
- h = hoogte van de waterkolom in meter (m).

Door ingenieurs wordt de hoogte H als grootte gebruikt die informatie geeft over de druk van een waterkolom. Om van een kolom met hoogte H de druk in pascal ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$) uit te rekenen, kan men in de formule $p = \rho \cdot h \cdot g$ voor h de hoogte H invullen.

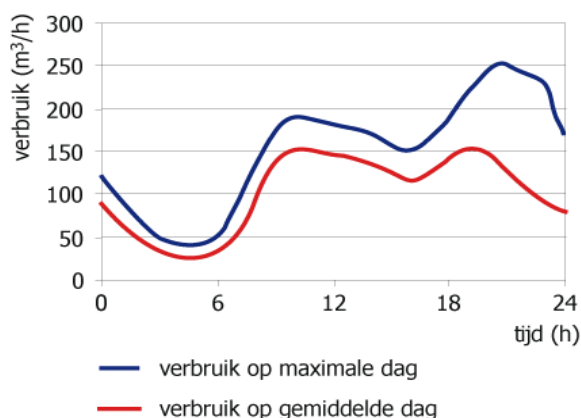
Bijvoorbeeld: onderaan een waterkolom van 3 meter hoogte heerst dus een druk van 3 m waterhoogte ofwel $\rho \cdot 3 \cdot g$ Pa; dat is circa $1000 \times 3 \times 10 = 30.000$ Pa en dat is 30 kPa.

De druk in de waterleidingen is niet overal dezelfde. Door wrijving van de waterstroming neemt de druk in de leiding af. Hoe langer de leiding, hoe groter het drukverschil tussen het begin en het einde van de leiding zal zijn. Ook zal de druk sneller afnemen in een leiding als die leiding een kleinere doorsnede heeft. Verder zal de druk sneller afnemen als het water sneller door die leiding stroomt. In figuur 46 is dit schematisch weergegeven. De pomp moet een druk genereren die overeenkomt met H_{statisch} om het hoogteverschil in de leiding te overwinnen. Als een hoeveelheid water per seconde Q_1 (**debiet**) door de leiding gepompt wordt, moet als gevolg van de wrijvingsweerstand de pomp boven H_{statisch} nog een extra druk leveren die overeenkomt met $H_{\text{dynamisch}}$. Als de vraag naar water toeneemt, dan moet er een groter debiet Q_2 door de leiding stromen, welke met een grotere wrijvingsweerstand gepaard gaat. De pomp moet nu een grotere druk leveren (**de 'opvoerhoogte'**) overeenkomend met een grotere $H_{\text{dynamisch}}$ om aan het eind van de leiding dezelfde afleverdruk te handhaven.



Figuur 46: opvoerhoogte en druklijn voor een transportleiding voor twee verschillende debieten.

Om een afleverdruk van 20 m waterkolom te kunnen handhaven, kan het zijn dat een productielocatie in landelijke gebieden met veraf gelegen afnemers op het maximale verbruiksmoment een druk van 60 m boven maaiveld moet leveren. Tijdens de nachtelijke uren zal hier met een druk van nauwelijks meer dan 25 m kunnen worden volstaan, omdat bij een



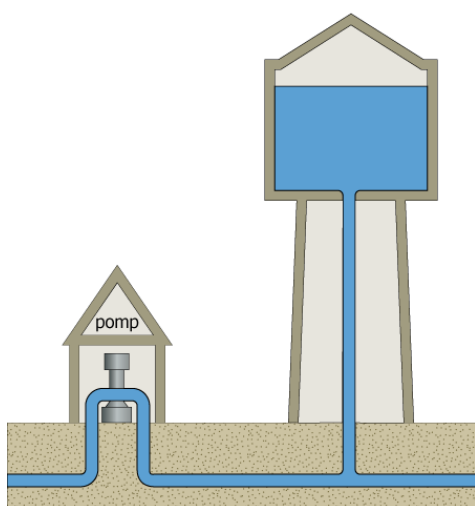
Figuur 47: verbruikpatroon over een gemiddelde dag en over een extreme dag.

zeer laag verbruik de stromingsweerstand in het distributienet zeer klein zal zijn (figuur 47).

Om de drukken in het distributiesysteem binnen zekere grenzen te houden, worden ook wel **'aanjagers'** toegepast. Dit zijn in de leiding geplaatste pompen die het water op een hogere druk brengen voor de levering naar een achterliggend gebied. Deze worden vooral toegepast bij transportleidingen met zeer kortdurende hoge piekbelastingen en bij transportleidingen met een hoog statisch niveauverschil.

Distributie van drinkwater speelt zich voornamelijk onzichtbaar ondergronds af. Bovengronds zijn alleen watertorens te zien (figuur 48 en 49). Watertorens werden vroeger gebruikt als 'schakelvat' voor de distributiepompen. Als het waterniveau in de toren zakt, wordt er een extra distributiepomp ingeschakeld. Bij een hoog waterniveau schakelt men een distributiepomp af. Watertorens zorgen zo voor een relatief gelijkmatige druk en enkele minuten nalevering bij stroomuitval bij de distributiepompen.

Watertorens zijn tegenwoordig niet meer noodzakelijk. Toerengeregelde pompen kunnen elke gewenste hoeveelheid traploos leveren. Noodstroomaggregaten leveren binnen 30 seconden stroom en waterslagketels bij de distributiepompen hebben voldoende inhoud om deze periode te overbruggen.



Figuur 48: principe van een watertoren ('schakelvat').



Figuur 49: watertoren Dokkum.

Vanaf de waterleiding in de straat is elke woning aangesloten via een huisaansluiting, ook wel **dienstleiding** genoemd. De huisaansluiting eindigt bij de watermeter, waarna de afnemer 'eigenaar' van het drinkwater

wordt. In Nederland zijn er ongeveer 6 miljoen aansluitingen op het drinkwaternet.

9. Vraag

- a. Transportsystemen en distributienetwerken bestaan niet alleen uit leidingen, maar ook nog uit andere objecten. Noem die objecten en leg hun functie duidelijk uit.
- b. Noem twee oorzaken waarom de druk in een waterleiding niet overal hetzelfde is.

In de tekst staat dat onderaan een waterkolom van 3 m hoogte een druk heerst van 30 kPa. Dit is een afgeronde waarde.

- c. Bereken de waarde in 2 decimalen nauwkeurig.
- d. Leg uit waarom watertorens tegenwoordig niet meer noodzakelijk zijn.
- e. Wat is het verschil tussen het distributienet in Zuid-Limburg en dat in Groningen?
- f. Leg uit hoe het komt dat ook in hoge flatgebouwen van 15 verdiepingen en meer nog stromend water uit de kraan komt.

6 Bekkens

Doelen

- Het noemen van verschillende soorten bekkens en hun functie.
- Het kunnen omschrijven van het begrip zelfreiniging.
- Het verschil kunnen uitleggen tussen propstrooming en volledige menging.
- Berekeningen kunnen uitvoeren met betrekking tot de zelfreiniging van bekkens.

6.1 Soorten bekkens

Het oppervlaktewater dat in Nederland gebruikt wordt voor de bereiding van drinkwater is voornamelijk afkomstig uit de rivieren Rijn en Maas. Het water van deze rivieren kenmerkt zich door grote kwaliteits- en kwantiteitsfluctuaties. Door deze variaties is het niet altijd mogelijk dat er water ingenomen wordt uit de rivier. Om toch drinkwater te kunnen leveren, dient er een voorraadbuffer aanwezig te zijn die gebruikt kan worden in tijden dat de inname gestaakt wordt (figuur 50).



Figuur 50: de drie bekkens in de Biesbosch voor de watervoorziening van zuidwest Nederland.

Aangezien de oppervlaktewaterzuiveringen in Nederland een grote capaciteit hebben, dient de voorraadbuffer ook groot te zijn. Daarom wordt bij de directe zuivering van oppervlaktewater gebruik gemaakt van grote bekkens. Een voorbeeld vormen de bekkens in de Biesbosch, die een inhoud hebben die toereikend is voor meerdere maanden. De drie reservoirs hebben een inhoud van 13 tot $40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Deze bekkens zorgen

niet alleen voor een watervoorraad, maar er vinden er ook allerlei processen in plaats, waardoor het water schoner wordt. Dit heet **natuurlijke zelfreiniging**. Vaak wordt er voor de grote bekkens een kleiner bekken geplaatst. Als blijkt dat het water in de rivier te sterk vervuild is, wordt het water uit dit kleine bekken niet ingelaten in het grote bekken. Figuur 51 geeft de drie te onderscheiden soorten bekkens weer.

Soort bekkens	Verblijftijd	Functionies
Analysebekken	ca. 1 week	Analyse van het ingenomen water, op grond waarvan besloten kan worden of de inname al dan niet gestopt moet worden
Proces- of mengbekken	ca. 3 – 5 weken	Kwaliteitsverbetering door dosering chemicaliën. Zelfreiniging van het water door afbraak, vervluchtiging, afsterving en sedimentatie.
Voorraadspaarbekken	ca. 1 – 3 maanden	Voorraad ten tijde van slechte waterkwaliteit (door een ramp of lage afvoer). Kwaliteitsafvlakking door opmenging. Zelfreiniging van het water door afbraak, vervluchtiging, afsterving en sedimentatie.

Figuur 51: soorten bekkens met hun specifieke functies.

6.2 Zelfreiniging

Water zal altijd verontreinigingen bevatten. Wordt water aan zichzelf overgelaten dan zal de kwaliteit van het water na verloop van tijd beter worden.

De Biesboschbekkens hebben een zelfreinigende werking. Het zwevende stofgehalte en de troebelheid nemen door bezinking af. Zware metaalionen zoals cadmium en nikkel worden verwijderd. Door de ontharding neemt de pH toe en neemt het Ca^{2+} , CO_2 en HCO_3^- gehalte af. Organische stoffen zullen worden afgebroken, de temperatuur van het water zal dalen door warmteafgifte aan de atmosfeer. Pathogene (= ziekteverwekkende) micro-organismen zullen afsterven en kunnen zich in het koude oppervlaktewater niet voortplanten. Al deze bovenstaande processen worden samengevat onder de noemer zelfreiniging. Zelfreiniging is een natuurlijk proces, waarop vele zuiveringsprocessen zijn gebaseerd. Omdat zelfreiniging een tijdsafhankelijk proces is, is het stromingspatroon in het oppervlaktewater van belang. Het stromingspatroon heeft namelijk invloed op de verblijftijd en verblijftijdspreiding.

6.3 Propstroming of volledige menging?

Door in een rivier of leiding de waterdeeltjes te volgen, is vast te stellen dat deze deeltjes bij turbulente stroming min of meer dezelfde verblijftijd hebben. Men spreekt van een propstroming (figuur 52). Het waterpakket beweegt zich als een prop door een smal en lang systeem, waarbij geen menging optreedt met andere waterpakketten. Dat betekent tevens dat de

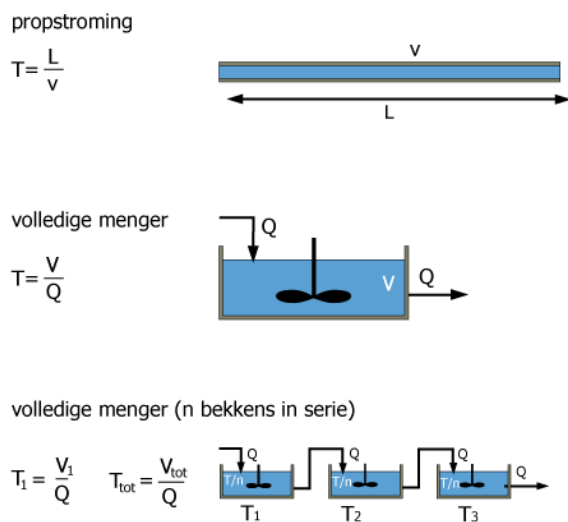


Figuur 52: propstroombekkens bij productiebedrijf Berenplaat (Zuid-Holland).

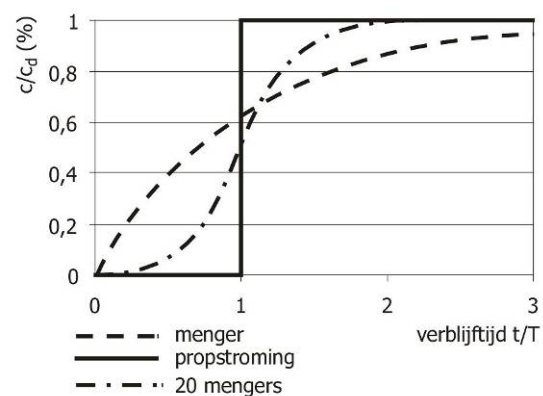
concentraties van stoffen in de waterpakketten in principe kan verschillen, bijvoorbeeld door biologische zelfreiniging.

Als in een meer de waterdeeltjes gevolgd worden, is te zien dat de verblijftijd van de verschillende deeltjes juist verschilt. Voor het ene deeltje is de verblijftijd langer, voor het andere deeltje korter. Er treedt een spreiding op in de verblijftijden van de verschillende deeltjes. De concentratie van stoffen is echter niet verschillend.

Wanneer aangenomen wordt dat het inkomende water zich direct volledig mengt met het al in het meer aanwezige water, dan spreekt men van **volledige of ideale menging**. Propstrooming en volledige menging zijn twee uitersten wat betreft verblijftijdspreiding en concentratieverschillen.



Figuur 53: verschillende stromingscondities.



Figuur 54: verblijftijdspreiding bij verschillende stromingscondities.

Toelichting bij figuur 53 en 54:

- T = totale verblijftijd in seconde(s) (bij propstroombekkens)
- T = gemiddelde verblijftijd in seconde (s) (bij mengbekkens)
- L = lengte in meter (m)
- v = stroomsnelheid in meter per seconde (m/s)
- V = volume in kubieke meter m^3)
- Q = debiet in kubieke meter per seconde (m^3/s)
- t = verblijftijd in seconde (s) (bij propstroombekkens: $0 < t < T$).

We kunnen de mate van verblijftijdspreiding bepalen met behulp van **tracerproeven**. Bij deze proeven wordt aan het water vanaf tijdstip $t = 0$ continu een stof gedoseerd (**de tracer**) die normaal gesproken in lage concentraties aanwezig is (figuur 54). Wanneer we te maken hebben met een propstrooming zal na de verblijftijd in het systeem een sprong in de concentratie optreden tot de concentratie die gedoseerd is (c_d). Bij een

volledige menging zal de concentratie rond de gemiddelde verblijftijd geleidelijk stijgen tot de eindconcentratie. Wanneer nu meerdere gemengde systemen achter elkaar geplaatst worden neemt de verblijftijdspreiding af en nadert het systeem een propstroming.

6.4 Afsterving van bacteriën

De verblijftijd speelt bij zelfreiniging van water een belangrijke rol. Het is voor de afsterving van bacteriën van belang te weten wat de verblijftijd in een systeem, rivier of meer, is. Bij een propstroming is de verblijftijd nauwkeurig bekend en kan het rendement gemakkelijk berekend worden. Bij een gemengd systeem is het mogelijk dat bacteriën het systeem direct verlaten of juist erg lang in het systeem aanwezig zijn.

Door het grote verschil in verblijftijd bij een menger zal het rendement voor afsterving in een mengbekken altijd lager zijn dan het rendement voor afsterving in een propstroombekken. Voor afvlakking van de concentratiepieken is een gemengd systeem echter effectiever dan een propstroming. Bij het ontwerp van een bekken moeten deze eigenschappen tegen elkaar worden afgewogen.

Hierna wordt weergegeven hoe het rendement van afbraak en afsterving in propstroombekkens, mengbekkens en mengbekkens in serie kan worden berekend.

Afbraak en afsterving bij propstroming

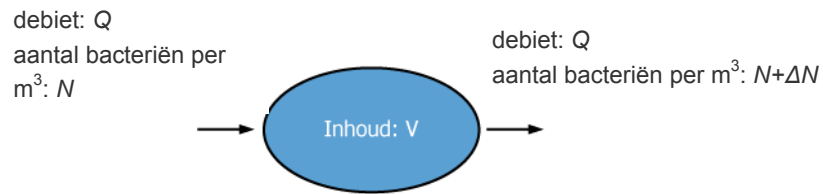
Uitgaande van het totaal aantal bacteriën dat een bekken per seconde binnenstroomt (de aanvoer) geldt dat de afvoer aan het eind van een propstroombekken kan worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$\text{aanvoer} + \text{aanvulling} = \text{afvoer} + \text{afbraak} + \text{berging} \quad (3)$$

Dit is een bijzonder geval van de algemene wet van behoud van massa (de massabalans). Er kan geen massa verloren gaan; in het geval van een bekken kan het totaal aantal bacteriën dat het bekken aan het eind uitstroomt alleen lager zijn dan het aantal dat er instroomt als er bacteriën afsterven ('afbraak') of in het bekken achterblijven ('berging'). Meestal wordt verondersteld dat het volume van een meer of rivier hetzelfde blijft. Hierdoor is de berging van water en daarmee van bacteriën nul. Ook de term 'aanvulling' is in het algemeen nul. Dit betreft bijvoorbeeld een zijtak aan het systeem waarmee ook bacteriën worden aangevoerd. De vergelijking wordt door deze aannames vereenvoudigd tot:

$$\text{aanvoer} = \text{afvoer} + \text{afbraak} \quad (4)$$

Hierbij is de term ‘afbraak’ zoals in het voorgaande al is uitgelegd afhankelijk van de verblijftijd.



Figuur 55: schematische weergave massabalans.

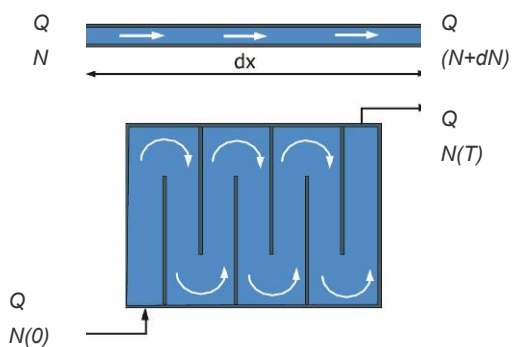
Uit figuur 55 blijkt dat aanvoer en afvoer afhankelijk zijn van het debiet Q en het aantal bacteriën N volgens:

$$\text{aanvoer} = Q_{in} \cdot N \quad (5a)$$

$$\text{afvoer} = Q_{uit} \cdot (N + \Delta N) \quad (5b)$$

waarin:

- $Q_{in}=Q_{uit}=Q$ = debiet in kubieke meter per seconde (m^3/s)
- N = aantal bacteriën per m^3 (aantal/ m^3)
- ΔN = toename van het aantal bacteriën/ m^3 (negatief getal door zelfreiniging)
- aanvoer, afvoer = aantal bacteriën per seconde (aantal/s).



Figuur 56: schematische voorstelling van een propstrooming.

Over een lengte-interval Δx neemt N met ΔN toe tot $N + \Delta N$. N is dus een functie van x : $N(x)$, en omdat de afgelegde weg x een functie van de tijd is, is N ook een functie van t : $N(t)$. Als we het interval zeer klein nemen, dat wil zeggen $\Delta x \rightarrow 0$, dan gebruiken we de notatie dx voor Δx en dN voor ΔN (figuur 56). Bij propstrooming wordt aangenomen dat over een lengte dx zowel het aantal bacteriën per m^3 N als de stroomsnelheid v over de gehele dwarsdoorsnede A gelijk zijn. Voor het totaal aantal bacteriën per seconde geldt nu:

$$\begin{aligned} \text{aanvoer} &= \text{afvoer} + \text{afbraak} \\ Q \cdot N &= Q \cdot (N + dN) + k_0 \cdot N \cdot A \cdot dx \end{aligned} \quad (6)$$

waarin:

- k_0 = afbraak- en afstervingscoëfficiënt per seconde (s^{-1})
- N = aantal bacteriën per kubieke meter (aantal/ m^3)

- A = doorstroomde oppervlak in vierkante meter (m^2)
- Q = debiet in kubieke meter per seconde (m^3/s)
- dx = lengte in meter (m).

Ga na dat de term $k_0 \cdot N \cdot A \cdot dx$ evenals de twee andere termen een aantal bacteriën per seconde voorstelt. Door de haakjes weg te werken, vereenvoudigen we de vergelijking tot:

$$Q dN = -k_0 \cdot N \cdot A \cdot dx \quad \text{delen door } dt \text{ en } Q \text{ levert:}$$

$$dN / dt = -k_0 \cdot N \cdot (A / Q) \cdot dx / dt \quad dx / dt = v, \text{ dus:}$$

$$= -k_0 \cdot N \cdot (A / Q) \cdot v \quad A \cdot v = Q \text{ zodat:}$$

$$dN / dt = -k_0 \cdot N$$

In woorden: de toename van het aantal bacteriën per m^3 is recht evenredig met het aantal per m^3 en de verblijftijd. Dit mag je ook schrijven als:

$N'(t) = -k_0 \cdot N(t)$ en dat heet wiskundig een **differentiaalvergelijking**, waarin N' de afgeleide is van N . Deze vergelijking kan door integreren worden opgelost, maar die techniek heb je bij wiskunde misschien nog niet gehad. De vergelijking $N'(t) = -k_0 \cdot N(t)$ heeft als oplossing een functie $N(t)$ waarvan de afgeleide $N'(t)$ gelijk is aan een constante maal zichzelf: $N'(t) = c \cdot N(t)$ (lineair verband).

De oplossing is de volgende exponentiële functie:

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-k_0 \cdot t} \quad \text{waarin } e \text{ het grondtal van de natuurlijke logaritme is (} e \approx 2,718\ldots \text{)}$$

Hoe je hieraan komt kun je - als je tijd hebt - aan je (wiskunde)docent vragen.

Verifieer door te differentiëren (met de kettingregel) dat dit inderdaad een oplossing is.

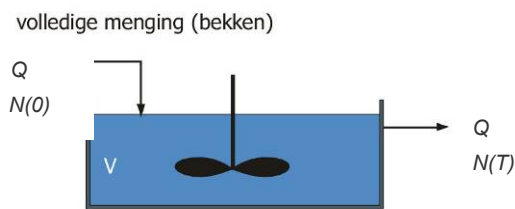
Aan het begin van de propstrooming geldt: $t = 0$, $N = N(0)$ en $x = 0$

Aan het eind van de propstrooming geldt: $t = T$, $N = N(T)$ en $x = L$ (T = verblijftijd, L = bekkenlengte)

De waarde van de afbraak- en afstervingscoëfficiënt k_0 is tussen $5,5 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} = 5\text{-}10 \text{ dag}^{-1}$.

Afbraak en afsterving bij volledige menging

Een volledige menger wordt voorgesteld als een tank met een volume V (m^3) die gevoed wordt door een debiet Q en een aantal bacteriën per m^3 $N(0)$ (figuur 57 en 58).



Figuur 57: schematische voorstelling van een volledig gemengd systeem.



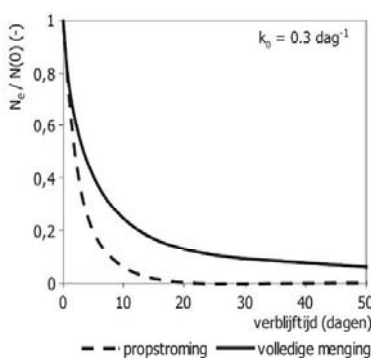
Figuur 58: mengbekken in de Biesbosch.

Uit het bekken verdwijnt een debiet Q met een aantal bacteriën per m^3 $N(T)$, waarin T de gemiddelde verblijftijd is. Omdat er geen berging plaats vindt, is het debiet dat het bekken inkomt gelijk aan het debiet dat het bekken verlaat. Voor het bekken kan nu de volgende massabalans opgesteld worden:

$$\begin{aligned} \text{aanvoer} &= \text{afvoer} + \text{afbraak} \\ Q \cdot N(0) &= Q \cdot N(T) + k_0 \cdot V \cdot N(T) \end{aligned} \quad (7)$$

Eerder hebben we gezien dat voor volledige menging geldt dat de gemiddelde verblijftijd T in een mengbekken voldoet aan $T = V / Q$. Combineren we deze formule met de massabalans dan krijgen we de formule:

$$\frac{N(T)}{N(0)} = \left(\frac{1}{1 + k_0 \cdot T} \right) \quad (8)$$



Figuur 59: afbraak en afsterving bij propstrooming en volledige menging bij dezelfde afbraakcoëfficiënt.

Wanneer de oplossingen van de afbraak bij propstrooming en volledige menging bij dezelfde afbraakcoëfficiënt k_0 als functie van de tijd uitgezet worden dan resulteert dit in figuur 59.

In eerste instantie lijkt het dat de oplossingen niet veel van elkaar verschillen. Als je echter naar $T = 20$ dagen kijkt dan blijkt voor de bacterieafbraak propstrooming veel gunstiger te zijn: $N(20 \text{ dagen}) / N(0)$ is voor propstrooming gelijk aan 0,0025 en voor volledige menging gelijk aan 0,14. Een verschil van een factor 58!

Afbraak en afsterving bij gemengde bekkens in serie

Met meerdere bekkens in serie wordt propstroming benaderd.

Bij de verblijftijdspreiding hebben we gezien dat deze kleiner wordt wanneer we meerdere bekkens achter elkaar plaatsen. Door meerdere bekkens achter elkaar te plaatsen hebben we een situatie die zich bevindt tussen volledige menging en de propstroming. Wanneer we een massabalans opstellen voor meerdere bekkens achter elkaar geschakeld, krijgen we de volgende formules:

$$\text{bekken 1: } N_1 \cdot Q = N_2 \cdot Q + k_0 \cdot V_1 \cdot N_2$$

Het uitgaande aantal bacteriën per m³ van bekken 1 is het ingaande aantal bacteriën per m³ van bekken 2

$$\text{bekken 2: } N_2 \cdot Q = N_3 \cdot Q + k_0 \cdot V_2 \cdot N_3$$

10. Opdracht

10.1 Bekkens

Gegeven: Het volume van twee bekkens is gelijk: $V_1 = V_2$. De totale verblijftijd verandert niet als het oorspronkelijke bekken vervangen wordt door twee bekkens met $V_1 + V_2 = V$.

- Geef de formule $N(T)/N(0)$ voor beide bekkens in serie geschakeld.
- Geef de algemene formule als n bekkens in serie zijn geschakeld.

10.2 Afvalwater

Een stad met 600.000 inwoners loost afvalwater op de rivier.

De stroming in de rivier komt overeen met een propstroming.

Het doorstroomde oppervlak van de rivier is 66,7 m² en het debiet is 26 m³/s.

Doorstroming	Afbraakcoëfficiënt k_0 (dag ⁻¹)
doorstroomd reservoir	0,3
langzaam stromende rivier ($v < 1$ m/s)	0,5
snelstromende rivier ($v > 1$ m/s)	0,8

Figuur 60: doorstroming rivier.

- a. Bereken het gemiddelde aantal E-coli's per m^3 in de rivier als per persoon per dag 10^{11} E-coli's worden geloosd, $N(0)$.
- b. Bepaal de waarde van k_0 die hoort bij deze rivier.
- c. Bereken hoe lang het duurt voordat het aantal bacteriën minder dan 10^7 per m^3 bedraagt.
- d. Bereken op welke afstand van het lozingspunt het aantal E-coli's minder dan 10^7 per m^3 bedraagt.

10.3 Drinkwaterbedrijf

Een drinkwaterbedrijf heeft een innamepunt direct benedenstrooms van het lozingspunt. Om voldoende afsterving van E-coli's te krijgen, zijn meerdere bekkens in serie geschakeld. De verblijftijd in één bekken bedraagt 45 dagen.

Bereken hoeveel bekkens nodig zijn als het aantal E-coli's niet meer dan 10^6 per m^3 mag zijn.

10.4 Zwembad

In een zwembad zijn per dag gemiddeld 200 zwemmers aanwezig. Per zwemmer worden er per dag $2 \cdot 10^9$ kiemen voor E-coli's in het water gebracht. Het aantal E-coli's in dit zwembad mag niet groter zijn dan $5 \cdot 10^8$.

Voor het zwembad kan een kiembalans worden opgesteld: aanvoer = afvoer + afbraak.

Bereken hoe groot het volume (m^3) van dit zwembad moet zijn.

7 Expertopdrachten

Nu valt er wat te kiezen. Jullie gaan in een groepje van 3-4 leerlingen een expertopdracht uitvoeren. Er zijn vier expertopdrachten. Hierin komen naast wiskundige, vooral ook scheikundige en natuurkundige aspecten aan de orde. Het zijn verdiepingsopdrachten waarin jullie één zuiveringstechniek gaan onderzoeken. Jullie zullen als een ingenieur gaan denken: onderzoek doen, er aan rekenen en dan de onderzoeksofstelling opschalen naar een installatie op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

De module wordt afgesloten met een presentatie (mondeling of schriftelijk) over de resultaten van onderzoek en opschaling. Vraag je docent aan welke eisen de presentatie moet voldoen en hoe je beoordeeld wordt. De bijlagen staan (ook) op ► vaklokaal NLT bij 'Presenteren algemeen' en 'Mondeling presenteren'. In sommige bijlagen zitten werkvellen; het is handig om die te gebruiken.

Keuze 1: expertopdracht Beluchting (zie bijlage 1)

Doel van de opdracht

- Het onderzoeken van de afhankelijkheid van de valhoogte van het water op het zuurstofgehalte en het rendement van de beluchting.
- Het opschalen van de onderzoeksofstelling naar een cascadebeluchting op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

Werkplan

Je stelt een werkplan op voor het experimentele deel van deze onderzoeksofsticht (1^e doel). Geef daarin antwoorden op de vragen:

- Wat is de onderzoeksvraag?
- Hoe willen jullie het onderzoek aanpakken? (werkwijze beschrijven, eventueel opstelling tekenen).
- Welke materialen en stoffen hebben jullie nodig?

Beschikbaar is in elk geval:

- water met een laag zuurstofgehalte
- een cascadeopstelling met 1 stap
- een zuurstofsensoren.

Laat je werkplan goedkeuren door je docent en voer het onderzoek uit.

Je houdt een onderzoek en formuleert een eindconclusie

Keuze 2: expertopdracht Filtratie (zie bijlage 2)

Doel van de opdracht

- Het onderzoeken van de eigenschappen van zandfilters. Hierbij komen aan de orde: de onderlinge afhankelijkheid van drukverloop, filterbedhoogte, bovenwaterstand en debiet en de gevolgen voor het filtratieproces.
- Het opschalen van de onderzoekopstelling naar een zandfilter op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

Onderzoeksvraag

Hoe verandert de druk op verschillende hoogtes binnen een snelfilterinstallatie bij verschillende hoogten van het debiet en bij toenemende vervuilingsgraad en wat zijn de gevolgen voor het filtratieproces?

Je houdt een onderzoek en formuleert een eindconclusie

Keuze 3: expertopdracht Opharding (zie bijlage 3)

Doel van de opdracht

- Het onderzoeken van de ideale contacttijd tussen het materiaal in een ophardingskolom en calciumvrij water. Deze contacttijd is onder andere afhankelijk van de bedhoogte van het kolommateriaal.
- Het opschalen van de onderzoekopstelling naar een ophardingsinstallatie op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

Hoofdvraag

Wat is de ideale bedhoogte en daarmee de ideale contacttijd van een ophardingskolom?

Formuleer een tweede onderzoeksvraag en leg die voor aan je docent.

Je houdt een onderzoek en formuleert een eindconclusie.

Keuze 4: expertopdracht Distributie (zie bijlage 4)

Doel van de opdracht

- Onderzoeken hoe je hydraulische verliezen kunt bepalen in een aantal configuraties van transportleidingen en van distributienetten.
- Het opschalen van de onderzoekopstelling naar een transportsysteem en/ of distributienet op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

Werkplan

Stel een werkplan op voor het experimentele deel van deze onderzoeksopdracht.

Geef daarin antwoorden op de vragen:

- Wat is de onderzoeksvraag?
- Hoe willen jullie het onderzoek aanpakken? (werkwijze beschrijven, eventueel opstelling tekenen).
- Hoe gaan jullie de wrijvingsfactor λ bepalen voor verschillende situaties?
- Heb je in een bepaalde situatie alleen met wrijvingsverliezen of ook met vertragsingsverliezen te maken?
- Hoe kun je beide verliezen in een configuratie bepalen?

Laat dit werkplan door de docent goedkeuren voordat je met het onderzoek begint en voer daarna het onderzoek uit.

Je houdt een onderzoek en formuleert een eindconclusie.

Bijlage 1 Expertopdracht Beluchting

Doel van de opdracht

- Het onderzoeken van de afhankelijkheid van de valhoogte van het water op het zuurstofgehalte en het rendement van de beluchting.
- Het opschalen van de onderzoeksofstelling naar een cascadebeluchting op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

In paragraaf 4.1 is beluchting en ontgassing besproken.

B1.1 Theorie

Gassen zijn in meer of mindere mate in water oplosbaar. De hoeveelheid gas in water is in evenwicht met de hoeveelheid gas in de lucht. Dit is een verdelingsevenwicht:

Gas (lucht) $\rightleftharpoons$ Gas (water) met als evenwichtsconstante (verdelingsconstante):

$$K = \frac{[\text{gas}]_{(\text{water})}}{[\text{gas}]_{(\text{lucht})}} \quad (9a)$$

Deze formule kun je ook weergeven als:

$$K = \frac{c_{\text{gas(water)}}}{c_{\text{gas(lucht)}}} \quad (9b)$$

Hierbij is c de verzadigingsconcentratie van zuurstof in mg/L.

Deze relatie, waarbij het quotiënt van de concentratie van een gas in de waterfase en in de luchtfase constant is, staat bekend als de **wet van Henry**.

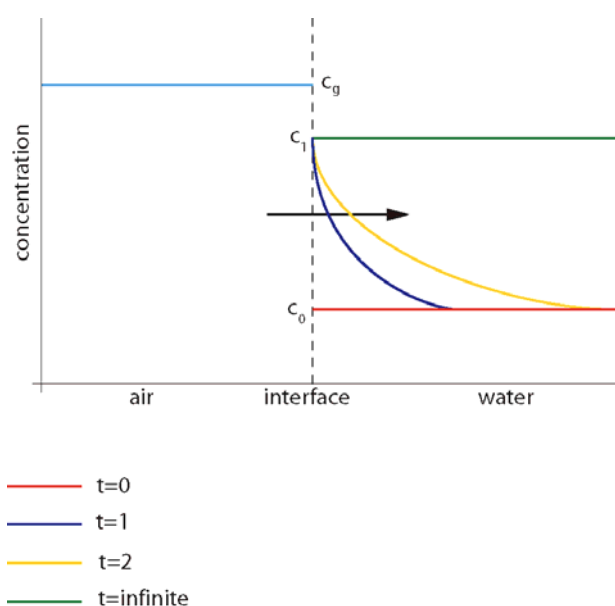
11. Vraag

- a. Zoek in Binas tabel 44 de oplosbaarheid op van de gassen zuurstof, koolstofdioxide en waterstofsulfide bij 298 K.
- b. Gebruik figuur 29 uit paragraaf 4.1 om een schatting te maken van de maximale zuurstofconcentratie in water na beluchting bij 298 K en reken deze om naar mol.L⁻¹. (m.a.w. welke zuurstofconcentratie kan dan bij de drinkwaterbereiding worden bereikt?)
- c. Verklaar het verschil voor zuurstof tussen het antwoord bij a en bij b.

- d. Bereken de evenwichtsconstante voor het evenwicht tussen zuurstof in water en lucht bij 298 K. Ga ervan uit dat de lucht 21 vol.% zuurstof bevat.

In de praktijk is er niet altijd evenwicht tussen het gas in de waterfase en de luchtfase. Een extreem voorbeeld is grondwater. Dat heeft een (veel) lagere concentratie zuurstof dan de verzadigingsconcentratie, simpelweg omdat er geen contact is met de lucht.

Er zal dus intensief contact moeten worden gemaakt tussen de luchtfase en de waterfase om de concentratie zuurstof in het water te verhogen. In figuur 61 wordt dit principe duidelijk gemaakt.



Verklaring symbolen

$c_{(g)}$ = concentratie zuurstof in de lucht
 c_0 = beginconcentratie zuurstof in water
 c_1 = verzadigingsconcentratie zuurstof in water bij de heersende temperatuur.

Opmerking

Pas na lange tijd (hier: $t = \text{infinite}$) zal de maximale zuurstofconcentratie in water, de verzadigingsconcentratie, worden bereikt

Figuur 61: het principe van de beluchting als gevolg van het verschil in zuurstofconcentratie tussen lucht en water.

We zien dus dat op het grensvlak van water- en luchtfase de verzadigingsconcentratie meteen wordt bereikt. Echter, verder in de waterfase is dat nog lang niet het geval. Er is dan ook sprake van een concentratieverschil tussen het grensvlak en de verder gelegen delen van de waterfase. Hoe groter het verschil in concentratie, des te groter de drijvende kracht om dit verschil op te heffen.

De zuurstofoverdracht van de luchtfase naar de waterfase vindt plaats met een bepaalde snelheid. Deze snelheid is niets anders dan de verandering van de zuurstofconcentratie per tijdseenheid. Deze snelheid hangt af van het verschil tussen de zuurstofconcentratie in het grensvlak (verzadigingsconcentratie) en de zuurstofconcentratie in de verder gelegen delen van de waterfase. Deze snelheid kan worden weergegeven als:

$$\frac{dc_t}{dt} = k(c_e - c_t) \quad (10)$$

waarin:

- c_e = de zuurstofconcentratie in de evenwichtssituatie in gram per kubieke meter (g/m^3)
- (PS: de verzadigingsconcentratie is afhankelijk van de temperatuur van het water)
- c_t = de zuurstofconcentratie op tijdstip t in gram per kubieke meter (g/m^3)
- k = gasoverdrachtscoëfficiënt.

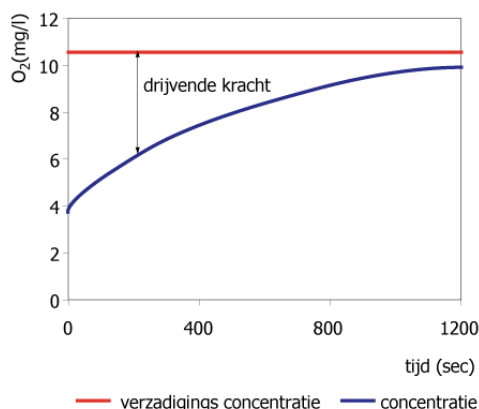
Een wiskundige bewerking van deze formule levert:

$$\frac{c_e - c_t}{c_e - c_0} = e^{-kt} \quad (11)$$

waarin:

- c_e = de zuurstofconcentratie in de evenwichtssituatie in gram per kubieke meter (g/m^3)
- (PS: de verzadigingsconcentratie is afhankelijk van de temperatuur van het water)
- c_t = de zuurstofconcentratie op tijdstip t in gram per kubieke meter (g/m^3)
- k = gasoverdrachtscoëfficiënt
- c_0 = de beginconcentratie zuurstof in het water, de zuurstofconcentratie op het tijdstip $t = 0$ in gram per kubieke meter (g/m^3).

In figuur 62 wordt het verloop van de zuurstofconcentratie met de tijd in een beluchtingapparaat (bijvoorbeeld door een cascadebeluchting) weergegeven.



Figuur 62: verloop van het zuurstofgehalte in een beluchtingsapparaat.

We zien in deze figuur dat in het begin de zuurstofconcentratie snel toeneemt. Er is dan ook sprake van een grote drijvende kracht. Maar, als we de verzadigingsconcentratie naderen, neemt de zuurstofconcentratie minder snel toe. De drijvende kracht is minder geworden. Deze figuur geldt alleen wanneer we grondwater in een waterbassin zeer intensief met lucht mengen en dat net zo lang doen totdat we inderdaad de verzadigingsconcentratie hebben bereikt. In de praktijk gaat het echter niet op deze manier.

12. Vraag

Leg uit waarom men in de praktijk niet op de hierboven beschreven manier werkt.

Als we water beluchten dan zal de concentratie zuurstof gaan toenemen. De mate waarin dat gebeurt, drukken we uit in het rendement van de beluchting. Zoals je uit de natuurkunde weet, is het energierendement je nuttig (werkelijk) gebruikte energie gedeeld door de beschikbare (toegevoerde) energie. Zo is het ook met beluchting. Hier is het rendement gelijk aan de bereikte afname van de drijvende kracht, gedeeld door de theoretisch mogelijk afname van de drijvende kracht. Het totale rendement van een cascadebeluchting wordt dan:

$$R = \frac{c_{uit} - c_{in}}{c_e - c_{in}} \quad (12)$$

waarin:

- R = het totale rendement van de cascadebeluchting
- c_{uit} = de zuurstofconcentratie van het water dat de cascade verlaat in gram per kubieke meter (g/m^3)
- c_{in} = de zuurstofconcentratie van het water dat de cascade ingaat in gram per kubieke meter (g/m^3) (bijvoorbeeld de zuurstofconcentratie van het ingaande grondwater)
- c_e = de zuurstofconcentratie in de evenwichtssituatie in gram per kubieke meter (g/m^3)
- (verzadigingsconcentratie bij de gemeten temperatuur van het water).

Dus:

$c_{uit} - c_{in}$ = hoeveelheid zuurstof die werkelijk is toegevoegd.

$c_e - c_{in}$ = hoeveelheid zuurstof die maximaal toegevoegd had kunnen worden.

Als we meerdere stappen hebben om te beluchten, zoals bij een cascadebeluchting het geval is, dan zal bij iedere stap het rendement even groot zijn.

Hebben we n stappen dan wordt het totale rendement van alle cascade stappen samen:

$$R = 1 - (1 - r)^n \quad (13)$$

waarin:

- R = het totale rendement van de cascadebeluchting
- r = rendement van 1 stap
- n = aantal stappen.

13. Vraag

Bereken hoeveel stappen je nodig hebt om grondwater te beluchten van 1 mg/L naar 8 mg/L wanneer het rendement van één cascdestap (r) gelijk is aan 0,4 en $C_e = 10$ mg/L.

Bereken hetzelfde voor $r = 0,2$ en $r = 0,6$.

Het rendement kan worden verbeterd door de overdracht van zuurstof van de lucht naar het water te verbeteren. Dat is belangrijk, want door een hoger rendement kun je de beluchting misschien met minder stappen uitvoeren. En, minder stappen betekent minder geld!

Welke factoren beïnvloeden nu eigenlijk de overdracht van zuurstof van lucht naar water? Deze wordt beïnvloedt door:

- het contactoppervlak tussen de luchtbell en het water
- de mate waarin dit oppervlak wordt ververs.

14. Vraag

Beschrijf hoe de twee genoemde factoren de overdracht van zuurstof van lucht naar water beïnvloeden.

In een cascadebeluchting kunnen we de genoemde factoren beïnvloeden door:

- de valhoogte (h) van het water uit de opvangbak
- de breedte van de uitstroomopening
- de hoek waaronder het water de opvangbak uitstroomt.

In het experiment ga je onderzoek doen aan één stap van een cascadebeluchting.

Je gaat het verband bepalen tussen het rendement (r) en de valhoogte. In het experiment houden we de hoek waaronder het water uitstroomt constant (30°).

B1.2 Onderzoek

Werkplan

Stel een werkplan op voor het experimentele deel van deze onderzoeksopdracht (1^e doel). Geef daarin antwoorden op de volgende vragen:

- Wat is de onderzoeksvraag?
- Hoe willen jullie het onderzoek aanpakken? (werkwijze beschrijven, eventueel opstelling tekenen).
- Welke materialen en stoffen hebben jullie nodig?

Beschikbaar is in elk geval:

- water met een laag zuurstofgehalte
- een cascadeopstelling met 1 stap
- een zuurstofsensor.

Laat je werkplan goedkeuren door je docent en voer het onderzoek uit.

Verwerking onderzoeksresultaten

- Bepaal de verzadigingsconcentratie van zuurstof in water bij de temperatuur tijdens het experiment.
- Maak een diagram waarin de valhoogte (h) uitgezet is tegen de bereikte zuurstofconcentratie van het water. Bespreek het gevonden verband.
- Bepaal het rendement (r) van één cascdestap.
- Maak een diagram waarin het rendement uitgezet is tegen de valhoogte.
- Bepaal de optimale valhoogte uit het diagram. Deze optimale valhoogte is geen absolute waarde, maar zul je uit het verloop en de vorm van het diagram moeten schatten (stel jezelf de vraag of meer valhoogte genoeg extra rendement oplevert).

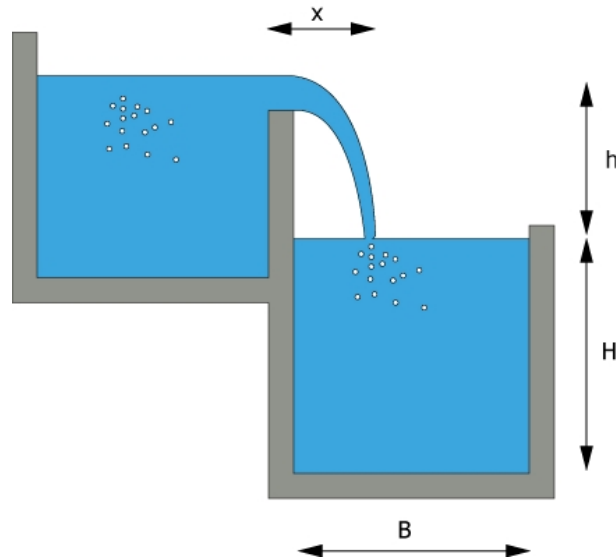
Conclusie

Formuleer je eindconclusie van het onderzoek.

B1.3 Opschalingsopdracht

Theorie

Voor de opschaling van een cascadebeluchting naar een installatie op werkelijke schaal zijn naast het rendement ook andere parameters van belang. In figuur 63 is één cascdestap getekend met daarin de voor de opschaling belangrijke parameters.



Figuur 63: plaatje van één cascdestap met de belangrijke parameters H , h en x .

We gebruiken de relaties:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 + V_0 t \sin \alpha \quad (14a)$$

en

$$x = tV_0 \cos \alpha \quad (14b)$$

waarin:

- h = de hoogte van de uitstroomopening van de bovenste bak tot de wateroppervlakte van de onderste bak in meter (m). Deze kan gemeten en gevarieerd worden.
- t = is de tijd die het water erover doet om deze hoogte te overbruggen in seconde (s). Dus dit is de contacttijd met de lucht. Hier vindt de uitwisseling plaats. Ook vindt er uitwisseling plaatst door turbulentie van het water in de onderste bak.
- V_0 = de snelheid van het water in de uitstroomopening in meter per seconde (m/s). Deze kan berekend worden door het debiet (Q) te delen de hoogte van het water in de uitstroomopening (d) vermenigvuldigd met de breedte van de uitstroomopening (L). Deze zijn allemaal te meten. Er geldt:

$$V_0 = \frac{Q}{Ld} \quad (15)$$

- x = de horizontale afstand van de uitstroomopening tot waar de waterstraal het wateroppervlak van de bak eronder raakt in meter (m). Deze kan ook worden opgemeten.
- De hoek α is de hoek waaronder het water de bovenste opvangbak verlaat (deze wordt ingesteld op 30°).

Met behulp van jouw uitkomsten uit het gedane onderzoek, ga je een eerste opzet voor een cascadebeluchting op grotere schaal maken. Je gaat daarvoor de belangrijkste dimensies (afmetingen) van deze cascadebeluchting bepalen.

Eisen

De eisen waar de installatie aan moet voldoen zijn:

- hoeveelheid grondwater dat belucht wordt is $500 \text{ m}^3/\text{u}$
- er mag alleen uitgegaan worden van cascadebeluchting
- de uitgaande zuurstofconcentratie bedraagt minimaal 8 mg/L .

Uitgangspunten

Om te kunnen opschalen, moet je natuurlijk een aantal uitgangspunten kennen.

Je moet uitgaan van de volgende omstandigheden:

- zuurstofgehalte van het grondwater: $0,4 \text{ mg/l}$
- temperatuur van het grondwater: 10°C .

De volgende dimensies zijn voor het opschalen van een cascadebeluchting het meest van belang:

- de breedte van de opvangbak (B)
- de hoogte van de opvangbak (H)
- de totale breedte van alle uitstroomopeningen (L) samen
- de totale hoogte van de cascade.

Daarnaast is het belangrijk te weten hoeveel stappen (n) er in de cascade zitten. Op basis van deze dimensies en het aantal stappen in de cascade kun je een technische tekening maken.

De theorie die hierboven al is gepresenteerd, heb je uiteraard nodig voor de opschaling.

Verder maken ingenieurs vaak gebruik van zogeheten vuistregels. Dat zijn door ervaring verkregen regels die een min of meer optimaal resultaat opleveren en die je daarom altijd hanteert. Voorbeelden van vuistregels staan hieronder voor de hoogte en breedte van de opvangbak.

Voor een optimale hoogte van de opvangbak geldt:

$$\text{Hoogte opvangbak} = \frac{2}{3}h$$

Hierin is h de hoogte van de uitstroomopening van de bovenste bak tot de wateroppervlakte van de onderste bak in meter (m). Deze heb je gemeten en moest in je experiment gevarieerd worden.

Voor een optimale breedte van de opvangbak geldt:

$$\text{Breedte opvangbak} = 2x$$

Hierin is x is de horizontale afstand van de uitstroomopening tot waar de waterstraal het wateroppervlak van de bak eronder raakt in meter (m). Deze x kan worden berekend door eerst V_0 te berekenen en deze in te vullen in relatie (14a). Uit relatie (14a) volgt t . Vervolgens kun je relatie (14b) gebruiken om x te berekenen.

B1.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling

Maak van de cascadebeluchting op grote schaal een technische tekening waarin alle relevante dimensies, eisen en uitgangspunten staan vermeld. Let er bij de verdere uitwerking op welke parameters al vast staan (door experimentele bepaling, door berekening of omdat het een eis of uitgangspunt is) en welke je met bovenstaande formules gaat berekenen. Leg tot slot uit wat jullie verwachten van de kwaliteit van deze door jullie bedachte installatie. Besteed daarbij vooral aandacht aan de factoren die jullie onderzoeksresultaten nadelig beïnvloeden kunnen hebben en de gevolgen daarvan voor de installatie op grote schaal.

B1.5 Presentatie

Presenteer het onderzoek en de opschaling in de vorm die de docent aangeeft.

Vraag hem of haar naar de beoordelingscriteria.

Bijlage 2 Expertopdracht Filtratie

Doel van de opdracht

- Het onderzoeken van de eigenschappen van zandfilters. Hierbij komen aan de orde de onderlinge afhankelijkheid van drukverloop, filterbedhoogte, bovenwaterstand en debiet en de gevolgen voor het filtratieproces.
- Het opschalen van de onderzoekopstelling naar een zandfilter op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

In paragraaf 4.2 zijn drie soorten uitvoeringsvormen van filtratie besproken: snelfiltratie, langzame zandfiltratie en membraanfiltratie.

B2.1 Theorie

Fysische aspecten van zandfilters

Op grond van alleen de mechanische zeefwerking verwijdt een filterbed van zand alleen de zwevende deeltjes die groter zijn dan de poriën tussen de zandkorrels. De zuiverende zeefwerking is hierdoor beperkt tot het oppervlak van het filterbed en is onafhankelijk van de snelheid waarmee het water binnendringt. De ‘zeef’ is niet in staat om fijn verdeelde zwevende colloïdale deeltjes (1 nm - 1 μ m) of bacteriën tegen te houden.



Figuur 64: snelfilterinstallatie.

Behalve de zeefwerking treden meer effecten op. Door bezinking kan het fijn verdeelde materiaal zich op het oppervlak van de korrels afzetten. Per m^2 filter is dit effect vele malen groter dan in een bezinkbassin doordat het oppervlak waarop het bezonken materiaal zich kan afzetten zoveel groter is. Dit oppervlak is immers het totale oppervlak van de bovenzijden van alle korrels voor zover dit niet door andere korrels wordt

bedekt. Afhankelijk van beddikte of korrelgrootte varieert dit oppervlak per m² filterbed tussen ongeveer 100 en 1000 m².

Het neerslaan van zwevende deeltjes op het korreloppervlak gebeurt niet alleen door de zwaartekracht. Door stromingseffecten komen de deeltjes ook dicht in de buurt van de zij- en onderkant van de korrels. Eenmaal in de onmiddellijke omgeving van de korrelwand kunnen ze zich daaraan hechten onder invloed van aantrekkingskrachten tussen de moleculen (elektrische kracht bij geladen deeltjes en vanderwaalskracht bij ongeladen deeltjes).

De aantrekkingskracht tussen massa's werkt steeds en overal, maar elektrische attractie is alleen mogelijk wanneer het zwevende deeltje en de zandkorrel tegengestelde elektrische ladingen bezitten. Van nature is zand negatief geladen, waardoor het in staat is om positief geladen ionen zoals Fe²⁺, Fe³⁺ en Mn²⁺ aan te trekken.

Op sommige plaatsen van het korreloppervlak kunnen zich zoveel van deze positieve ionen ophopen, dat een deel van het korreloppervlak juist positief wordt, waarna in tweede instantie negatief geladen deeltjes, zoals colloïdale organische deeltjes, en dergelijke uit het langsstromende water kunnen worden verwijderd. Dit spel kan zich enkele malen herhalen, waarbij de totale lading elke keer minder wordt. Hierdoor neemt de zuiverende werking van het filter voortdurend af. Na verloop van tijd verlaat het water onvoldoende gezuiverd het filterbed. Het filter moet nu worden schoongemaakt om zijn reinigend vermogen weer te herkrijgen.

Door bovengenoemde aanhechting van colloïdale, moleculaire en geïoniseerde opgeloste deeltjes neemt de concentratie aan het korreloppervlak toe waardoor allerlei (bio)chemische processen versneld worden. Zo kunnen bijvoorbeeld door oxidatie onder invloed van micro-organismen ammonium (NH₄⁺) en organische stoffen biologisch worden omgezet.

Bedrijfsvoering van een snelfilterinstallatie

Tijdens het filtratieproces neemt de vervuiling van een filter door de afgezette verontreinigingen steeds verder toe waardoor ook de filterbedweerstand verder toeneemt. Daardoor zal het debiet steeds verder afnemen, tot op zeker moment de filtercapaciteit onaanvaardbaar laag is geworden en het filter moet worden schoongespoeld. Na het schoonspoelen begint weer een nieuwe cyclus van filtratie en regeneratie van het filter..

Om deze bedrijfsvoeringscyclus mogelijk te maken, zijn de verschillende toe- en afvoerleidingen van een filter voorzien van afsluiters (kranen) waarmee de ruwwatertoevoer, de reinwaterafvoer en de toe- en afvoer

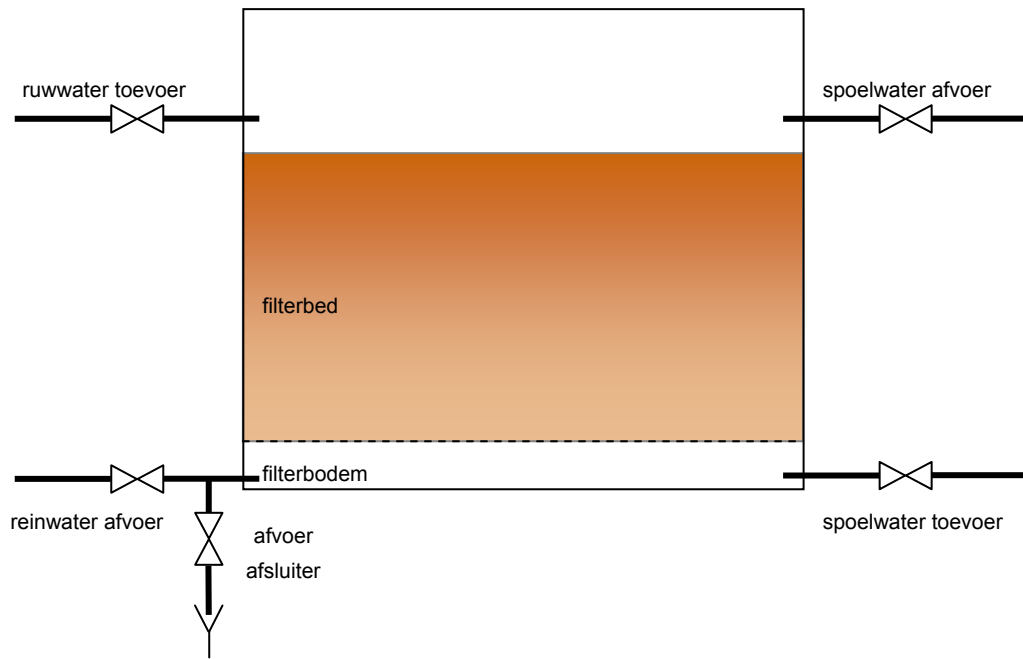
van spoelwater worden geregeld (figuur 65). Tijdens het filtratieproces zijn de spoelwaterafsluiters gesloten en tijdens het spoelen zijn juist de ruw- en reinwaterafsluiters dicht.

Gedurende het filtratieproces wordt het ruwwater via een afsluiter bovenlangs toegevoerd, zakt het door het filterbed en de filterbodem omlaag om als gezuiverd water onderlangs via een afsluiter het filter weer te verlaten.

Als het filter te ernstig vervuild is, wordt het voor schoonmaak buiten dienst gesteld, en worden beide genoemde afsluiters gesloten. Door de spoelwaterafsluiter te openen, wordt onderin spoelwater aangevoerd dat met grote snelheid door het filterbed omhoog stroomt waardoor het filterbed expandeert en de afgezette verontreinigingen worden losgemaakt.

Het spoelwater wordt via een tweede spoelwaterafsluiter bovenin tot buiten het filter afgevoerd. Na enige minuten spoelen, waarbij 4 tot 5 maal de filterinhoud aan spoelwater passeert, wordt het filter weer in dienst gesteld door de spoelwaterafsluiters te sluiten en de ruw- en reinwaterafsluiters weer te openen. Om waterslag te voorkomen wordt hierbij slechts één afsluiter tegelijk bediend, uiteraard in de gewenste volgorde. Waterslag is het verschijnsel dat het stromende water in een waterleiding plotseling wordt gestopt door het sluiten van een kraan of afsluiter. De energie van het stromende water wordt daarbij omgezet in een drukgolf die door de leiding gaat lopen, die in sommige gevallen tot schade aan de leiding kan leiden.

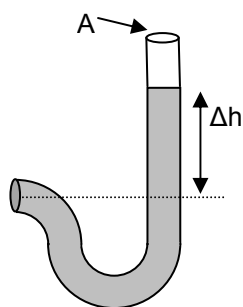
Als de kwaliteit van het gefiltreerde water gedurende de eerste tijd te wensen overlaat, blijft de reinwaterafsluiter voorlopig gesloten en wordt het filtraat via een extra afsluiter direct naar het riool afgevoerd. Soms is de reinwaterafvoerleiding voorzien van een regelbare afsluiter, welke zich slechts langzaam opent en gedurende het eerste uur de filtratiesnelheid tot een lagere waarde beperkt.



Figuur 65: schema van een snelfilterinstallatie met toe- en afvoerleidingen.

Drukmeting

Bij het hierna uit te voeren filterexperiment vindt drukmeting op verschillende hoogtes in de filterbedkolom plaats via het principe van de watermanometer (figuur 66). In de berekeningen wordt de atmosferische druk buiten beschouwing gelaten, omdat die aan beide zijden gelijke invloed heeft. Ter hoogte van de stippellijn heerst links en rechts dezelfde druk. Links heerst de druk van het meetpunt in het filterbed en rechts de druk van de vloeistofkolom boven de stippellijn. Deze druk wordt veroorzaakt door de kracht van de vloeistof op het oppervlak, in dit geval dus de doorsnede van de slang:



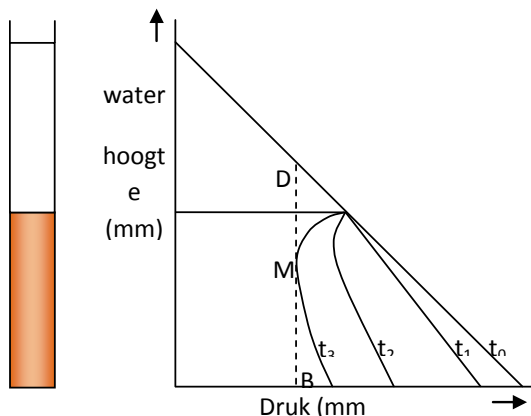
Figuur 66: watermanometer.

$$\Delta p = \frac{F_g}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot \Delta h}{A}$$

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad \text{met } \rho_{\text{water}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{dus } \Delta p = 9810 \cdot \Delta h \quad (\text{h in m})$$

Zoals je ziet speelt de oppervlakte A geen rol bij de watermanometer. Als h in meters wordt uitgedrukt krijg je voor de druk een waarde in Pascal ofwel Pa ($=\text{N}/\text{m}^2$). Bij het ontwerp van zuiveringsinstallaties wordt de druk echter meestal in meters waterkolom uitgedrukt (zie 5.4)

De filtratiesnelheid (in m/u) wordt gedefinieerd als het waterdebiet (in m^3/u) per m^2 filteroppervlak. De werkelijke watersnelheid in het filterbed is uiteraard hoger.



Figuur 67: -Lindquistdiagram.

Filterbedweerstand en drukverloop

Een belangrijk hulpmiddel voor het ontwerp van een zandfilter is het zogenaamde Lindquistdiagram. Het drukverloop over het filter wordt hierbij in kaart gebracht tegen de hoogte in het filterbed. De hydrostatische druk (zonder stroming) verloopt volgens een rechte lijn (figuur 67, tijdstip t_0 , hydrostatische druklijn). Door de filterbedweerstand is de hydrodynamische druk, dat wil zeggen de druk bij stromend water, kleiner. Met schoon zand is het drukverloop nog wel lineair (zie figuur 67, tijdstip t_1 ,

hydrodynamische druklijn).

Doordat het filter na verloop van tijd vervuilt, verandert de filterbedweerstand en verschuift de hydrodynamische druklijn verder naar links. Doordat de vervuiling vooral boven in het filter plaatsvindt, wordt het drukverloop niet-lineair (figuur 4, t_2).

Door toenemende vervuiling en daarmee grotere hydraulische weerstand krijgt de grafiek een steeds grotere kromming naar links. Het drukverlies op een bepaalde hoogte in het filterbed kan worden afgelezen als de horizontale afstand tussen de dynamische druklijn t_3 en de statische druklijn t_0 . Het punt M dat op druklijn t_3 het meest links is gelegen, is een belangrijk punt bij het ontwerp. In dat punt is door vervuiling de dynamische druk het laagst. Zou M te ver naar links verschuiven (tegen de y -as) dan zou op die hoogte het drukverlies even groot zijn als de druktoename door de waterhoogte: de druk is dan ter plaatse gedaald tot nul.

De gestippelde verticale raaklijn aan M (het punt van minimale hydrodynamische druk) snijdt de hydrostatische druklijn in punt D . Dit punt markeert de minimale waterhoogte boven het filterbed waarmee het filter bij deze vervuilingsgraad nog net functioneert. In die situatie is er ondanks het hoogteverschil tussen D en M geen drukverschil. Dat betekent dat de resultante van de krachten die op dit stuk van de waterkolom werken nul is: het water beweegt dan niet meer ($F_r = p_D A - p_M A = 0$). In feite vormt zich een evenwicht doordat door de afnemende stromingssnelheid ook het dynamische drukverlies weer afneemt.

15. Opdracht

15.1 Vlokmiddel

Waarom wordt voorafgaand aan de filtratie van oppervlaktewater een vlokmiddel, bijvoorbeeld een FeCl_3 -oplossing, toegevoegd?

Geef de vergelijkingen van de reacties die hierbij plaatsvinden.

15.2 Hydrostatische druk

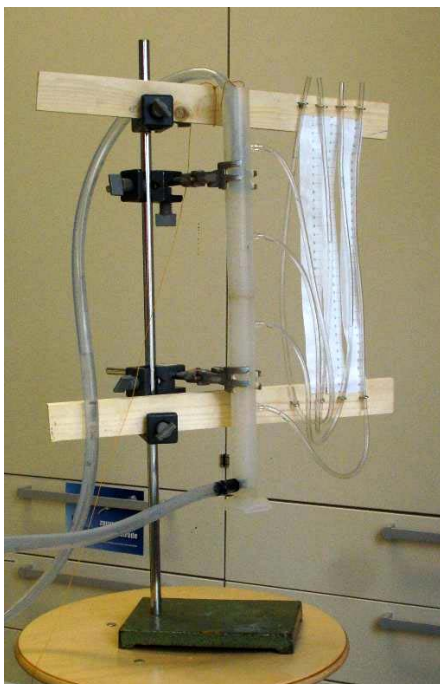
- Bereken de hydrostatische druk op de bodem van een 0,5 meter diep filter.
- In plaats van Pascal wordt meestal de eenheid meter gebruikt. Leg dit uit.
- Teken het verloop van de hydrostatische druk in een zandfilter, van boven naar beneden.
- Schets in de grafiek het drukverloop behorend bij de maximale vervuiling als de waterhoogte boven het filterbed 50% van de filterbedhoogte is.

15.3 Automatische besturing

Ontwerp een automatische besturing ('systeembord') voor de bedrijfsvoering van een snelfilter. Gebruik sensoren voor het gemeten debiet en de effluentkwaliteit en relais om de afsluiters te bedienen.

15.4 Filtratie- en watersnelheid

- De filtratiesnelheid (in m/u) wordt gedefinieerd als het waterdebiet (in m^3/u) per m^2 filteroppervlak. Leg uit waarom de werkelijke watersnelheid in het filterbed hoger is.
- Geef een schatting van de verhouding tussen beide snelheden.



Figuur 68: deel van een proefopstelling.

B2.2 Onderzoek

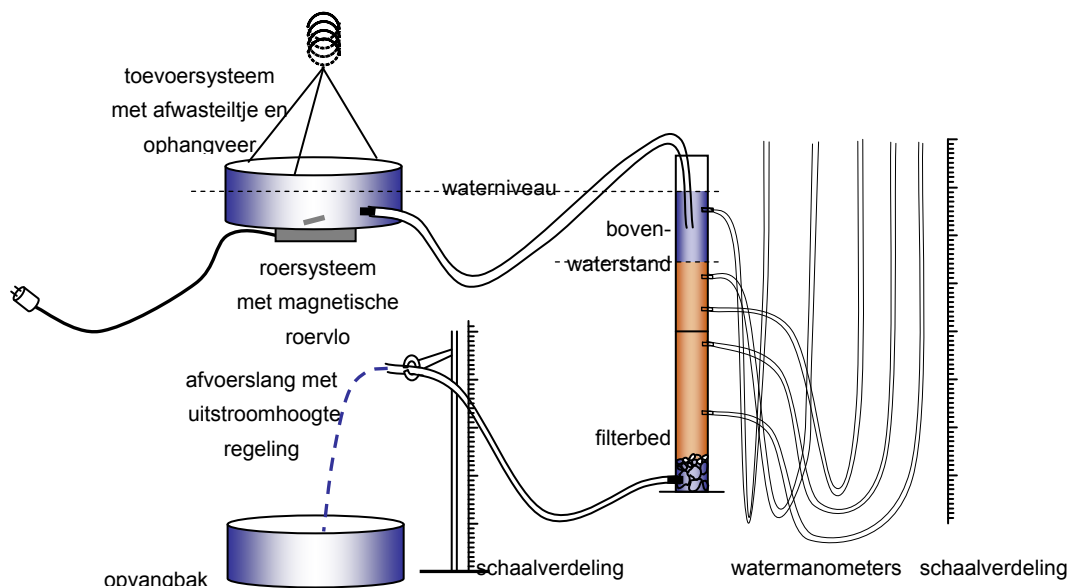
Onderzoeksvraag

Hoe verandert de druk op verschillende hoogtes binnen een snelfilterinstallatie bij verschillende hoogte van het debiet en bij toenemende vervuilingsgraad en wat zijn hiervan de gevolgen voor het filtratieproces?

Proefopstelling

De experimentele filteropstelling bestaat uit een ongeveer 50 cm hoge verticale transparante buis met een diameter van 3 cm, met een doseersysteem voor vervuild water en een afvoer voor het gezuiverde water. De buis is tot ca. 40 cm hoogte gevuld met filterzand (het filterbed) met een korreldiameter tussen 1,0 - 2,0 mm. Langs de hoogte van de buis zijn vijf gaatjes gemaakt

Onder aan het filter is een flexibele afvoerslang bevestigd. Als de uitstroomopening van deze slang op gelijke hoogte is met het waterniveau in de kolom stroomt er (natuurlijk) geen water uit. De druk in de filterkolom neemt in die situatie lineair af met de hoogte: bovenin 0 mm waterkolom en onderin ca. 500 mm waterkolom. Hierdoor is het niveau in alle watermanometers gelijk, en ook gelijk aan dat in de filterkolom. Gelijk niveau betekent niet dat de druk ter hoogte van de meetpunten gelijk is! Doordat de meetpunten op verschillende hoogte zitten, is Δh tussen het meetpunt en het waterniveau in de slangetjes verschillend, en daarmee de gemeten druk. Ga dat na. Zodra de uitstroomopening lager ligt dan het waterniveau in de kolom zal er water gaan stromen en zal er bij alle meetpunten door hydraulische weerstand verschil in druk ontstaan ten opzichte van de statische situatie (zonder stroming). Het niveau in de watermanometers gaat daardoor dalen.



Als de kolom gevuld is met filterzand is de hydraulische weerstand hoger en zal er bij stromend water ook een groter drukverval optreden. Door vervuiling van het filterzand neemt tijdens bedrijf de hydraulische weerstand van het filterbed toe en zal het drukverlies verder stijgen. Wegens de drukverliezen vermindert het debiet (m^3/u) uiteindelijk tot onaanvaardbaar lage waarden. Als het debiet onder een bepaalde grens komt, die tijdens het ontwerp door factoren van proceseconomie wordt

bepaald, wordt het filtratieproces gestopt. Dit gebeurt zelfs als de kwaliteit van het effluent nog aanvaardbaar is. Ook als de kwaliteit van het effluent onvoldoende wordt, stopt men het proces, en wordt het filter teruggespoeld.

Proef 1: metingen hydrostatische- en dynamische druk leeg filter

Bevestig de uitstroomopening van de afvoerslang in de hoogste stand en vul het (lege !) filter met schoon water via het doseersysteem, tot enkele centimeters boven de bovenste manometer aansluiting. Dit wordt tevens het constante waterniveau van de aanvoerbak. De aanvoerslang moet als hevel werken (over het hoogste punt boven het filter) en moet dus helemaal met water gevuld blijven. Dit lukt alleen als de uitstroomopening van de aanvoerslang in het filter gestoken wordt en onder water blijft. Je kunt de hevelwerking starten door met de hand de aanvoerbak op te tillen zodat het voorraadwaterniveau tot boven het hoogste punt van de slang komt. Pas op dat het filter niet te veel overstroomt.

Mocht door omstandigheden het vullen van de voorraadbak stagneren, breng dan de uitstroomopening van de afvoerslang in de hoogste stand om te voorkomen dat het filter droog komt te staan en dat de hevelwerking stopt. Dit is tevens de stand voor het pauzeren van het experiment.

Controleer nu het functioneren van de watermanometers; deze moeten vrij van luchtbellen zijn. Maak als die er wel zijn de bovenkant los en laat er water uitlopen door de opening laag te houden totdat alle luchtbellen zijn verdwenen (Deze handeling kan ook in een later stadium nog wel eens nodig zijn). De waterhoogte is nu, als het goed is, in de manometers en in de uitstroomslang gelijk aan die in het filter.

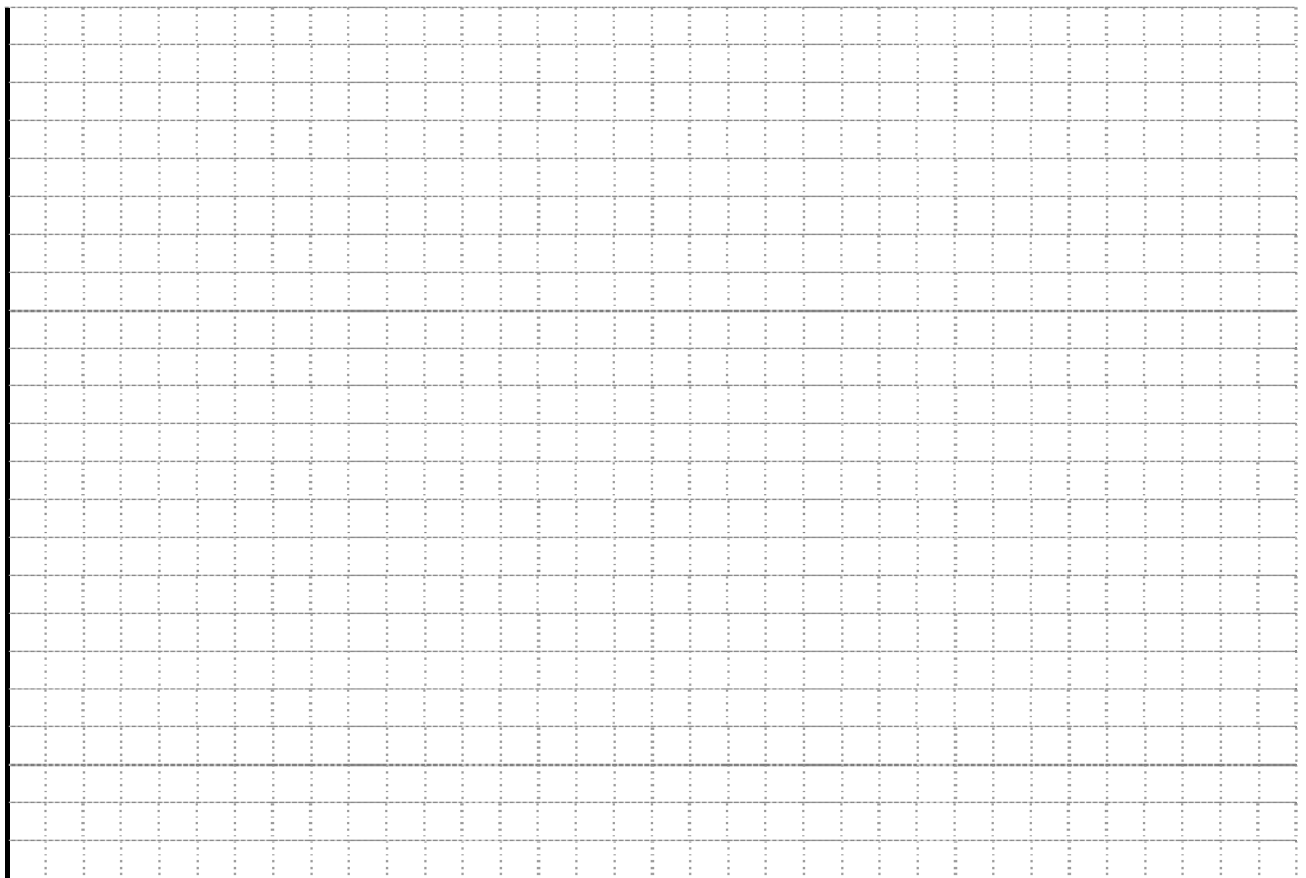
Laat vervolgens de uitstroomopening van de afvoerslang 10 cm zakken, en zorg er met het doseersysteem voor dat de waterhoogte in het filter gelijk blijft (enkele cm boven de bovenste manometer). Lees de manometers af en bepaal het debiet door het water in een maatcilinder of bekerglas op te vangen en de uitgestroomde hoeveelheid water te meten per tijdseenheid (gebruik een stopwatch).

Onderzoeksresultaten proef 1 (leeg filter)

Uitstroom hoogte (mm)	Debiet (L/u)	Druk 1 (mm)	Druk 2 (mm)	Druk 3 (mm)	Druk 4 (mm)	Druk 5 (mm)
0	0 (hydrostatisch)					

Verwerking onderzoeksresultaten proef 1

- Maak een grafiek van het drukverloop tegen de hoogte in het filter (de 5 water-manometers). Kies de hoogte langs de verticale as, en neem als eenheid van druk m.
- Doe dit bij 4 verschillende waarden van het debiet, door de uitstroomhoogte te variëren.



Proef 2: metingen schoon zandfilter

Breng onder in het filter een filterbodem aan van enkele kiezelsteentjes, onderop grotere (ca. 10 mm) en daarboven kleinere. De filterbodem voorkomt dat het filterzand wegspoelt.

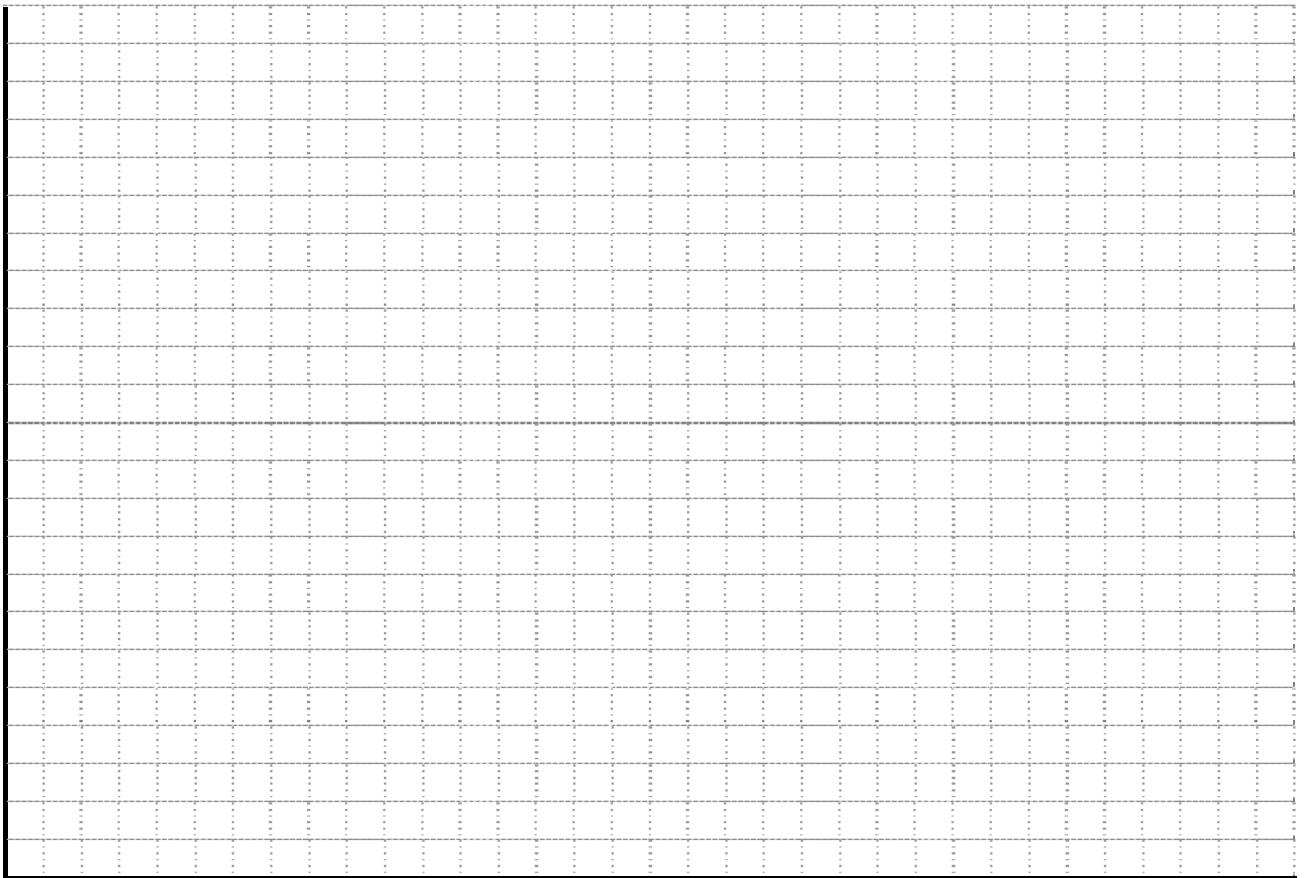
Vul het filter vervolgens met zand tot 10 mm boven het 4^e meetpunt (er is dan genoeg ruimte voor 100 mm water boven het filterbed).

Onderzoeksresultaten proef 2 (schoon water door schoon zand filter)

Uitstroom hoogte (mm)	Debiet (L/u)	Druk 1 (mm)	Druk 2 (mm)	Druk 3 (mm)	Druk 4 (mm)	Druk 5 (mm)
0	0 (hydrostatisch)					

Verwerking onderzoeksresultaten proef 2

Herhaal de metingen van proef 1 en maak weer 4 grafieken van het hydrodynamische drukverloop tegen de hoogte in het filter. Deze grafieken gelden als referentie voor de metingen aan het zandfilter met *vervuild* water.



Proef 3: metingen met kleiwater of kalkwater

Dit wordt de meest realistische meting aan het zandfilter, die vrij lang kan duren, omdat je moet wachten tot het filter voldoende is vervuild om daar conclusies aan te verbinden. De vervuilingsgraad hangt onder meer af van de soort klei of kalk, de dosering, het debiet en de korrelgrootte van het zandfilter. Kies een vast debiet dat werkbaar is in verband met het voortdurend aanvoeren en afvoeren van water en verander de uitstroomhoogte om bij toenemende vervuiling van het filter het debiet constant te houden gedurende de hele proef.

Teken één grafiek van proef 2 over, behorend bij het gekozen debiet. Deze lijn is de referentie druklijn en geeft de dynamische drukval bij een schoon filter.

Laat nu grote hoeveelheden water door het filter lopen en meng steeds klei- of kalkpoeder bij. Herhaal zo nu en dan de metingen en noteer het tijdstip en de meetwaarden.

De tijdstippen van de metingen worden zo gekozen dat verschillen in hydrodynamische druk zichtbaar worden, veroorzaakt door de grotere weerstand van het vervuilde filterbed.

Het verloop van de druk tegen de hoogte in het filter is een maat voor de vervuilingsgraad op de verschillende hoogtes.

Onderzoeksresultaten proef 3

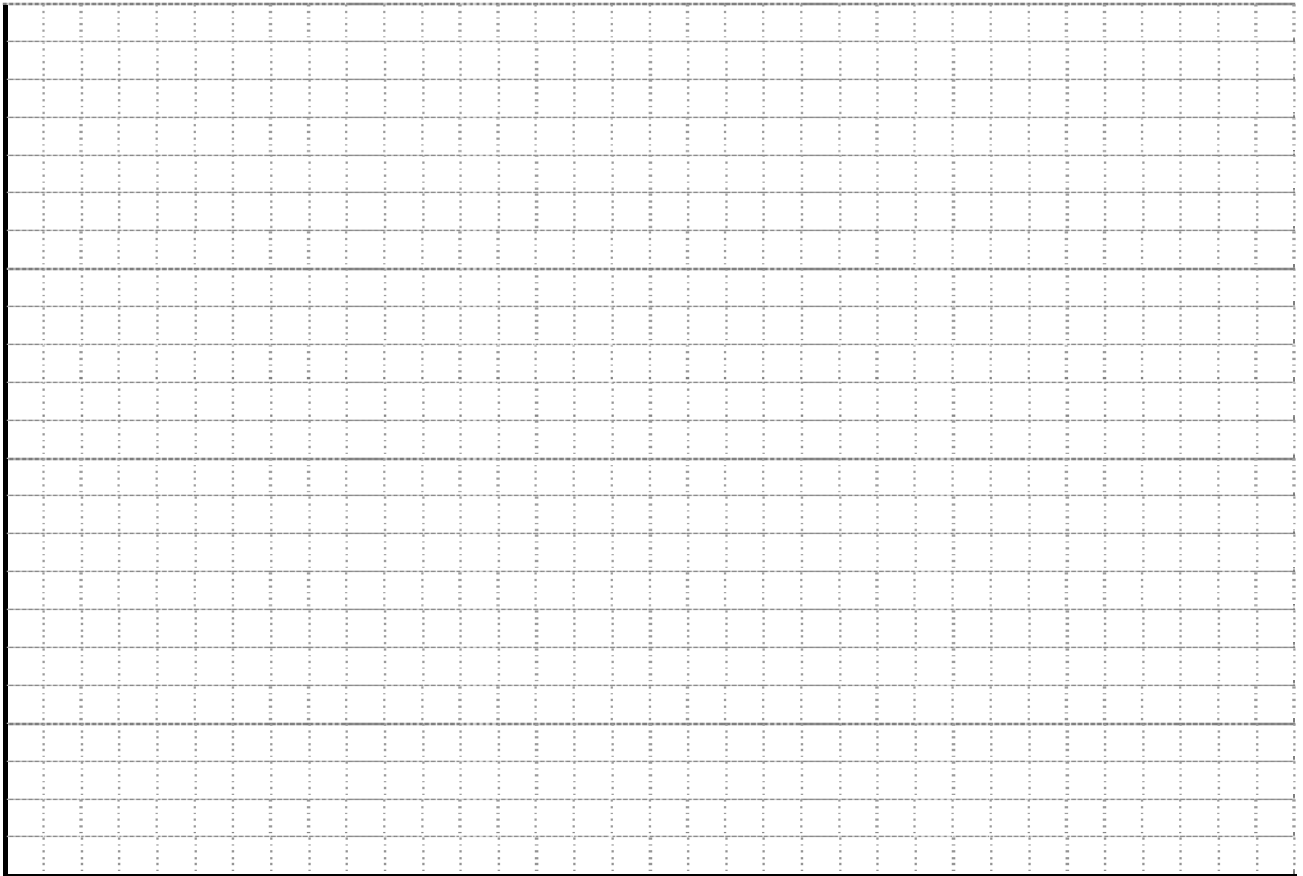
Debiet (L/u) (VAST)	
------------------------------------	--

Constant houden door uitstroomhoogte te variëren.

Tijdstip (min)	Uitstroom hoogte (mm)	Druk 1 (mm)	Druk 2 (mm)	Druk 3 (mm)	Druk 4 (mm)	Druk 5 (mm)
0						

Verwerking onderzoeksresultaten proef 3

- Verwerk de meetresultaten in de hieronder gekopieerde grafiek van proef 2.
- Maak het Lindquistdiagram af.
- Bespreek de grafieken.



Conclusie

Formuleer de eindconclusie van je onderzoek.

B2.3 Opschalingsopdracht

Vertaal nu de verkregen onderzoeksresultaten (onder andere het Lindquist diagram) naar een snelfilterinstallatie op werkelijke schaal, die voldoet aan onderstaande eisen en uitgangspunten.

Eisen

De eisen waar de installatie aan moet voldoen zijn de volgende:

- debiet $2500 \text{ m}^3/\text{u}$
- filtertype: enkellaags snelfilter
- stroomafwaartse regelklep.

Je gaat de belangrijkste dimensies (afmetingen) van deze snelfilterinstallatie bepalen.

Je moet de volgende items gaan bepalen:

- a. de hoogte van het bed
- b. de hoogte van de ondersteunende lagen
- c. de bovenwaterstand
- d. de filtratiesnelheid
- e. het aantal filtereenheden
- f. de afmetingen van de filtereenheden ($l \times b \times h$).

Uitgangspunten

Filterbedhoogte

De filterbedhoogte moet zo worden gekozen dat de vervuiling niet tot in de filterbodem doordringt, omdat deze anders ook vervuult waardoor het filter niet meer door enkel terugspoelen kan worden gereinigd. Dit is uit de experimenten te zien door na te gaan tot hoever de vervuiling doordringt.

Filterbodemhoogte

De filterbodemhoogte moet voldoende zijn om het filterbed op zijn plaats te houden. Bovendien moet ten behoeve van het terugspoelen het schone spoelwater goed worden verdeeld over het gehele oppervlak van (de onderkant) van het zandbed. Hier kun je volstaan met een grove schatting.

Bovenwaterstand

De bovenwaterstand (waterhoogte boven het filter) bepaalt het drukverloop in het filterbed. Uit het Lindquist diagram volgt de minimale bovenwaterstand waarbij juist geen onderdruk optreedt. Een veel grotere bovenwaterstand leidt tot een te hoog en daarmee ook te duur filter.

Uit de gekozen bovenwaterstand volgt ook het debiet per m^2 filteroppervlak. Hieruit is te berekenen wat het totale filteroppervlak moet zijn om de gewenste filtercapaciteit te realiseren. Uit de berekende oppervlakte, gecombineerd met de verschillende ontworpen hoogtes zijn de dimensies van de totale filterinstallatie te berekenen.

De filtratiesnelheid

De filtratiesnelheid (in m/u) wordt gedefinieerd als het waterdebiet (in m^3/u) per m^2 filteroppervlak. De werkelijke watersnelheid in het filterbed is uiteraard hoger.

Schoon filtermateriaal heeft een totale porositeit van 35 tot 40 %. Bij een filtratiesnelheid van $5 m/u$ is de hydraulische weerstand ('schoonbedweerstand') $0,1 - 0,3 m$, afhankelijk van de korreldiameter. Uit deze gegevens is af te leiden welk oppervlak het filter moet krijgen.

Aantal filters

Omdat filters regelmatig enige tijd buiten gebruik worden gesteld vanwege het spoelen en vanwege (groot) onderhoud, moet de capaciteit gerealiseerd worden met meerdere filters. De totale capaciteit moet dus

geleverd kunnen worden met één of enkele filters buiten bedrijf. Theoretisch is dit mogelijk met twee gelijke filters die beide de gehele vraag aankunnen, maar uit economisch oogpunt zijn andere combinaties voordeliger.

B2.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling

Maak van het zandfilter op grote schaal een technische tekening waarin alle relevante dimensies, eisen en uitgangspunten staan vermeld. Let op bij de verdere uitwerking welke parameters al vast staan (door experimentele bepaling, door berekening of omdat het een eis of uitgangspunt is) en welke je met bovenstaande formules gaat berekenen. Leg tot slot uit wat jullie verwachten van de kwaliteit van deze door jullie bedachte installatie. Besteed daarbij vooral aandacht aan de factoren die jullie onderzoeksresultaten nadelig beïnvloed kunnen hebben en de gevolgen daarvan voor de installatie op grote schaal.

B2.5 Presentatie

Presenteer het onderzoek en de opschaling in de vorm die de docent aangeeft.

Vraag hem of haar naar de beoordelingscriteria.

Bijlage 3 Expertopdracht Opharding

Doel van de opdracht

- Het onderzoeken van de ideale contacttijd tussen het materiaal in een ophardingskolom en calciumvrij water. Deze is o.a. afhankelijk van de bedhoogte van het kolommateriaal.
- Het opschalen van de onderzoekopstelling naar een ophardingsinstallatie op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

Zoals in paragraaf 4.3 van al werd vermeld, ontstaat op zeer kalkarme grond te zacht water. Dit heeft als belangrijkste nadeel, dat het meestal een lage pH heeft en daardoor agressief is. Het tast bijv. koperen of loden leidingen aan, waardoor schadelijke metaalionen in het drinkwater terecht kunnen komen, en het kan ook leiden tot aantasting (afbraak) van cement of beton. Men streeft daarom naar water met een niet te hoge, maar ook niet te lage hardheid. Bijkomend voordeel daarvan is dat de juiste hardheid gepaard gaat met aanwezigheid van voldoende HCO_3^- ionen, die een gunstige, pH-stabiliserende werking hebben.

Al met al worden in de Nederlandse drinkwaterwet de volgende kwaliteitseisen gesteld:

- $[\text{Ca}^{2+}]$ tussen 1,0 en 1,5 mmol/L
- $[\text{HCO}_3^-]$ minimaal 1 mmol/L, bij voorkeur 2 mmol/L
- pH tussen 8,0 en 8,3.

Om aan deze eisen te voldoen past men bij de drinkwaterbereiding in gebieden met zeer kalkarme grond opharding toe en in gebieden met kalkrijke grond ontharding.

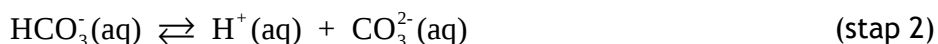
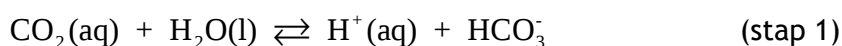
Bij opharding van te zacht water laat men het water door een bed met kalkachtig materiaal stromen, bijvoorbeeld schelpen of marmerkorrels. Het calciumcarbonaat in dit materiaal reageert met het in het water opgeloste koolstofdioxide, waardoor calciumwaterstofcarbonaat ontstaat dat in het water oplost. Het kalkmateriaal moet tijdens het proces regelmatig (bijvoorbeeld eenmaal per twee maanden) aangevuld worden omdat het door de genoemde reactie verdwijnt.

De kwaliteit van de opharding wordt bepaald door het contactoppervlak en de porositeit van de kalkhoudende stof en door de contacttijd van het water met het materiaal.

B3.1 Theorie

Koolzuurhoudend water

Zoals in paragraaf 4.3 onder 'Ontzuren' is beschreven, kan door biologische afbraakprocessen de concentratie opgelost koolstofdioxide ('koolzuur') in grondwater hoog oplopen. Koolzuur is een zwak zuur en ioniseert dus gedeeltelijk in water. Deze ionisatie vindt plaats in twee stappen:



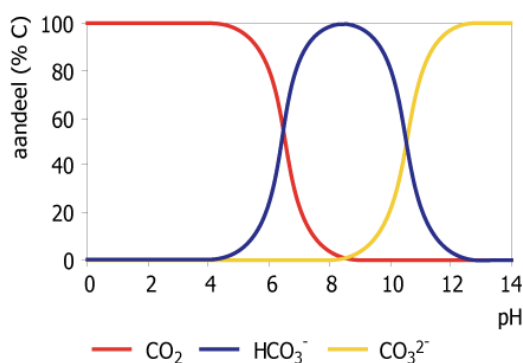
In welke vorm het koolzuur zich uiteindelijk in het water zal bevinden, is afhankelijk van de pH van het water.

Dat is te berekenen met behulp van de evenwichtsvoorwaarden voor de ionisatie-evenwichten, die voor dit doel vaak herschreven worden in de pK-vorm ($\text{pK} = -\log K$):

$$\text{pK}_{z_1} = \text{pH} + \log \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{HCO}_3^-]} = 6,35 \text{ (bij 298 K)}$$

$$\text{pK}_{z_2} = \text{pH} + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_3^{2-}]} = 10,33 \text{ (bij 298 K)}$$

Bij een bepaalde pH hoort een bepaalde verhouding tussen de deeltjes CO_2 , HCO_3^- en CO_3^{2-} , zoals ook te zien is in figuur 70.



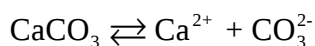
Figuur 70: relatie tussen pH en de percentages CO_2 , HCO_3^- , en CO_3^{2-} .

16. Vraag

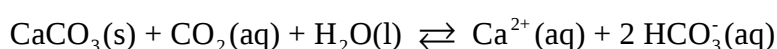
Bereken met behulp van de gegeven pK_z -formules in welke verhouding de drie deeltjes voorkomen bij $\text{pH} = 6,3$; $8,3$ en $10,3$ (bij 298 K).

Kalk-koolzuurevenwicht in water

Calciumcarbonaat is het hoofdbestanddeel van alle kalkachtige materialen en is slecht oplosbaar in water. Er stelt zich bij contact tussen water en kalk het volgende evenwicht in:



In zuiver water kan slechts een zeer lage concentratie calciumionen bereikt worden. In natuurlijk water zijn veel hogere calciumgehalten mogelijk, doordat calciumcarbonaat reageert met het opgeloste koolstofdioxide tot het goed oplosbare calciumwaterstofcarbonaat:

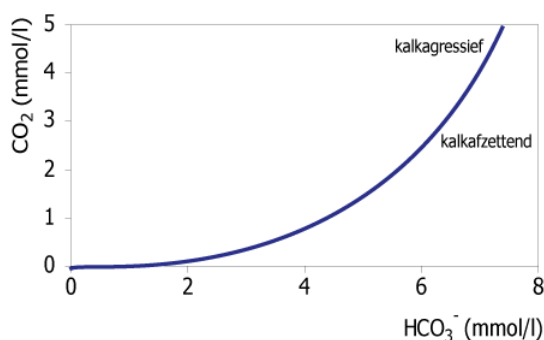


Voor deze evenwichtsreactie geldt (bij 298 K):

$$K = \frac{[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_2]} = 3,6 \cdot 10^{-5}$$

Als alle calciumionen in het water afkomstig zijn van calciumcarbonaat (en niet uit CaSO_4 of CaCl_2), geldt dat $[\text{Ca}^{2+}] = \frac{1}{2} [\text{HCO}_3^-]$. Hiermee geldt voor het evenwicht een derdemachts-relatie tussen $[\text{CO}_2]$ en $[\text{HCO}_3^-]$. De grafische weergave hiervan is bekend onder de naam **'Tillmans kromme'** (figuur 71).

De kromme geeft het kalk-koolzuurevenwicht aan. Boven de lijn is het water **'kalkagressief'**. Dat wil zeggen: in staat kalkachtig materiaal aan te tasten, beneden de lijn is het water **'kalkafzettend'**. Bij een hogere temperatuur verschuift de lijn omhoog. Water dat eerst niet kalkafzettend was, wordt het nu wel kalkafzettend, zoals optreedt bij de vorming van kalkaanslag (CaCO_3) in bijvoorbeeld een wasmachine.



Figuur 71: Tillmans kromme.

De mate van over- of onderverzadiging van calciumcarbonaat in water wordt aangegeven als de **saturation-index** (SI):

$$SI = \log \left(\frac{[Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}]}{K_s} \right) = pH - pH_s \quad (16)$$

waarin:

- K_s = het oplosbaarheidsproduct van calciumcarbonaat
- pH_s = de evenwichts-pH van water met dezelfde concentraties Ca^{2+} en HCO_3^- .

$$pH_s = pK_{z_2} - pK_s - \log[Ca^{2+}] \cdot [HCO_3^-]$$

Water met een positieve SI is kalkafzettend, water met een negatieve SI is kalkagressief. Volgens de norm in de Nederlandse wetgeving moet de SI tussen - 0,3 en 0,2 liggen.

17. Vraag

Ga door middel van berekening van de SI na, of drinkwater met $pH = 8,2$, $[Ca^{2+}] = 1,3 \text{ mmol/L}$ en $[HCO_3^-] = 2,0 \text{ mmol/L}$ (bij 298 K) kalkagressief is of kalkafzettend.

B3.2 Onderzoek

Onderzoeksvraag

De hoofdvraag van dit onderzoek is: Wat is de ideale bedhoogte en daarmee de ideale contacttijd van een ophardingskolom?

Formuleer een tweede onderzoeksvraag en leg die voor aan je docent.

Bereiding zuurhoudend water

Omdat de bereiding van koolzuurhoudend water praktische nadelen heeft, wordt zoutzuur of azijnzuuroplossing (opgelost in calciumvrij demiwater) als modelvloeistof gebruikt. Gebruik een oplossing met dezelfde pH als een verzadigde koolstofdioxideoplossing ($pH = 3,9$ bij 298 K), namelijk $1 \cdot 10^{-4} \text{ M}$ zoutzuur of $6 \cdot 10^{-4} \text{ M}$ azijnzuur.

Voorbereiden ophardingskolom

Tip: Hieronder wordt een werkwijze beschreven voor één ophardingskolom. Om zo efficiënt mogelijk te werken kun je echter ook met drie ophardingskolommen naast elkaar werken. Je moet er dan wel rekening mee houden, dat niet alleen de bedhoogtes in de kolommen zullen verschillen, maar ook de doorstroomsnelheden.

Neem een PET-fles van 1,5 liter, bij voorkeur een stevig, recht model (bijvoorbeeld van Spa). Keer de fles ondersteboven en snijd de bodem eraf. Doe in de hals een prop watten om de schelpen of marmerkorrels

tegen te houden. Maak in de dop m.b.v. een priem een klein gaatje, bijv. met een doorsnede van ongeveer 1 mm. Hang de fles stevig in een statief, gesteund door een klem rondom de hals. De constructie van de opstelling moet stevig genoeg zijn om de fles met enkele kilogrammen materiaal (schelpen of marmer + water) te kunnen vullen.

Sla zo nodig de schelpen in stukjes (pas op: de splinters zijn erg scherp!) en doe een laag schelpen of marmerkorrels van ongeveer 10 cm (gemeten vanaf de prop watten in de hals) in de fles. Vul de fles daarna met kraanwater, verwijder zo goed mogelijk luchtbellens uit het kalkbed door in de fles te knijpen en bepaal de snelheid waarmee de fles leegloopt. De gewenste doorstroomsnelheid is ongeveer 2 (maximaal 3) liter per uur. Bij een lagere doorstroomsnelheid duren de proeven te lang, maar een te hoge snelheid leidt tot onvoldoende opharding. Maak eventueel het gaatje in de dop van de fles groter om de gewenste snelheid te bereiken.

Bepaal het volume van het schelpenbed. Meet hiervoor de afmetingen van het schelpenbed na doorspoelen met kraanwater op, het bed klinkt door de vloeistof meestal nog wat in. Gebruik je wiskundige kennis om de gemeten afmetingen om te rekenen naar het gewenste bedvolume. Bedenk ter controle ook een experimentele manier om het volume te bepalen.

Uitvoering proeven

Meet met behulp van een geijkte pH-meter de pH van de zure oplossing. Vul de fles met de zure oplossing en verwijder de luchtbellens zo goed mogelijk uit het kalkbed door in de fles te knijpen. Laat minimaal een halve liter vloeistof uit de fles lopen en vang daarna minimaal 250 mL op. Zorg dat het kalkbed in de tussentijd niet droog valt. Bepaal van de opgevangen vloeistof de pH, het gehalte calcium en het gehalte waterstofcarbonaat. De calcium- en waterstofcarbonaatbepalingen kunnen ook op een later tijdstip plaatsvinden; bewaar de vloeistof dan in een afgesloten erlenmeyer en geef op het etiket aan bij welke proef dit monster hoort.

Herhaal de procedure met twee andere hoogtes van het kalkbed, bijvoorbeeld de helft en het dubbele van wat je eerst gebruikt hebt. Bij deze proeven is het niet meer nodig om de gehalten waterstofcarbonaat te bepalen.

Wanneer er tijd over is voor extra onderzoek, onderzoek dan ook de tweede onderzoeksvraag die jullie met de docent besproken hebben.

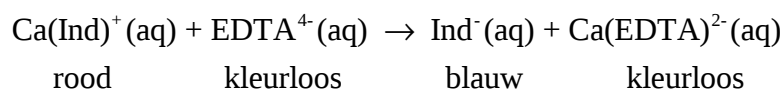
Bepaling calciumgehalte

Vul een buret met 0,0100 M EDTA-oplossing (EDTA is een reagens op Ca^{2+} ionen, naam en formule ervan zijn hier niet van belang).

Meet met een maatcilinder 100 mL van het monster af in een erlenmeyer van 250 mL, voeg 5 mL bufferoplossing toe en zwenk de erlenmeyer even rond zodat de stoffen mengen. Voeg vervolgens 3-4 druppels Calmagite oplossing toe, meng weer en titreer de vloeistof met de oplossing in de buret totdat de kleur blauw is. Al het rood moet verdwenen zijn, dus niet stoppen bij paarsblauw! Probeer de titratie eerst uit met 0,0020 M CaCl_2 . Voer de titratie voor elk monster in duplo uit.

Bij deze titratie wordt gebruik gemaakt van het feit dat calciumionen oplosbare complexen kunnen vormen met EDTA en met de indicator (hier verder afgekort als Ind). Het complex met de indicator heeft een andere kleur dan de indicator zelf.

Titratiereactie:



Omdat deze reactie alleen in basisch milieu aflopend is, wordt aan het titratiemengsel een basische buffer toegevoegd. Deze moet het restant zuur in het behandelde water neutraliseren en de pH van het totale mengsel op minimaal 10 brengen. Controleer dit.

Bepaling waterstofcarbonaatgehalte

Vul een buret met ca. 0,010 M zoutzuur, waarvan de molariteit nauwkeurig bekend is.

Pipetteer 50,0 mL van het monster in een erlenmeyer, voeg enkele druppels oplossing van de indicator broomkresolgroen toe en titreer tot de kleur omslaat naar geel.

Voer deze titratie voor slechts één monster uit, in duplo.

Onderzoeksresultaten

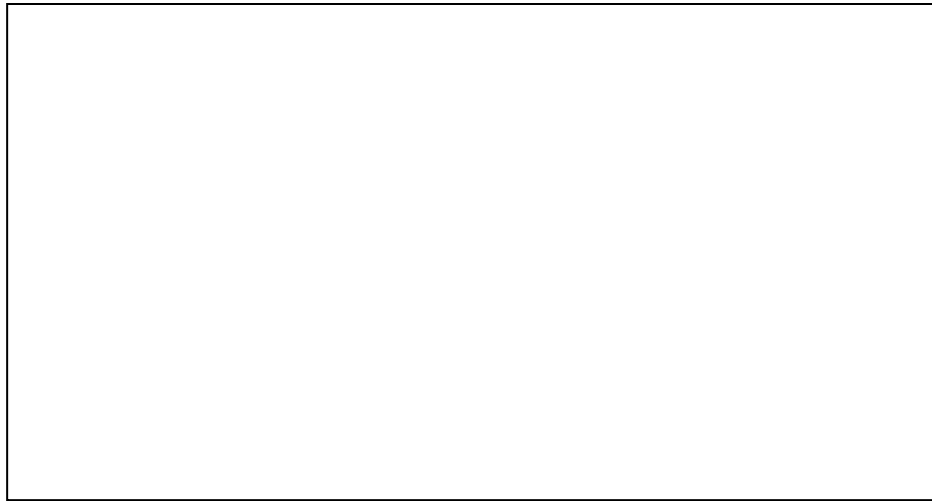
Bepaling doorstroomsnelheid van de kolom

Meting nr.	Uitgestroomd volume (mL)	Doorstroomtijd (s)
1		
2		
3		
4		
gemiddeld		

Berekening gemiddelde doorstroomsnelheid

Bepaling bedvolume

Gemeten afmetingen (teken de opstelling en geef daarin de maten aan)



Wiskundige berekening van het bedvolume



Experimentele bepaling van het bedvolume



Resultaten bepalingen van het calciumgehalte en het
waterstofcarbonaatgehalte

Hoogte schelpenbed (cm)	Buretstanden EDTA (mL)	Buretstanden zoutzuur (mL)
	Begin: Eind:	Begin: Eind:
	Begin: Eind:	Begin: Eind:
	Begin: Eind:	Begin: Eind:
	Begin: Eind:	Begin: Eind:

Invloed kolomhoogte op opharding

	Zure oplossing vóór behandeling	Vloeistof na een schelpenbed met een hoogte van cm cm cm		
pH				
[Ca ²⁺] (mmol/L)	0,0			
[HCO ₃ ⁻] (mmol/L)	0,0			

Invloed andere variabele

Onderzochte variabele

Resultaten

Verwerking van de onderzoeksresultaten

- Laat met een voorbeeldberekening zien, hoe jullie uit de afgelezen buretstanden de Ca^{2+} -concentraties uit de titratiegegevens hebben berekend.
- Doe hetzelfde voor de berekening van de concentratie van HCO_3^- .
- Leg uit welke samenhang er bij deze experimenten zou moeten zijn tussen het Ca^{2+} -gehalte en het HCO_3^- -gehalte. Klopt dit met de resultaten? Zo nee, wat zou daarvan de oorzaak kunnen zijn?
- Bereken de contacttijden van het water met het kolommateriaal bij de toegepaste bedhoogtes.
- Zet in diagrammen de pH, $[\text{Ca}^{2+}]$ en $[\text{HCO}_3^-]$ uit als functie van de contacttijd.
- Leid met behulp van de diagrammen af wat de meest geschikte contacttijd is om water zonder Ca^{2+} voldoende op te harden (zie de kwaliteitseisen in de introductie).

Conclusie

Formuleer de conclusies die getrokken kunnen worden uit jullie onderzoeksresultaten, ook van het extra onderzoek als dat verricht is.

B3.3 Opschalingsopdracht

Vertaal nu de verkregen onderzoeksresultaten naar een ophardingsinstallatie op werkelijke schaal voor een gebied op de Veluwe. Het gaat daarbij onder andere om het bepalen van de belangrijkste dimensies (afmetingen) van deze installatie.

Eisen en uitgangspunten

1. Bereken op basis van de bij vraag 6 bepaalde contacttijd het benodigde oppervlak voor een ophardingsinstallatie met een capaciteit van 5 miljoen m^3 per jaar.
2. Beoordeel of het berekende oppervlak realistisch is voor een drinkwaterbedrijf, bijvoorbeeld door het te vergelijken met het totale oppervlak dat zo'n bedrijf ter beschikking heeft. Wanneer het

berekende oppervlak niet realistisch is, bedenk dan hoe de ophardingsinstallatie moet worden aangepast. De aanpassing moet zodanig zijn, dat die niet tot kwaliteitsverlies leidt.

3. Pas vervolgens de installatie aan uitgaande van de volgende gegevens:
 - de gemiddelde watertemperatuur is 10°C i.p.v. 25°C
 - het calciumgehalte van het grondwater is $0,5\text{ mmol/L}$ i.p.v. $0,0\text{ mmol/L}$.
4. Bereken hoe vaak de hoeveelheid schelpen in de installatie aangevuld moet worden. Ga hierbij uit van de volgende gegevens:
5. de schelpen bestaan volledig uit calciumcarbonaat
6. aanvulling is nodig als 10 % van de schelpen is omgezet.

B3.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling

Maak een technische tekening van de ophardingsinstallatie op grote schaal waarin alle relevante dimensies, eisen en uitgangspunten staan vermeld. Leg uit wat jullie verwachten van de kwaliteit van deze door jullie bedachte installatie. Besteed daarbij vooral aandacht aan de factoren die jullie onderzoeksresultaten nadelig beïnvloed kunnen hebben en de gevolgen daarvan voor de installatie op grote schaal.

B3.5 Presentatie

Presenteer onderzoek en opschaling in de vorm die de docent aangeeft. Vraag hem of haar naar de beoordelingscriteria.

Bijlage 4 Expertopdracht Distributie

Doel van de opdracht

- Onderzoeken hoe je hydraulische verliezen in een aantal configuraties van transportleidingen en van distributienetten kunt bepalen.
- Het opschalen van de onderzoekopstelling naar een transportsysteem en/ of distributienet op werkelijke schaal met behulp van de verkregen onderzoeksresultaten.

Nadat alle zuiveringstechnieken zijn doorlopen, moet het drinkwater naar de bedrijven en de huishoudens worden gedistribueerd. In hoofdstuk 5 vind je de basis van distributie. Bij distributie kun je een aantal onderdelen onderscheiden, namelijk transportsystemen, distributienetten en (eventueel) opslag. In de expertopdracht gaan we kijken hoe water zich gedraagt in transportsystemen en distributienetten. Daartoe maak je kennis met de theorie van de hydraulische verliezen in de leidingen. Een analogie van deze theorie met de theorie van elektrische netwerken wordt gepresenteerd.

B4.1 Theorie

Lange transportleidingen hebben over grote afstanden een constante doorsnede (**doorstroomprofiel**). Dit betekent dat het water overal in die leiding, of je nu aan het begin of aan het eind van de leiding of er ergens tussenin kijkt, met dezelfde snelheid stroomt. Dit wordt een **eenparige waterstroming** genoemd. Niet-eenparige stroming komt onder meer voor bij overgangen in leidingdiameter en bij uitstroming in reservoirs. Neem als voorbeeld een taps toelopende leiding. We nemen aan dat het water onsamendrukbaar is. Dat wil zeggen dat hoe sterk je ook op een bepaalde hoeveelheid water drukt het steeds hetzelfde volume blijft innemen. Het onsamendrukbaar zijn van water heeft tot gevolg dat het debiet overal in de leiding even groot is. Het debiet is de hoeveelheid water (het volume) dat per tijdseenheid door een doorsnede van de leiding stroomt. De doorsnede in een dergelijke taps toelopende leiding wordt steeds kleiner en het debiet blijft overal even groot. Dan moet de snelheid van het water wel toenemen. Zo'n stroming wordt niet-eenparig genoemd.

In principe is de stroming in leidingen niet-stationair, vanwege de fluctuerende behoefte in bedrijven en huishoudens. Stationair wil zeggen dat de waterstroming in de tijd niet verandert. Niet-stationair betekent dat het debiet wel in de tijd verandert. De veranderingen verlopen echter geleidelijk, waardoor voor het berekenen van de hydraulische weerstand

een stationair stromingsbeeld wordt verondersteld. De hydraulische weerstand is de weerstand die water ondervindt als het stroomt in leidingen, in reservoirs, enzovoort.

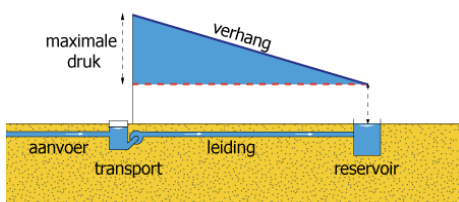
Voorbeelden van ongelijkmatige veranderingen van doorstroomprofielen zijn overgangen van leidingen met verschillende doorsneden, bochten, samenvoegingen van leidingen, overgang van een leiding in een reservoir of omgekeerd, enzovoort.

De **hydraulische weerstand** in leidingen bestaat uit 2 componenten:

- wrijvingsverliezen, door eenparige stroming langs de wand
- vertragsverliezen, door een ongelijkmatige verandering van het doorstroomprofiel.

A. Wrijvingsverliezen

Doordat water in een leiding stroomt, verliest het energie door wrijving aan de wanden van de leidingen (figuur 72). Dit verlies aan energie door wrijving uit zich in een afname van de druk. Dit drukverschil is te meten met bijvoorbeeld stijgbuizen.



Figuur 72: drukverlies door weerstand.

Wrijvingverliezen kunnen worden bepaald met de formule van Darcy-Weisbach en Colebrook-White, die omgeschreven kunnen worden naar de volgende vergelijking:

$$\Delta H_w = \lambda \cdot \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \quad (17)$$

waarin:

- ΔH_w = wrijvingsverlies in meter (m)
- λ = wrijvingsfactor
- L = lengte van de leiding in meter (m)
- D = diameter van de leiding in meter (m)
- Q = debiet door de leiding in kubieke meter per seconde (m^3/s)
- g = gravitatieconstante in meter per seconde kwadraat (m/s^2).

Het wrijvingsverlies ΔH_w wordt gemeten als het verschil in waterhoogte in twee stijgbuizen op twee verschillende plaatsen langs de leiding. Dit verschil in waterhoogte is een maat voor het drukverschil in de waterleiding.

De wrijvingsfactor λ ligt in de praktijk tussen 0,01 en 0,04. Voor een eerste schatting van λ wordt vaak 0,02 aangehouden.

De wrijvingsfactor is vooral afhankelijk van de relatieve wandruwheid en verschilt sterk per materiaalsoort. In de tijd kan de wandruwheid sterk

toenemen door corrosie, afzettingen en slijmvorming. Hierdoor komt in de praktijk wel eens een verdubbeling van de wrijvingsfactor voor.

De wrijvingsfactor is daarnaast afhankelijk van het stromingstype: laminair of turbulent. Een **laminaire stroming** is een stroming waarbij het water in laagjes stroomt. Elk watermolecuul blijft in zijn eigen laagje. Bij een **turbulente stroming** bewegen de moleculen kriskras door elkaar. In een dergelijke stroming zie je ook allerlei wervelingen.

In de praktijk blijkt dat in het distributienet de stroming laminair is en dat in het transportnet de stroming turbulent is.

B. Vertragsingsverliezen

Behalve verliezen door wrijving aan de leidingwanden gaat er ook energie verloren bij de overgangen die er in de leidingen zijn zoals een overgang naar een leiding met een grotere diameter, een uitstroming in een reservoir, bij samenvoegingen van leidingen, bij bochten enzovoort. Bij dit soort overgangen ‘botsen’ de watermassa’s op elkaar. Bij een uitstroming in een reservoir bijvoorbeeld ‘botst’ het stromende water uit de leiding op het stilstaande water van het reservoir. Hierdoor gaat er energie verloren. Het verschil tussen wrijvingsverlies en vertragsingsverlies kan met een volgend voorbeeld geïllustreerd worden. Een auto die met een constante snelheid op een weg rijdt, heeft last van wrijving tussen de banden en het wegoppervlak. Dit wrijvingsverlies is te merken aan de slijtage van de banden. Als diezelfde auto stevig remt voor een rood verkeerslicht of door een bocht rijdt, heeft die auto te maken met vertragsingsverliezen. Door verandering van de snelheidsvector van de auto gaat ook energie verloren in warmte en slijtage van de banden.

Elke automobilist weet dat die vertragsingsverliezen behoorlijk groot kunnen zijn, vaak groter dan de wrijvingsverliezen.

In een leiding zijn er meestal meerdere overgangen zoals bochten, samenvoegingen van leidingen, verandering van diameter van de leiding, enzovoort. Elke overgang wordt ook wel een **element** genoemd.

Door de verschillende overgangen in leidingen treden meerdere vertragingen op. Het vertragsingsverlies in een overgang (element) wordt berekend uit:

$$\Delta H_{v,n} = \xi_n \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \quad (18)$$

waarin:

- $\Delta H_{v,n}$ = vertragsingsverlies over het n -de element in meter (m)
- ξ_n = verliesfactor van het n -de element (zonder eenheid)
- Q = debiet door de leiding in kubieke meter per seconde (m^3/s)
- g = gravitatieconstante in meter per seconde kwadraat (m/s^2)
- D = diameter van de leiding in meter (m).

Het totale vertragsingsverlies in de leiding is dan de som van de vertragsingsverliezen over alle elementen:

$$\Delta H_v = \sum_{n=1}^{n=k} \xi_n \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \quad (19)$$

waarin:

- k = totaal aantal elementen.

In formule (19) zijn de verliesfactoren steeds gerelateerd aan het debiet (en dus de snelheid) in de leiding.

Voor alle verschillende stromingsituaties zijn de vertragsingsverliezen met behulp van experimenten bepaald. In figuur 73 zijn de verliesfactoren voor enkele stromingsovergangen gegeven.

Overgang	ξ
Instroming vanuit reservoir (instekende pijp)	1,0
Instroming vanuit reservoir (scherpe instroom)	0,5
Instroming vanuit reservoir (afgeronde instroom)	0,1
Bocht 90° (haakse knik)	1,2
Bocht 90° ($r = D$)	0,2
Bocht 90° ($r = 4D$)	0,1
Schuifafsluiter (open)	0,1
Vlinderklep (open)	0,2
Terugslagklep	2,0 - 2,5
Uitstroming in reservoir (scherpe uitstroom)	1,1
Uitstroming in reservoir (verwijdende uitstroom)	0,2
Uitstroming in grotere leidingen	0,01 – 1,0

Figuur 73: verliesfactoren (ξ) voor enkele stromingsovergangen.

Bij leidingen treden de grootste vertragsingsverliezen op bij terugslagkleppen ($\xi = 2,0 - 2,5$) vanwege de sterke verandering in het doorstroomprofiel.

In de praktijk geldt dat ξ_{totaal} een waarde heeft tussen 1 en 4 voor korte leidingstukken. Bij lange leidingen met vele bochten, appendages, samenvoegingen, enzovoort, kan een veel hogere waarde optreden.

Totale hydraulische verliezen

De vergelijkingen (17) en (19) kunnen samengenomen en herschreven worden tot de volgende vergelijking voor het totale hydraulische verlies in een leiding:

$$\Delta H_{\text{tot}} = \Delta H_w + \Delta H_v = c_w \cdot Q^2 + c_v \cdot Q^2 \quad (20)$$

waarin:

- ΔH_{tot} = totale hydraulische verlies in meter (m)
- Q = debiet door de leiding in kubieke meter per seconde (m³/s)

- c_w = coëfficiënt voor wrijvingsverlies in seconde kwadraat per meter⁵ (s^2/m^5)
- c_v = coëfficiënt voor vertragsingsverlies in seconde kwadraat per meter⁵ (s^2/m^5).

De coëfficiënt voor wrijvingsverlies is lineair met L en evenredig met D^{-5} .

De coëfficiënt voor vertragsingsverlies is evenredig met D^{-4} .

Bij lange leidingen ($L / D > 500$) zijn de vertragsingsverliezen verwaarloosbaar.

Voor zeer korte leidingen ($L / D < 20$) zijn de wrijvingsverliezen verwaarloosbaar.

Analogie met elektrische netwerken

In deze paragraaf zullen we de analogie tussen de theorie van waterstromingen en de theorie van elektrische netwerken uitleggen. Deze analogie maakt het mogelijk om hydraulische problemen om te schrijven naar elektrische problemen en die dan met de reeds bekende theorieën over elektrische netwerken op te lossen. Met deze analogie kun je ook eerst met elektrische componenten als weerstanden en spannings- en/of stroombronnen een netwerk maken en daarmee experimenteren alvorens je daadwerkelijk met waterleidingen aan de gang gaat.

In een gesloten stroomkring met een spanningsbron U en een weerstand R loopt een (elektrische) stroom I , die voldoet aan de bekende wet van Ohm:

$$U = I \cdot R \quad (21)$$

waarin:

- U = (elektrische) spanning in volt (V)
- I = (elektrische) stroom in ampère (A)
- R = (elektrische) weerstand in ohm (Ω).

Het vermogensverlies P over de weerstand is gegeven door:

$$P = U \cdot I \quad (22)$$

waarin:

- P = vermogensverlies in watt (W).

De vergelijkingen (21) en (22) kunnen gecombineerd worden tot de volgende vergelijking:

$$P = I^2 \cdot R \quad (23)$$

Vergelijking (23) is identiek aan vergelijking (20) als voor het vermogensverlies P gelezen wordt het hydraulische verlies ΔH_{tot} ; voor de stroom I het debiet Q en voor de weerstand R de coëfficiënt voor wrijvingsverlies c_w of de coëfficiënt voor vertragsingsverlies c_v .

In de elektriciteitstheorie kun je de weerstand R schrijven als:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (24)$$

waarin:

- R = weerstand in ohm (Ω)
- ρ = soortelijke weerstand in ohm-meter (Ωm)
- L = lengte van de stroomdraad in meter (m)
- A = doorsnede van de stroomdraad in vierkante meter (m^2).

Hierin is ρ een materiaalconstante en L en A zijn de afmetingen van de stroomdraad.

Hoewel het geen directe analogie is, kun je ook in de theorie van waterstromingen de coëfficiënten voor wrijvingsverlies en vertragsingsverlies schrijven als een product van een materiaalconstante en een factor waar alleen de afmetingen voorkomen.

Zo kun je c_w schrijven als een product van de materiaalconstante λ en een factor waarin de afmetingen voorkomen:

$$c_w = \lambda \cdot \frac{8 \cdot L}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \quad (25)$$

en c_v als een product van de materiaalconstante ξ en een factor waarin de afmetingen voorkomen:

$$c_v = \xi \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} = \xi \cdot \frac{2}{g \cdot A^2} \quad (26)$$

18. Opdracht

18.1 Lengte leiding

- a. Hoeveel groter/kleiner wordt het wrijvingsverlies als je de leiding twee keer zo lang maakt?
- b. Hoeveel groter/kleiner wordt het vertragsingsverlies als je de leiding twee keer zo lang maakt?

18.2 Haakse bocht

Een leiding van een zekere lengte en diameter heeft een haakse bocht. Andere vertragsingsverliezen zijn te verwaarlozen. Nu wordt er nog een

identieke haakse bocht in deze leiding gemaakt; lengte en diameter blijven hetzelfde.

- Hoeveel groter/kleiner wordt het wrijvingsverlies?
- Hoeveel groter/kleiner wordt het vertragsingsverlies?

18.3 Diameter leiding

- Hoeveel groter/kleiner wordt het wrijvingsverlies als je de diameter van de leiding twee keer zo groot maakt?
- Hoeveel groter/kleiner wordt het vertragsingsverlies als je de diameter van de leiding twee keer zo groot maakt?

18.4 Debiet

- Hoeveel groter/kleiner wordt het wrijvingsverlies als je het debiet door de leiding twee keer zo groot maakt?
- Hoeveel groter/kleiner wordt het vertragsingsverlies als je het debiet door de leiding twee keer zo groot maakt?

18.5 Identieke leidingen

Je vervangt een leiding door twee identieke leidingen die je parallel aanlegt. Het totale debiet door de twee leidingen laat je onveranderd. Hoe verandert het stromingsverlies? (Denk aan de analogie met elektrische netwerken).

18.6 Dimensiecontrole

Laat zien dat uit de vergelijkingen (25) en (26) volgt dat de dimensie van zowel c_w als c_v gelijk is aan s^2/m^5 .

18.7 Wrijvingsverlies (1)

In een transportleiding van 54 km lang en een diameter van 1500 mm is het debiet $10000 \text{ m}^3/\text{h}$. De wrijvingsfactor λ is 0,018

- Bereken de (gemiddelde) stroomsnelheid in de leiding.
- Bereken het wrijvingsverlies in de leiding.

18.8 Vertragsingsverlies (1)

In de leiding van opgave 18.7 zitten 30 bochten (vertragsingsverlies $\xi = 0,5$ per bocht), 10 afsluiters ($\xi = 0,3$ per afsluiter), 1 terugslagklep ($\xi = 2,5$), 1 instroming ($\xi = 0,5$) en 1 uitstroming ($\xi = 1,0$).

Bereken het vertragsingsverlies.

18.9 Wrijvingsverlies (2)

Van een 25 km lange transportleiding is gegeven dat de diameter 1500 mm is en dat het debiet $12500 \text{ m}^3/\text{h}$ is. Het wrijvingsverlies is 58,7 m.

- Bereken de (gemiddelde) snelheid in de leiding.
- Bereken de wrijvingsfactor λ .

18.10 Vertragsingsverlies (2)

Bereken het vertragsingsverlies bij de onderstaande gegevens. Maak bij deze berekening gebruik van een eigen schatting voor de verliescoëfficiënten bij bochten, afsluiters, terugslagkleppen en in- en uitstroming.

- debiet = $12500 \text{ m}^3/\text{h}$
- lengte van de leiding = 25 km
- diameter van de leiding = 1500 mm
- aantal bochten = 35
- aantal afsluiters = 23
- aantal terugslagkleppen = 1
- aantal in- en uitstromingen = 1.

B4.2 Onderzoek

Werkplan

Stel een werkplan op voor het experimentele deel van deze onderzoeksopdracht. Geef in dit werkplan de antwoorden op de volgende vragen:

- Wat is de onderzoeksvraag?
- Hoe willen jullie het onderzoek aanpakken? (werkwijze beschrijven, eventueel opstelling tekenen).
- Hoe gaan jullie de wrijvingsfactor λ gaat bepalen voor verschillende situaties?
- Hebben jullie in een bepaalde situatie alleen met wrijvings- of ook met vertragsingsverliezen te maken?
- Hoe kunnen jullie in een configuratie beide verliezen bepalen?
- Welke materialen en stoffen hebben jullie nodig?

Beschikbaar is in elk geval:

- water
- kunststof leidingen
- koppelstukken, T-stukken, kranen, bochten, enzovoort.

Laat dit werkplan door de docent goedkeuren voordat je met het onderzoek begint en voer daarna het onderzoek uit.

Opstelling van de proef

De experimentele opstelling bestaat uit een aantal kunststof leidingen van verschillende lengten en verschillende diameters. Met behulp van deze leidingen kunnen een aantal eenvoudige configuraties van distributienetten worden doorgemeten op stromingsverliezen.

Het debiet in het net wordt geregeld met een kraantje en gemeten met een emmer en stopwatch. De druk wordt gemeten met watermanometers (stijgbuizen).

Besprek met je groepje hoe jullie te werk zullen gaan. Spreek dit met je toa of docent door.

Verwerking van de onderzoeksresultaten

Maak voor de verschillende configuraties tabellen en grafieken van het stromingsverlies als functie van het debiet.

- Bepaal uit de grafieken de verliescoëfficiënten.
- Beredeneer of de aanname dat de vertragingsverliezen te verwaarlozen zijn ten opzichte van de wrijvingsverliezen een correcte aanname is geweest.
- Probeer met behulp van de theorie en je resultaten een schatting te geven van de vertragingsverliezen en daarmee een schatting voor de verliesfactor ξ . Maak hiermee een nauwkeuriger schatting van de wrijvingsfactor λ .

Conclusie

Formuleer de eindconclusie van je onderzoek.

B4.3 Opschalingsopdracht Trantsportsysteem en Distributienet

A. Transportsysteem

Ontwerp een nieuw transportsysteem om infiltratiewater over het traject van Brakel naar Bergambacht (Zuid Holland) te transporteren.

Eisen

Het traject is 35 km lang en moet een debiet aankunnen van 74 miljoen m³/jaar. In verband met leveringszekerheid worden twee leidingen met dezelfde diameter aangelegd. Het wrijvingsverlies moet zo klein mogelijk zijn.

Uitgangspunten

Het wrijvingsverlies door een leiding van 30 km en met een doorsnede van 1000 mm is 160 m. Met vertragingsverliezen hoeft geen rekening gehouden te worden. De optimale snelheid voor water in een transportleiding is 0,88 m/s.

Uitwerking van de opschalingsopdracht Transportsysteem

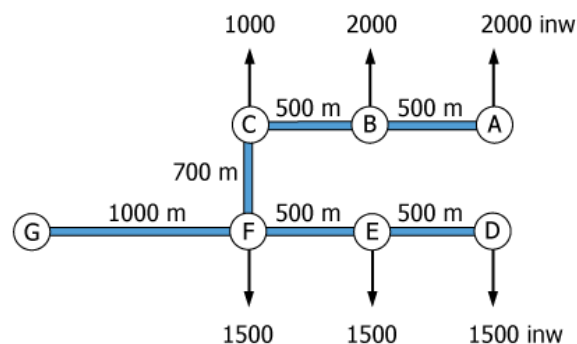
Let bij de verdere uitwerking erop welke parameters al vast staan (door experimentele bepaling, door berekening of omdat het een uitgangspunt is) en welke je met de formules uit de theorie gaat berekenen.

Laat met een grafiek zien hoe het wrijvingsverlies varieert met de vrij te kiezen parameter.

Geef de optimale parameter aan waarbij het wrijvingsverlies minimaal is.

B. Distributienet

In een woonwijk wordt een vertakt distributienet aangelegd, zie figuur 74. Bij de knooppunten staat aangegeven hoeveel inwoners vanaf dat knooppunt van water worden voorzien. Ontwerp een distributienetwerk waarin de stromingsverliezen minimaal zijn.



Figuur 74: vertakt distributienet in een woonwijk.

Eisen

De stromingsverliezen zijn minimaal. Het aantal inwoners dat vanaf een bepaald knooppunt van water moet worden voorzien, is gegeven in figuur 74.

Uitgangspunten

Er wordt verondersteld dat op de dag dat het waterverbruik het hoogst is, per inwoner 20 l/h verbruikt wordt op het uur van die dag dat waterverbruik het hoogst is.

De diameters van de leidingen tussen de verschillende knooppunten hoeven niet gelijk genomen te worden.

Andere vertakkingen van dit distributienet zijn ook mogelijk; bijvoorbeeld door niet knooppunten C en F met elkaar te verbinden, maar knooppunten B en E of knooppunten A en D met elkaar te verbinden.

Uitwerking van de opschalingsopdracht Distributie

Let op bij de verdere uitwerking welke parameters al vast staan (door experimentele bepaling, door berekening of omdat het een uitgangspunt is) en welke je met de formules uit de theorie gaat berekenen. Laat met berekeningen en grafieken zien wat de wrijvingsverliezen in de verschillende configuraties zijn.

B4.4 Evaluatie van onderzoek en opschaling

Maak van het transportsysteem en van het distributienet op grote schaal een technische tekening waarin alle relevante dimensies, eisen en uitgangspunten staan vermeld. Let bij de verdere uitwerking erop welke parameters al vast staan (door experimentele bepaling, door berekening of omdat het een eis of uitgangspunt is) en welke je met bovenstaande formules gaat berekenen.

Leg tot slot uit wat jullie verwachten van de kwaliteit van deze door jullie bedachte installatie. Besteed daarbij vooral aandacht aan de factoren die jullie onderzoeksresultaten nadelig beïnvloed kunnen hebben en de gevolgen daarvan voor de installatie op grote schaal.

B4.5 Presentatie

Presenteer het onderzoek en de opschaling in de vorm die de docent aangeeft.

Vraag hem of haar naar de beoordelingscriteria.

Bijlage 5 URL-lijst

URL1 United Nations, Millenium Development Goals

<http://www.un.org/millenniumgoals/>

URL2 MDG Monitor, tracking the millenium development goals

<http://www.mdgmonitor.org/>

URL3 Unicef, information by country and programme

<http://www.unicef.org/infobycountry/>

URL4 Aqua for All

<http://www.aquaforall.nl/>

URL5 Oxfam Novib

<http://www.oxfamnovib.nl/>

URL6 The World Bank

<http://www.worldbank.org/>

URL7 United Nations Development Programme

<http://www.undp.org/>

URL8 The United Nations World Water Development Report

<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/>

URL9 IRC, International Water and Sanitation Centre

<http://www.irc.nl/>

URL10 IS, Internationale Samenwerking

<http://www.isonline.nl/>

URL11 Aquacell waterontharder

<http://www.aquacell-waterontharder.nl>