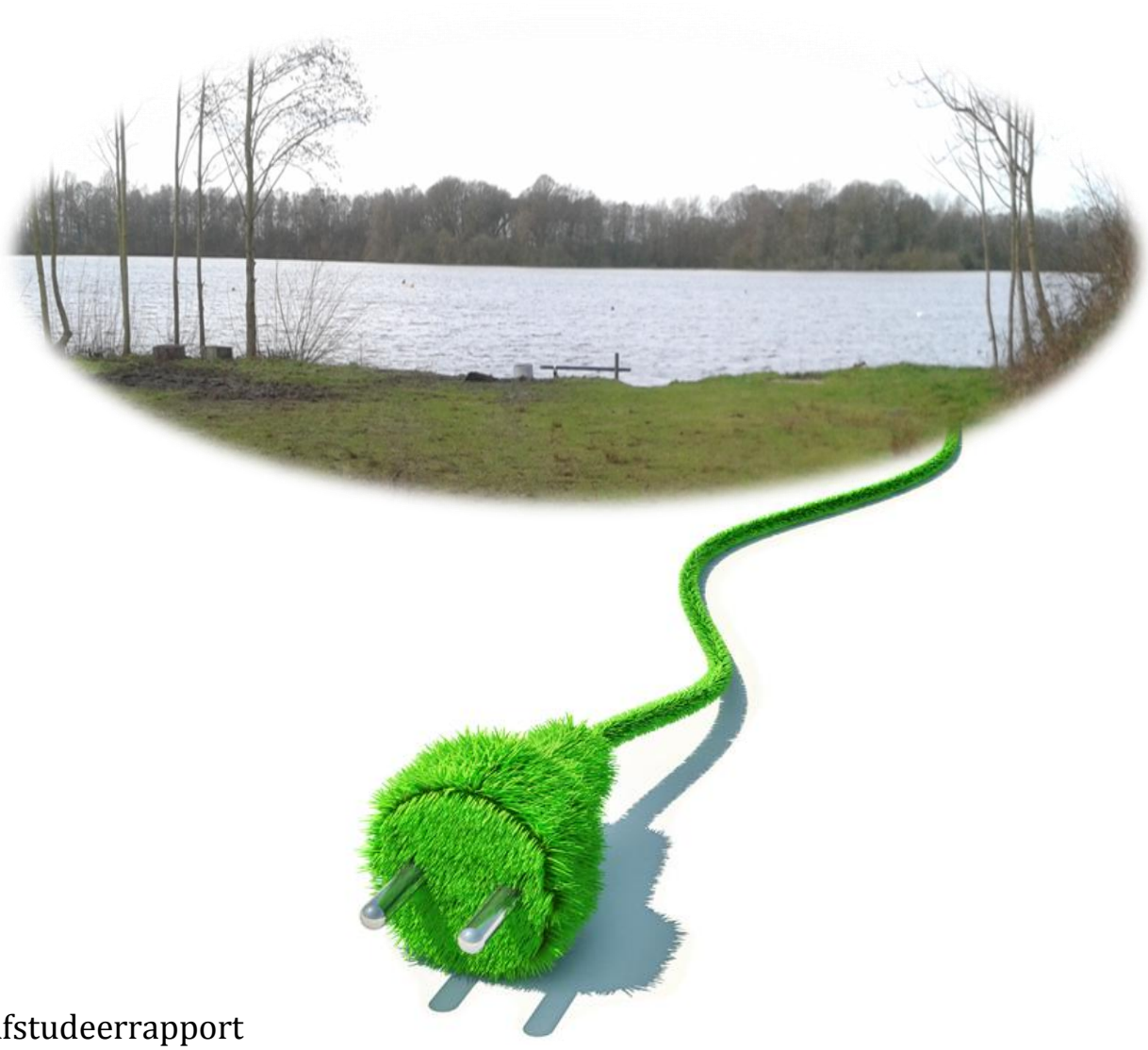
Lake Source Cooling

Koudewinning uit de Leemslagenplas



Afstudeerrapport

4-6-2015

Van Hall Larenstein

R. Cordova Middelbrink

Colofon

Titel:
Lake Source Cooling Leemslagenplas

Auteur:
Rutger Cordova Middelbrink

Document:
Eindscriptie

Onderwijsinstelling:
Van Hall Lareinstein

Begeleiders:
Bertus Welzen (Van Hall Larenstein)
Hans Wiggers (NTP-Groep Enschede)

Datum:
4 juni 2015

Inhoud

Colofon 3
Samenvatting 6
1 Inleiding 7
1.1 Aanleiding 7
1.2 Probleembeschrijving 7
1.3 Methode 8
1.4 Leeswijzer 8
2 Lake Source Cooling 9
2.1 Inleiding 9
2.2 Werkingsprincipe 9
2.3 De casus 9
2.4 Opbouw van waterlichaam 10
2.4.1 Stratificatie 10
2.4.2 Mengperiode 12
2.4.3 Spronglaag 12
2.5 Energie capaciteit 14
3 Milieu en beleid 19
3.1 Zuurstof 19
3.2 Fosfaat 20
3.3 Temperatuur 20
3.4 Flora en fauna 21
3.5 Vergunning 22
4 Pompinstallatie 24
4.1 Inleiding 24
4.2 Energievraag 24
4.3.1 Drukverlies appendages 29
4.4 Leidingtracé 30
4.4.1 Kanaal 32
4.5 Pompen 33
4.6 Aanzuigfilter 36
4.7 Calamiteiten 37

4.8 Lozingspunt 39
5 Conclusie en aanbevelingen 43
6 Bibliografie 45
7 Bijlagen 47
Bijlage 1 Situatiekaart 47
Bijlage 2 Temperatuurverloop Meer het Mondsee 48
Bijlage 3 Dieptekaart 49
Bijlage 4 Resultaat meting 2014 50
Bijlage 5 Resultaat metingen 2002 51
Bijlage 6 Energievraag ZGT 52
Bijlage 7 Drukverlies leidingen (Grafieken en rekentabel) 53
Bijlage 8 Pompcapaciteit berekening 54
Bijlage 9 Warmtevracht & Energiecapaciteit berekening 55
Bijlage 10 Cascade berekening 56
Bijlage 11 Vergelijking kosten Grondwerkers 57
Bijlage 12 Boorprofiel Twentekanaal 58
Bijlage 13 Varianten Leidingtracé 59
Bijlage 14 Lozingsmogelijkheden 60
Bijlage 15 Zuurstofverzadigingspercentages en - concentraties 61

Samenvatting

Lake Source Cooling (LSC) is een relatief nieuwe methode om op een duurzame manier groene energie te winnen. Bij LSC wordt koud water uit een plas of meer op grote diepte onttrokken en via een warmtewisselaar wordt koude overgebracht naar een ander leidingnetwerk. Het onttrokken water wordt vervolgens in dezelfde plas aan het oppervlak geloosd.
Een zandwinput, de Leemslagenplas in Almelo, zal vanaf dit jaar gaan fungeren als een energiebron door middel van LSC om het ziekenhuis van Almelo (Ziekenhuis Groep Twente) te voorzien van koelbehoefte.
Diep stilstaande oppervlaktewateren zijn, buiten het winterseizoen om, opgebouwd uit drie lagen waarvan in de onderste een constante lage watertemperatuur heerst. De inhoud van deze onderste laag van de Leemslagenplas bedraagt circa 1,5 miljoen kubieke meters. Omgerekend naar joules is deze hoeveelheid 37,62 Terra Joule, oftewel 10.450 MW. Het ZGT verbruikt jaarlijks een vermogen van 2700 MW en daarmee voldoet de Leemslagenplas ruim aan de vraag.
Tijdens de winterperiode verdwijnen de lagen en ontstaat er een homogene situatie waarbij het verschil in zuurstofconcentraties en watertemperaturen in de gehele plas klein is. Dit verschijnsel wordt de mengperiode genoemd en kan worden beschouwd als een oplaadfase aan koude.
Tijdens stratificatie is er een verschil in de samenstelling van de waterlagen. Als gevolg van LSC worden de ondiepe en diepe lagen met elkaar gemengd waardoor de samenstelling van de ondiepe laag kan veranderen. Het zuurstofarme water uit de onderste laag kan tot problemen leiden wanneer deze in dezelfde status in de bovenste laag wordt geloosd waarvan de zuurstofconcentratie hoger ligt. Daarbij verandert de gemiddelde watertemperatuur in de plas ten gevolge van thermische verontreiniging.
Om de gevraagde hoeveelheid energie bij het ZGT te krijgen moet 80% van het jaar 44 m^3/uur koud water via een leiding met een diameter van 300 mm en een totale lengte van 4400 meter naar het ZGT verpompt worden. Tijdens piekmomenten kan dit oplopen naar 287 m^3/uur dat naar schatting 1% van het jaar voorkomt. Om dit mogelijk te maken is één kleine pomp met een capaciteit van 50 m^3/uur en drie grote pompen met een capaciteit van minimaal 150 m^3/uur nodig. De minimale vereiste werkdruk is 5 bar vanwege het totale drukverlies van 4,2 bar dat veroorzaakt wordt door de leidingweerstand en appendages.
Voordat het water de pompen bereikt passeert het eerst een aanzuigfilter die in het midden van de plas op 2 meter boven de bodem wordt bevestigd. Ter voorkoming van het opzuigen van vissen en (zwevend)materiaal zijn twee aanzuig openingen met een minimale diameter van 620 mm nodig om de aanzuigsnelheid beperkt te houden tot 0,2 m/s. Een zuigkorf helpt voorkomen dat materiaal de pomp(en) instroomt.
Voordat het zuurstofarme water terug de plas in stroomt dient het door middel van een cascade belucht te worden om de zuurstofconcentratie te verhogen en nadelige milieu effecten te voorkomen.
Door de heen- en retourleiding met elkaar te verbinden kunnen beide leidingen als wateraanvoerleiding fungeren in geval een leiding defect raakt. Vanwege het ontbreken van een retourleiding is een lozingsvoorziening voor het retourwater nodig. Een oplossing hiervoor is om een tweede retourleiding aan te sluiten die uitmondt in een sloot nabij het ziekenhuis, waar het retourwater tijdelijk in geloosd kan worden.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het kader van duurzame energiewinning zijn er in Nederland innovatieve ontwikkelingen gaande waarbij gebruik wordt gemaakt van koud water ten behoeve van koeling. Een inmiddels bekende techniek is warmte en koude opslag (WKO) waarbij grondwater het koel- of warmtemedium is. Een minder bekende techniek is LSC (Lake Source Cooling). Bij LSC wordt koud oppervlakte water uit plassen of meren op grote diepte onttrokken en door middel van een warmtewisselaar wordt koude overgebracht naar een ander leidingnetwerk.
Gemeente Almelo heeft in samenwerking met ZGT-Almelo (Ziekenhuis Groep Twente) een overeenkomst gesloten om door middel van LSC het ZGT te voorzien van koeling. Daarvoor wordt water onttrokken uit de Leemslagenplas die van oorsprong een zandwinplas is.
NTP-Groep Enschede heeft als externe partij de exploitatie en de daarbij behorende werkzaamheden op zich genomen. In Nederland is LSC een enkele keer toegepast en is er nog weinig ervaring met deze techniek. De Nederlandse overheid en de Europese Unie bieden daarom ondersteuning aan innovatieprojecten die bijdragen aan een koolstofarme economie door het verstrekken van subsidies indien aan bepaalde eisen wordt voldaan. Voor NTP is het de eerste keer dat het kennis maakt met LSC. De belangen van deze partijen hebben geleid tot het opzetten van een afstudeeronderzoek naar LSC.

1.2 Probleembeschrijving

Een deel van dit onderzoek is gericht op het bepalen van de energiecapaciteit van de Leemslagenplas en de risico's die LSC met zich mee brengt. In het overige deel van dit rapport zal een technisch ontwerp duidelijkheid moeten geven over het verplaatsen van deze energie naar de afnemer(s).
Daarvoor zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld.

Onderzoeksvraag:

Kan het ZGT door middel van LSC worden voorzien van koude?

De volgende deelvragen moeten antwoord geven op de hoofdvraag.

Deelvragen:

Wat is de beschikbare energiecapaciteit van de Leemslagenplas?

Wat zijn de aandachtspunten betreft het milieu en de regelgeving?

Hoe vindt het transport van energie plaats?

1.3 Methode

Om de energiecapaciteit te bepalen is onderzoek verricht naar het watersysteem van diep stilstaande oppervlaktewateren. Voor de energiecapaciteitsberekeningen zijn veel wetten uit de thermodynamica toegepast. Berekeningen met betrekking tot het technisch ontwerp zijn met behulp van formules uit de vloeistofmechanica tot stand gebracht.
Om inzicht te krijgen van wat de gevolgen kunnen zijn, is gekeken of er veranderingen in oppervlaktewateren zijn opgetreden waar LSC is toegepast.
Voor het wettelijk mogelijk maken van dit project is voor de vergunningaanvraag overleg gepleegd met het waterschap, Rijkswaterstaat en de gemeente Almelo.
Op de vraag hoe belanghebbenden kunnen worden voorzien van koelbehoefte, speelt het technische aspect een belangrijke rol. Door steeds meerdere varianten op te stellen en deze met elkaar te vergelijken is er een overzichtelijk beeld gecreëerd van de mogelijkheden waaruit een voorkeursvariant gekozen kan worden. De varianten zijn vaak intern bediscussieerd en in dit rapport opgenomen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de eerste deelvraag beantwoord. In dit hoofdstuk is een beschrijving van het watersysteem opgenomen en zijn de basisprincipes van LSC toegelicht.
Hoofdstuk 3 is gekoppeld aan de tweede deelvraag en beschrijft de mogelijke gevolgen van LSC en wat dit voor de Leemslagenplas betekent. Een klein onderdeel van dit hoofdstuk heeft betrekking tot de vergunningaanvraag van de activiteiten die nodig zijn.
In hoofdstuk 4 is het resultaat van de technische haalbaarheid beschreven. Daarin wordt duidelijk gemaakt hoe het transport van energie plaats kan vinden.

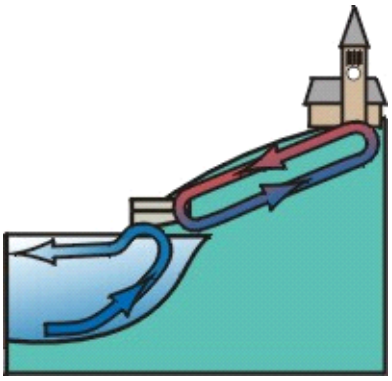
2 Lake Source Cooling

2.1 Inleiding

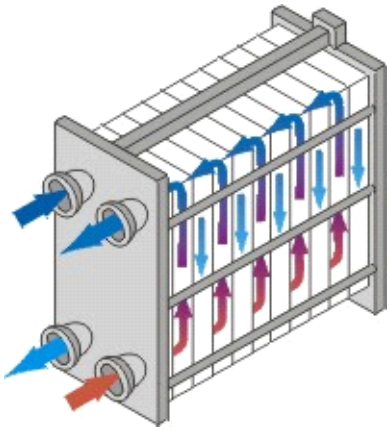
Om te bepalen hoeveel energie de Leemslagenplas bergt is het van belang het watersysteem te begrijpen en te ondervinden waar de energiecapaciteit afhankelijk van is. Daarom wordt in dit hoofdstuk de techniek nader toegelicht en dieper ingegaan op de natuurlijke processen van het watersysteem waaruit vervolgens een energieberekening is gemaakt. Op basis van deze informatie is bepaald hoeveel water onttrokken moet worden om het ZGT te voorzien van hun energievraag en hoeveel energie er daarna in de plas over blijft.

2.2 Werkingsprincipe

De werkingsprincipe van LSC is eenvoudig. Oppervlaktewateren beschikken vanaf bepaalde dieptes over een koude onderlaag. Uit deze koude onderlaag wordt water onttrokken door middel van een groot aanzuigfilter. Vervolgens zal het koude water via leidingen worden getransporteerd naar een warmtewisselaar. De warmtewisselaar zorgt ervoor dat het koude water het warmere water van een ander gesloten systeem verkoeld, zodat deze gebruikt kan worden voor het koelen van machines en/of ruimtes. Het onttrokken oppervlakte water stroomt in dit geval na deze handeling verwarmd terug naar de Leemslagenplas. In feite is er sprake van twee leidingnetwerken. Eén netwerk waarbij koud water onttrokken wordt en verwarmd retour gaat naar de Leemslagenplas. In het ander netwerk wordt warm water verkoeld en circuleert het door het ziekenhuis. Dit netwerk is in beheer van het ZGT en valt onder hun verantwoording. (University C. , z.d.)



Figuur 1 - Basisprincipe LSC

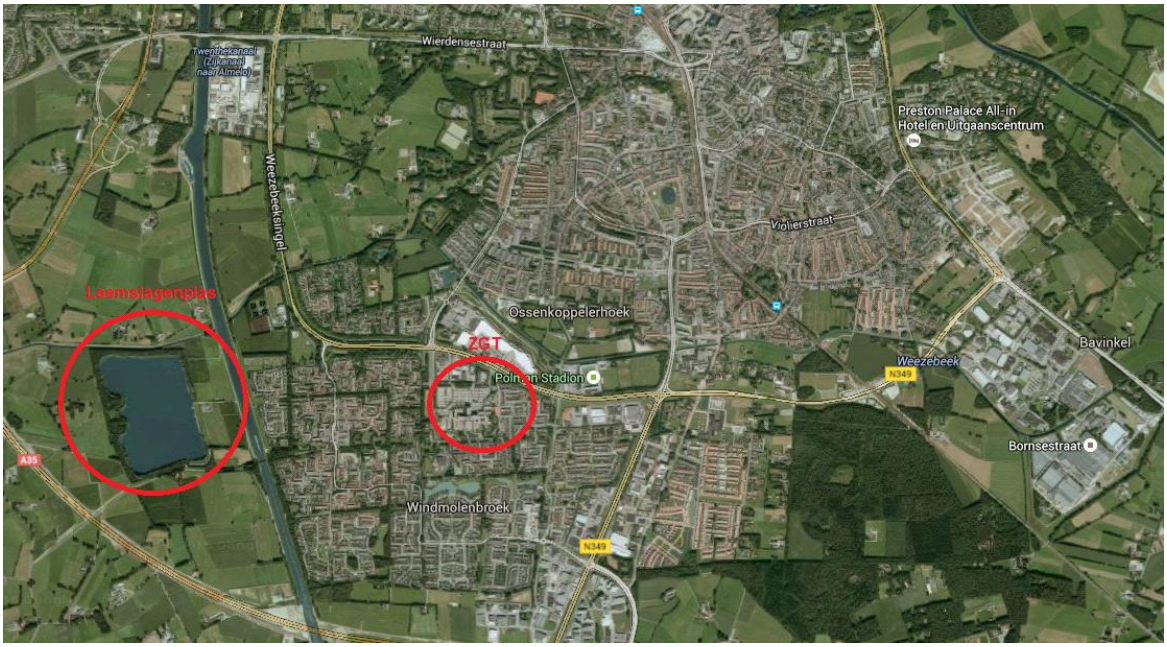


Figuur 2 - Een warmtewisselaar

2.3 De casus

Voor dit project is de Leemslagenplas in Almelo de energiebron. De Leemslagenplas is van oorsprong een zandwingebied die zich na gebruik heeft gevuld met grondwater. De plas heeft een oppervlakte van circa 264.000 m^2 en een diepte van circa 35 meter. Dit betekent dat de plas ongeveer 4.767.997 m^3 water bergt.

De afnemer is het ziekenhuis van Almelo die onderdeel uitmaakt van Ziekenhuis Groep Twente (ZGT). Het energieverbruik aan koude van het ZGT is jaarlijks 2700 MW. Tijdens piekmomenten kan de energievraag oplopen tot 2 MW.
Het koude water dat onttrokken wordt, zal via een ondergrondse leiding naar het ziekenhuis stromen waar ook de warmtewisseling plaats zal vinden. Verder heeft de plas recreatieve doeleinden voor een lokale duikersvereniging.



Figuur 3 - Locatie van Leemslagenplas en het ZGT

2.4 Opbouw van waterlichaam

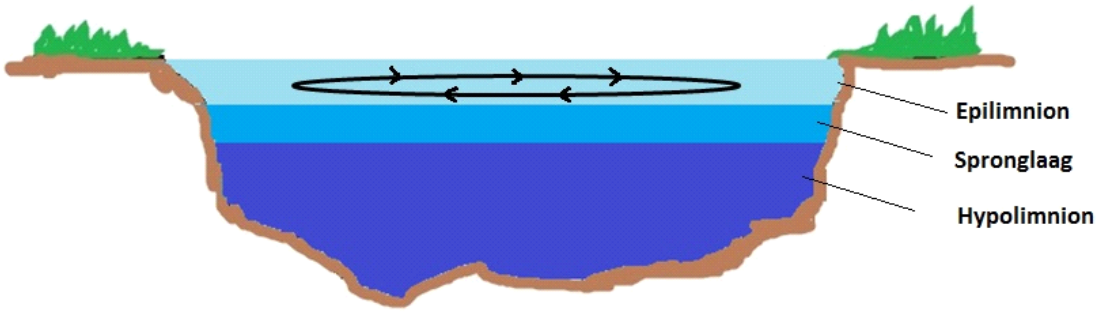
In eerste instantie is het van belang te ondervinden waar de capaciteit aan koude afhankelijk van is. Daarvoor is er gekeken naar de opbouw en het watersysteem van oppervlaktewateren om vervolgens te kunnen bepalen hoeveel oppervlaktewater onttrokken kan worden.

2.4.1 Stratificatie

Bij een bezoek aan een recreatieplas in de zomerperiode voelt het water in ondiepe gedeeltes en aan het oppervlak warm aan. Tijdens een duik in het diepe is op enkele meters een duidelijke daling van temperatuur waarneembaar. De overgang van warm naar koud betekent de overgang naar een andere waterlaag waaruit een plas is opgebouwd. In totaal bestaan diepe plassen uit 3 lagen die buiten het winterseizoen om gevormd worden. De periode waarin deze lagen zich vormen heet de stratificatieperiode. Tijdens de stratificatieperiode is de plas opgebouwd uit een warme bovenlaag, een koude onderlaag en een tussenlaag die als overgangs-laag kan worden beschouwd. De duur van deze periode en dikte van de lagen is afhankelijk van de oppervlakte van het waterlichaam en het omgevingsklimaat. Het omgevingsklimaat is seizoensgebonden waardoor de situatie in de plas altijd veranderd. In het voorjaar wanneer de omgevingstemperatuur toeneemt en de windsnelheid afneemt, stabiliseert het oppervlaktewater en start het stratificatieproces. In dit proces wordt het water aan het

oppervlak verwarmd door de toenemende omgevingstemperatuur. Bekend is dat als water warmer wordt, het een kleinere dichtheid aanneemt en daardoor lichter is dan kouder water. Daardoor blijft warm water bovenop koud water liggen. Naarmate het warmer wordt zal na verloop van tijd de warme laag steeds groter worden totdat er een punt wordt bereikt waar de zoninstraling geen invloed meer op de diepte heeft en er een sterk temperatuurverschil is waar te nemen. Nabij dit punt vindt de overgang plaats van de warme laag, het epilimnion, naar een koudere laag die het metalimnion, en ook de spronglaag wordt genoemd.
Het epilimnion is onder invloed van de atmosfeer, waardoor bij een toenemende omgevingstemperatuur ook de watertemperatuur geleidelijk zal toenemen. Omdat zonlicht in deze laag doordringt kan er fotosynthese plaatsvinden en zodoende ook zuurstofproductie. Ook de oppervlakte van het waterlichaam is een belangrijke factor voor de dikte van het epilimnion. Hoe groter de oppervlakte, des te hoger de windsnelheden en onrustiger het water. Daardoor kunnen grote stromingen ontstaan waardoor de laag uitzet. Wanneer windsnelheden afnemen klinkt de laag weer iets in. Deze theorie kan worden bevestigd door formule $Z_{epi} = 4{,}6 * A^{0.205}$ (Boehrer, 2008), waarin A de oppervlakte van het waterlichaam in km^2 is. Dit is een gemiddelde berekening omdat de dikte van deze laag seizoensgebonden is. Deze formule toont aan dat de oppervlakte een bepalende factor is voor de dikte van de laag. Voor de Leemslagenplas is de dikte van het epilimnion volgens de formule ongeveer $4{,}6 \times 0{,}264^{0.205} = 3{,}5$ meter (Eary, 2009) (Boehrer, 2008).

Het metalimnion, oftewel de spronglaag, is de tweede en middelste waterlaag tijdens de stratificatieperiode. Ook de dikte en eigenschappen van deze zone is erg afhankelijk van de tijd van het jaar (zie paragraaf 3.2.4). Een eigenschap van deze laag is de sterke temperatuurgradiënt van de bovenste naar de onderste laag.



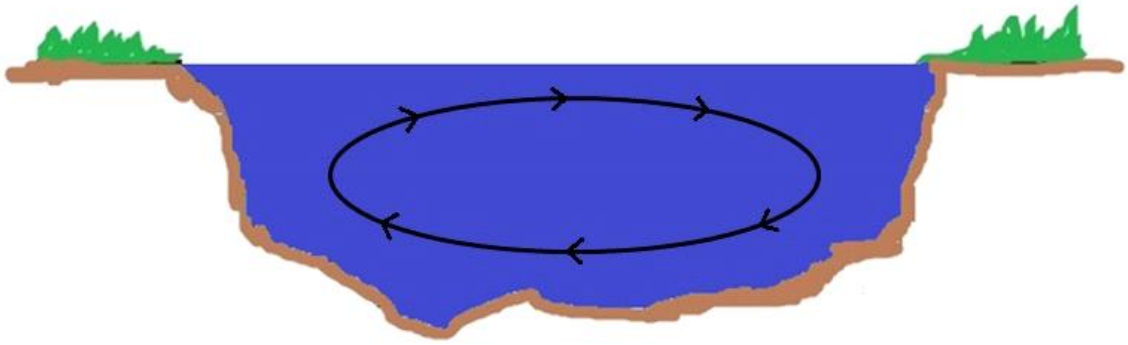
Figuur 4 – Stratificatie van een plas

De onderste laag, het hypolimnion, is een stabiele koude laag. De dichtheid, oftewel het gewicht van water, is het grootst bij 4 ^{0}C. Dit betekent dat zoetwater op de bodem nooit kouder kan zijn dan 4 ^{0}C. Door de aanwezigheid van de spronglaag zal zwaarder water van het hypolimnion niet gaan mengen met het lichtere water van het epilimnion. Dit houdt in dat het koude zware water onder de spronglaag blijft. Doordat de lagen niet met elkaar mengen, is het zuurstofgehalte in het hypolimnion laag omdat er wegens gebrek aan zonlicht geen fotosynthese en zuurstofwisseling met de atmosfeer kan plaatsvinden. Het weinige zuurstof in deze laag wordt gebruikt om zinkend organisch materiaal van de bovenste lagen af te breken. Het hypolimnion kan ook gedefinieerd worden als een zuurstofarme waterlaag met een

constante temperatuur van rond de 4 ^{0}C. De hoeveelheid aan koud water is afhankelijk van de inhoud van de plas en de dikte van de lagen.

2.4.2 Mengperiode

Niet het gehele jaar is er sprake van stratificatie. In het najaar neemt de omgevingstemperatuur af en de windsnelheid toe. Hierdoor zal de temperatuur van het water in het epilimnion ook afnemen waardoor de dichtheid van het water groter word. Het verschil in temperatuur en dichtheid tussen de lagen wordt steeds kleiner en door de hogere windsnelheid neemt de circulatie toe waardoor de lagen onderling gaan mengen. Op dat moment is er een homogene situatie gecreëerd. Het water circuleert in de gehele plas en de waterlagen zijn verdwenen. Overal heersen lage temperaturen en dezelfde zuurstofconcentraties. Wateronttrekkingen kunnen blijven plaatsvinden omdat de plas in feite één grote hypolimnionlaag is (Boehrer, 2008).

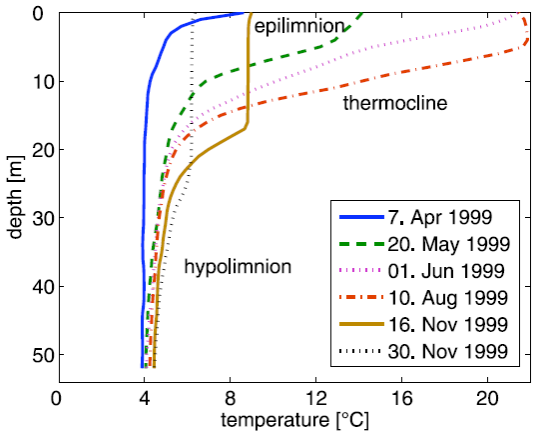


Figuur 5 - Homogene situatie tijdens mengperiode

De mengperiode houdt zich in Nederland de gehele winter aan. Als door winterse omstandigheden ijsvorming optreed, zal er een omgekeerde gelaagdheid kunnen optreden. Dit verschijnsel wordt winterstagnatie genoemd. Water onder het ijs zal net boven het vriespunt liggen. Naarmate de diepte toeneemt zal ook de watertemperatuur toenemen tot 4 ^{0}C omdat het dan weer zijn grootste dichtheid heeft bereikt. De omgevingstemperatuur en windsnelheid zijn daarom de belangrijke factoren voor de duur van de mengperiode.
Daarna breekt opnieuw de lente aan en zal het water aan het oppervlak worden verwarmd. De temperatuur blijft oplopen en het verschil in dichtheid van het water wordt weer groter waardoor het stratificatieproces opnieuw zal beginnen (university, z.d.) (Boehrer, 2008).

2.4.3 Spronglaag

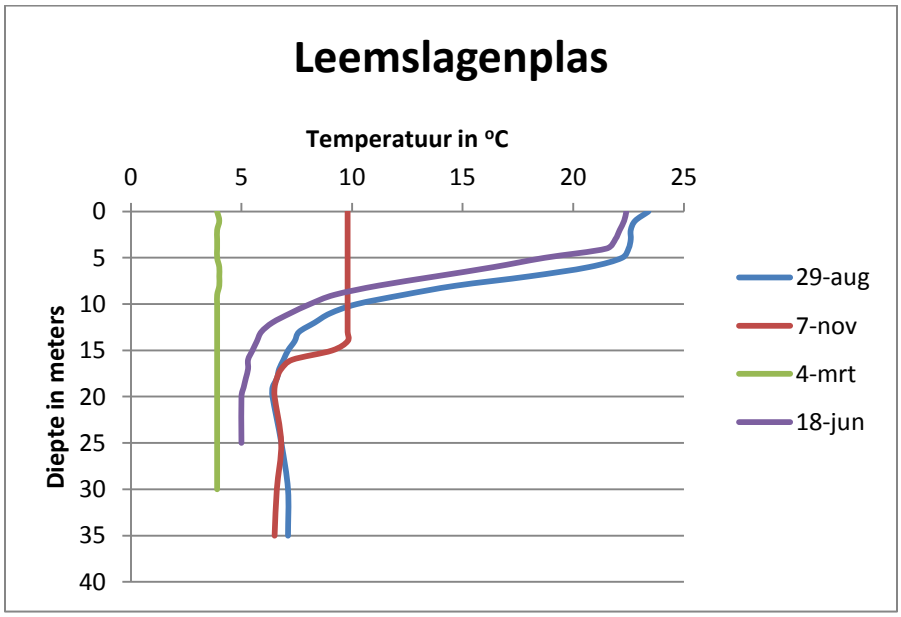
De dikte van de waterlagen kan goed benaderd worden door in een grafiek de watertemperatuur tegen de diepte uit te zetten. De sterke temperatuurgradiënt geeft de dikte van de spronglaag aan. Grafiek 1 laat de temperatuurgradiënt zien tijdens de stratificatieperiode van een meer in Oostenrijk.



Grafiek 1 - Temperatuurverloop in Meer de Mondsee (Carlson, 1996)

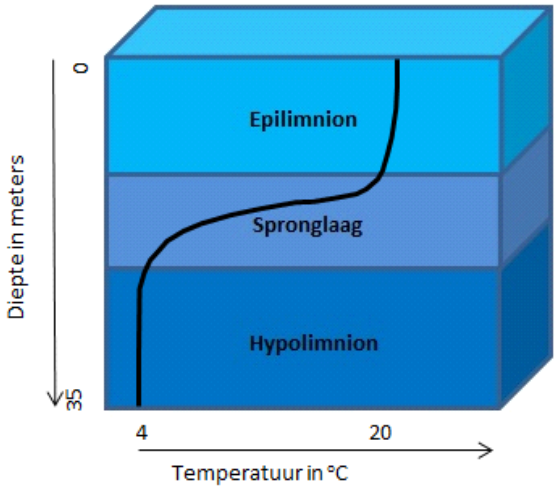
De grafiek laat zien dat vlak na de mengperiode (7 april) er nog geen duidelijke spronglaag is waar te nemen. Het water aan het oppervlak wordt verwarmd maar er heeft nog geen gelaagdheid opgetreden. In mei begint de spronglaag een duidelijkere vorm aan te nemen. In juni en augustus is het water aan het oppervlak tot enkele meters diep verwarmd. Daarna neemt in de spronglaag de temperatuur over een afstand van circa 10 meter snel af. Rond deze periode is de verandering in temperatuur in de spronglaag het grootst. Aan het einde van de stratificatie periode (16 november) is het temperatuurverschil tussen het epilimnion en hypolimnion kleiner. Twee weken later zijn de lagen bijna verdwenen. (Carlson, 1996) Met een temperatuurmeting zoals in grafiek 1 is weergegeven kan de dikte van de lagen worden vastgesteld .

Een zelfde temperatuurmeting is in 2002 in de Leemslagenplas verricht(bijlage 5). De gegevens daarvan zijn uitgezet in een grafiek.



Grafiek 2 - Temperatuurverloop Leemslagenplas

Wat opgemerkt kan worden is dat de de grafiek van de Leemslagenplas veel gelijkenissen vertoond met die van het Meer de Mondsee. In beide gevallen eindigt de spronglaag op een diepte van circa 15 meter. Ook de trend in beide grafieken komt overeen lettend op de datum wanneer deze gemeten is.

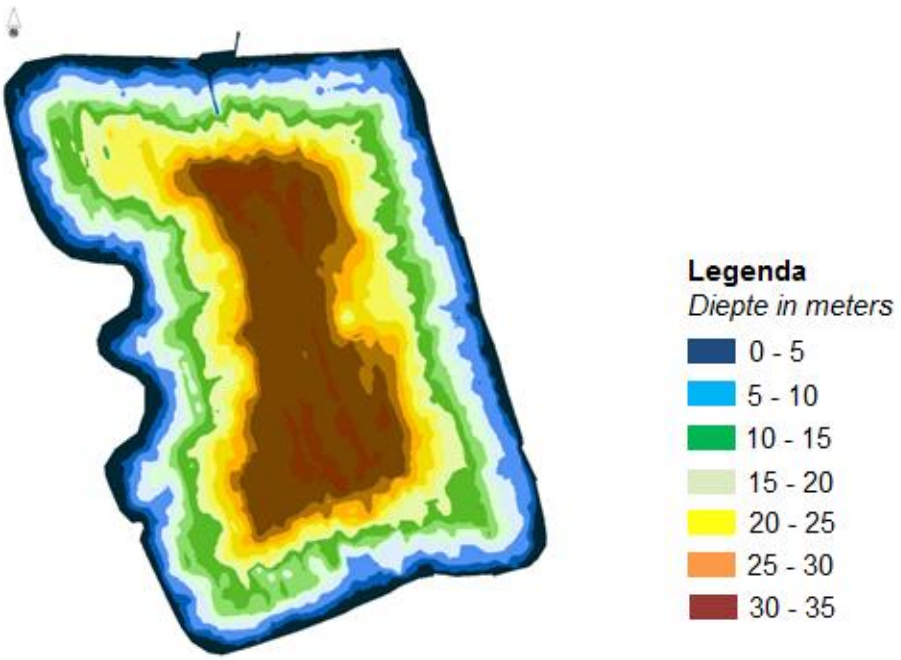


Figuur 6 - Temperatuurverloop tijdens stratificatie

2.5 Energie capaciteit

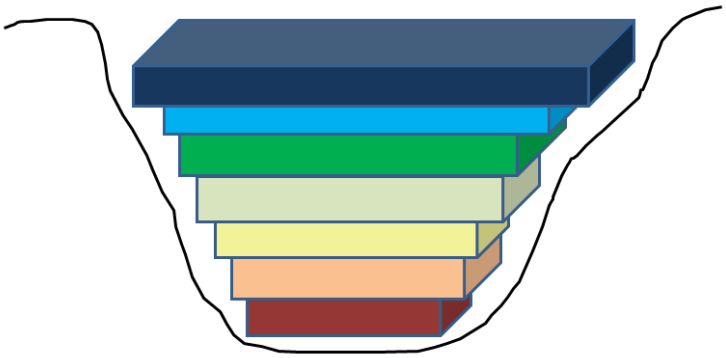
De beschikbare hoeveelheid koude in het hypolimnion is afhankelijk van de inhoud van deze laag. Om de beschikbare capaciteit te bepalen zal de temperatuurmeting plaats moeten vinden als het hypolimnion het kleinst is. Dit is na de zomer wanneer de dikte van de spronglaag en epilimnion het grootst zijn. Tevens hangt de inhoud ook af van de grootte van het wateroppervlak. Hoe groter het oppervlak en dieper de plas, hoe meer koude beschikbaar is.

Om vast te stellen of de Leemslagenplas geschikt is voor LSC, is eerst onderzocht wat de energiecapaciteit van de plas is. Vervolgens is bepaald of deze hoeveelheid voldoet aan de energievraag van de afnemer.
De inhoud van de plas is te bepalen door de oppervlakte, diepte, profiel en de temperatuurverloop van de plas in kaart te brengen. In het verleden is de diepte van de plas onderzocht door RoyalHashkoning waarvan het resultaat in figuur 7 is weergegeven.



Figuur 7 - Dieptekaart van Leemslagenplas (Haskoning, 2002)

De zandwinningsplas loopt stijl af en bereikt uiteindelijk een diepte van circa 35 meter. Door middel van deze kaart kan de opbouw van de plas over een bepaalde diepte in kubieke meters uitgedrukt worden. De inhoud van de plas kan vervolgens benaderd worden als de oppervlakte en breedte van elke laag bekend is zoals in figuur 8 is weergegeven.



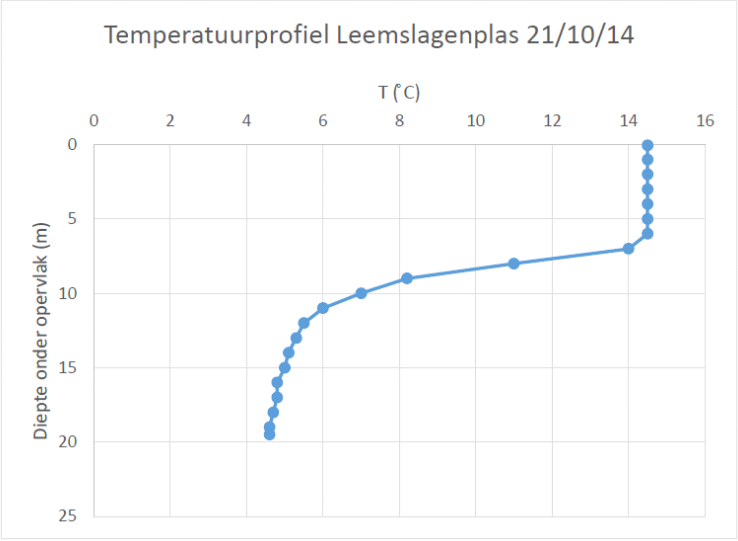
Figuur 8 - Voorbeeld van laagopbouw

Voor de Leemslagenplas is de inhoud per laagdikte van 5 meter, weergeven in tabel 1.

Diepte (m)	Inhoud (m^3)
0-5	1.299.039
5-10	1.086.310
10-15	871.960
15-20	648.483
20-25	452.309
25-30	315.522
30-35	94.373
Totaal	**4.767.997**

Tabel 1 - Inhoud per laag van Leemslagenplas (Haskoning, 2002)

Nu bekend is hoe de plas is opgebouwd komt de volgende stap, namelijk het bepalen van de dikte van het hypolimnion. Eind oktober, in de periode dat het hypolimnion het kleinst is, is een temperatuurmeting verricht waarvan de resultaten in grafiek 3 te zien zijn.



Grafiek 3 - Verloop van temperatuur in de Leemslagenplas (Wit, Temperatuurverloop, 2014)

De grafiek laat zien dat tot 7 meter diepte de temperatuur constant is. Daaruit is op te maken dat na 7 meter het epilimnion overgaat naar de spronglaag. Vervolgens neemt in de spronglaag de temperatuur af van 14,5 ^{0}C naar 4,5 ^{0}C af, op een afstand van circa 6 meter. Daarna is de watertemperatuur stabiel en ligt deze tussen de 4 en 4,5 ^{0}C. Dit betekent dat het hypolimnion vanaf circa 13 meter begint en een dikte heeft van ruim 20 meter. Als in tabel 1 de inhoud vanaf 15 tot 35 meter bij elkaar op wordt geteld komt dit tot een totale hoeveelheid van 1.510.687 m^3. Dit is de hoeveelheid aan koud water die de Leemslagenplas bergt.

Nu de inhoud van het hypolimnion bekend is, kan deze hoeveelheid worden omgerekend naar energie. De eenheid van energie wordt uitgedrukt in Joules en Watt. De capaciteit aan joules uit koude is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen vraag en aanbod (ΔT). Dit komt omdat voor elke gram water dat 1 graad opgewarmd wordt, 1 joule nodig is. Het verschil in temperatuur (ΔT) is de bepalende factor voor de energiecapaciteit van koude uit oppervlaktewater. Dit is in de volgende formule weergegeven .

$$Joules = massa * \Delta T * c \text{ (Velde, 2009)}$$

Massa= gewicht water (1000 kg/m^3)
ΔT = Temperatuurverschil
c = Soortelijke warmte water (4186 J/kg/C^o)

De massa kan vervolgens weer omgerekend worden naar kubieke meters (1000 kg. water is 1 m^3).
De ΔT is het verschil in temperatuur tussen het water voordat het de warmtewisselaar ingaat en de temperatuur die het aanneemt bij het verlaten van de warmtewisselaar. Contractueel is vastgesteld dat de temperatuur van het aangeleverde water maximaal 8 ^{0}C mag zijn en deze opgewarmd wordt tot 14 ^{0}C. De ΔT is dan 6 C^0. Nu kan de formule ingevuld worden;

$$Joules = massa * \Delta T * c = 1{,}5 * 10^{-9} * 6 * 4186 = 3{,}76 * 10^{13}\ Joule$$

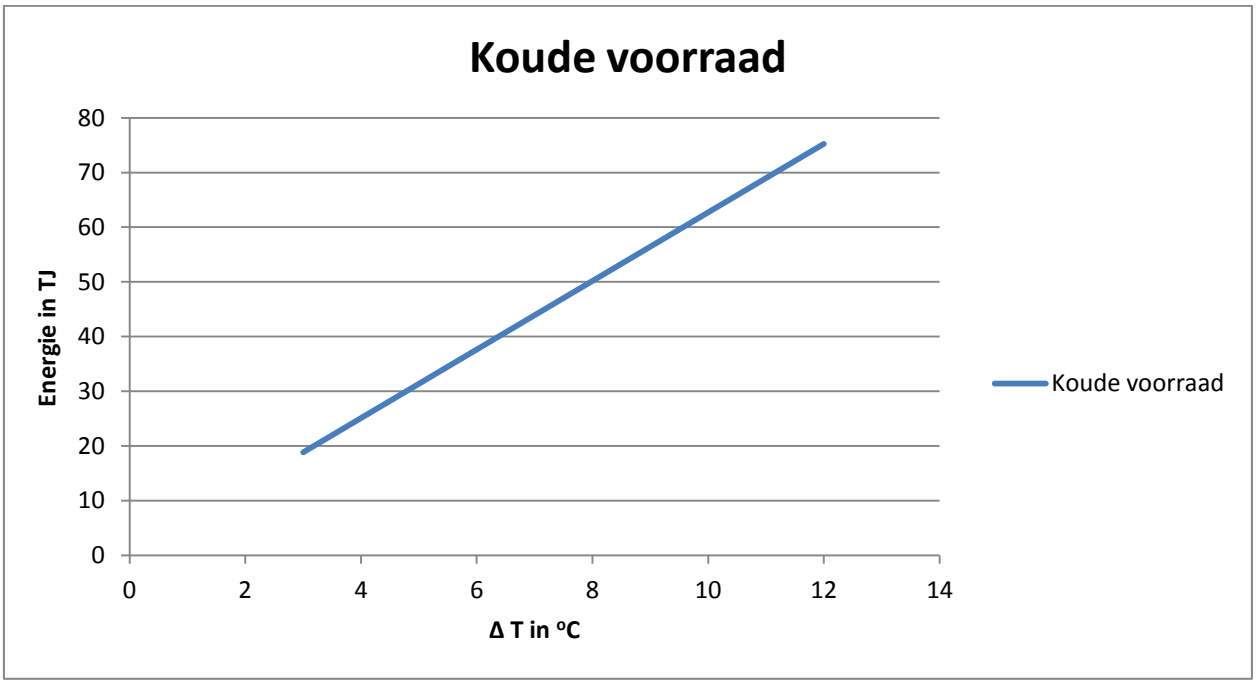
*1 Terrajoule (TJ) = 1*10^{13} joule*

Bij een ΔT van 6 ^{0}C is de energiecapaciteit in de plas 37,62 TJ. In de praktijk ligt dit aantal hoger omdat er met een hypolimnion laagdikte van 20 meter is gerekend, terwijl deze in werkelijkheid iets dikker is. De dikte van de laag is om veiligheidsredenen naar beneden afgerond. Ook is de temperatuur van het aangeleverde water mogelijk lager dan 8 ^{0}C. De onttrekkingstemperatuur is namelijk 4,5 ^{0}C en de verwachting is dat er maar een paar graden Celsius verloren gaat tijdens transport. Stel dat er met een ander ΔT word gerekend is in tabel 2 weergegeven wat dit voor de energiecapaciteit betekent.

ΔT	TJ	MW
4	25,08	6967
6	37,62	10.450
9	56,43	15.675
10	62,7	17.417

Tabel 2 - ΔT uitgezet tegen MW

Hoe groter de ΔT hoe meer energie gewonnen kan worden. Stel dat er door transport 1^{0}C (ΔT9) verloren gaat, dan bergt de plas 56,43 TJ. Het ZGT vraagt jaarlijks een vermogen van 2700 MW. De plas heeft bij een ΔT 6 een energiecapaciteit van 10.450 MW. Het aanbod voldoet ruim aan de vraag.
In de grafiek is de ΔT uitgezet tegen de hoeveelheid energie.



Grafiek 4 - ΔT uitgezet tegen Terra Joule

Door de formule anders op te stellen kan worden berekend hoeveel water nodig is om aan een bepaalde energievraag te voldoen. Eerder is aangegeven dat het ZGT een jaarlijkse vraag aan vermogen van 2700 MW heeft dat overeen komt met 9,72 * 10^{12} joule (2700*3,6*10^{9}).

$$Massa = \frac{\frac{Joules}{c}}{\Delta T} = \frac{\frac{3{,}6 * 10^{9}}{4186}}{6} = 387.004.300\ kg\ water$$

*1 Joule =1 MWh * 3.600.000*

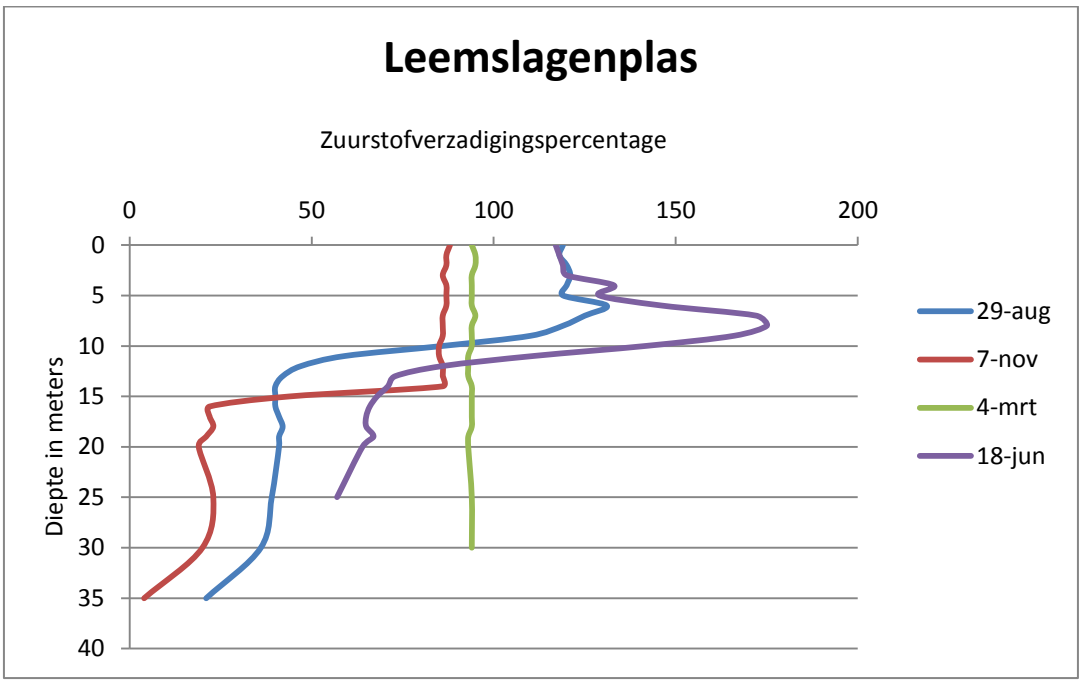
Door deze hoeveelheid te delen door 1000 resulteert dit in de hoeveelheid m^3 aan water.
Er is 387.004,3 m^3 water nodig om aan de jaarlijkse vraag aan vermogen van het ZGT te voldoen. De beschikbare hoeveelheid water in het hypolimnion is 1.5 miljoen m^3. De vraag van het ZGT bedraagt 25% van de totale energiecapaciteit van de Leemslagenplas.

3 Milieu en beleid

Bekend is nu dat er voldoende koude in de plas aanwezig is. De volgende vraag is hoeveel daarvan beschikbaar kan worden gesteld rekening houdend met veiligheidsmarges, vergunningen en mogelijke gevolgen voor het milieu. Omdat water uit de onderste laag in de bovenste laag geloosd wordt is het van belang deze waterlagen met elkaar te vergelijken om zo vast te stellen wat het gevolg kan zijn.

3.1 Zuurstof

Zoals eerder is vermeld is het zuurstofgehalte in het hyolimnion tijdens de stratificatieperiode erg laag in vergelijking met die van het epilimnion. Tijdens de stratificatieperiode ligt op 30 meter diepte het zuurstofverzadigingspercentage tussen de 5 en 40 procent (Wit, Meting, 2014). Rond dezelfde periode is dit op 2 meter diepte circa 120 procent. Om die reden zijn er nauwelijks levende organismen, waaronder vissen, in het hypolimnion te vinden tijdens de stratificatieperiode. Tijdens de mengperiode is dit anders. Door de homogene situatie is in de gehele plas zuurstof aanwezig, maar is het zuurstofgehalte op de bodem lager dan aan het oppervlak. Overigens is het zuurstofgehalte hoog genoeg voor vissen om tijdens de winter in de diepere zones te overwinteren. (Waterwereld, z.d.)



Grafiek 5 - Zuurstofverzadigingspercentage Leemslagenplas

De theorie dat koud water meer zuurstof opneemt dan warm water kan door de gemeten waarden niet worden bevestigd. De meetresultaten tonen aan dat warm water een hoger zuurstofverzadigingspercentage heeft dan koud water(zie bijlage 5).
Door LSC wordt tijdens de stratificatieperiode koud en zuurstofarm water uit het hypolimnion onttrokken en in het epilimnion geloosd. Hierdoor zal het zuurstofgehalte in het epilimnion omlaag kunnen gaan. De waterkwaliteit wordt daardoor negatief beïnvloed wat niet wenselijk is voor de flora en fauna. Een oplossing voor dit probleem is het voorkomen dat het zuurstofarme water in die status in het

epilimnion wordt geloosd. Doordat de plas tijdens de mengperiode homogeen is, zal het effect van de onttrekking en lozing in de winter weinig invloed hebben op het zuurstofgehalte in het waterlichaam (Carlson, 1996) (Osmond, 1995).

3.2 Fosfaat

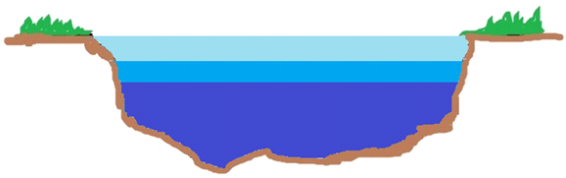
Een bekend probleem in oppervlaktewateren is de aanwezigheid van fosfaten. Fosfaten leiden tot eutrofiering met algenbloei als resultaat en achteruitgang van de waterkwaliteit. Echter wordt er gesuggereerd dat Lake Source Cooling bijdraagt aan algenbloei door de thermische verontreiniging of/en door lozing van zuurstofarm water in de bovenlaag. Het Ouderkerkerplas in Amsterdam is daar een voorbeeld van. Deze plas is gebruikt voor LSC en heeft te maken met een fosfaatrijke bodem en hoge concentraties aan fosfaat in het hypolimnion tijdens het groeiseizoen. Mogelijke oorzaak van dit probleem is dat in het verleden fosfaatrijke grond in de plas is gestort. Als gevolg van LSC wordt het fosfaatrijke water na de warmtewisseling in het epilimnion geloosd en leidt dit tot algenbloei aan het oppervlak (Smolders, 2011).
Er zijn ook voorbeelden waar dit probleem zich niet voordoet. Het Eesermeer in Steenwijk is ook gebruikt voor koudewinning. Uit metingen is gebleken dat het fosfaatgehalte in het hypolimnion onder de detectiegrens lag en dat er na het toepassen van LSC geen veranderingen zijn opgetreden (Wit, Lake Source Cooling Eesermeer, 2011).
Ook het Cayuga Lake in New York is gebruikt voor koudewinning. Uit monitoring data is gebleken dat ook hier geen toename aan fosfaatgehalte is geconstateerd (University C. , Table 2. Lake Water SPDES Data Reported, 2013).

Fosfaten zijn in te staat te adsorberen aan waterbodems waardoor fosfaten in de zomerperiode kan vrijkomen en worden nageleverd aan het oppervlaktewater. Deze fosfaten kunnen door verschillende processen vrijkomen, onder meer door fysische nalevering. Dit gebeurt wanneer de bodem geroerd of verstoord. Dit verschijnsel treedt vooral op in ondiepere wateren waar de bodem een grote invloed heeft op de binding van fosfaten (Bruijne, 2009) (Bakker, 2011) (Gerven, 2011).
Om te voorkomen dat een dergelijk probleem zich voordoet in de Leemslagenplas zijn er metingen verricht op 2 en 20 meter diepte. (Wit, Fosfaat metingen, 2015) Daaruit is gebleken dat de gehalte aan stikstof en fosfaat erg laag is waardoor er geen extra maatregelen nodig zijn met betrekking tot het lozen van het retourwater. In geval er fosfaten aan de bodem zijn gebonden zal voorkomen moeten worden dat de bodem verstoord wordt.

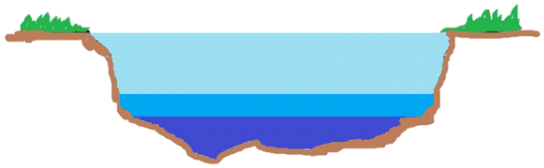
3.3 Temperatuur

Doordat koud water wordt onttrokken en warm wordt terug geloosd is het voor de hand liggend dat de gemiddelde watertemperatuur in de plas omhoog gaat. In welke mate dit gebeurt is afhankelijk van de omgevingstemperatuur en de warmtevracht.
Tijdens de mengperiode is de omgevings- en watertemperatuur laag. Als het warme water in de plas wordt geloosd zal deze door de kleinere dichtheid naar het oppervlak stromen waar het vervolgens wordt blootgesteld aan de omgevingstemperatuur die gedurende deze periode laag ligt. Hierdoor koelt het verwarmde water snel af en de verwachting is dat het geen blijvende gevolgen heeft voor de temperatuur van de plas.

Tijdens de stratificatie periode zal dit anders zijn. Door LSC zullen de stratificatielagen andere diktes aannemen. De dikte van het hypolimnion zal kleiner worden door het onttrekken van koud water. Omdat het verwarmde water in het epilimnion geloosd wordt zal deze laagdikte gaan toenemen waardoor je een verschuiving ziet van de waterlagen. Hierdoor zal de gemiddelde temperatuur tijdens de stratificatieperiode hoger liggen. Dit betekent niet dat in de zomerperiode het epilimnion warmer is dan tijdens natuurlijke omstandigheden. In de zomer ligt de watertemperatuur aan het oppervlak boven de 20 ^{0}C. De temperatuur van het retour water is 14^{0}C waardoor het water in het epilimnion eerder een lager gemiddelde temperatuur zal aannemen. Bij een grote warmtevracht kan het wel betekenen dat het epilimnion in het voorjaar eerder opgewarmd wordt waardoor het stratificatieproces zal worden versneld. Aan het eind van de stratificatieperiode is ten gevolge van LSC en de zomerperiode de dikte van het epilimnion het grootst. Mogelijk zullen vissen hierdoor zich op grotere diepten begeven (Carlson, 1996).



Figuur 9 - Gelaagdheid onder natuurlijke omstandigheden



Figuur 10 - Verandering gelaagdheid door LSC

Vervolgens begint de mengperiode die als een oplaadperiode kan worden beschouwd. Hoe lager de omgevingstemperatuur, hoe sneller de plas oplaad. Als door een zachte winter de omgevingstemperatuur niet voldoende daalt, zal het water niet kunnen afkoelen waardoor het dichtheidsverschil beperkt blijft en de menging niet (volledig) kan optreden. Indien de voorraad aan koude grotendeels verbruikt is door LSC en de omgevingstemperatuur laag blijft door een zeer zachte winter, zal het waterlichaam geen koude van 4^{0}C kunnen laden, maar zal het afkoelen tot een temperatuur dichtbij de gemiddelde omgevingstemperatuur. Dit betekent dat het opladen van koude sterk afhankelijk is van de temperaturen in de winter. Als er geen lage temperaturen worden bereikt, kan het water ook geen lage temperaturen aannemen. De kans dat deze situatie zich in Nederland voordoet is zeer klein. De gemiddelde temperatuur tijdens de zachtste winter ooit bedroeg 6,5 ^{0}C berekend over 3 maanden. Door de gemiddelde hoge windsnelheden tijdens de winterperiode ligt de gevoelstemperatuur al gauw rond het vriespunt waardoor het oppervlaktewater altijd in staat is koude te laden (Fink, 2014) (Department, 2007).

3.4 Flora en fauna

Gedurende stratificatieperiode zijn er in het hypolimnion weinig levende organismen aanwezig. Vissen zullen deze laag niet opzoeken omdat het zuurstofgehalte te laag is. Ook planten kunnen in deze laag niet groeien wegens een gebrek aan zonlicht. Het vergroten van het epilimnion zal geen gevolgen hebben voor de vissen, zolang het zuurstofgehalte in deze laag hetzelfde is als tijdens natuurlijke omstandigheden.

Mits er geen schadelijke stoffen uit het hypolimnion in het epilimnion worden geloosd, zoals fosfaten en stikstoffen, zullen er geen nadelige gevolgen plaatsvinden.
Tijdens de mengperiode is dit anders. Sommige vissen overwinteren in diepere gedeelten. Om te voorkomen dat vissen niet worden opgezogen door het aanzuigfilter, moet de aanzuigsnelheid niet hoger liggen dan 0,1 a 0,2 meter per seconde. Vissen zijn in staat om tegen deze snelheden in te zwemmen (University C. , Energy en sustainability, z.d.) (Vaate, 2008) (Spiegel, 1991).

3.5 Vergunning

In een vroeg stadium dient een vergunning te worden aangevraagd voor wateronttrekking en thermische verontreiniging. Tijdens de vergunningaanvraag is gebleken dat de Leemslagenplas niet onder de keur van het waterschap valt. De Leemslagenplas is in bezit van de gemeente, maar de waterkwaliteit is de verantwoording van het waterschap. Tegenwoordig zijn verschillende vergunningen samengevoegd tot twee vergunningen, namelijk de waterwetvergunning en omgevingsvergunning.
Wateronttrekkingen ten behoeve van koeling vinden meestal plaats uit kanaal- of rivierwater. In deze stromende waterlopen met geringe diepten is het watertemperatuurverschil binnen het waterlichaam beperkt.
Voor de vergunningaanvraag is de hoeveelheid warmtevracht van belang. De hoeveelheid warmtevracht bepaalt of voor de activiteit een vergunning nodig is. In artikel 3.6 van de wet staat beschreven dat het lozen van koelwater met een warmtevracht van maximaal 10 Kilojoule per seconde zonder een vergunning is toegestaan. Voor een warmtevracht van 50.000 kilojoule per seconde of meer moet een vergunning worden aangevraagd. Voor een warmtevracht die hier tussen in ligt is het indienen van een maatwerkbesluit voldoende.
Om de warmtevracht te bepalen moeten de volgende gegevens met elkaar worden vermenigvuldigd (Artikel 3.6, 2015);

- Het debiet in kubieke meter per seconde,
- het verschil tussen de lozingstemperatuur en de temperatuur van het ontvangende oppervlaktewaterlichaam in graden Celsius,
- de warmtecapaciteit van het koelwater hetgeen gelijk is aan 4186 Kilojoule per kubieke meter per graad temperatuursverhoging.

Het maximale debiet waar van uit wordt gegaan is 0,24 m^3/seconde. Dit wordt in hoofdstuk 2 verder toegelicht.
Punt 2 kan in deze situatie op verschillende manieren worden geïnterpreteerd. In andere situaties wordt koelwater meestal in kanaal- of rivierwater geloosd waar de watertemperaturen met toenemende diepte gelijk zijn vanwege het ontbreken van stratificatielagen. Daardoor maakt het niet uit op welke diepte het water onttrokken of geloosd wordt.
In geval van LSC ligt het complexer omdat het water onttrokken en geloosd wordt in een stilstaand waterlichaam waar er sprake is van gelaagdheid en verschillende temperaturen. Logisch zou zijn dat voor de vergunningaanvraag van deze activiteit de gemiddelde opwarming van de plas berekend moet worden. Met de drie bovengenoemde stappen wordt alleen de warmtevracht bepaald zonder te weten hoeveel de plas opwarmt. Het onttrokken water heeft altijd een temperatuur van circa 4 ^{0}C en wordt

vervolgens met 14 ^{0}C in het epilimnion geloosd. Voor de gemiddelde opwarming van de plas zal dan met een Δ10 ^{0}C gerekend moeten worden om vervolgens de gemiddelde temperatuur af- of toename van elk laag te bepalen.

In de regelgeving staat beschreven dat het verschil tussen de lozingstemperatuur en de temperatuur van het ontvangende waterlichaam als ΔT moet worden gehanteerd. De ΔT is dan sterk afhankelijk van het seizoen omdat de watertemperatuur in het epilimnion per seizoen erg varieert. Voor de vergunningaanvraag zal er dan moeten worden uitgegaan van de minst gunstige situatie waarbij ΔT het grootst is. Dit is wanneer de temperatuur in het epilimnion het hoogst of laagst is. Tijdens de winterperiode kan het water aan het oppervlak bevroren zijn (0^{0}C). In de zomer kan de temperatuur van het water aan het oppervlak oplopen tot 20^{0}C. Uitgaande van deze situaties is het temperatuurverschil tussen het lozings- en ontvangende water respectievelijk 14- en -6^{0}C.
De warmtevracht kan dan op de volgende manier berekend worden;

$$Warmtevracht = Q * \Delta T * c = 0{,}24 * 14 * 4186 = 14.000\ KJ/s$$

Omdat in beide gevallen de warmtevracht onder de 50.000 KJ/s en boven de 10 KJ/s ligt, is er geen vergunning nodig en is het indienen van een maatwerkbesluit bij het waterschap voldoende. Wel kan worden opgemerkt dat de gemiddelde temperatuur in het epilmnion in de zomer zal afnemen door LSC. Ondanks dat neemt de gemiddelde temperatuur van de gehele plas toe.

Voor het kruisen van het kanaal dient een vergunning aangevraagd te worden bij Rijkswaterstaat. Voor de aanvraag zijn aantal gegevens nodig waaronder een boortekening en een boor- en werkplan. Deze worden door de boortechnicus geleverd. Voor de offerte aanvraag van de grondboring onder het kanaal is een dwarsprofiel geprojecteerd. Tevens is deze tekening ook gebruikt voor de vergunning aanvraag voor Rijkswaterstaat.
Overige vergunningen in het kader van de waterwet en omgevingswet worden via het omgevingsloket aangevraagd. Dit betreft de volgende werkzaamheden:

- Bronbemaling voor pompkelder
- Construeren van pompkelder
- Aanleg van leidingen onder sloot
- Aanleg van leidingen (omgevingsvergunning)

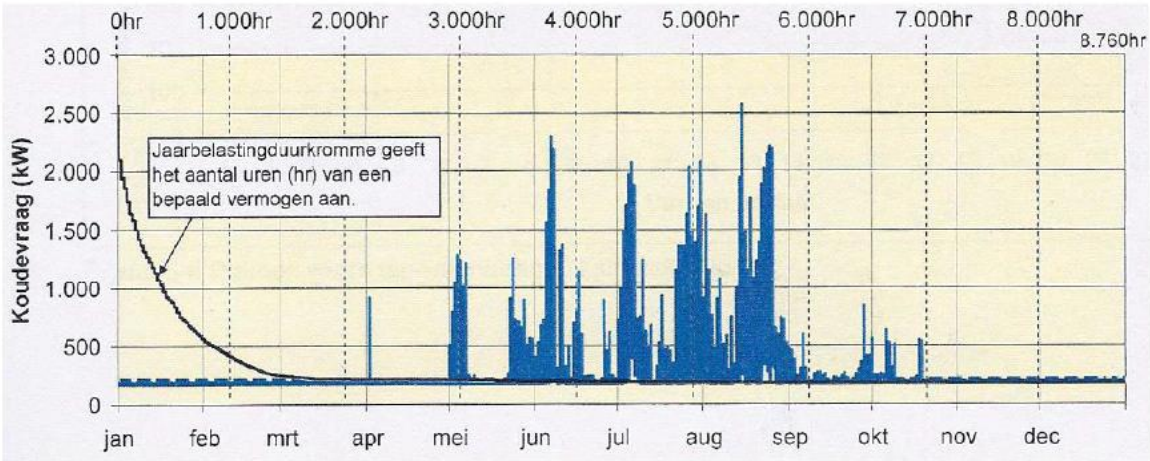
4 Pompinstallatie

4.1 Inleiding

De volgende fase van dit onderzoeksrapport is het schetsen van een technisch ontwerp die kan worden onderverdeeld in het aanzuigpunt, pompkelder, leidingtracé, leidingtype, lozingspunt en calamiteitenvoorzieningen. Met andere woorden; hoe komt het koude water van punt A (Leemslagenplas) naar punt B (ZGT) en weer terug naar punt A met het streven de kosten en verliezen te beperken. De totale lengte van dit traject is 4400 meter.

4.2 Energievraag

Een belangrijk onderdeel van het ontwerp is het vaststellen van de benodigde pompcapaciteit. Het koude water moet van de Leemslagenplas naar het ZGT en weer terug gepompt worden. Dit wordt mogelijk gemaakt door een pompgebouw waarin pompen staan opgesteld. De pompsoort is afhankelijk van de hoeveelheid vermogen die geleverd moet worden aan het ZGT en mogelijke andere afnemers.
De Leemslagenplas heeft een halterachtige vorm met een oprit in het midden van de plas (zie bijlage 1). Het einde van de oprit is de meest geschikt locatie om het pompgebouw te realiseren vanwege de toegankelijkheid.
De pompcapaciteit voor het ziekenhuis moet berekend zijn op de piekbelasting die 2 MW bedraagt. Tevens is voor de pompkeuze van belang dat deze ook berekend is op de gemiddelde energievraag van het ZGT. In grafiek 6 is de jaarlijkse energievraag van het ziekenhuis weergegeven.



Grafiek 6 - Energieverbruik aan koude (Gemeente Almelo, 2011)

In de grafiek is te zien dat grotendeels van het jaar (circa 7000 uur) de vraag aan koude van het ZGT rond de 250 kW ligt. De piekvraag van 2000 KW komt tijdens de zomerperiode een enkele keer voor. Naar schatting gaat het om tientallen uren.

De energievraag kan worden omgezet naar aantal m^3 water die verpompt dient te worden.
De volgende rekenstappen resulteren in de benodigde hoeveelheid water die geleverd moet worden tijdens de maximale piekbelasting.

$$MWh = MW * h \quad \rightarrow \quad 2 * 8760 = 17.520\ MWh$$

Een tijdelijk vraag van 2 MW zou op jaarbasis 17.520 MW zijn.
MWh kan worden omgerekend naar Joules;

$$Joules = MWh * 3600000) * 1000 \rightarrow 17520 * (3600000) * 1000) = 6.3 * 10^{13}\ Joules$$

Met de hoeveelheid Joules kan worden berekend hoeveel kilo water er verplaatst moet worden door dezelfde formule toe te passen als in hoofdstuk 2.5.

$$Kg\ water = \frac{\frac{joules}{c}}{\Delta T} \rightarrow \frac{\frac{6.3*10^{13}}{4186}}{6} = 2{,}5 * 10^9\ \text{kg. water}$$

Omgerekend naar kubieke meters is dit;

$$\frac{2.514.832.536}{1000} = 2.514.832\ \text{m3 water}$$

Het verpompen van deze hoeveelheid water komt neer op;

$$Q = \frac{\frac{m3}{dagen\ in\ het\ jaar}}{uur\ per\ dag} = \frac{\frac{2.514.832}{365}}{24} = 287\ m^3\ per\ uur$$

h = aantal uren per jaar
MW = MegaWatt
c = Soortelijke warmte water (4186 J/(kg.K))

Voor de maximale koude behoefte van het ziekenhuis dient 287 m^3/uur verpompt te worden. Dit is echter een piek moment die tientallen uren per jaar voorkomt. Ongeveer 7000 uur (80%) van het jaar is de vraag aan vermogen 0,25 MWh. Door dezelfde rekenstappen te maken als hierboven is berekent dat 0,25 MWh overeenkomt met 44 m^3/uur. Oftewel 80% van het jaar zal er 44 m^3/uur aan koud water naar het ziekenhuis verpompt worden. De overige 20% van het jaar zal er meer dan 44 m^3/uur verpompt moeten worden met een maximum van 287 m^3/uur dat naar schatting minder dan 100 uur(1%) per jaar voorkomt.

Rekening houdend met mogelijk meerdere koude afnemers in de toekomst is het van belang dat de pompinstallatie dusdanig wordt gedimensioneerd dat deze geadapteerd kan worden aan een grotere koude vraag. Theoretisch gezien is er 10.450 MW per jaar beschikbaar. In totaal is er nog (10.450-2700) 7750 MW over. Een veiligheidsmarge van 25% voorkomt dat de maximale beschikbaarheid aan koude overschreden wordt. Dit houdt in dat er ruim 5800 MW beschikbaar is voor overige afnemers. De veiligheidsmarge is gevoelsmatig bepaald. Omdat in hoofdstuk 2.5 (laagdikte) ook een veiligheidsmarge

is toegepast is de verwachting dat 25% voldoende is.
Stel dat er in de toekomst twee afnemers bij komen die beide tijdens piekmomenten een vermogen van 2 MW vragen, dan moet het systeem een totaal vermogen van 6 MW kunnen leveren. Dit komt neer op; 287 m^3/uur x 3 = 861 m^3/uur. Echter is dit een piekvraag die zich alleen kan voordoen bij meerdere afnemers.

4.3 Leidingtype

Voor het transporteren van het koelwater is de keus gevallen op HDPE leidingen. HDPE leidingen zijn van sterk materiaal gemaakt waardoor het lang mee gaat. Daarbij is het resistent tegen hoge druk en corrosie en heeft het een lage weerstandcoëfficiënt.
Voor het transporteren van het water is onderzocht welke leidingdiameter het meest geschikt is. Dit heeft voornamelijk te maken met de hoeveelheid water die verplaatst moet worden en de kosten van de leiding. In eerste instantie is berekend wat het drukverlies is van de leidingdiameters bij een minimaal en maximaal debiet. De volgende uitgangspunten zijn daarbij in acht genomen.

		Eénheden
Lengte leidingtraject	4400 *(zie hoofdstuk 4.1)*	m
Druk (ρ) water bij 4 C°	1002	Kg/m³
Zwaartekracht (g)	9,81	m/s
Wandruwheid (k) HDPE	0,01	mm
Dynamische viscositeit (μ)	0,001569 (Toolbox, z.d.)	Kg/(m.s)

Tabel 3 - Uitgangspunten voor berekening van het drukverlies

Met deze gegevens is er een drukberekening gemaakt van het gehele leidingtracé. In deze berekening is nog geen rekening gehouden met drukverliezen van appendages en bochten.

Het drukverlies is berekend met de formule van Darcy-Weisbach;

$$h_v = \frac{\lambda \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \text{ (Larenstein, 2011)}$$

h_v = *drukverlies*
λ = *weerstandscoëfficiënt*
L = *lengte van leiding*
v = *stroomsnelheid*
D = *leidingdiameter*
g = *versnelling van de zwaartekracht*

De onbekende in deze formule is de weerstandscoëfficiënt (λ). Deze is te bepalen met de formule van Colebrook-White;

$$\lambda = \frac{0{,}25}{[log_{10}\ (\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}})]^2} \text{ (Larenstein, 2011)}$$

Ɛ = relatieve wandruwheid
Re = Getal van Reynolds

In deze formule is het getal van Reynolds en de relatieve wandruwheid de onbekenden. Met het getal van Reynolds kan worden bepaald of het een laminaire of turbulente stroming betreft. De relatieve wandruwheid is te bepalen aan de hand van de volgende formule. Hiervoor moet de wandruwheid van het leidingmateriaal bekend zijn. Deze is opgevraagd bij de leverancier.

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \rightarrow \frac{0.00001}{300} = 3{,}33 \times 10^{-5} \text{ (Larenstein, 2011)}$$

k = wandruwheid

$$Re = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\mu} \text{ (Larenstein, 2011)}$$

μ = dynamische viscositeit

Met deze formules kan het drukverlies van het gehele leiding traject worden berekend. In eerste instantie is er uitgegaan van een leidingdiameter van 300 mm. Het maximale debiet is eerder al bepaald op 287 m^3/uur. De stroomsnelheid kan dan worden berekend door eerste de oppervlakte van de leiding te bepalen;

1) $Q = v \cdot A \rightarrow A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0{,}15^2 = 0{,}0707\ m^2$
2) $v = \frac{\frac{Q}{3600}}{A} = \frac{\frac{287}{3600}}{0{,}0707}$ = 1,128 m/s

Vervolgens is het Getal van Reynolds bepaald door:

$$Re = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\mu} = \left(\frac{1.128 \cdot 4400 \cdot 1002}{0.001569}\right) = 216.140{,}5$$

De volgende stap is om de weerstandscoëfficïent te bepalen;

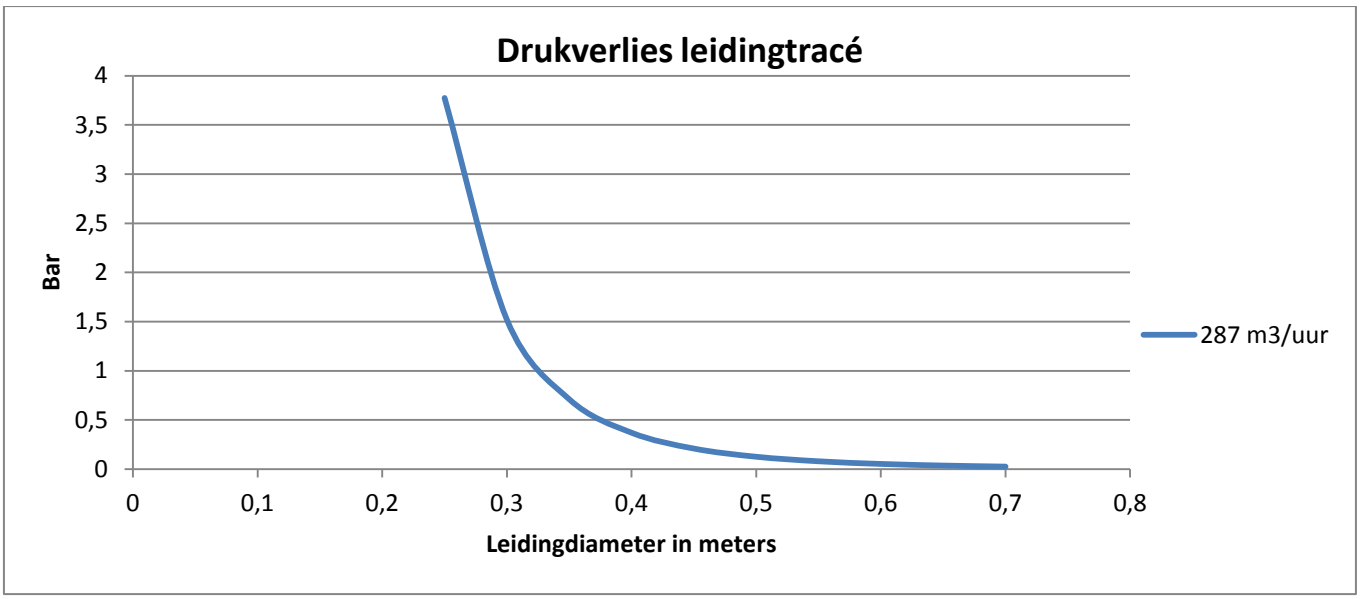
$$\lambda = \frac{0{,}25}{\left[log_{10}\left(\frac{3{,}33*10^{-5}}{3{,}7*0.3} + \frac{5.74}{216.140{,}5^{0.9}}\right)\right]^2} = 0{,}01628$$

Tenslotte is het drukverlies (h_v) berekend;

$$\frac{0{,}01628*4400*1{,}128^2}{0{,}3*2*9{,}81} = 15{,}49 \text{ meter}$$

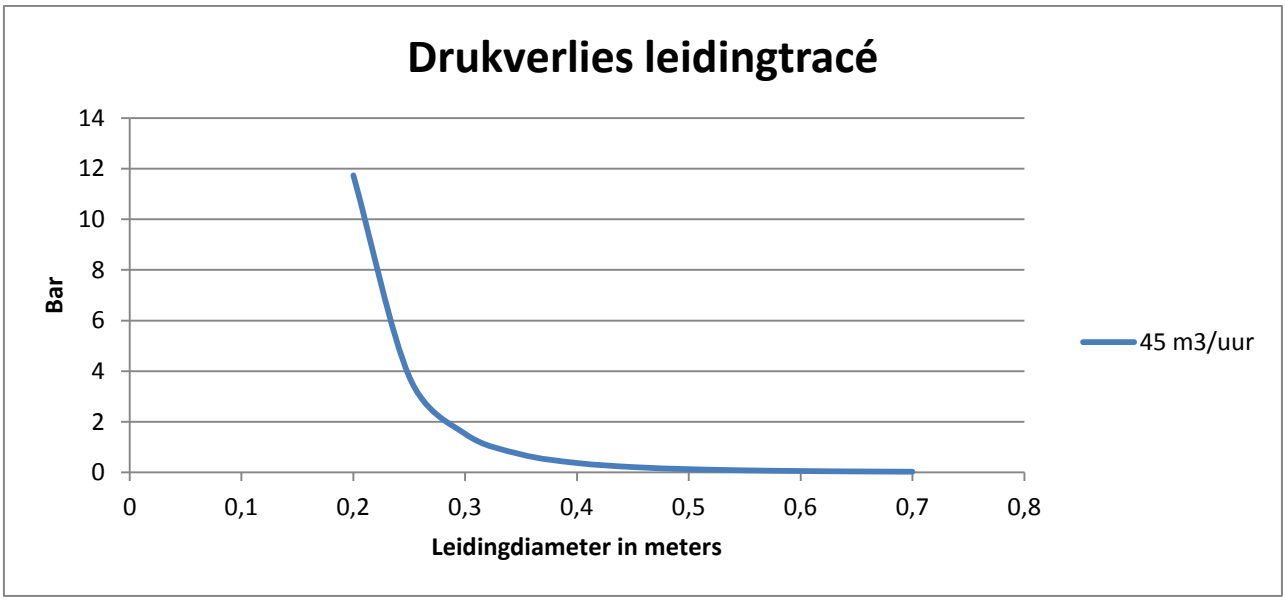
Omgerekend naar bar en KPa wordt dit;
$= 15{,}49 * 0{,}098 = 1{,}52$ bar
$= 1{,}52 * 100 = 152$ KPa

Op deze wijze is in Excel een model (bijlage7)gemaakt waar het minimale en maximale debiet uitgezet is tegenover verschillende leidingdiameters die in grafiek 7 & 8 zijn weergegeven. Op basis daarvan zijn de volgende conclusie getrokken;
in grafiek 7 is te zien dat een leiding vanaf 300 mm een sterk stijgende gradiënt vertoond. Bij elk kleinere diameter zal bij dit debiet het drukverlies snel toenemen.



Grafiek 7 - Drukverlies bij maximaal debiet

Maar omdat deze scenario zich maar tientallen uur per jaar voordoet is het van belang rekening te houden met de situatie die zich het meest voordoet, namelijk 44 m^3/uur.
Hieruit volgt de volgende grafiek.



Grafiek 8 - Drukverlies bij minimaal debiet

Hieruit is op te merken dat bij een debiet van 44 m^3/uur het drukverlies 5,1 KPa is. Een kleinere diameter zou bij dit debiet mogelijk zijn. Echter zal een kleinere diameter bij een het maximale debiet tot een dermate hoog drukverlies leiden waardoor de werkingsdruk van de pomp erg hoog moet zijn. Een leiding diameter van 250 mm leidt tot een drukverlies van bijna 378 KPa(3,8 bar) bij 287 m^3/uur, exclusief appendages en bochten. Door een iets groter leidingdiameter te kiezen wordt het drukverlies beperkt. Een leidingdiameter van 300 mm levert bij een debiet van 287 m^3/uur een weerstand op van 152 KPa, oftewel 1,5 bar.

4.3.1 Drukverlies appendages

Naast dat er verliezen ontstaan door de leidingweerstand, veroorzaken bochten en appendages ook drukverliezen. Van een aantal appendages is het drukverlies door de leverancier weergegeven. In tabel 4 zijn alle appendages waarvan het drukverlies bekend is weergegeven.

	KPa	Bar
Warmtewisselaar	80	0,8
Regelklep	20	0,2
Filter	20	0,2
Beluchter	30	0,3
Debietmeter	40	0,4
Vernauwing/verbreding	80	0,8
Totaal	**270**	**2,7**

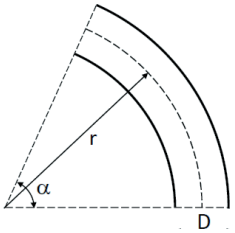
Tabel 4 - Drukverliezen van appendages

Over het gehele leidingtracé zijn er bochten van 90- en 45 graden aanwezig. In zowel de pompkelder als de ruimte in het ziekenhuis waar de warmtewisseling zal plaatsvinden zullen 4 bochten van 90 graden aanwezig zijn. In het leidingtracé zullen 6 bochten van 45 graden aanwezig zijn. Met deze informatie is

berekend hoeveel weerstand de bochten in totaal leveren.
Om de verliescoëfficiënt van een bocht van 90 graden te bepalen bij een debiet van 287 m^3/uur en een leiding van 300 mm is de volgende formule toegepast;

$$\delta b = \frac{0.44*D^2}{r^2} + 6*\lambda = \frac{0.44*0.3^2}{1.05^2} + 6*0{,}01628 = 0{,}13$$ (Engelsman, 2013 - 2014)

r = straal(3,5D) zoals afgebeeld in figuur 11.



Figuur 11 - Radius van bocht

Vervolgens kan met de weerstandscoëfficiënt de drukval berekend worden.

$$\Delta H = \delta b * sin\alpha * \frac{v^2}{2*g} = 0{,}13 * sin90 * \frac{1.13^2}{2*9.81} = 0{,}0086\ m$$ (Engelsman, 2013 - 2014)

Eén bocht van 90 graden leidt tot een drukverlies van 0,0086 meter. Dit komt overeen met 0,00084 bar. Voor 4 bochten betekent dit 0,00336 bar, oftewel 0,34 KPa.
Bij een bocht van 45 graden is het verliescoëfficiënt;

$$\delta b, a = sin\alpha * \delta b$$ (Engelsman, 2013 - 2014)

Vervolgens is de verlieshoogte;

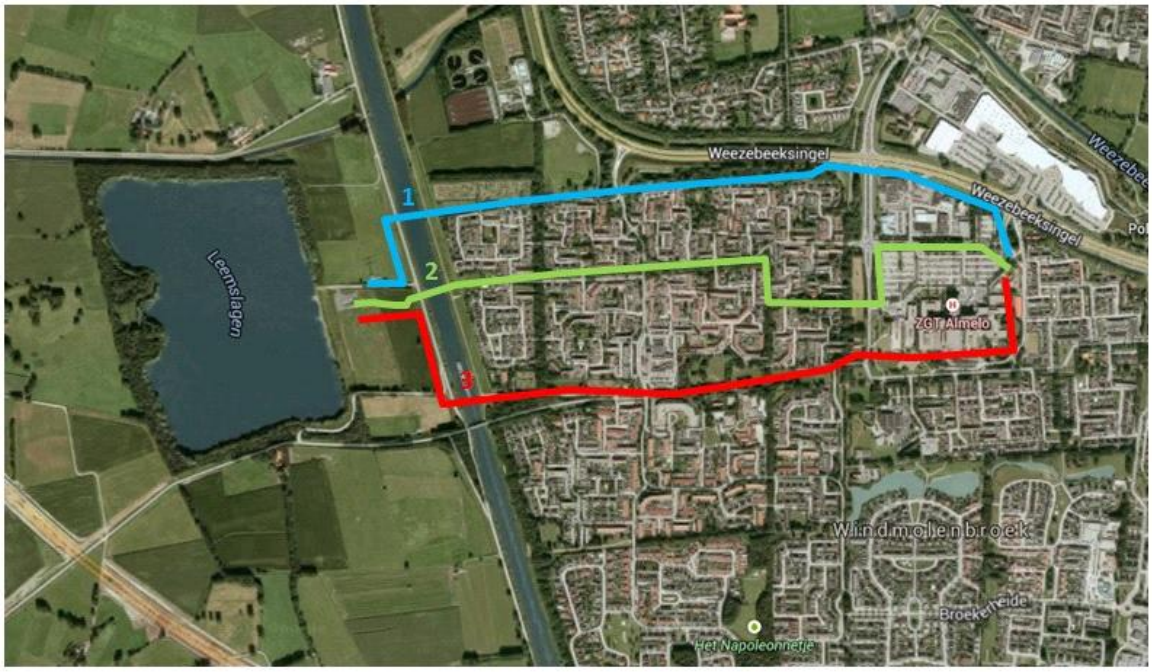
$$\Delta H = 0{,}13 * sin45 * \frac{1{,}13^2}{2 * 9{,}81} = 0{,}0061\ m$$

Voor 8 bochten betekent dit 0,48 KPa. Gezamenlijk wordt dit 0,48 + 0,34 = 0,82 Kpa. Deze waarde is zo laag dat deze verwaarloosd kan worden. De geringe hoeveelheid aan drukverlies heeft te maken met de grootte van de leidingdiameter en de straal van de bocht (D*r) die erg ruim is waardoor er nauwelijks weerstand optreed.

De grootste drukverliezen worden veroorzaakt door de appendages in het leidingtracé. De appendages die in tabel 4 zijn weergegeven, resulteren gezamenlijk in een drukverlies van 270 Kpa. Inclusief het leidingverlies komt dit uit op een totaalverlies van 420 KPa tijdens piekmomenten.

4.4 Leidingtracé

Het leidingtracé is de route die het water aflegt van de Leemslagenplas naar het ziekenhuis en terug. Het bepalen van de meest geschikte route is afhankelijk van de complexiteit en afstand. Van de Leemslagenplas naar het ZGT zijn enkele routes denkbaar gebaseerd op de toegankelijkheid en afstand. Zie figuur 12.



Figuur 12 - Leidingtracé varianten

Een belangrijk aandachtspunt zijn de obstakels die in elk variant aanwezig zijn. Onder obstakels worden wegen, sloten en kruispunten verstaan waar het leidingwerk onderdoor moet. Hiervoor moeten grondwerkers ingehuurd worden die horizontale grondboringen verrichten. Deze activiteit moet beperkt blijven om de kosten laag te houden. Om de verschillen van de varianten te bepalen is er een offerte aangevraagd voor de activiteiten die nodig zijn om de obstakels te kruizen. Uit de aanvraag is gebleken dat alle obstakels door middel van een raketboring kunnen worden gepasseerd. De kosten hiervoor zijn €155 per meter, uitgaand van een leidingdiameter van 300 mm. De totale afstand van alle obstakels zijn in beeld gebracht. Daarbij is ook rekening gehouden met de retourleiding. Ook zijn de kosten van de leidingen aangevraagd. HDPE leidingen met een diameter van 300 mm kosten €40 per meter. De totale kosten van het leidingtracé is gebaseerd op het aantal grondboringen en de leidinglengte.
Het kanaal is niet meegerekend omdat deze in alle varianten dezelfde kosten met zich mee brengt. In tabel 5 is een overzicht weergegeven van de lengte en het aantal obstakels van elk leidingtracé en de daarbij gemoeide kosten.

Tracé-variant	Afstand in km	Obstakels (excl. Kanaal)	Kosten boringen	Kosten leidingmateriaal	**Totaal**
1	2	6 (278 m)	43.090	160.000	**203.090**
2	1,8	13 (432 m)	66.950	144.000	**210.960**
3	2	13 (380 m)	58.900	160.000	**218.900**

Tabel 5 - Vergelijking van de varianten(kosten in euro's)

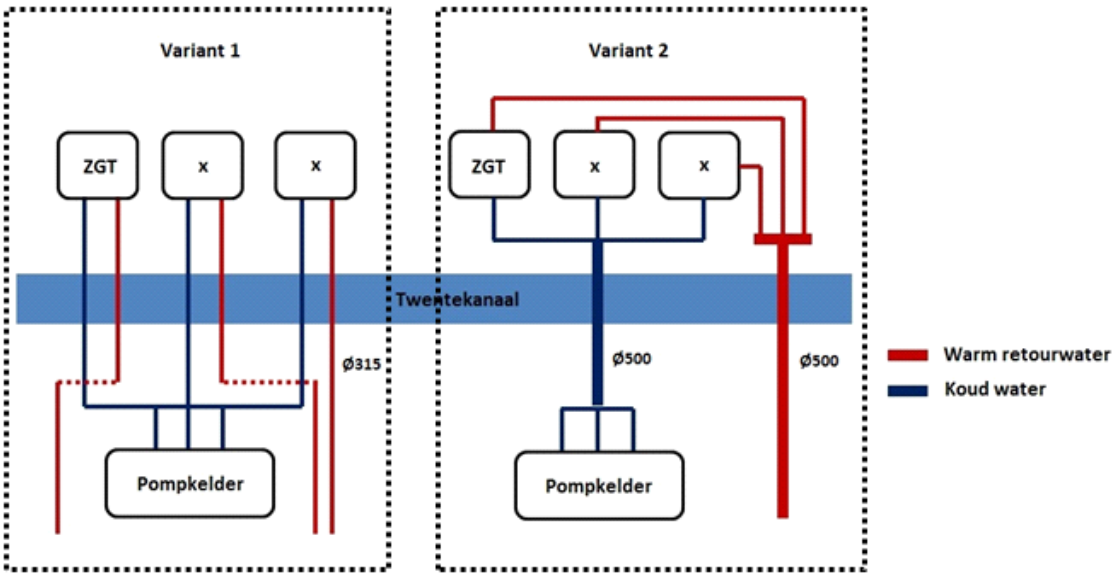
Leidingtracé 1 is financieel het meest aantrekkelijk van de drie varianten. Gelet op het gebied waar deze variant zich doorheen begeeft, is op te merken dat deze door onbebouwd gebied loopt. Ook is er rekening gehouden met leidingen en kabels, oftewel de zogenaamde click melding en beplanting waarbij wortelgroei voor problemen kan zorgen in de bodem. Daaruit is gebleken dat leidingtracé 1 het meest

gunstig is met betrekking tot het aanleggen van de leidingen. Dat in combinatie met de lagere kosten heeft bepaald dat leidingtracé 1 de voorkeur heeft.

4.4.1 Kanaal

Het grootste obstakel die zich in het leidingtracé bevindt is het Twentekanaal. Door middel van horizontaal gestuurde grondboring worden de leidingen onder het kanaal aangebracht(bijlage12). Voor deze activiteit is uitgezocht welke methoden beschikbaar zijn en welke daarvan de voorkeur krijgt. Dit is afhankelijk van de kosten en functionaliteit.

Zoals eerder aangegeven is, is er een debiet bereik van 44 tot 287 m^3/uur. In veronderstelling dat er in de toekomst meerdere afnemers worden gecontracteerd zal het debiet op kunnen lopen naar 870 m^3/uur. Voor het kruisen van het kanaal zijn twee mogelijkheden denkbaar. Hieronder worden deze toegelicht.



Figuur 3 Varianten om het kanaal te kruisen

Het verschil tussen beide varianten is dat in variant 1 meerdere leidingen met een diameter van 315 mm onder het kanaal worden aangelegd. Deze leidingen gaan direct naar de afnemer. Hierdoor is er geen leidingverdeler nodig. Tevens kan er beter ingespeeld worden op de afnemers. Het aantal afnemers staat niet vast en bestaat de kans dat er helemaal geen afnemer bij komt. Het nadeel is dat als er wel meerdere afnemers bij komen, er meer boringen verricht moeten worden om 870 m^3/uur te kunnen verpompen.

In variant 2 zijn twee boringen onder het kanaal voldoende. Een grotere diameter van 500 mm kan alle debieten aan. Het risico bestaat dat wanneer er geen koude afnemers bij komen, de grote leidingdiameter zinloos is. Ook zijn er meer overgangs- en verdelingstukken nodig wat leidt tot hogere kosten en drukverliezen.

De kosten van een gestuurde boring van Ø500 mm is € 110,- per meter. Van een Ø 315 mm leiding is dit € 85,- per meter. De lengte van de boring is afhankelijk van de diameter. Een leiding met een grotere

diameter heeft een grotere radius nodig.
In de tabel hieronder is weergegeven wat de kosten van de varianten zullen zijn.

	Lengte (m)	Kosten leiding	Kosten grondboring	Totale kosten
Variant 1	370	14.800	31.450	46.250
Variant 2	420	46.200	46.200	92.400

Tabel 6 - Kosten van de varianten(kosten in euro's)

Overigens is deze berekening alleen gebaseerd op één afnemer. Als er twee afnemers bijkomen zullen de kosten van variant 1 oplopen tot 46.250 x 3 = € 138.750.

In eerste instantie is dit project alleen gericht op het ZGT. Daardoor krijgt variant 1 de voorkeur. Deze variant is minder complex en goedkoper. Variant 2 is alleen voordeliger als er minimaal twee afnemers bij komen.

4.5 Pompen

Het is inefficiënt om een pompinstallatie alleen te dimensioneren op een debiet van 287 m^3/uur terwijl 80% van het jaar een debiet van 44 m^3/uur verpompt moet worden. Het is voor de pompkeuze van belang dat deze binnen zijn curve dusdanig functioneert dat de gebruikerskosten zo laag mogelijk zijn bij een debiet van 44 m^3/uur, maar als nodig ook een maximaal debiet van 287 m^3/uur kan verpompen. Daarbij is het van belang dat er een pomp stand-by staat in geval er een pomp uitvalt, het ZGT moet immers altijd kunnen worden voorzien van koude.
Uitgangspunten en randvoorwaarden zijn;

- Pompgebouw moet zich naast de plas bevinden,
- pompen moeten een druk van 5 bar kunnen leveren,
- er moet een back-up pomp klaarstaan,
- kosten aanschaf pomp beperkt houden,
- gebruikskosten pomp beperkt houden,
- de pompen bevinden zich onder het waterniveau van de plas.

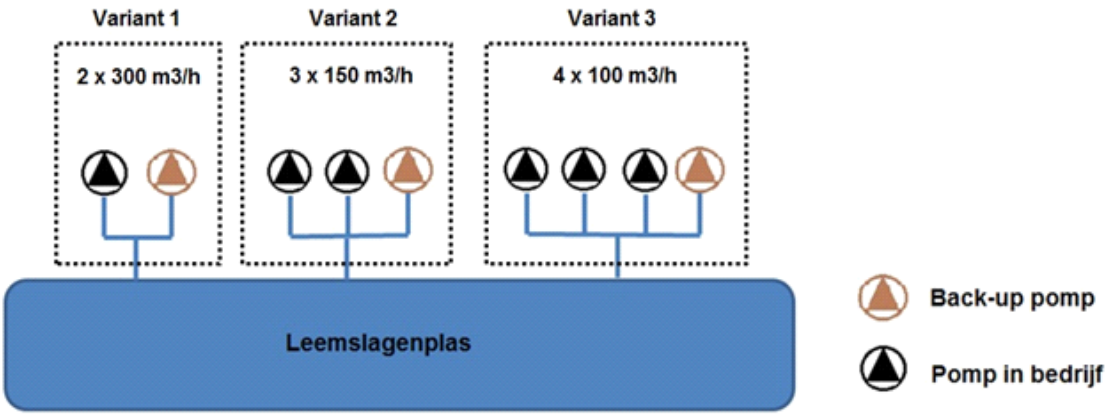
Het koude water komt het pompgebouw binnen via één enkele leiding die in verbinding staat met de pomp(en). Bij vraag aan koude wordt automatisch de pomp ingeschakeld om het gewenste debiet te leveren. De verwachting is dat er meerdere pompen nodig zijn voor de variatie in debieten. Tevens moet er rekening gehouden worden dat er mogelijk in de toekomst meer afnemers bij kunnen komen.

Omdat 80% van het jaar 44 m^3/uur verpompt moet worden moet er een pomp gekozen worden waarvan de gebruikerskosten bij dit debiet het laagst is. De gebruikerskosten worden uitgedrukt in KW. Daarbij speelt ook de aanschafkosten een rol.
Voor het ontwerp zijn pompen met verschillende maximale debieten met elkaar vergeleken. Daarvoor is er bij een leverancier geïnformeerd naar de aanschaf- en gebruikerskosten van verschillende pompen.
In tabel 7 zijn daarvan de resultaten weergegeven.

Pomp	Kw volle verm.	45 m3/h	Jaarbasis KW	Kosten/jaar	5 Jaar	Aanschaf
45 m3/h	8,2	8,2	57.400	11.480	57.400	6500
100 m3/h	16	10,7	74.900	14.980	74.900	7000
150 m3/h	27,4	17	119.000	23.800	119.000	8600
300 m3/h	45	26	182.000	36.400	182.000	11.000

Tabel 7 - Pompcapaciteit en (gebruikers)kosten in euro's

In verband met een back-up pomp, zijn er altijd minimaal 2 pompen nodig. Zoals in de tabel is weergegeven zijn de gebruikerskosten afhankelijk van de pompcapaciteit. Een pomp die ontworpen is voor lage debieten (50 m^3/uur) verbruikt 8,2 kW. Een pomp die ontworpen is voor grote debieten (300 m^3/uur) verbruikt bij dat debiet 45 kW. Indien deze pomp ook zou worden ingezet voor het verpompen van 45 m^3/uur zal deze 26 kW verbruiken. Hoe groter de pomp hoe meer deze verbruikt bij zowel lage als hoge debieten. Daarbij verbruikt één grote pomp van 300 m^3/uur minder dan twee kleine pompen van 150 m^3/uur(45 kW tegen 55 kW). Met die informatie zijn verschillende combinaties van pompen onderzocht met als doel de gebruikerskosten zo laag mogelijk te houden.
Er is in eerste instantie gekeken naar een combinatie van dezelfde pompen die kunnen voldoen aan de debieten die gevraagd worden (45 – 290 m^3/uur) plus één back-up pomp.



Figuur 14 - Varianten van pompopstellingen

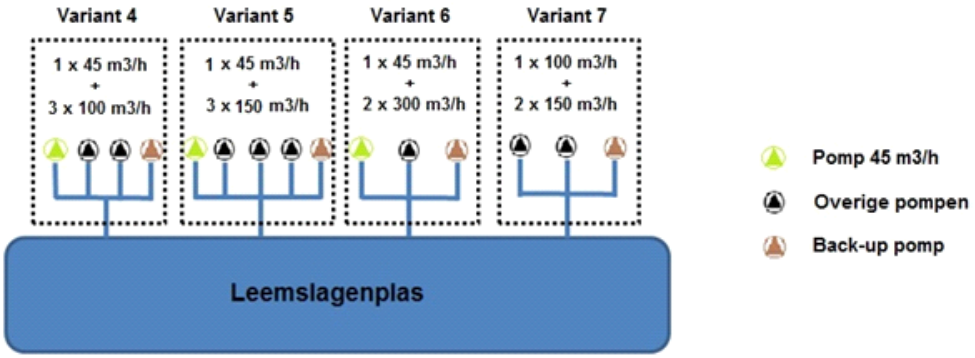
Vervolgens is onderzocht wat de totale kosten van deze varianten zijn wanneer deze 80% van het jaar op 45 m^3/uur staan te draaien. Rekening houdend dat een pomp minimaal 5 jaar meegaat is er een kostenberekening gemaakt van een termijn van 5 en 10 jaar. In tabel 8 zijn hiervan de uitkomsten weergegeven. De gebruikerskosten is de vraag aan vermogen in kW. De kosten per kW is ongeveer € 0,20. Aanschafkosten zijn de kosten van de pomp. Deze bedragen zijn alleen gebaseerd op de kosten bij een debiet van 45 m^3/uur die 80% van het jaar van toepassing is.

	Variant 1 (300 m^3/h)		Variant 2 (345 m^3/h)		Variant 3 (345 m^3/h)	
	5 jaar	10 jaar	5 jaar	10 jaar	5 jaar	10 jaar
Gebruikerskosten	182.000	364.000	119.000	238.000	74.900	149.800
Aanschafkosten	22.000	22.000	25.800	25.800	28.000	28.000
Totaal	**204.000**	**386.000**	**144.800**	**263.800**	**102.900**	**177.800**

Tabel 8 - Kosten van de varianten 1 t/m 3

De maximale debieten die onder de varianten zijn weergegeven zijn exclusief de back-up pomp. In praktijk ligt het maximale debiet van de pompen hoger dan in de variant is aangegeven. In verband met veiligheidsmarges is de maximale pompcapaciteit in de varianten omlaag gebracht. Dit geldt ook voor tabel 7.

Tabel 8 laat zien dat het gunstiger is om kleinere pompen in te zetten die minder verbruiken. De investeringskosten liggen hoger wanneer meerdere pompen nodig zijn, maar deze kosten zijn snel terugverdiend.
Nu bekend is dat meerdere kleine pompen tot lagere kosten leidt, is er ook naar andere variaties gekeken. Gezien dit feit is onderzocht naar combinaties van verschillende pompen. Deze zijn hieronder weergegeven. Echter is wel het streven om niet meer dan twee verschillende pompen op te stellen in verband met onderdelen en DN diameters.



Figuur 15 - Gemengde varianten

Onder overige pompen worden de pompen van 100-, 150-, en 300 m^3/uur verstaan. De back-up pomp is hetzelfde als de grootste pomp die in de variant aanwezig is. Zo bestaat variant *7* uit één constant draaiende pomp van 100 m^3/uur die 80% van het jaar is ingesteld op 45 m^3/uur. Voor hogere debieten wordt de pomp van 150 m^3/uur ingeschakeld. In geval deze laatst genoemde uit zal vallen, zal de back-up pomp van 150 m^3/uur in worden geschakeld. Van de hiervoor genoemde varianten is een kostenberekening gemaakt die in tabel 9 is weergegeven.

Max. pompcap.	Variant 4 (245 m3/h)		Variant 5 345 (m3/h)		Variant 6 (345 m3/h)		Variant 7 250 (m3/h)	
	5 jaar	10 jaar	5 jaar	10 jaar	5 jaar	10 jaar	5 jaar	10 jaar
Gebruikerskosten	57.400	114.800	57.400	114.800	57.400	114.800	74.900	149.800
Aanschafkosten	27.500	27.500	32.300	32.300	28.500	28.500	24.200	24.200
Totaal	**84.900**	**142.300**	**89.700**	**147.100**	**85.900**	**143.300**	**99.100**	**174.000**

Tabel 9 – Kosten in euro's van de varianten 4 t/m 7

Uit de berekening blijkt dat de kosten van gecombineerde varianten op lange termijn voordeliger zijn dan de varianten 1 t/m 3. Op basis hiervan zal de voorkeur uitgaan naar gecombineerde pompopstellingen waarbij variant 4 het voordeligst is. Echter doen variant 4 t/m 6 qua prijs niet ver voor elkaar onder. Daarom is er naar andere factoren gekeken zoals mogelijke toekomstige afnemers en flexibiliteit in debieten (overige 20% van het jaar). Daarbij kan geconstateerd worden dat **variant 6** minder flexibel is dan de andere varianten. Stel er wordt een debiet gevraagd van tussen de 50 en 150 m^3/uur, dan zal de 300 m^3/uur pomp onder 50% van zijn maximale capaciteit draaien. Echter zal deze pomp nooit op 100% van zijn capaciteit draaien. Stel dat door meerdere afnemers de pompcapaciteit uitgebreid moet worden en met het streven de variatie in pompen beperkt te houden, zal er een extra pomp van 300 m^3/uur bij moeten komen waardoor er sprake is van over-dimensionering.
Variant 4 is het voordeligst en is, in tegenstelling tot variant 6, wel flexibel. Pompen zullen altijd boven de 50% van de maximale capaciteit draaien. Nadeel is dat bij uitbreiding van de pompopstelling er 2 pompen van 100 m^3/uur per afnemer bij moeten komen om het maximale vraag aan vermogen van meerdere afnemers te kunnen leveren. Dit heeft gevolgen voor de grootte van de pompkelder.
De pompen in **variant 5** halen een maximaal debiet van circa 345 m^3/uur. In geval er nog een afnemer bij komt is het gevraagde debiet 580 m^3/uur. Dan zal één pomp extra van 150 m^3/uur kunnen voldoen aan de maximale vraag. 345 + 150 = 495 m^3/uur, maar in theorie kunnen deze pompen 200 m^3/uur halen. Theoretisch gezien is de maximale pompcapaciteit dan 645 m^3/uur. Dit ligt ruim boven de 580 m^3/uur. Variant 5 is de tussenvariant van variant 4 en 6 en is flexibeler, voordelig en kan er eenvoudiger worden ingespeeld op toekomstige afnemers. Variant 5 lijkt het meest geschikt te zijn voor dit ontwerp.

4.6 Aanzuigfilter

Het ontwerp begint bij het punt waar het water onttrokken wordt. Dit zal gebeuren door middel van een aanzuigfilter. De meest geschikte locatie voor het aanzuigfilter is in het midden van de plas omdat dit tot de kortste afstand leidt naar het pompgebouw. Voor het ontwerp van het aanzuigpunt is gekeken naar aanzuigfilters van andere LSC projecten. Wanneer water onttrokken wordt, moet er rekening worden gehouden met een aantal factoren. De instroomsnelheid mag niet te hoog zijn. Dit ter voorkoming dat vissen aan het aanzuigkorf blijf vast blijven plakken. Vissen zijn in staat om tegen een stroomsnelheid van 0,1 a 0,2 m/s in te zwemmen. Het aanzuigpunt moet een minimale afstand hebben van 2 meter ten opzichte van de bodem zodat de bodem ongeroerd blijft en mogelijk gebonden fosfaten niet worden opgezogen. Tevens is het van belang dat het water zo schoon mogelijk de pomp instroomt.

Eerder is berekend dat bij een maximale vraag aan vermogen, 870 m^3/uur verplaatst moet worden. Omdat de maximale instroomsnelheid niet hoger dan 0,2 m/s mag zijn, kan de diameter van het aanzuigpunt worden berekend. Voor het dimensioneren van het aanzuigpunt is uitgegaan van de volgende uitgangspunten;

1. Q = V x A
2. 870 m^3/uur = 0,242 m^3/seconde
3. 0,242 = 0,2 x A
4. A-cirkel = 1,21 m^2
5. A = π x r^2 = √(1,21/π) = r = 0,62 meter
6. Diameter = 1,24 meter

De berekening laat zien dat een leidingdiameter van 1,24 meter voldoet aan de maximale stroomsnelheid van 0,2 m/s. In geval van een maximale koude vraag van het ZGT(287 m^3/uur) voldoet een leidingdiameter van 0,71 meter.

Variant 1
Om de diameter van het aanzuigpunt te verkleinen bestaat de mogelijkheid om het aanzuigpunt op te splitsen in twee openingen. Hierdoor kan de diameter gedeeld worden door 2, wat neer komt op twee aanzuigopeningen met een diameter van 0,62 meter. Afgerond is dit 0,7 meter, oftewel 700 mm. Voordat het water de leiding ingaat, zal het eerst door een filter moeten stromen om te voorkomen dat er zwevend materiaal zoals takken en bladeren worden opgezogen.

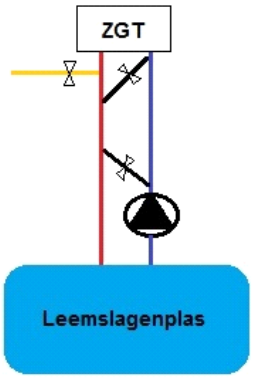
Variant 2
De meest eenvoudige optie is het kiezen van één enkele leiding van circa 700 mm. In dat geval zal er een stroomsnelheid bereikt worden van 0,62 m/s. Echter zal deze snelheid alleen bereikt worden wanneer alle afnemers tegelijk een maximale piekvraag hebben. Wanneer er een minimale vraag van het ZGT (0,25 MW) is, zal de stroomsnelheid circa 0,03 meter per seconde zijn. Ook hier moet een filter voorkomen dat er zwevend materiaal in de pomp beland.

Variant 2 is minder complex en daardoor ook goedkoper. Rekening houdend met het feit dat de maximale piekvraag alleen in de zomerperiode gevraagd wordt, maakt de aanzuigsnelheid niet veel uit omdat tijdens de zomer(stratificatieperiode)de vissen de diepte vermijden wegens een gebrek aan zuurstof. Wanneer in de winter sommige vissoorten de diepte opzoeken is de koude vraag minimaal waardoor ook de aanzuigsnelheid erg laag is. Daardoor zullen vissen tijdens de zomerperiode geen hinder ondervinden van de hoge stroomsnelheden.
Echter heeft een grotere aanzuigsnelheid ook een grotere aanzuigreikwijdte. Het streven is om het water zo schoon mogelijk de pomp in te laten stromen. Als de aanzuigsnelheid hoog is, bestaat de kans dat er meer zwevend materiaal in de omgeving van het filter wordt opgezogen. Om dit te voorkomen gaat de voorkeur uit naar variant 1.

4.7 Calamiteiten

Vanwege de importantie om het ZGT te allen tijde te kunnen voorzien van koude, moet er rekening gehouden worden met scenario's waarbij het water toevoer naar het ZGT door een calamiteit niet meer

mogelijk is. Eerder is al aangegeven dat wanneer een pomp het begeeft, er een back-up pomp klaarstaat die direct kan worden ingezet. Een ander denkbaar scenario is het defect raken van leidingen. Hiervoor is een oplossing bedacht door de heen- en retourleiding met elkaar te verbinden zodat het ZGT altijd kan worden voorzien van koude.



Figuur 16 - Verbinden van heen- en retourleiding

Stel dat de aanvoerleiding niet meer kan functioneren, dan kan de retourleiding als aanvoerleiding fungeren waardoor er tijdelijk geen retourleiding meer is. Totdat dit probleem verholpen is zal er tijdelijk een lozingsvoorziening moeten worden gerealiseerd. Daarvoor zijn er verschillende mogelijkheden onderzocht waarbij ook enkele uitgangspunten zijn gedefinieerd. De lozingsvoorziening zal in de buurt van het ZGT aanwezig moeten zijn om extra leidingwerk te besparen.
In de omgeving van het ZGT zijn een aantal opties onderzocht die mogelijk als lozingsvoorziening kunnen functioneren. De opties zijn een nabij gelegen sloot, de weezebeek en een gemengd rioolstelsel.

Figuur 4 Lozingsvoorzieningen

<u>De weezebeek</u> is erg geschikt omdat er geen rekening gehouden hoeft te worden met het lozingsdebiet. De beek kan een groot debiet afvoeren zonder dat er wateroverlast zal plaatsvinden. Het nadeel van de

beek is de afstand ten opzichte van het ZGT. Om de beek te bereiken zijn er gestuurde boringen nodig en circa 500 meter leiding.
Het **gemengd rioolstelsel** bevindt zich, net zoals de sloot, dicht in de buurt van de warmtewisselaar van het ZGT. In geval een calamiteit zich voordoet en het retourwater geloosd wordt in het rioolstelsel, zal schoonwater af worden gevoerd naar de waterzuivering. Daarbij is het een complexere werkzaamheid om de lozingsleiding op het rioolstelsel aan te sluiten dan wanneer deze op een sloot of beek uitmondt.
Als het afvoerdebiet van de **sloot** lager is dan het lozingsdebiet, zal hier wateroverlast ontstaan. Het voordeel van de sloot als lozingspunt is dat er geen extra graafwerkzaamheden verricht hoeft te worden, omdat de lozingsleiding tegelijk kan worden aangebracht met de aanleg van het leidingtracé. Het leidingtracé loopt namelijk langs de sloot naar het ZGT. Stel dat de afvoercapaciteit van de sloot onvoldoende is, dan kan uitgaande van de minst gunstige situatie bepaald wordt hoeveel water er in sloot kan worden geborgen totdat deze vol is. Dit is dan de reparatietijd.
Als tijdens de maximale vraag (287 m^3/uur) de lozingsvoorziening in werking zal treden, dan zal de sloot in 5 uur vol raken. Dit is bepaald door de lengte en oppervlakte van de sloot met elkaar te vermenigvuldigen. Echter is de kans klein dat tijdens een maximale vraag (1% van het jaar) een leiding defect raakt. Stel dat de leiding defect raakt op het moment dat er een debiet van 45 m^3/uur door de leiding stroomt, zal de sloot in 34 uur vol raken. In praktijk duurt dit langer omdat er ook water door de sloot wordt afgevoerd.
Kort samengevat is de slootvariant goedkoper omdat er geen extra werkzaamheden hoeven worden verricht, maar is de hersteltijd van het leidingtracé beperkt. Het rioolstelsel is financieel gezien onvoordeliger omdat er een leidingsleuf naar het rioolstelsel gegraven moet worden en een lozingsleiding hierop moet worden aangesloten.
Op basis hiervan gaat de voorkeur uit naar de sloot als lozingspunt. De verwachting is dat een leidingdefect in 2 dagen gerepareerd kan worden. Afhankelijk van de afvoercapaciteit van de sloot duurt het minimaal 1,5 dag voordat de sloot vol is tijdens een lozingsdebiet van 45 m^3/uur.

4.8 Lozingspunt

Het zuurstofarme retourwater van 14^{0}C dient in de zomerperiode eerst belucht te worden alvorens het de plas in stroomt. Voor het beluchten van water worden verschillende methodes toegepast, namelijk;

- versproeiing,
- cascade,
- plaatbeluchting,
- beluchtingtorens.

Bij het toepassen van een beluchter speelt de beeldkwaliteit een belangrijke rol omdat industriële toepassingen niet in een natuurlijke omgeving passen.
Omdat het om niet verontreinigd water en biologische zuiveringen gaat is intensieve beluchting niet nodig. Om die redenen vallen plaatbeluchters en beluchtingstorens af. De twee meest voor de hand liggende opties zijn cascade beluchting en versproeiing door middel van een fontein. Gelet op andere projecten waar LSC is toegepast, gaat de voorkeur uit naar cascade beluchting omdat deze tot gewenste resultaten heeft geleid en deze methode ook in een natuurlijke omgeving past. Na de beluchting kan er

ook voor gekozen worden om het water via een watergang af te laten stromen naar de Leemslagenplas. Het lozingswater krijgt dan de kans om de omgevingstemperatuur aan te nemen waardoor de thermische verontreiniging zal afnemen.

Het doel van een cascade beluchting is om door één of meerdere waterval(len) het zuurstofgehalte in het water te verhogen. Een belangrijk gegeven voor de zuurstoftoename is de valhoogte en het aantal cascades (steps). Deze is theoretisch te benaderen door de volgende formule toe te passen;

$$K_2 = \frac{C_{w,e} - C_{w,0}}{C_s - C_{w,0}} = 1 - (1-k)^n \text{ (Saxion, 2015)}$$

$K_2 \quad = Totale\ efficiëntie$
$C_{w,e} = zuurstofconcentratie\ effluent$
$C_{w,0} = Zuurstofconcentratie\ influent$
$C_s \quad = Maximale\ verzadegingsconcentratie$
$n \quad =$ Aantal 'steps'
$k \quad = Efficiëntie$

Uit zuurstofmetingen is gebleken dat in het midden van de plas de zuurstofverzadigingspercentage op 30 meter diepte tijdens stratificatie rond de 30% ligt. Op 2 meter diepte is dit 110%. In bijlage 15 is een tabel opgenomen waarin zuurstofverzadigingspercentage door middel van de temperatuur omgerekend kan worden naar de zuurstofconcentratie. De zuurstofconcentratie op 2 meter diepte is circa 10 mg/liter en op 30 meter diepte 4 mg/liter waardoor $C_{w,e}$ en $C_{w,0}$ nu bekend zijn. De aantal 'steps' en de k-waarde(efficiëntie) zijn de waarden die bepalend zijn voor het ontwerp. De k-waarde is uit te drukken in de valhoogte. Een k-waarde van 25% geeft een valhoogte van 0,4 meter weer. Zie tabel 10.

Hoogte(m)	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
k (%)	14	25	36	46	51	55

Tabel 10 - Valhoogten uitgezet in k-waardes

De C_s is berekend met de volgende formule.

$$C_s = K_D * \frac{M}{R*T} * \rho = 0{,}04135 * \frac{32}{8.3143*293} * 21.278 = 11{,}56 \frac{mg}{l} \text{ (Saxion, 2015)}$$

$K_D = Distributiecoëfficiënt\ (= 0{,}04135\ bij\ 5C^o)$
$R = Universel\ gas\ constante\ (= 8{,}3143 \frac{J}{K.mol})$
$T = Temperatuur\ in\ Kelvin$
$\rho = Partiële\ gasdruk = 21.278{,}25\ Pa$
$M = Molmassa\ zuurstof$

Vervolgens kan nu de K_2 worden berekend.

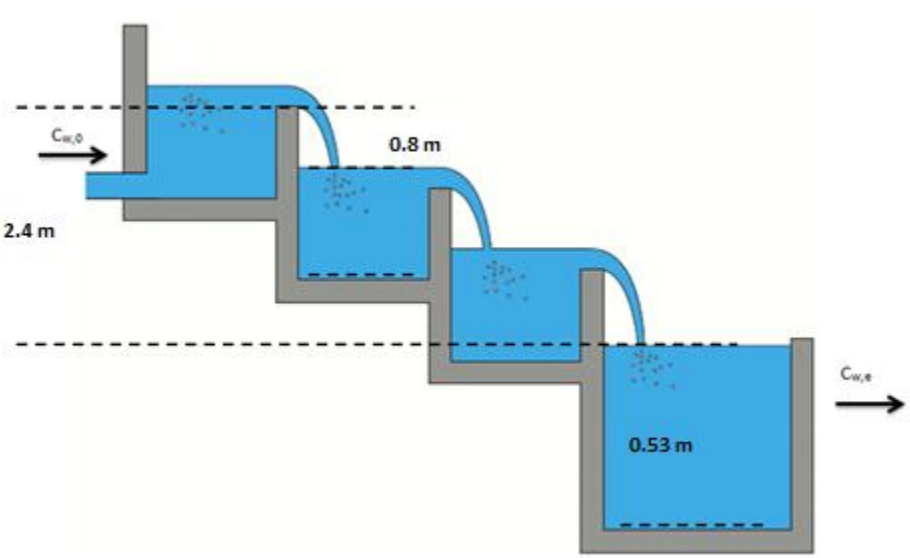
$$\frac{10-4}{11{,}56-4} = 79\% = 1-(1-k)^n$$

De totale efficiëntie is 79%. Vervolgens zijn alle K-waardes die in tabel 10 zijn opgenomen ingevuld. Bij elke k-waarde is berekend hoeveel steps er nodig zijn om aan de totale efficiëntie te voldoen. De uitslag hiervan is tabel 11 weergeven.

k(%)	Valhoogte (m)	aantal steps	Afgerond	Diepte bak(2/3 valhoogte)	Totale hoogte
0,14	0,2	10,347	11	0,13	2,2
0,25	0,4	5,422	6	0,27	2,4
0,36	0,6	3,495	4	0,40	2,4
0,46	0,8	2,532	3	0,53	2,4
0,51	1	2,188	3	0,67	3,0
0,55	1,2	1,954	2	0,80	2,4

Tabel 11 - Berekening van hoogten en 'steps'

De valhoogte is opgeteld bij de aantal 'steps' wat resulteert in de totale hoogte van de cascade. Zoals tabel 11 aantoont is er een minimale hoogte van 2.2 meter nodig. De werkelijke totale hoogte is iets groter omdat de hoogte van de opvangbak 2/3 van de valhoogte moet zijn. Deze wordt alleen bij de laatste opvangbak opgeteld.
De totale hoogte van de meeste varianten zijn gelijk. Daardoor zal er gekozen kunnen worden voor cascade die het eenvoudigst te realiseren is. Om een impressie te geven van een cascade ontwerp is in figuur 18 een cascade geprojecteerd met 3 'steps'.



Figuur 18 Visualistatie van berekening

Voor het LSC project in het Eesermeer is ook cascadebeluchting toegepast die uit een enkele ‘step’ van 2 meter bestond. De totale hoogte van die cascade komt dus redelijk overeen met deze hoogte. Door de cascade op een natuurlijk wijze in de omgeving te integreren wordt beeldkwaliteit verhoogd. In een verder stadium kan dieper worden ingegaan op de details van het ontwerp zoals de breedte van de cascade.

5 Conclusie en aanbevelingen

De belangrijkste parameter om de laagopbouw van een plas te bepalen is de temperatuur. Met deze parameter kan de dikte van de lagen in kaart worden gebracht.
De beschikbare capaciteit van de Leemslagenplas kan op 2 manieren geïnterpreteerd worden. De maximale aanwezigheid van koud water en de maximale hoeveelheid koud water die beschikbaar is voor gebruik, rekening houdend met veiligheidsmarges. De totale hoeveelheid aan energie is 10.450 MW waarvan 7837 MW beschikbaar is als er een veiligheidsmarge van 25% gehanteerd wordt en de dikte van het hypolimnion van 23 meter wordt afgerond naar 20 meter. Tevens is er gerekend met een aanlevertemperatuur van 8°C. Indien het aanlevertemperatuur lager is, zal er meer energie beschikbaar zijn. In dit project zijn de veiligheidsmarges ruim aangenomen. Mogelijk kunnen de veiligheidsmarges naar beneden worden bijgesteld als na aantal jaar blijkt dat er voldoende koude overblijft en de plas voldoende koude oplaad.
Om de theoretische benadering van de energiecapaciteitsbepaling te toetsen aan de praktijk, is het van belang dat de watertemperatuur in de plas gemeten wordt. Zo kan worden vastgesteld hoeveel meters het hypolimnion is ingeklonken. Tevens kan worden bevestigd of de plas tijdens de winter voldoende koude oplaad en of er een versnelling van het stratificatieproces zichtbaar is. Wellicht kan de lokale duikvereniging constateren of vissen zich op grotere dieptes begeven ten gevolge van vergroting van het epilimnion.
De milieueffecten ten gevolge van LSC zijn gering mits er maatregelen getroffen worden. De zuurstofconcentratie dient verhoogd te worden voordat het water in het epilimnion terug stroomt.
Om de milieurisico's te beperken dient het effluent periodiek gecontroleerd te worden op fosfaten en stikstoffen om zo nodig in een vroeg stadium in te kunnen grijpen. Verder wordt niet verwacht dat de thermische verontreiniging nadelige gevolgen heeft. Gevaar voor hoge watertemperaturen en botulisme is onnodig omdat in de zomer de temperatuur in het hypolimnion eerder af zal nemen.
Het technisch ontwerp bestaat uit 6 hoofdonderdelen, namelijk het aanzuigfilter, pompen, leidingtype, leidingtracé, lozingspunt en calamiteitenvoorziening. Voor de voorkeursvarianten zijn vooral de kosten en (druk)verliezen meegenomen in de afwegingen. Het drukverlies van het leidingtracé is op twee methodes berekend, die beide tot hetzelfde antwoord resulteerde. Het aantal appendages zijn in dit ontwerp geschat. Mogelijk verandert dit aantal waardoor het drukverlies iets zal afwijken van de huidige berekening.
Bij de pompkeuze is opgemerkt dat de aanschafkosten van de pomp geen grote invloed heeft op de totale kosten voor het pompkelder ontwerp, omdat de meeste kosten worden gemaakt door het stroomverbruik van de pomp. Daarom is het van belang dat de keus van de pomp gedimensioneerd is op het debiet die meestentijds gevraagd wordt.

Afhankelijk van de energievraag, kan naast het ZGT, ten minste nog één marktpartij gebruik maken van koude uit de Leemslagenplas. Met name voor het technisch ontwerp is het vooraf vastleggen van marktpartijen een kosten besparende factor. Hiermee voorkom je over- en onderdimensionering van het technisch ontwerp. Een aanbeveling voor een volgend LSC project is om eerst een marktonderzoek op te stellen.

Een vreemd verschijnsel is de gemeten zuurstofconcentraties die in bijlage 5 is weergegeven. De resultaten komen niet overeen met de theorie dat koud water meer zuurstof kan opnemen dan warm water. In bijlage 5 is te zien dat op dezelfde dieptes, warmer water een hoger zuurstofverzadigingspercentage heeft dan kouder water. Indien nodig kan verdere onderzoek de reden hiervan uitwijzen.
Wat ook is op te merken dat de meetresultaten die bijlage 4 en 5 zijn opgenomen van elkaar afwijken. Op 20 meter diepte is er een verschil van ruim 2 ^{o}C waar te nemen tussen de metingen die in november 2002 en oktober 2014 zijn verricht. De oorzaak van dit verschil is onbekend. Tevens blijkt uit de metingen van 2002 dat in de zomerperiode het water op 30 meter diepte een temperatuur van 6,5 tot 7 ^{o}C kan aannemen. Dit betekent dat er maar 1 tot 1,5 ^{o}C verloren mag gaan tijdens transport om aan de gewenste aanlevertemperatuur van 8 ^{o}C te komen.

Ook kan worden opgemaakt dat de wet (nog) niet voorbereid is op nieuwe technieken zoals LSC. Zoals in hoofdstuk 3.5 is weergegeven wordt er afhankelijk van de warmtevracht, toestemming of een vergunning verleend om water te lozen. In het belang van het milieu is het logischer om de opwarming van het oppervlaktewaterlichaam te bepalen in plaats van de warmtevracht. Dit geeft aan dat de lozingswet op het moment alleen op stromende oppervlaktewaterlichamen is gebaseerd.

De eindconclusie is dat het ziekenhuis van Almelo kan worden voorzien van koude door middel van Lake Source Cooling. Daarbij draagt dit project bij aan een koolstofarme economie omdat alleen het verpompen van het koude medium energie vraagt. Als deze pompen aangedreven worden door zonne-energie wordt deze techniek nog groener. Tevens kan onderzocht worden welke mogelijkheden er nog meer zijn betreft het verwarmde retourwater. Wellicht is het geschikt voor het leveren van warmte of energiewinning door waterkracht in combinatie met de cascade.

6 Bibliografie

Artikel 3.6, l. 2. (2015). *Wet- en regelgeving*. Opgehaald van Overheid: http://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/Hoofdstuk3/Afdeling31/315/Artikel36/geldigheidsdatum_17-05-2015

Bakker. (2011). Zuurstof toevoer legt fosfaat. *Land + Water* .

Boehrer, S. &. (2008). *Stratification of Lakes.*

Bruijne, D. (2009). *Overzicht indicatoren fosfaat nalevering vanuit de waterbodem.*

Carlson. (1996). *North American Lake Management.* Opgehaald van Secchi Dip-In: http://www.secchidipin.org/Temp_O2.htm

Department, M. (2007). *Annual summery report.*

Eary. (2009). *Mine Pit Lakes.* Colorado: SME.

Engelsman. (2013 - 2014). Vloeistofmechanica . Hogeschool van Amsterdam.

Fink. (2014). *Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat.*

Gemeente Almelo, Z. A. (2011). *Almelo duurzaam en efficiënt.* Almelo.

Gerven, V. (2011). *Nalevering van fosfor naar oppervlaktewater.*

Haskoning, R. (2002). Inhoud van Leemslagenplas.

Larenstein, V. H. (2011). College.

Osmond. (1995). *Dissolved oxygen*. Opgehaald van Watershedss: http://www.water.ncsu.edu/watershedss/info/do.html

Saxion. (2015). College Watertreatment.

Smolders, B. &. (2011). Zuurstoftoevoer legt fosfaat. *Land + Water* .

Spiegel, V. D. (1991). *Rapport Visserijkundig onderzoek.* Utrecht.

Toolbox, E. (z.d.). *Engineering Toolbox*. Opgehaald van http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html

University, C. (z.d.). *Energy en sustainability*. Opgehaald van Cornell University: http://energyandsustainability.fs.cornell.edu/util/cooling/production/lsc/eis/fish.cfm

University, C. (z.d.). *How lake source cooling works*. Opgehaald van Energy and sustainability: http://energyandsustainability.fs.cornell.edu/util/cooling/production/lsc/works.cfm

University, C. (2013). *Table 2. Lake Water SPDES Data Reported*. Opgehaald van http://energyandsustainability.fs.cornell.edu/file/DMR_LakeWater.pdf

university, G. v. (z.d.). Opgehaald van http://faculty.gvsu.edu/videticp/stratification.htm

Vaate. (2008). *Handboek voor ecologisch.*

Velde. (2009). *Wetenschapsforum*. Opgehaald van http://www.wetenschapsforum.nl/index.php/topic/121459-microcursus-warmtecapaciteit-deel-1-basisbegrippen/

Waterwereld. (z.d.). *Limnologie- zuurstof en saturatie.* Opgehaald van Waterwereld: http://www.waterwereld.nu/limnology4.php

Wit, D. (2015). Fosfaat metingen.

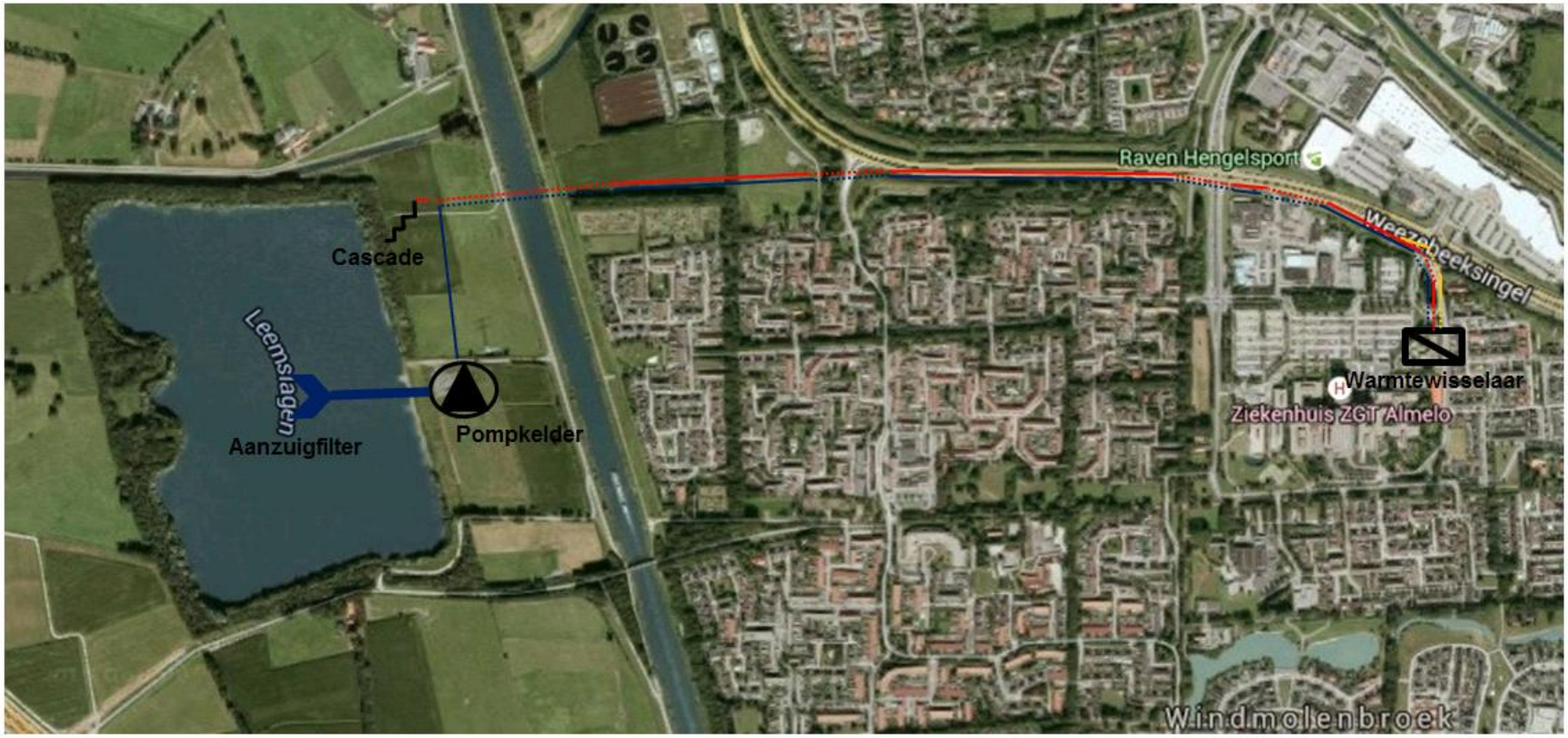
Wit, D. (2011). *Lake Source Cooling Eesermeer.*

Wit, D. (2014). Meting.

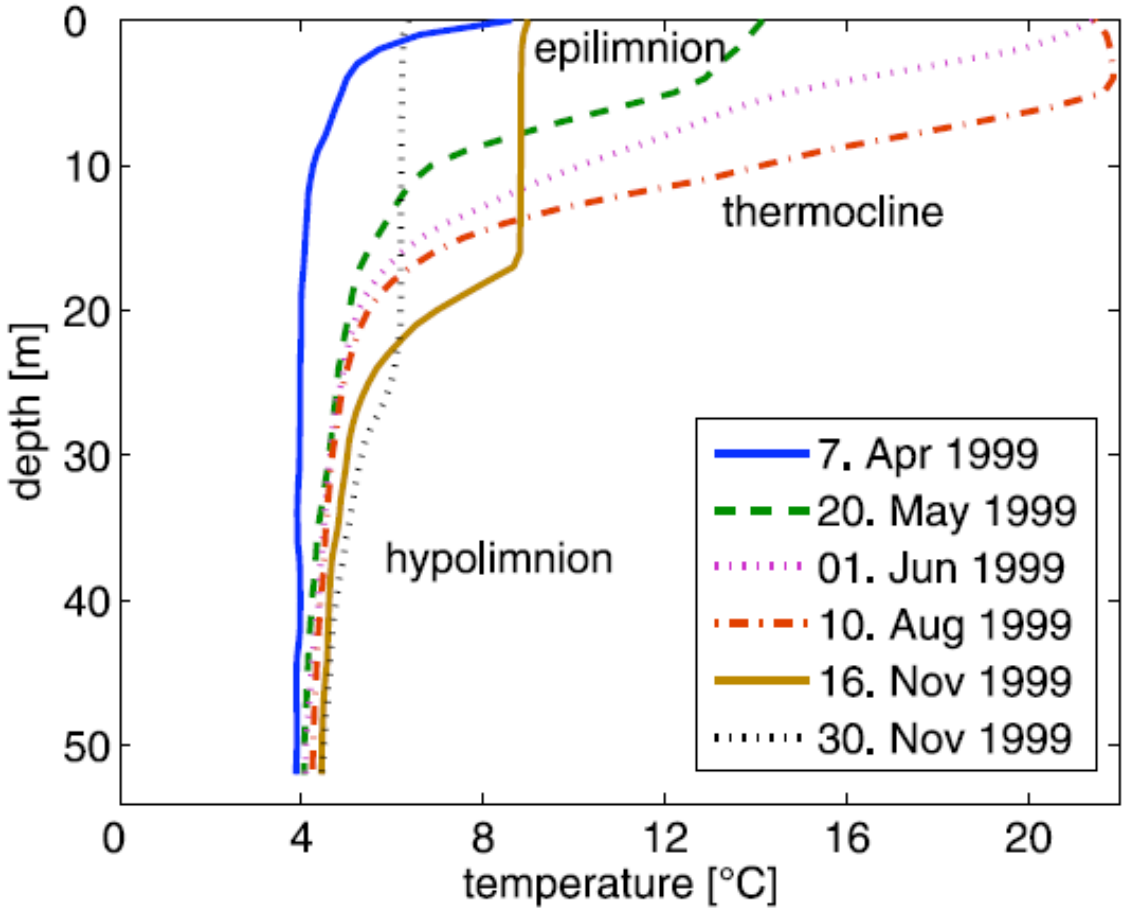
Wit, D. (2014). Temperatuurverloop.

7 Bijlagen

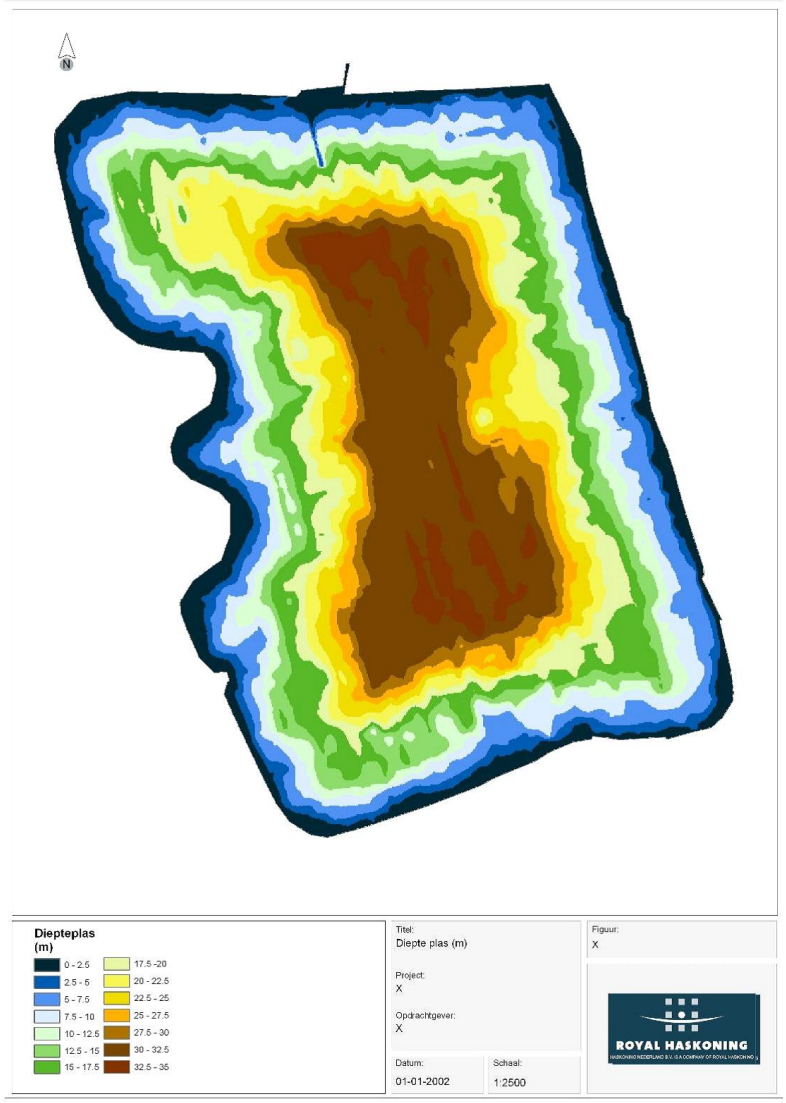
Bijlage 1 Situatiekaart



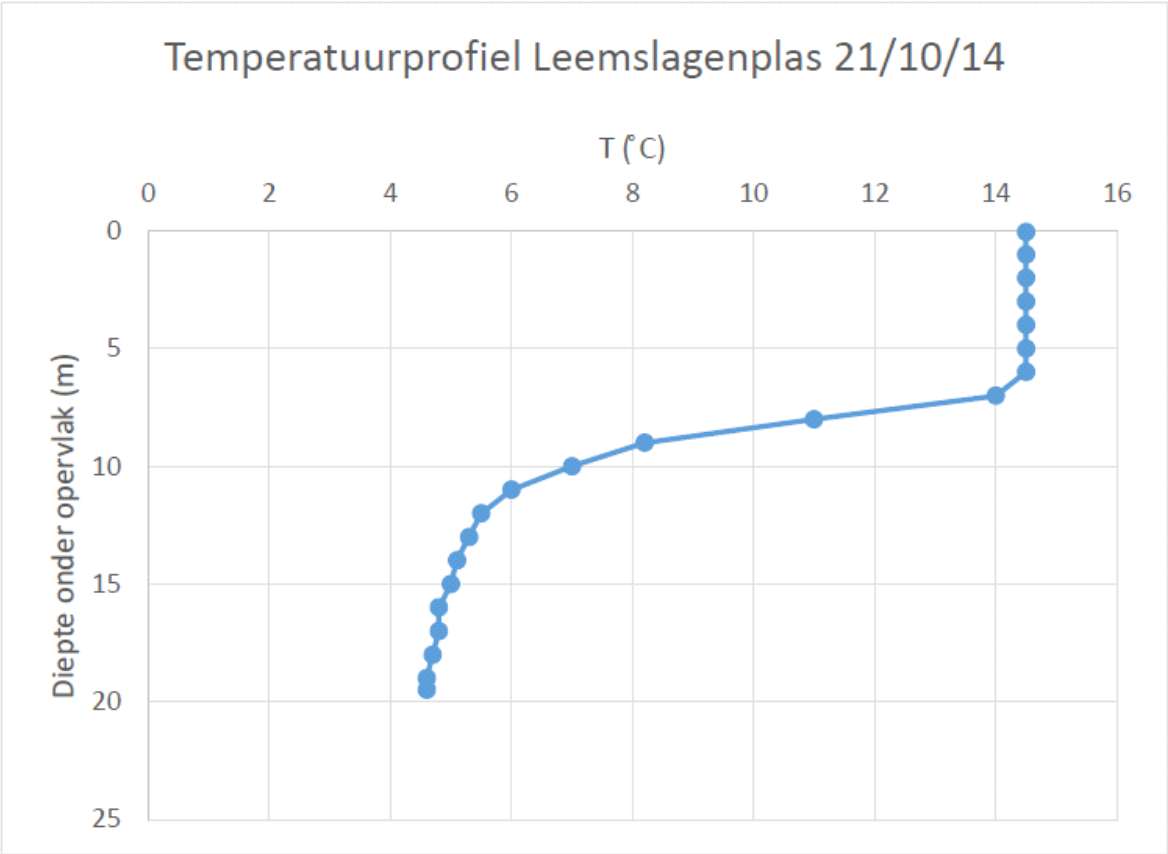
Bijlage 2 Temperatuurverloop Meer het Mondsee



Bijlage 3 Dieptekaart



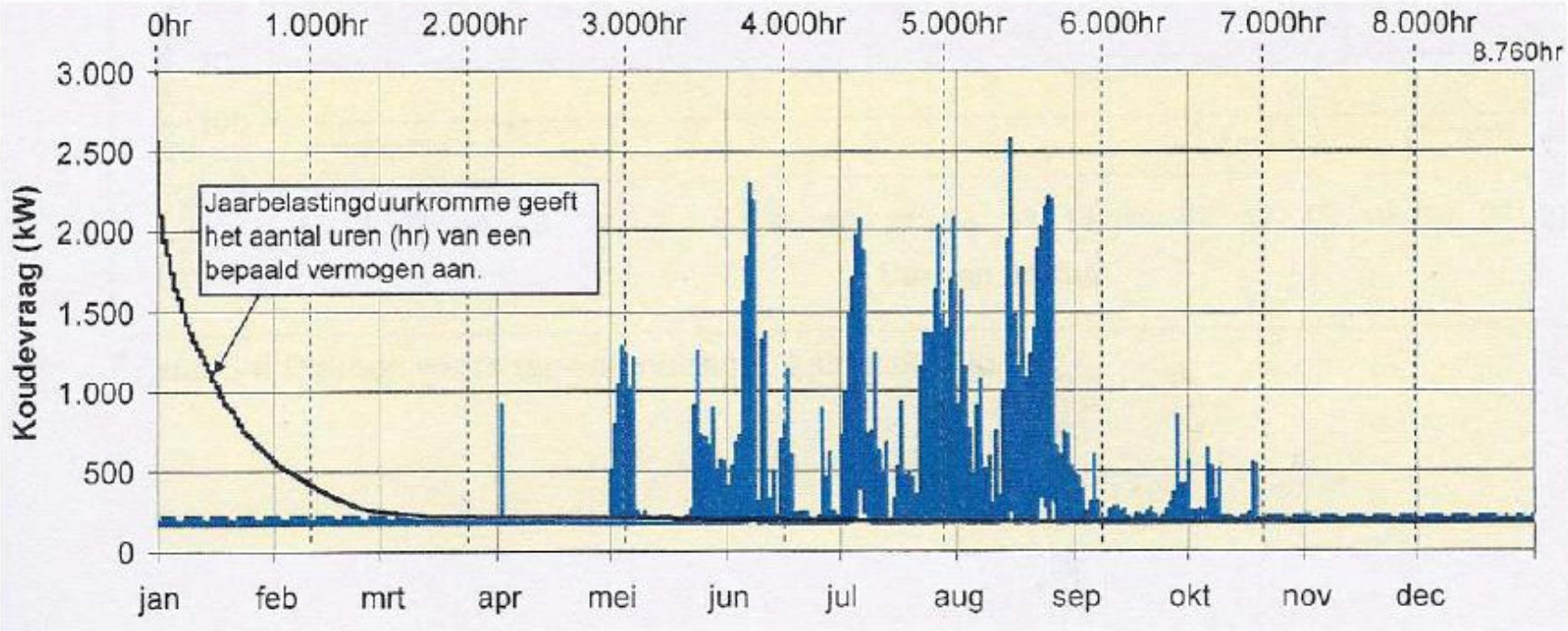
Bijlage 4 Resultaat meting 2014



Bijlage 5 Resultaat metingen 2002

Monsterdatum	29-08-2002		07-11-2002		04-03-2003		18-06-2003	
EcoLIMSnummer	326302		326303		326304		326305	
diepte (m)	O2%	T (°C)	O2%	T (°C)	O2%	T (°C)	O2%	T (°C)
0.00	119	23,4	88	9,8	94	3,9	117	22,4
1.00	118	22,8	87	9,8	95	4	118	22,3
2.00	120	22,6	87	9,8	95	3,9	119	22,1
3.00	121	22,6	86	9,8	94	3,9	120	21,9
4.00	120	22,5	87	9,8	94	3,9	133	21,5
5.00	119	22,2	87	9,8	94	3,9	129	18,7
6.00	131	20,7	87	9,8	94	4	146	16,4
7.00	125	18	86	9,8	95	4	172	13,8
8.00	119	14,7	86	9,8	94	4	175	11,2
9.00	110	12,3	86	9,8	94	3,9	166	9,2
10.00	86	10,2	85	9,8	94	3,9	142	8,1
11.00	59	9	85	9,8	93	3,9	111	7,2
12.00	47	8,3	86	9,8	93	3,9	86	6,4
13.00	42	7,6	86	9,8	93	3,9	73	5,9
14.00	40	7,4	86	9,8	94	3,9	71	5,7
15.00	40	7,1	44	9,1	94	3,9	68	5,5
16.00	40	6,9	22	7,3	94	3,9	66	5,3
17.00	41	6,7	22	6,8	94	3,9	65	5,3
18.00	42	6,6	23	6,6	94	3,9	65	5,2
19.00	41	6,4	21	6,5	93	3,9	67	5,1
20.00	41	6,4	19	6,5	93	3,9	64	5
25.00	39	6,8	23	6,8	94	3,9	57	5,8
30.00	36	7,1	20	6,6	94	3,9	5	5,5
35.00	21	7,1	4	6,5				

Bijlage 6 Energievraag ZGT



Bijlage 7 Drukverlies leidingen (Grafieken en rekentabel)

Uitgangspunten		
Lengte leiding	4400	
Dichtheid (ρ)	1002	*kg/m3*
Zwaartekracht (g)	9,81	*m/s*
Wandruwheid (k)	0,01	*mm*
Wandruwheid (k)	0,00001	*m*
Viscositeit	0,001569	*pa/s*

Colebrook-White	**Getal van Reynolds**	**Relatieve wandruwheid**	***V (m/s)***	***A (m2)***	***Diameter (m)***	***Drukval (m)***	***Bar***	***KPa***
0,01857	518737,1	0,00008	6,49819	0,0122718	0,125	1406,8352	137,869	*13787,0*
0,01657	324210,7	0,00005	2,53835	0,0314159	0,2	119,71674	11,7322	*1173,2*
0,01627	259368,6	0,00004	1,62454	0,0490873	0,25	38,516365	3,77460	*377,5*
0,01628	216140,5	0,00003	1,12815	0,0706858	0,3	15,493508	1,51836	*151,8*
0,01645	185263,3	0,00003	0,82885	0,0962112	0,35	7,2400203	0,70952	*71,0*
0,01668	162105,4	0,00003	0,63458	0,1256637	0,4	3,765675	0,36903	*36,9*
0,01694	144093,7	0,00002	0,50140	0,1590431	0,45	2,1223929	0,20799	*20,8*
0,01721	129684,3	0,00002	0,40613	0,1963495	0,5	1,2733598	0,12478	*12,5*
0,01748	117894,8	0,00002	0,33565	0,2375829	0,55	0,8031886	0,07871	*7,9*
0,01775	108070,2	0,00002	0,28203959	0,282743339	0,6	0,527841459	0,05172	*5,2*
0,01802	99757,1	0,00002	0,24031776	0,331830724	0,65	0,358979478	0,03518	*3,5*
0,01827	92631,6	0,00001	0,20721276	0,3848451	0,7	0,251335734	0,02463	*2,5*

Bijlage 8 Pompcapaciteit berekening

Pompberekening		
Vraag	17520	*MW*
"	6,3072E+13	*J*
warmte cap. Water	4180	*J/K*
Delta T	6	*graden C*
Massa water	2514832536	*kg*
Inhoud water	2514832,536	m^3
Inhoud water	2,515	$x\ 10^6\ m3$
Debiet (q)	287,08	m^3/h
Leidingdiameter (d)	0,3	*m*
Leidingstraal (r)	0,15	*m*
Leiding opp. (A)	0,071	m^2
Leiding dikte	0,02	
Stroomsnel. (v)	1,13	*m/s*

Bijlage 9 Warmtevracht & Energiecapaciteit berekening

Warmtevracht		
Delta T	10	*ΔT*
Debiet (q)	861,2440191	*m^3/h*
Debiet (q)	0,23923445	*m^3/s*
Massa stroom	239,2344498	*kg/s*
Massa stroom	239234,4498	*gr/s*
Energie	6000000	*j/s*
Energie	6000	*kj/s*

Energiecapaciteit		
Inhoud water	1500000,000	*m^3*
Massa water	1500000000	*kg*
Delta T	6	*ΔT*
Energie	3,762E+13	*J*
Energie	37,62	*TJ*
Vermogen	10450	*MWh*

Bijlage 10 Cascade berekening

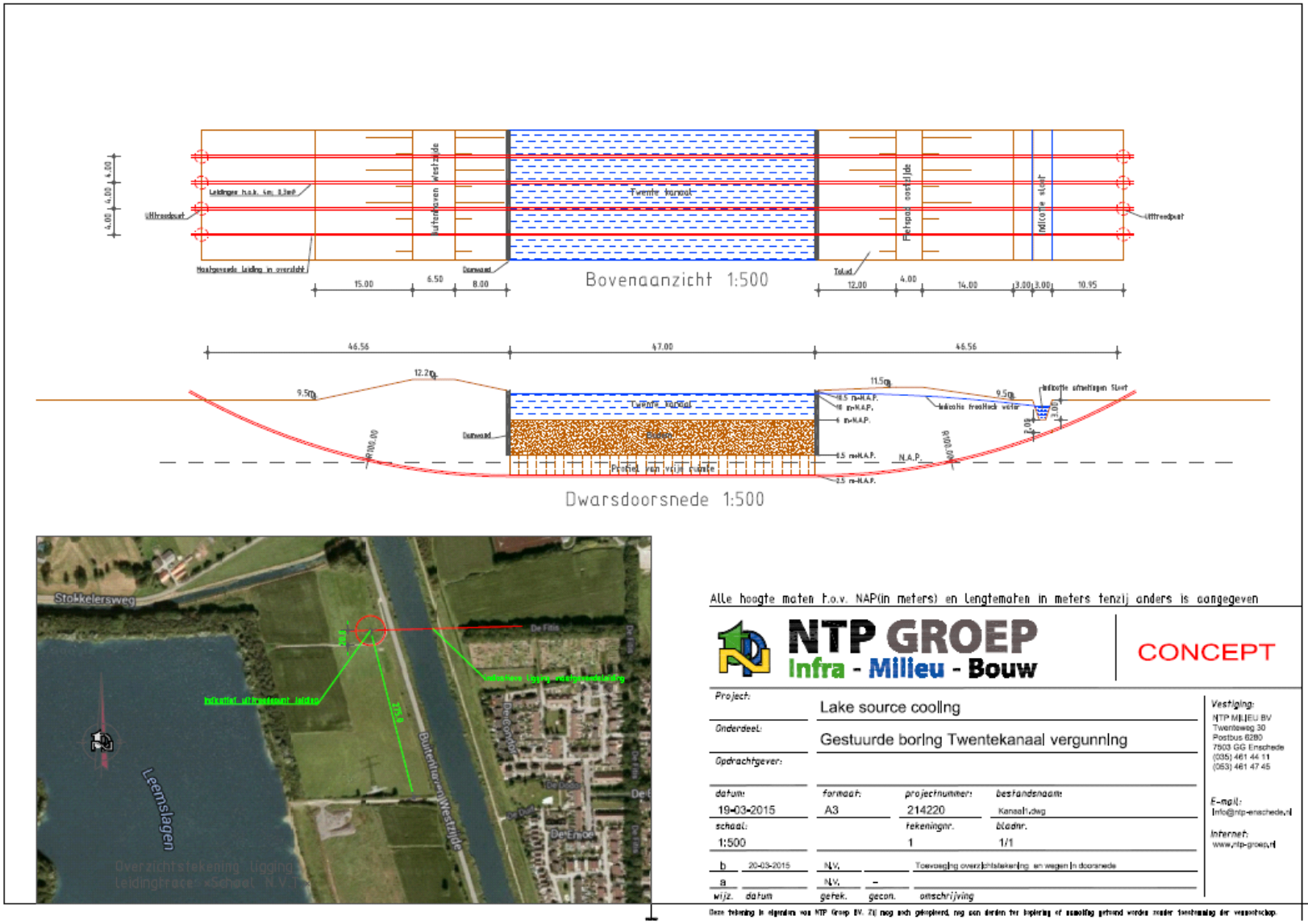
Uitgangspunten		
Distribution coëfficiënt (k_d)	0,04135	
Effluent ($C_{w,e}$)	10	*mg/l*
Influent ($C_{w,o}$)	4	*mg/l*
Max verzadiging	11,56	*mg/l*
Totale eff. (k_2)	0,79	*%*

k(%)	**Valhoogte (m)**	**aantal steps**	**Afgerond**	**Diepte bak(2/3 valhoogte)**	**Totale hoogte**
0,14	0,2	10,347	11	0,13	2,2
0,25	0,4	5,422	6	0,27	2,4
0,36	0,6	3,495	4	0,40	2,4
0,46	0,8	2,532	3	0,53	2,4
0,51	1	2,187	3	0,67	3,0
0,55	1,2	1,954	2	0,80	2,4

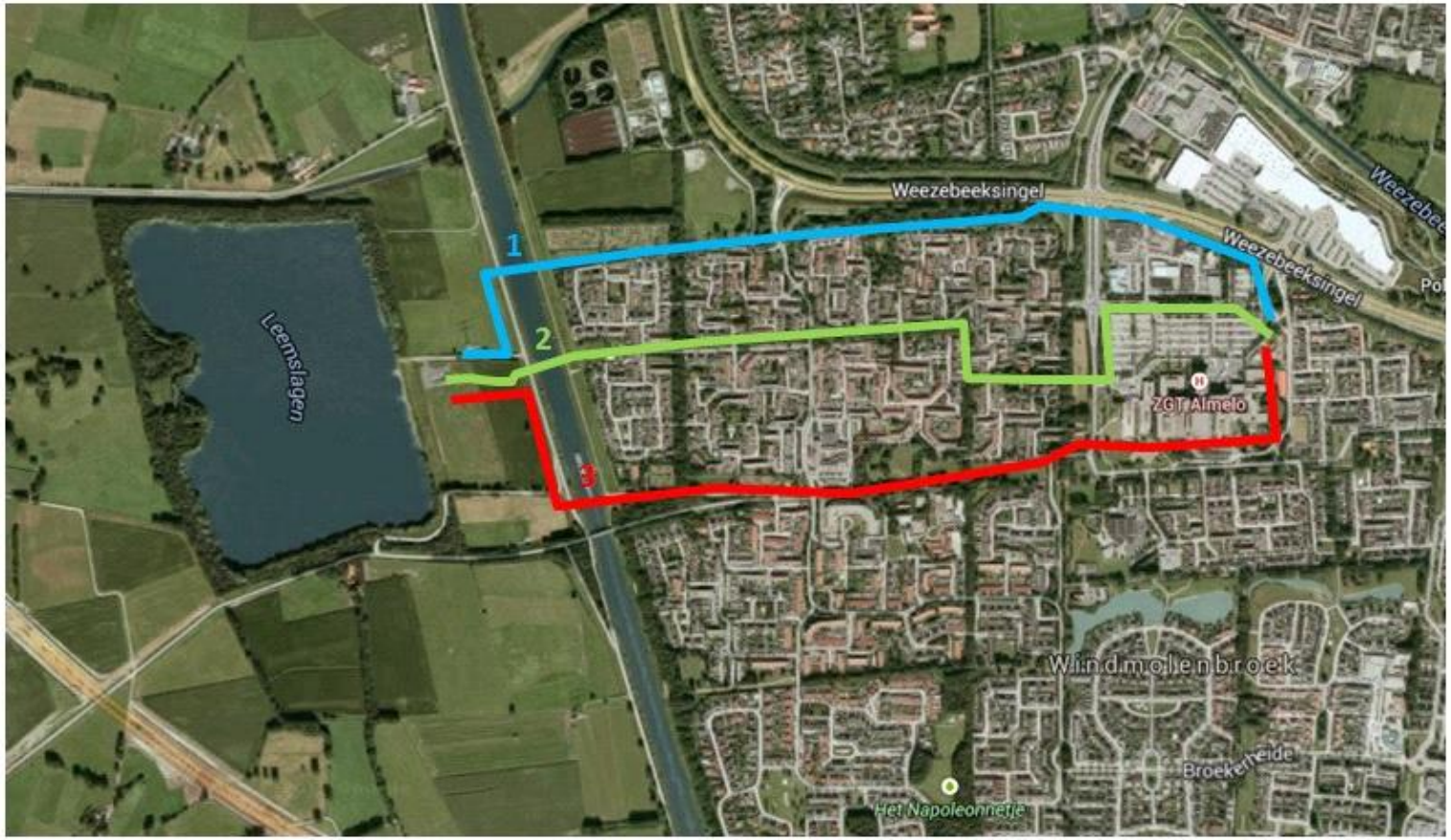
Bijlage 11 Vergelijking kosten Grondwerkers

De Lange				**VanVulpen**				**Gebr. Van Leeuwen**		
300 mm				**300 mm**				**300 mm**		
Gestuurde boring	370	m		Gestuurde boring	370	m		Gestuurde boring	370	m
Raket boring	240	m		Raket boring	240	m		Raket boring	240	m
Lassen	38	stuks		Lassen	10	stuks		Lassen	38	stuks
Gestuurde boring	85	€/m		**Gestuurde boring**	82,5	€/m		**Gestuurde boring**	98,6	€/m
Gyroscoop	35	€/m		Gyroscoop	11,5	€/m		Gyroscoop		€/m
Lassen	67	€/stuk		Lassen	96	€/stuk		Lassen	115	€/stuk
Raket boring	155	€/m		**Raket boring**		€/m		**Raket boring**	236,5	€/m
Kosten				**Kosten**				**Kosten**		
Gestuurde boring	44400	€		Gestuurde boring	30525	€		Gestuurde boring**	36482	€
Gyroscoop	12950	€		Gyroscoop	4255	€		Gyroscoop	0	€
Raket boring	37200	€		Overige kosten	21230	€		Raket boring	56760	€
Lassen	2546	€		Lassen	960	€		Lassen	4370	€
Tekeningen	3500	€		Tekeningen	1575	€		Tekeningen	5500	€
Totaal	**87646**	**€**		**Totaal***	**58545**	**€**		**Totaal**	**103112**	**€**
				**Alleen gestuurde boring*				*** Incl. gyroscoop*		

Bijlage 12 Boorprofiel Twentekanaal



Bijlage 13 Varianten Leidingtracé



Bijlage 14 Lozingsmogelijkheden

Rioolstelsel
Afvoersloot
Weezebeek
Locatie warmtewisselaar

Bijlage 15 Zuurstofverzadigingspercentages en - concentraties

Milligram per liter

Temperatuur in °C	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5	20
0	3	7	10	14	17	21	24	28	31	34	38	41	45	48	52	55	59	62	66	69	72	76	79	83	86	90	93	97	100	103	107	110	114	117	121	124	128	131	134	138
1	4	7	11	14	18	21	25	28	32	35	39	42	46	49	53	56	60	63	67	70	74	77	81	85	88	92	95	99	102	106	109	113	116	120	123	127	130	134	137	141
2	4	7	11	14	18	22	25	29	33	36	40	43	47	51	54	58	62	65	69	72	76	80	83	87	91	94	98	101	105	109	112	116	120	123	127	130	134	138	141	145
3	4	7	11	15	19	22	26	30	34	37	41	45	49	52	56	60	63	67	71	75	78	82	86	90	93	97	101	104	108	112	116	119	123	127	131	134	138	142	146	149
4	4	8	11	15	19	23	27	31	34	38	42	46	50	53	57	61	65	69	73	76	80	84	88	92	95	99	103	107	111	115	118	122	126	130	134	137	141	145	149	153
5	4	8	12	16	20	24	28	31	35	39	43	47	51	55	59	63	67	71	75	79	83	87	91	94	98	102	106	110	114	118	122	126	130	134	138	142	146	150	154	157
6	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	68	69	73	77	81	85	89	93	97	101	105	109	113	117	121	125	129	133	137	141	145	149	153	157	161
7	4	8	12	17	21	25	29	33	37	41	45	50	54	58	62	66	70	74	79	83	87	91	95	99	103	107	112	116	120	124	128	132	136	140	145	149	153	157	161	165
8	4	8	13	17	21	25	30	34	38	42	47	51	55	59	64	68	72	76	81	85	89	93	97	102	106	110	114	119	123	127	131	136	140	144	148	153	157	161	165	169
9	4	9	13	17	22	26	30	35	39	43	48	52	57	61	65	70	74	78	83	87	91	96	100	104	109	113	117	122	126	130	135	139	143	148	152	157	161	165	170	174
10	4	9	13	18	22	27	31	35	40	44	49	53	58	62	66	71	75	80	84	88	93	97	102	106	111	115	119	124	128	133	137	142	146	150	155	159	164	168	173	177
11	5	9	14	18	23	27	32	36	41	45	50	55	59	64	68	73	77	82	86	91	95	100	105	109	114	118	123	127	132	136	141	145	150	155	159	164	168	173	177	182
12	5	9	14	19	23	28	32	37	42	46	51	56	60	65	69	74	79	83	88	93	97	102	106	111	116	120	125	130	134	139	144	148	153	157	162	167	171	176	181	185
13	5	10	14	19	24	29	33	38	43	48	52	57	62	67	71	76	81	86	90	95	100	105	110	114	119	124	129	133	138	143	148	152	157	162	167	171	176	181	186	190
14	5	10	15	19	24	29	34	39	44	49	53	58	63	68	73	78	83	87	92	97	102	107	112	117	121	126	131	136	141	146	150	155	160	165	170	175	180	184	189	194
15	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	54	59	64	69	74	79	84	89	94	99	104	109	114	119	124	129	134	139	144	149	153	158	163	168	173	178	183	188	193	198
16	5	10	15	20	25	30	35	40	45	51	56	61	66	71	76	81	86	91	96	101	106	11	116	121	126	131	136	141	146	152	157	162	167	172	177	182	187	192	197	202
17	5	10	15	21	26	31	36	41	46	52	57	62	67	72	77	82	88	93	98	103	108	113	119	124	129	134	139	144	149	155	160	165	170	175	180	186	191	196	201	206
18	5	11	16	21	26	32	37	42	47	53	58	63	68	74	79	84	89	95	100	105	111	116	121	126	132	137	142	147	153	158	163	168	174	179	184	189	195	200	205	211
19	5	11	16	22	27	32	38	43	48	54	59	65	70	75	81	86	91	97	102	108	113	118	124	129	134	140	145	151	156	161	167	172	177	183	188	194	199	204	210	215
20	5	11	16	22	27	33	38	44	49	55	60	66	71	77	82	88	93	99	104	110	115	121	126	132	137	143	148	154	159	165	170	176	181	187	192	198	203	209	214	220
21	6	11	17	22	28	34	39	45	51	56	62	67	73	79	84	90	96	101	107	112	118	124	129	135	140	146	152	157	163	169	174	180	185	191	197	202	208	213	219	225
22	6	11	17	23	28	34	40	45	51	57	63	68	74	80	85	91	97	102	108	114	119	125	131	136	142	148	153	159	165	170	176	182	188	193	199	205	210	216	222	227
23	6	12	17	23	29	35	41	47	52	58	64	70	76	81	87	93	99	105	110	116	122	128	134	140	145	151	157	163	169	174	180	186	192	198	203	209	215	221	227	233
24	6	12	18	24	29	35	41	47	53	59	65	71	76	82	88	94	100	106	112	118	124	129	135	141	147	153	159	165	171	176	182	188	194	200	206	212	218	224	229	235
25	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	127	133	139	145	151	157	163	169	175	181	187	193	199	205	211	217	223	229	235	241
26	6	12	18	24	30	37	43	49	55	61	67	73	79	85	91	98	104	110	116	122	128	134	140	146	152	159	165	171	177	183	189	195	201	207	213	220	226	232	238	244
27	6	13	19	25	31	38	44	50	56	63	69	75	81	88	94	100	106	113	119	125	131	138	144	150	156	163	169	175	181	188	194	200	206	213	219	225	231	238	244	250
28	6	13	19	25	32	38	44	51	57	63	70	76	82	89	95	101	108	114	120	127	133	139	146	152	158	165	171	177	184	190	196	203	209	215	222	228	234	241	247	253
29	6	13	19	26	32	39	45	52	58	65	71	78	84	91	97	104	110	117	123	130	136	143	149	156	162	169	175	182	188	195	201	208	214	221	227	234	240	247	253	260
30	7	13	20	26	33	39	46	53	59	66	72	79	86	92	99	105	112	118	125	132	138	145	151	158	164	171	178	184	191	197	204	211	217	224	230	237	243	250	257	263

Zuurstofverzadigingspercentage