

## Een biogeochemische analyse van het grondwater en de onderwaterbodem van de G.W. Lovendaalsingel te Grave.



*Titel rapport:*

*Een biogeochemische analyse van het grondwater en de onderwaterbodem van de G.W. Lovendaalsingel te Grave.*

*Auteur:*

*A.J.P. (Fons) Smolders*

*Opdrachtgever: Waterschap Aa en Maas*

*Rapportnummer: 2015.20*

**Informatie:**

B-WARE Research Centre  
Radboud Universiteit Nijmegen  
Mercator III, Toernooiveld 1  
6525 ED Nijmegen  
Kamernummer: 02.025  
Tel: 024-3652816  
a.smolders@b-ware.eu

© B-WARE Research Centre, Nijmegen, 2015.

# 1. Inleiding

De G.W. Lovendaalsingel in Grave is een singel parallel aan de rivier Graafsche Raam. De singel maakte vroeger deel uit van de oude slotgracht. Sinds een aantal jaar treden er in de Lovendaalsingel periodiek blauwalgenbloeien op. In 2011 is er sprake geweest van vissterfte. De maximale diepte van de singel is ongeveer 1,7 m, met een gemiddelde geschatte diepte van 1,3 m. In de singel is sprake van een relatief dikke sliblaag (25 tot 50 cm). De oppervlakte van de Lovendaalsingel en de bijbehorende afvoerende oever bedragen beiden ongeveer 1,7 ha (Witteveen+Bos, 2014).

In opdracht van Waterschap Aa en Maas heeft Onderzoekcentrum B-WARE veldmetingen gedaan met als doel gegevens te verzamelen om de door Witteveen+Bos (2014) uitgevoerde watersysteemanalyses voor de G.W. Lovendaalsingel in Grave te kunnen herijken. Deze watersysteemanalyse is namelijk deels gebaseerd op aannames en kentallen uit de literatuur. Waterschap Aa en Maas wil meer inzicht krijgen in de daadwerkelijk grootte van de bijdrage van de onderwaterbodem en het grondwater aan de fosfaatbelasting van de Lovendaalsingel, waardoor een reëler beeld geschetst kan worden van de werkelijke bijdrage van de diverse bronnen en daarmee de kans op succes van eventuele maatregelen kan worden vergroot.

In augustus 2014 en februari 2015 zijn monsters genomen van de onderwaterbodem en het poriewater van de onderwaterbodem. Daarnaast is de lokale grondwaterkwaliteit bepaald. Het poriewater en het grondwater werden zowel in het zomerhalfjaar als in het winterhalfjaar bemonsterd. De bodemkwaliteit werd alleen in het zomer halfjaar bepaald. Op grond van deze analyses kunnen de potentiële bijdrages van de onderwaterbodem en het grondwater beter worden ingeschat. De resultaten van de analyses worden in deze rapportage toegelicht en geïnterpreteerd.

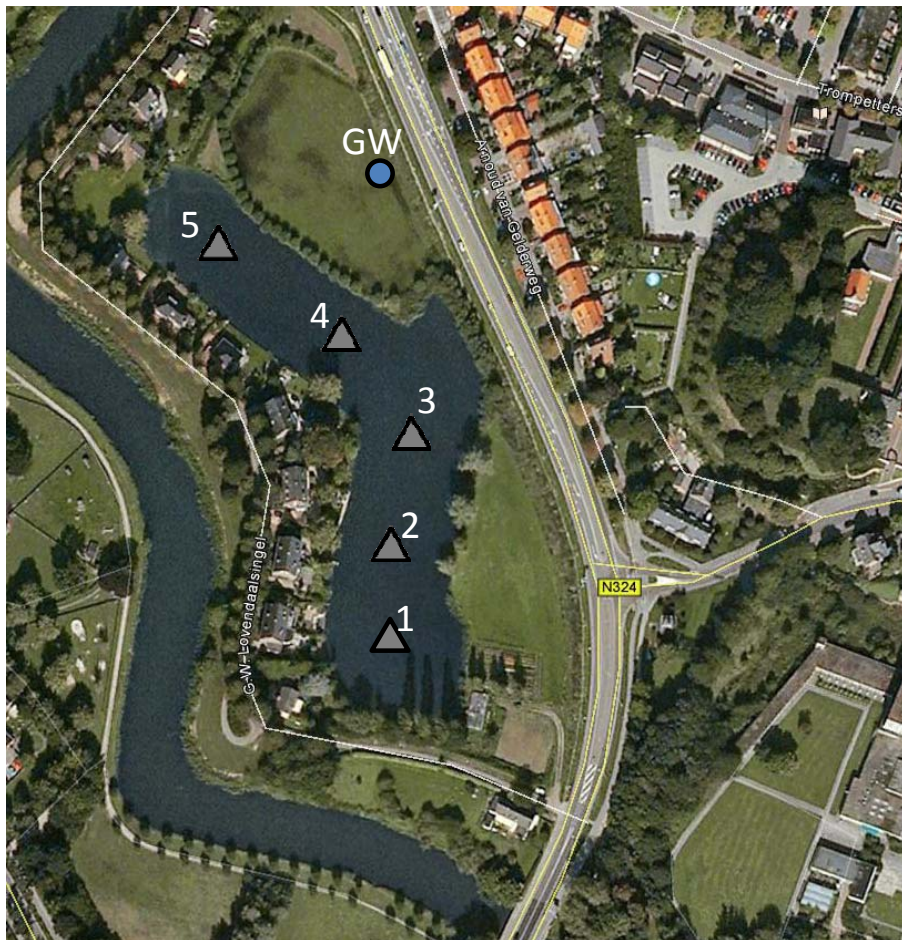


*Figuur 1. De plas G.W. Lovendaalsingel te Grave. Foto's zijn gemaakt tijdens het veldwerk op 27 augustus 2014*

## 2. Materiaal en Methode

### 2.1 Veldwerk

Op 27 augustus 2014 en 2 februari 2015 werden vanaf een 'bellyboat' onderwaterbodemmonsters verzameld met behulp van een Eckman bodemhapper. Hierbij werd steeds de bovenste 10 cm van de onderwaterbodem bemonsterd. De sedimentmonsters werden verzameld op de locaties die worden weergegeven in Figuur 2. Op de locatie 3 werd ook een oppervlaktewatermonster genomen. Op locatie GW werd met behulp van een poreuze cup een freatische grondwatermonster verzameld op een diepte van twee meter.



**Figuur 2.** De G.W. Lovendaalsingel te Grave met de ligging van de locaties waar de monsters zijn genomen. GW staat voor de locatie waar het grondwatermonster werd verzameld.

### 2.2 Bodemanalyses

Onmiddellijk na de monsternamen werd poriewater uit het sediment verzameld met behulp van teflon sedimentwaterbemonsteraars (Rhizons, Eijkelkamp, Agrisearch Equipment). In dit poriewater werden de volgende parameters gemeten: pH alkaliniteit,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4$ , P, Na, Cl,  $\text{SO}_4^{2-}$ , K, Mg, Ca, Fe, Mn, en Zn.

Een bekend volume van de sedimentmonsters werd gedroogd waarna het vochtgehalte en het massa volume (kilogram droge stof per liter bodemvolume) kon worden berekend. Van het gedroogde monster werd een deel verast/uitgegloeid (gedurende 5 uur bij  $550^\circ\text{C}$ ). Uit de afname van de massa tijdens verassen (gloeiverlies) werd het organisch stofgehalte berekend.

Van het gedroogde monster werd een deel ontsloten met geconcentreerd salperzuur en waterstofperoxide in een gesloten destructiemagnetron. Hierbij wordt de verweerbare fractie aan elementen van een bodem vrijgemaakt. Het destruaat werd doorverdund waarna de concentraties fosfor (P), calcium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K), ijzer (Fe), mangaan (Mn), zwavel (S), silicium (Si) en aluminium (Al) werden bepaald. De zo bepaalde concentraties worden in dit rapport aangeduid als respectievelijk P-tot, Ca-tot, Mg-tot, K-t-t, Fe-tot, Mn-tot, S-tot, Si-tot, en Al-tot.

### 2.3 Chemische analyses

De pH en alkaliniteit werd bepaald aan ongefilterde monsters. De alkaliniteit werd bepaald door een bekend volume monster met een 0,01 M zoutzuuroplossing te titreren tot pH 4,2. De concentraties natrium ( $\text{Na}^+$ ) en kalium ( $\text{K}^+$ ) werden vlamfotometrisch bepaald en de ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfaat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) en chloride ( $\text{Cl}^-$ ) concentraties aan de hand van kleurreacties met autoanalyser-technieken (zie ook <http://www.ru.nl/fnwi/gi>). De concentraties calcium (Ca), magnesium (Mg), zwavel (S), fosfor (P), ijzer (Fe), mangaan (Mn) en silicium (Si) werden gemeten met behulp van een ICP-OES (zie ook <http://www.ru.nl/fnwi/gi>). Totaal anorganisch koolstof werd bepaald met behulp van Infrarood gas analyse (IRGA) waarna aan de hand van de pH de bicarbonaat- ( $\text{HCO}_3^-$ ) en kooldioxide- ( $\text{CO}_2$ ) concentraties konden worden berekend op basis van het koolzuurevenwicht.

### 3. Resultaten en Discussie

De resultaten van de uitgevoerde analyses worden gegeven in de tabellen 1 en 2.

**Tabel 1a.** Resultaten van de analyses van het sediment poriewater, het oppervlaktewater en het grondwater . Alkal. staat voor alkaliniteit. EGV voor Elektrisch geleidingsvermogen. Alle waarden behalve pH, Alkaliniteit ( $\mu\text{equivalenten per liter}$ ) en EGV ( $\mu\text{S per cm}$ ) worden gegeven in  $\mu\text{mol per liter}$ .

		$\mu\text{eq L}^{-1}$	$\mu\text{S cm}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$
	pH	Alk.	EGV	CO2	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl
<b>Oppervlakte water</b>										
27-8-2015	10,5	1327	358	0	1197	558	134	1561	77	1709
2-2-2014	7,9	2136	410	67	2033	932	150	1624	126	1812
<b>Poriewater (27-8-2014)</b>										
1	6,8	5130	706	1996	4957	1715	192	1870	149	1932
2	7,1	3078	484	483	2823	1104	156	1711	96	1778
3	7,0	3249	515	806	3166	1200	146	1698	113	1799
4	6,9	4214	593	1117	4055	1572	202	1736	145	1835
5	6,8	7098	836	2840	6988	2309	300	1869	256	1914
<b>Poriewater (2-2-2015)</b>										
1	7,0	4489	637	1241	4717	1726	220	1856	157	1997
2	7,1	3282	532	715	3541	1318	188	1805	130	1842
3	7,1	3269	524	623	3473	1266	178	1809	128	1833
4	7,1	3272	538	670	3600	1329	184	1848	134	1967
5	7,0	4702	716	1366	5604	1934	235	2190	189	2041
<b>Grondwater</b>										
27-8-2014	6,6	2845	872	1797	2914	1255	177	3459	146	5043
2-2-2015	7,0	5478	924	1592	5930	1327	140	4487	53	4063
	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$
	SO4	Fe	P	ortho-P	NH4	NO3	Mn	Si	Zn	
<b>Oppervlakte water</b>										
27-8-2014	56	4,8	3,5	1,73	10,1	2,2	1,2	71	0,05	
2-2-2015	48	8,5	2,4	0,29	4,4	0,1	1,1	31	0,04	
<b>Poriewater (27-8-2014)</b>										
1	35	211	147,9		1100	1,9	25,9	656	0,88	
2	17	102	99,5		249	1,6	18,0	402	1,13	
3	16	114	87,1		336	1,7	17,4	454	0,34	
4	14	199	66,7		189	1,6	29,5	455	0,48	
5	27	442	68,6		757	1,8	53,2	658	0,92	
<b>Poriewater (2-2-2015)</b>										
1	15	166	99,6		360	0,5	32,3	519	0,20	
2	11	97	71,4		221	0,9	23,4	400	0,13	
3	12	120	57,9		260	0,6	21,3	363	0,15	
4	22	115	41,6		328	1,6	20,4	344	0,29	
5	17	288	26,7		342	2,0	38,2	435	0,38	
<b>Grondwater</b>										
27-8-2014	42	826	6,5		113	55,7	44,7	367	13,13	
2-2-2015	14	1322	5,6		147	0,9	70,9	382	0,83	

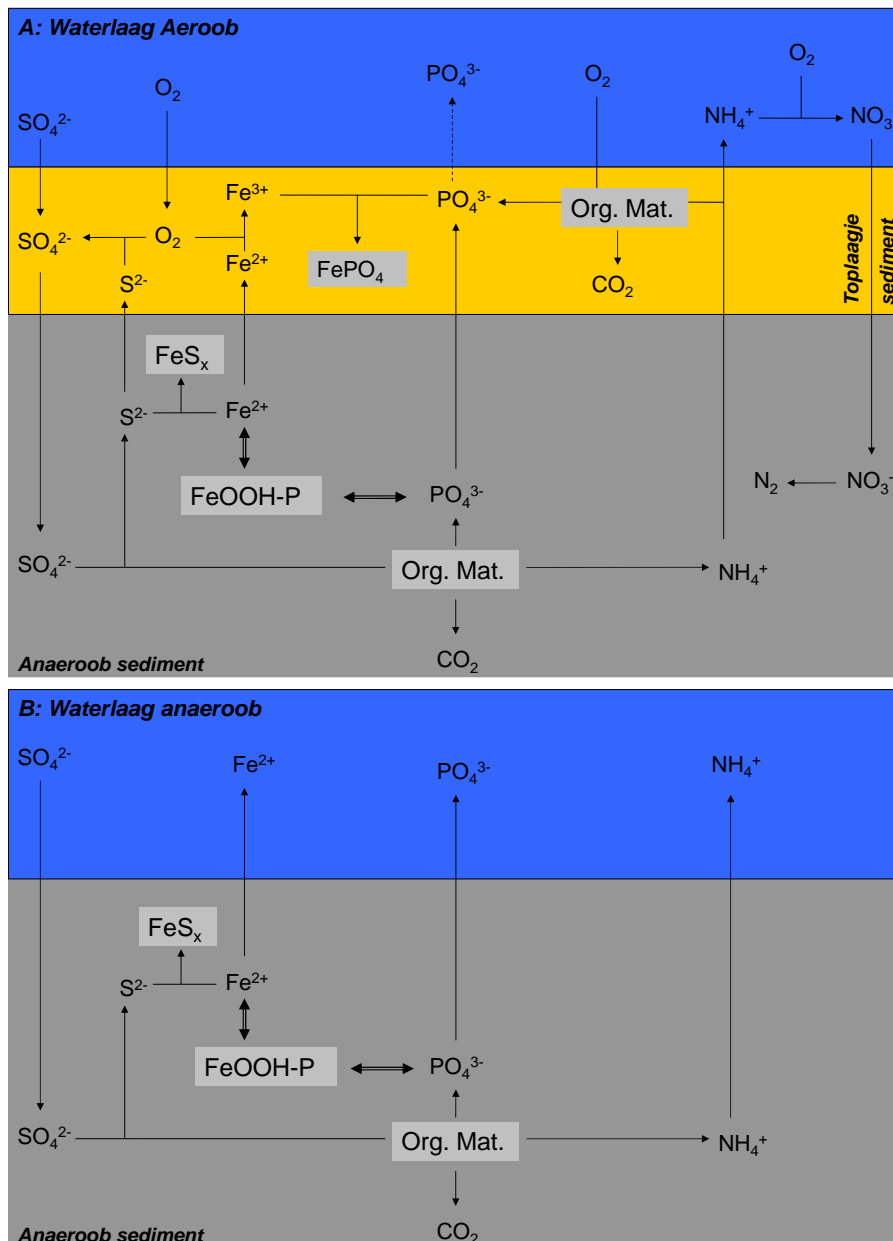
**Tabel 1a.** Resultaten van de analyses van het sediment poriewater, het oppervlaktewater en het grondwater . Alkal. staat voor alkaliniteit. EGV voor Elektrisch geleidingsvermogen. Alle waarden behalve pH, Alkaliniteit ( $\mu\text{equivalenten per liter}$ ) en EGV ( $\mu\text{S per cm}$ ) worden gegeven in mgram per liter.

		$\mu\text{eq L}^{-1}$	$\mu\text{S cm}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	
	pH	Alk.	EGV	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K	Cl	
<b>Oppervlakte water</b>											
	27-8-2015	10,5	1327	358	0,0	73,0	22,4	3,3	35,9	3,0	60,6
	2-2-2014	7,9	2136	410	2,9	124,0	37,4	3,6	37,3	4,9	64,2
<b>Poriewater (27-8-2014)</b>											
	1	6,8	5130	706	87,8	302,4	68,7	4,7	43,0	5,8	68,5
	2	7,1	3078	484	21,2	172,2	44,2	3,8	39,3	3,7	63,1
	3	7,0	3249	515	35,5	193,1	48,1	3,5	39,0	4,4	63,8
	4	6,9	4214	593	49,1	247,4	63,0	4,9	39,9	5,7	65,1
	5	6,8	7098	836	124,9	426,2	92,5	7,3	43,0	10,0	67,9
<b>Poriewater (2-2-2015)</b>											
	1	7,0	4489	637	54,6	287,8	69,2	5,4	42,7	6,2	70,8
	2	7,1	3282	532	31,4	216,0	52,8	4,6	41,5	5,1	65,3
	3	7,1	3269	524	27,4	211,9	50,7	4,3	41,6	5,0	65,0
	4	7,1	3272	538	29,5	219,6	53,3	4,5	42,5	5,2	69,7
	5	7,0	4702	716	60,1	341,9	77,5	5,7	50,3	7,4	72,3
<b>Grondwater</b>											
	27-8-2014	6,6	2845	872	79,1	177,8	50,3	4,3	79,5	5,7	178,8
	2-2-2015	7,0	5478	924	70,1	361,7	53,2	3,4	103,2	2,1	144,1
		$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	$\text{mg L}^{-1}$	
		SO <sub>4</sub>	Fe	P	ortho-P	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	Mn	Si	Zn	
<b>Oppervlakte water</b>											
	27-8-2014	5,4	0,3	0,11	0,05	0,1	0,03	0,1	2,0	0,003	
	2-2-2015	4,6	0,5	0,07	0,01	0,1	0,00	0,1	0,9	0,003	
<b>Poriewater (27-8-2014)</b>											
	1	3,3	11,8	4,58	0,00	15,4	0,03	1,4	18,4	0,058	
	2	1,6	5,7	3,08	0,00	3,5	0,02	1,0	11,3	0,074	
	3	1,6	6,3	2,70	0,00	4,7	0,02	1,0	12,8	0,022	
	4	1,3	11,1	2,07	0,00	2,6	0,02	1,6	12,8	0,031	
	5	2,6	24,7	2,12	0,00	10,6	0,03	2,9	18,5	0,060	
<b>Poriewater (2-2-2015)</b>											
	1	1,4	9,3	3,09	0,00	5,0	0,01	1,8	14,6	0,013	
	2	1,1	5,4	2,21	0,00	3,1	0,01	1,3	11,2	0,009	
	3	1,1	6,7	1,79	0,00	3,6	0,01	1,2	10,2	0,010	
	4	2,1	6,4	1,29	0,00	4,6	0,02	1,1	9,7	0,019	
	5	1,6	16,1	0,83	0,00	4,8	0,03	2,1	12,2	0,025	
<b>Grondwater</b>											
	27-8-2014	4,0	46,1	0,20	0,00	1,6	0,78	2,5	10,3	0,859	
	2-2-2015	1,4	73,8	0,17	0,00	2,1	0,01	3,9	10,7	0,054	



**Tabel 2.** Resultaten van de analyses van het sediment. ‘OS.’ voor organisch stofpercentage, ‘MV’ voor massa volume (kilogram droge stof per liter bodemvolume). ‘

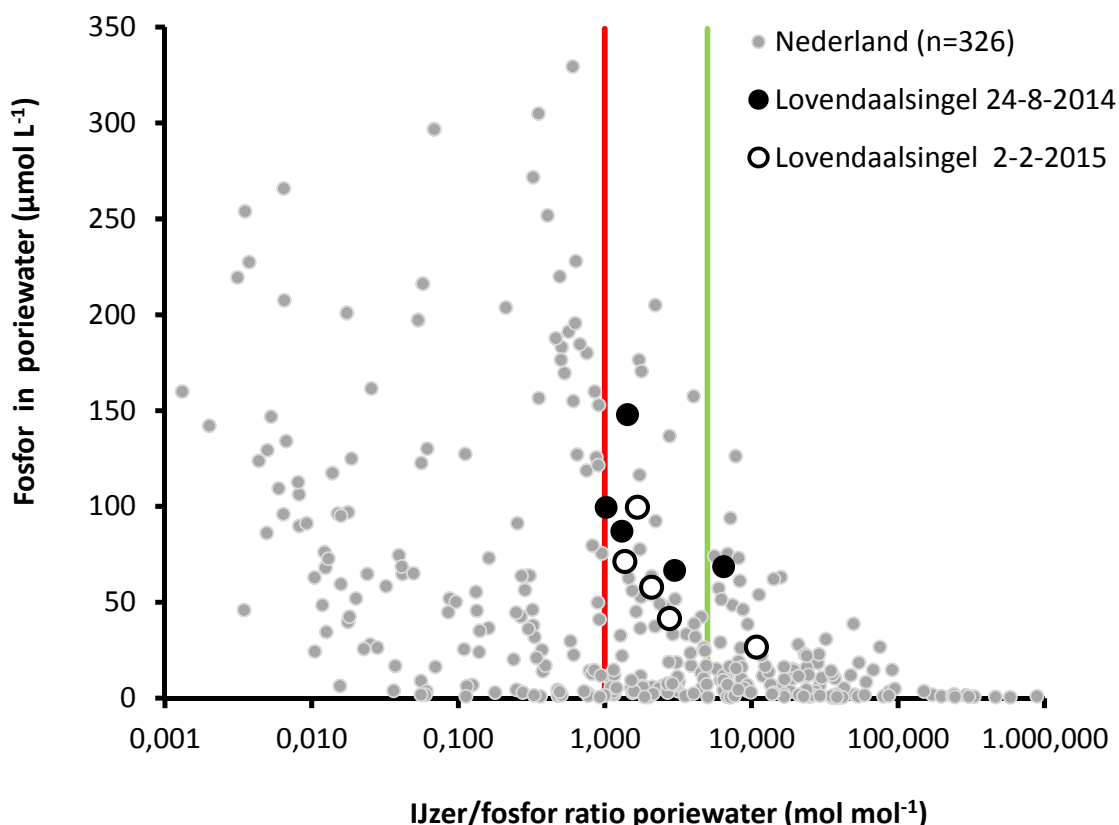
Locatie	%	kg L <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>	mmol kg <sup>-1</sup>
	Org. Stof	MV	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Al	Si	Zn
1	25,7	0,138	938	575	40	99	22	18	103	313	539	5,1	7,1
2	25,3	0,127	926	646	53	116	21	20	102	320	667	7,9	7,5
3	25,6	0,120	881	604	35	100	18	18	88	293	508	10,6	7,4
4	22,8	0,156	756	607	37	93	21	18	97	222	460	10,0	6,6
5	17,0	0,259	418	466	24	61	17	10	101	187	293	6,8	4,6



**Figuur 3** Interacties tussen de zwavel-, ijzer- en fosforkringloop in wateren met een zuurstofhoudende waterlaag (A) en wateren met een zuurstofarme waterlaag (B). In oranje is het geoxideerde toplaagje van de onderwaterbodem (het sediment) weergegeven. Dit laagje is meestal maar enkele millimeters dik.

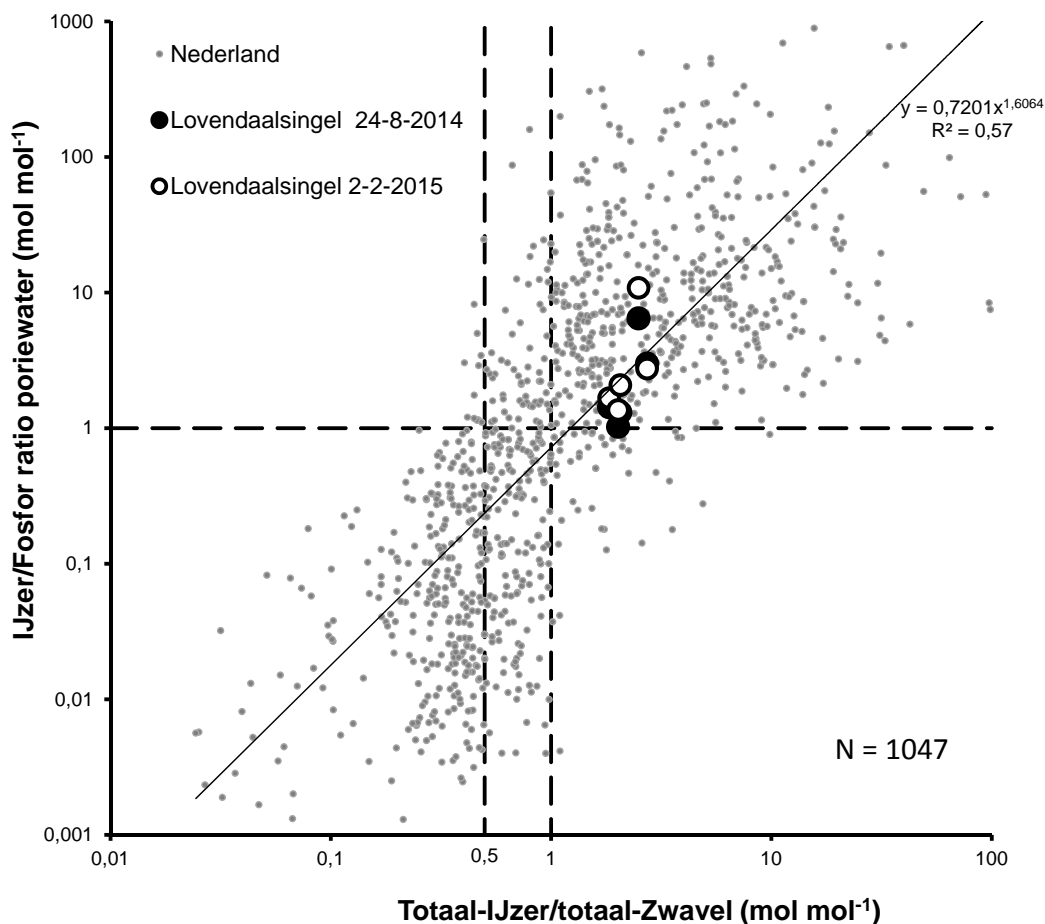
Voor de effecten van de P-rijkdom van de bodems op de waterkwaliteit is vooral de nalevering van P naar de waterlaag van belang. De fosfaatnalevering (via diffusie) uit sedimenten wordt sterk bepaald door de ijzer/fosfor (Fe/P) ratio van het poriewater (Smolders e.a., 2013). Dit komt omdat in het oxidatieve toplaagje tussen water en sediment het opgeloste gereduceerde ijzer weer wordt geoxideerd waardoor fosfaat wordt gebonden aan de gevormde ijzer(hydr)oxides en/of ijzer en fosfaat gezamenlijk neerslaan als  $\text{FePO}_4$  in de toplaag (figuur 3). Als gevolg hiervan wordt de nalevering van P naar de waterlaag beperkt zolang de Fe/P ratio in het bodemvocht voldoende hoog is ( $\gg 1$ ) en zolang de waterlaag aeroob (zuurstofhoudend) is. In figuur 4 wordt de P concentratie van het poriewater uitgezet tegen de Fe/P ratio van het poriewater. De P nalevering zal hoger zijn naarmate de Fe/P ratio lager is en de P concentratie van het sediment poriewater hoger is. Onder een bepaalde Fe/P verhouding zal deze vrijwel geen invloed meer hebben omdat het ijzer dan in verhouding nog maar weinig P kan binden op de overgang naar de aerobe waterlaag. Smolders e.a. (2001) vonden een toename van de nalevering van P naar de waterlaag bij een Fe/P ratio lager dan 5 (de groene lijn in figuur 5). De nalevering van P naar de waterlaag blijkt echter zeer sterk toe te nemen wanneer de Fe/P ratio in het bodemvocht lager wordt dan 1 (Smolders e.a., 2001; Geurts e.a. 2010).

Voor de onderwaterbodems van de G.W. Lovendaalsingel zien we dat de ijzerconcentratie van het poriewater zowel in de zomer (augustus 2014) als in de winter (februari 2015) steeds hoger is dan de fosforconcentratie (tabel 2; figuur 4). In het poriewater van de onderwaterbodems wordt een Fe/P ratio gemeten die overwegend tussen 1 en 5 inligt. De gemeten P concentratie van het poriewater ligt tussen 66 en 150  $\mu\text{mol L}^{-1}$  in de zomer (augustus 2014) en tussen 26 en 100  $\mu\text{mol L}^{-1}$  in de winter (februari 2015). We kunnen concluderen dat er voor deze bodem enige nalevering te verwachten is maar dat deze nalevering waarschijnlijk beperkt is zolang de overgang van de onderwaterbodem naar de waterlaag zuurstofhoudend is.



**Figuur 4.** Fosforconcentratie van het poriewater uitgezet tegen de IJzer/fosfor ratio van het poriewater voor een aantal onderwaterbodems uit Nederland. De locaties van de G.W. Lovendaalsingel (augustus 2014 en februari 2015) zijn apart weergegeven.

De Fe:P ratio van het sediment poriewater wordt bepaald door de ijzerrijkdom en de zwavelrijkdom van het systeem. De reductie van sulfaat naar sulfide in het anaerobe deel van de onderwaterbodem leidt tot de vastlegging van ijzer in de vorm van  $\text{FeS}_x$  (ijzersulfide, waaronder pyriet) (figuur 3). Het als ijzersulfide vastgelegde ijzer is slecht oplosbaar waardoor de ijzerconcentratie van het poriewater laag wordt. Bovendien is het aan sulfide gebonden ijzer ook slecht in staat om fosfaat te binden waardoor de P-beschikbaarheid toeneemt. De mate waarin de belasting met sulfaat leidt tot eutrofiëring van het oppervlaktewater hangt dus sterk af van de verhouding tussen de ijzer- en de zwavelvoorraad (totaal-ijzer/totaal-zwavel ratio) van de bodem. Er kan met enige zekerheid gezegd worden dat onderwaterbodems met een totaal-Fe/totaal-S ratio hoger dan 1 worden gekenmerkt door een hoge Fe/P ratio van het bodemwater (figuur 5) waardoor deze weinig P naleveren zolang de waterlaag zuurstofhoudend is. Bodems met een totaal-Fe/totaal-S ratio lager dan 0,5 daarentegen zullen vrijwel altijd P naleveren. Waarschijnlijk hangt de variatie die in figuur 5 zichtbaar is af van de vorm waarin het zwavel voorkomt in de bodem; respectievelijk als organisch zwavel,  $\text{FeS}$  of  $\text{FeS}_2$ . In de onderwaterbodems (sediment) van de G.W. Lovendaalsingel is in ieder geval meer ijzer dan zwavel aanwezig en overeenkomstig hiermee is de ijzer/fosfor ratio van het poriewater relatief gunstig (figuur 5).



**Figuur 5** Relatie tussen de totaal-ijzer/totaal-zwavel ratio van de bodem en de ijzer/fosfor ratio in het poriewater voor 1047 onderwaterbodems met een organisch stofgehalte van ten minste 10 % (uit de data set van Onderzoekcentrum B-WARE), met hierin geplote onderwaterbodems uit de plas Lovendaalsingel bij Grave..

Nalevering van P uit de sedimenten van de G.W. Lovendaalsingel is met name te verwachten wanneer de waterlaag anaeroob wordt. De afbraak van reactief organisch materiaal op de bodem (denk aan dode algen en afstervende waterplanten) kan leiden tot tijdelijke anaerobe condities boven de bodem waardoor

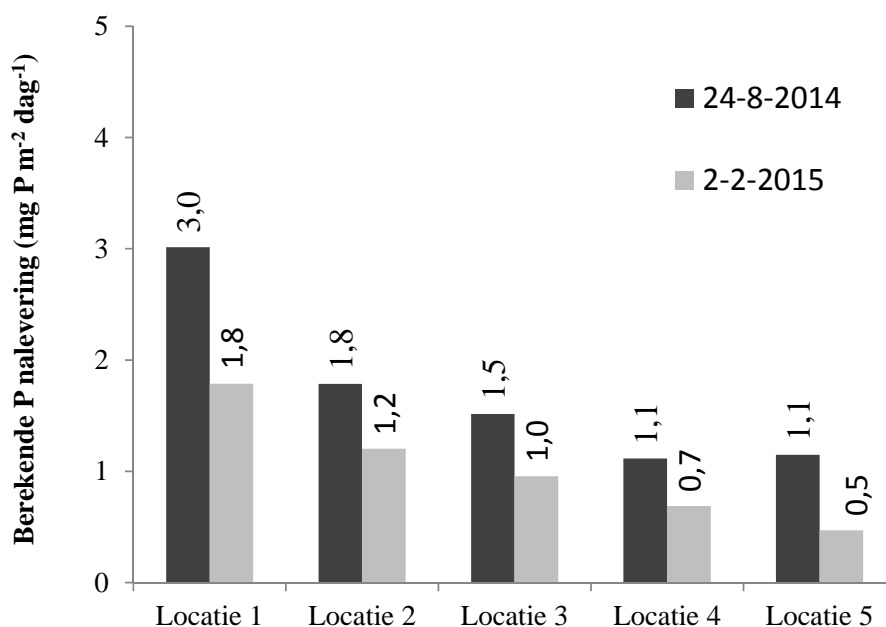
de nalevering van P naar de waterlaag zeer fors kan toenemen (Smolders e.a., 2013; Van Diggelen e.a., 2014). Met name in de warme zomermaanden kan de zuurstofconsumptie door het sediment aanzienlijk zijn. Ook de zeer dichte waterplantenvegetatie die werd aangetroffen in de plas (met name Smalle waterpest, *Elodea nuttallii*) en de aanwezigheid van draadalg kan leiden tot tijdelijk anaerobe condities boven de onderwaterbodem met name wanneer de planten beginnen af te sterven in de late zomer (Lamers e.a. 2012).

De dichte vegetatie van ondergedoken waterplanten fungeert op zichzelf ook als een nutriëntenpomp tussen de onderwaterbodem en de waterlaag. Dergelijke zeer dichte waterplantenvegetaties worden vaak aangetroffen op onderwaterbodems waarvan de P concentratie in het poriewater hoger is dan  $50 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Lamers e.a., 2012). Voorwaarde is dan wel dat de waterlaag in het voorjaar voldoende helder is. De relatief gunstige Fe:P ratio van het poriewater voorkomt mogelijk een sterke nalevering van P naar de waterlaag in het voorjaar waardoor het water voldoende helder blijft om de ontwikkeling van de waterplantenvegetatie mogelijk te maken. Voorwaarde hiervoor is wel dat de externe P-belasting niet te hoog is en ook dat de opwerveling van sediment door vissen niet tot een te grote troebeling van de waterlaag leidt. In de (na)zomer kan er bij (tijdelijk) verlaagde zuurstofconcentratie wel nalevering plaatsvinden uit het sediment en kunnen ook afstervende waterplanten bijdragen aan een verhoogde P concentratie in de waterlaag.

In het kader van het KRW innovatieproject *MIND-BAGGERNUT* is voor een groot aantal onderwaterbodems de nalevering door diffusie bepaald uit intacte bodemcores. Aan de hand van het verkregen mathematische verband tussen de P concentratie van het poriewater en de nalevering bij  $15^\circ\text{C}$  (Poelen et al., 2012), hebben we voor de onderwaterbodems van de G.W. Lovendaalsingel de potentiële nalevering berekend. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van het experimentele verband dat is gevonden tussen de nalevering van fosfor in cilinderexperimenten en de fosforconcentratie in het bodemvocht van de onderwaterbodems gemeten in het veld (Poelen et al., 2012) volgens de formule

$$0,0006*(P_{pw})^2 + 0,0105*P_{pw} + 0,1473.$$

$P_{pw}$  staat hierbij voor de P concentraties in het poriewater in  $\mu\text{mol L}^{-1}$ . De resultaten worden gegeven in figuur 6. De gemiddelde berekende nalevering bedraagt  $1,7 \text{ mg P m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ . Onder zuurstofloze omstandigheden kan de nalevering, zoals eerder vermeld, veel hoger liggen. In de winter zijn de fosforconcentraties in de onderwaterbodem lager en bedraagt de berekende nalevering  $1,0 \text{ mg P m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ .



**Figuur 6.** Berekende nalevering voor de verschillende locaties volgens de Baggernut formule (Van der Wijngaard, 2012).

Opgemerkt dient te worden dat gelet op de Fe/P ratio ( $>1$ ) en het feit dat de fosfaatconcentraties overwegend onder de  $100 \mu\text{mol L}^{-1}$  liggen, de uitkomsten op grond van deze formule als onzeker moeten worden getypeerd (Poelen et al., 2012). Om de nalevering van de onderwaterbodems met meer zekerheid te kunnen inschatten zijn naleveringsproeven nodig waarbij de nalevering onder zowel zuurstofrijke als zuurstofarme condities kan worden bepaald.

In augustus werd in het open water van de Lovendaalsingel een totaal-P concentraties gemeten van  $3,5 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $0,11 \text{ mg L}^{-1}$ ) en een ortho-P concentratie van  $1,7 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ ). De ammoniumconcentratie in de waterlaag was  $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ . Gelet op de hoge ammoniumconcentraties in het bodemwater en in het grondwater zal stikstoflimitatie in het water niet snel optreden. Op het moment van bemonsteren (27 augustus 2014) was er sprake van een sterke FLAB (draadalgen) ontwikkeling in een groot deel van de plas (figuur 1). Dit beeld past bij de gemeten nutriëntenconcentraties in de waterlaag. Ook de pH van het oppervlaktewater was zeer hoog wat duidt op een hoge fotosynthetische activiteit van (draad)algen in het water.

In februari 2015 werd een wat lagere totaal-P concentratie gemeten ( $2,4 \mu\text{mol L}^{-1}$ ,  $0,07 \text{ mg L}^{-1}$ ) en een veel lagere ortho-P concentratie van  $0,29 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ ). De ortho-P concentratie (door planten en algen direct opneembare P concentratie) is duidelijk veel lager in de winter. Op grond van de Fe:P ratio van het poriewater kan verwacht worden dat de nalevering in de winter, bij een zuurstofverzadigde waterlaag, laag is. Opvallend is verder dat het water in de winter wat harder is dan in de zomer. Dit kan te maken hebben met een toename van de doorstroming met gebufferd grondwater in de winter (er is geen inlaat van oppervlaktewater en alleen sprake van afvoer). De sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater (en de onderwaterbodems) zijn zowel in de zomer als in de winter erg laag. Eutrofiering als gevolg van sulfaatreductie speelt in het systeem geen rol van betekenis.

Het geanalyseerde grondwater bij de G.W. Lovendaalsingel laat zien dat het water hier rijk is aan chloride ( $5043 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $179 \text{ mg L}^{-1}$ ) in augustus 2014 en  $4063 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $144 \text{ mg L}^{-1}$ ) in februari 2015). Voor het opstellen van de stoffenbalans is Witteveen en Bos uitgegaan van  $60 \text{ mg L}^{-1}$ , waarbij bleek dat er een te grote hoeveelheid kwel nodig was om de chloride concentratie van het oppervlaktewater te kunnen verklaren. De P concentratie van het bemonsterde grondwater bedraagt  $6,5 \mu\text{mol L}^{-1}$  in augustus ( $0,20 \text{ mg L}^{-1}$ ) en  $5,6 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $0,17 \text{ mg L}^{-1}$ ) in februari. Dit is aanzienlijk lager dan de  $0,75 \text{ mg L}^{-1}$  waarvan Witteveen+Bos (2014) is uitgegaan in de stoffenbalans. Wanneer de gemeten chloride- en fosforconcentraties in het grondwater worden gebruikt voor het opstellen van de water en stoffenbalans dan zal de bijdrage van kwel in de P belasting fors lager uitkomen dan eerder berekend in de rapportage van Witteveen+Bos. Verder is het grondwater erg rijk aan ijzer (meer dan  $800 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $46 \text{ mg L}^{-1}$ ) in augustus 2014 en zelfs  $1322 \mu\text{mol L}^{-1}$  ( $74 \text{ mg L}^{-1}$ ) in februari 2015. Bij het uitreden van dit grondwater in de plas oxideert het ijzer, waardoor het met het aangevoerde fosfaat neerslaat en precipiteert in de waterbodem (Smolders e.a., 2012). Het grootste deel van het via het grondwater aangevoerde fosfor komt op deze wijze dus in de waterbodem terecht en niet in de waterlaag. Gelet op de grote hoeveelheid ijzer die via de kwel wordt aangevoerd kan deze aanvoer van ijzerrijk grondwater zelfs defosfaterend werken. Dit kan mogelijk ook de lage ortho-P concentratie in de winter verklaren.

Samengevat bestaat het beeld dat de eventuele eutrofiering via het grondwater waarschijnlijk geen grote rol speelt gelet op de zeer hoge ijzerconcentratie en de relatief lage P concentratie van het grondwater. Waarschijnlijk heeft deze ijzerrijke kwel eerder een positief effect op de waterkwaliteit. De onderwaterbodems zullen vooral fosfaat naleveren naar de waterlaag in periodes waarin de zuurstofconcentraties van de waterlaag sterk dalen. De nalevering vanuit de onderwaterbodems kan in zulke periodes fors zijn en kan gemakkelijk de P rijkdom van de waterlaag verklaren. Baggeren van de organische sliblaag zal leiden tot minder zuurstofconsumptie in de warme zomermaanden en zal waarschijnlijk tevens leiden tot lagere P concentraties in de toplaag van de onderwaterbodem. Dit laatste is erg waarschijnlijk maar weten we in principe niet zeker omdat we geen analyses hebben uitgevoerd aan de bodems die onder de sliblaag liggen.

#### 4. Literatuur

Geurts J.J.M., Smolders A.J.P., Banach A.M., van de Graaf J.P.M., Roelofs J.G.M. & L.P.M. Lamers. 2010. The interaction between decomposition, N and P mineralization and their mobilization to the surface water in fens. *Water Research* 44: 3487-3495.

Lamers L., Schep S., Geurts J. & Smolders A. 2012. Erfenis fosfaatrijk verleden: helder water met woekerende waterplanten. *H2O* 2012(13): 33-34.

Poelen M.D.M., Van den Berg L.J.L., Ter Heerdt G, Bakkum R., Smolders A.J.P., Jaarsma N.G., Brederveld R.J. & Lamers L.P.M. 2012. WaterBODEMbeheer in Nederland: Maatregelen Baggeren en Nutriënten (BAGGERNUT) -Metingen Interne Nutriëntenmobilisatie en Decompositie (MIND-BAGGERNUT) Eindrapportage 2012. Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen. Rapport 2012-18.

Smolders A.J.P., Lamers L.P.M., Moonen M., Zwaga K. & Roelofs J.G.M., 2001. Controlling phosphate release from phosphate-enriched sediments by adding various iron compounds. *Biogeochemistry* 54: 219-228.

Smolders A., Van den Broek T., Lucassen E. & Spanjers B. 2012. Monitoring proefsloten Lopikerwaard: hoe werkt een boerensloot in het veenweidegebied? *H2O* 2012(17): 30-32.

Smolders A.J.P., Van Diggelen J.H.M., Geurts J.J.M., Poelen M.D.M., Roelofs J.G.M., Lucassen E.C.H.E.T. & Lamers L.P.M. 2013. Waterkwaliteit in het veenweidegebied; De complexe interacties tussen oever, waterbodem en oppervlaktewater. *Landschap* 30(3): 145-153.

Van Diggelen J.M.H., Lamers L.P.M., van Dijk G., Schaafsma M.J., Roelofs J.G.M. & Smolders A.J.P. 2014. New insights into phosphorus mobilisation from sulphur-rich sediments - Time-dependent effects of salinisation. *PLOS One* 9(11): e e111106.

Witteveen en Bos 2014. Watersysteem- en bronanalyse knelpunten stedelijk water. Deelrapport Lovendaalsingel te Grave.