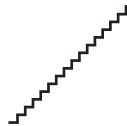


RIVM Milieu- en Natuurplanbureau

**Interacties tussen stuurvariabelen
voor ecologische doelen in meren,
fase 2: analyse van simulaties**

Witteveen+Bos
van Twickelostraat 2
postbus 233
7400 AE Deventer
telefoon 0570 69 79 11
telefax 0570 69 73 44



Interacties tussen stuurvariabelen voor ecologische doelen in meren, fase 2: analyse van simulaties

referentie BHV24-1/schj16/001	projectcode BHV24-1-1	status definitief
projectleider drs. M. Klinge	projectdirecteur ir. Th.G.J. Witjes	datum 3 juli 2006

autorisatie goedgekeurd	naam drs. M. Klinge	paraaf
-----------------------------------	-------------------------------	---------------



INHOUDSOPGAVE	blz.
SAMENVATTING VOOR BELEIDSMAKERS	
1. INLEIDING	1
2. UITGEVOERDE SIMULATIES	2
3. METHODE	3
3.1. Inleiding	3
3.2. Bepaling van kritische P-concentratie	3
3.3. Statistische analyses	4
3.3.1. Ecologische toestand en zomergemiddelde P-concentratie	4
3.3.2. Watersystemen in relatie tot kritische P-belasting: multi-pele regressie analyse	4
3.3.3. Watersystemen in relatie tot kritische P-belasting: interpolatietabel	5
3.4. Validatie	5
4. RESULTATEN	6
4.1. Inleiding	6
4.2. Frequentieverdeling	6
4.3. Box-plots	7
4.4. Multi-pele regressie analyse	8
4.5. Interpolatietabel	9
4.6. Validatie	9
5. INTERPOLATIETABEL	13
6. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	14
6.1. Conclusie	14
6.2. Discussie	15
6.3. Aanbevelingen	16
7. LITERATUURLIJST	17
laatste bladzijde	17
 bijlagen	 aantal bladzijden
Ia Inleiding: kritische P-belasting, waarom P?	1
Ib Inleiding: begrippenlijst	1
II Samenvatting fase 1: aanvullende opmerkingen	1
IIIa Methode: afleiden van de kritische P-concentratie, methode	3
IIIb Methode: afleiden van de kritische P-concentratie, resultaten	5
IIIc Methode: aanvullen interpolatietabel, verschillende type relaties tussen P-concentratie en plantenbedekking	2
IIId Methode: samenstelling validatieset	1
IVa Resultaten: boxplots P-belasting	1
IVb Resultaten: boxplots P-concentratie in meer (zomer gemiddelde)	1
IVc Resultaten: multi-pele regressie analyse	1
IVd Resultaten: peilvariatie tussen zomer en winter	1
IVe Resultaten: M-files	1

SAMENVATTING VOOR BELEIDSMAKERS100

Waterbeheerders zullen in 2015 moeten voldoen aan waterkwaliteits- en ecologische doelen, zoals deze gesteld worden in de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW). In deze studie is onderzocht of het mogelijk is om met een relatief eenvoudig instrument relaties af te leiden uit een ingewikkeld ecologisch model (PCLake), waarmee voor ondiepe meren ecologische doelen kunnen worden bepaald. Hiervoor is eerder een groot aantal modelsimulaties gedaan.

Een goede ecologische toestand (of potentieel) voor de ondiepe meren (minder dan 3 meter diep) wordt gekenmerkt door een waterplantengedomineerde watersysteem met een relatief laag chlorofylgehalte. De ecologische toestand is afhankelijk van een groot aantal processen. De processen kunnen echter worden teruggevoerd tot een aantal factoren. Het onderzoek gericht op deze factoren heeft geresulteerd in twee sterk vereenvoudigde modellen, te weten een **regressieformule** en een **interpolatietabel**.

De ecologische toestand wordt bepaald door de fosforbelasting en de inrichting van het watersysteem. De fosforbelasting is de hoeveelheid fosfor (P) die het watersysteem per jaar te verwerken krijgt in relatie tot zijn oppervlakte. Ligt deze hoeveelheid fosfor boven een kritische grens dan is sprake van overschrijding van de 'kritische P-belasting' en zal het watersysteem vertroebelen (toename algen, afname waterplanten). De inrichting van het watersysteem is samen met het beheer bepalend voor de kritische P-belasting. Zowel de regressieformule als de interpolatietabel berekenen de kritische P-belasting behorend bij een watersysteem (voor en na maatregelen).

De huidige of toekomstige jaarlijkse fosfaatbelasting moet door de waterbeheerder zelf worden berekend, teneinde deze te kunnen vergelijken met de kritische waarden.

Het blijkt dat de diepte en de verblijftijd (die systeemspecifiek zijn) het meest bepalend zijn voor de ecologische toestand van een ondiep meer. Ook het bodemtype (zand, klei of veen), het aandeel moeras en de oppervlakte zijn belangrijk. De ecologische toestand wordt tevens beïnvloed door visstandbeheer, peilfluctuatie en de historische uitgangssituatie (was het watersysteem tot nu toe helder of troebel).

In deze studie is de kritische P-belasting afgeleid op basis van de zomergemiddelde submerse waterplantenbedekking. De maximale P-belasting waarbij minimaal 5 % plantenbedekking (overeenkomstig de cijfers uit de Vierde Eutrofiëringsequête (RIZA 1998)) wordt bereikt is als kritische belasting gedefinieerd. Dit is een methodische op PCLake gebaseerde keuze.

De zomergemiddelde P-concentratie behorend bij een heldere plantenrijke toestand rond het omslagpunt is (op basis van de PCLake-resultaten en de in deze studie gehanteerde range) in 95 % van de gevallen lager dan 0,07 mg/l P (gemiddeld 0,02 mg/l P). Let wel op: de plantenrijke toestand op zichzelf bepaalt de lage zomergemiddelde P-concentratie. In een helder watersysteem, verdwijnt fosfor uit de waterfase door onder andere opname in waterplanten, versterkte sedimentatie en graas van algen door watervlooien. De gemeten P-concentratie in het watersysteem is dan ook laag.

De zomergemiddelde P-concentratie behorend bij een troebele algenrijke toestand rond hetzelfde omslagpunt is in 95 % van de gevallen lager dan 0,30 mg/l P (gemiddeld 0,10 mg/l P). In een plantenarme toestand wordt het fosfor voornamelijk opgenomen door de algen. Het fosfor bevindt zich grotendeels in de waterfase en wordt gemeten.

Rond het omslagpunt kan de P-concentratie sterk uiteenlopen, afhankelijk van de ecologische toestand zelf. Ofwel de zomergemiddelde P-concentratie is een afgeleide van de ecologische

toestand en slechts beperkt een stuurvariabele. Gebruik van zomergemiddelde P-concentraties als norm voor de goede ecologische toestand of het goed ecologisch potentieel is dan ook af te raden. Beter is het de norm te baseren op de fosfaatbelasting of eventueel de fosfaatconcentratie in het inkomende water.

De interpolatietabel geeft de meest bruikbare en betrouwbare resultaten. Nadeel is dat het enig inzicht vergt in de werking van de interpolatietabel en de database nodig is met gesimuleerde modelresultaten. Dit kan worden opgelost door waterbeheerders toegang te bieden tot het model via bijvoorbeeld internet. Naast de kritische P-belasting kunnen ook de zomergemiddelde P-concentratie (eerdergenoemd), waterplantenbedekking, concentratie chlorofyl-a en andere waarden voor KRW-kwaliteitselementen worden berekend.

De regressieformule is ook bruikbaar voor de berekening van de kritische P-belasting. Groot voordeel is dat deze door iedereen en op elk moment gebruikt kan worden. Nadeel is dat de resultaten minder nauwkeurig zijn. Aanbevolen wordt om bij gebruik van een regressieformule de regressieformule van Janse (2005) te gebruiken.

De conclusie is dat toepassing van de interpolatietabel goede mogelijkheden biedt om de kritische P-belasting van een watersysteem af te leiden. De eerder door Janse (2005) afgeleide regressieformule is een redelijk goed alternatief voor de interpolatietabel. De betrouwbaarheid van zowel interpolatietabel als regressieformule kan worden verbeterd door aanvullende simulaties uit te voeren.

De regressieformule (Janse 2005), waarmee de kritische P-belasting (in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) vanuit de heldere toestand (helderheid behouden) kan worden berekend is:

$$\ln(\text{kritische P-belasting}) = -0,05 + 0,02 \cdot (\text{diepte/verblijftijd} \cdot 1000) + 2,97/\text{diepte} + 0,63 \cdot \text{aandeel_moeras} - 4,56E-4 \cdot \text{strijklengte} - 0,30 \cdot \text{veen} - 0,10 \cdot \text{klei}$$

en vanuit de troebele toestand (omslag forceren):

$$\ln(\text{kritische P-belasting}) = -2,33 + 0,03 \cdot (\text{diepte/verblijftijd} \cdot 1000) + 4,98/\text{diepte} + 0,96 \cdot \text{aandeel_moeras} - 6,11E-4 \cdot \text{strijklengte} - 0,53 \cdot \text{veen} - 0,32 \cdot \text{klei}$$

Deze studie heeft een bruikbaar instrument opgeleverd, welke kan worden gebruikt voor de globale verkenning van de KRW. De interpolatietabel zal toegankelijk zijn via internet, ofwel via de website van STOWA (www.stowa.nl), ofwel via de website van het Milieu- en Natuurplanbureau (www.mnp.nl). De regressieformule is hierboven gegeven.

Voor alles geldt dat gewerkt is met modelresultaten. De werkelijkheid is in het algemeen gecompliceerder. Het in deze studie ontwikkelde instrument (de interpolatietabel) is echter het meest betrouwbare generieke hulpmiddel wat er op dit moment beschikbaar is voor toepassing in ondiepe meren.

1. INLEIDING

Ten behoeve van de implementatie van de Europese Kaderrichtlijn Water werken RIZA en RIKZ in opdracht van DG Water aan dosis-effect relaties tussen de belangrijkste stuurvariabelen en de ecologische doelen zoals kwalitatief vastgelegd in de voorlopige maatlatten (Van der Molen et al., 2004). Het Milieu- en Natuurplanbureau (MNP) is voor zijn natuur- en milieuverkenningen ook geïnteresseerd in deze relaties. Voor de verschillende typen ondiepe meren wordt hierin een waterplantengedomineerde toestand met relatief laag chlorofylgehalte als voorlopige indicator genoemd voor de goede ecologische toestand of goed ecologisch potentieel.

Om tot een goede beleidsafweging te kunnen komen van de effectiviteit van (generieke) nutriëntenreductiemaatregelen en aanvullende gebiedsgerichte maatregelen, is het van belang om de relaties tussen de belangrijkste stuurvariabelen en de score op de ecologische (deel)maatlatten zo veel mogelijk kwantitatief af te leiden. Inzicht in de kritische belasting van meren met nutriënten en de relatie met overige stuurvariabelen en met systeemkenmerken is hiervoor zeer relevant.

Door gebrek aan adequate veldgegevens over de respons van meerecosystemen en ecologische doelvariabelen op combinaties van maatregelen, biedt het langs empirische weg verkrijgen van de benodigde informatie voorsnog onvoldoende perspectief. Echter, met behulp van een adequaat gekalibreerd en gevalideerd modelinstrumentarium, is het mogelijk de effecten van bovengenoemde interacties te simuleren, om daarmee – met een bepaalde bandbreedte - optimale combinaties en ranges van stuurvariabelen en sleutelfactoren voor verschillende meertypen af te leiden. Hiervoor wordt het bij MNP ontwikkelde model PCLake (Janse, 1997, 2005) gebruikt.

doel

Het doel van deze studie is een op PCLake gebaseerd eenvoudig instrument, waarmee waterbeheerders en andere geïnteresseerden op basis van waterkwaliteit, systeemkenmerken en beheer de kritische P-belasting kunnen afleiden. De P-belasting (uitgedrukt in $g \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$) wordt bepaald door de P-concentratie van het inkomende water, de waterdiepte en de verblijftijd. De kritische P-belasting is de belasting waarbij het meer omslaat van troebel naar helder of van helder naar troebel. Als criterium voor dit omslagpunt is een 5 % bedekkingsgraad van de waterbodem met waterplanten gekozen. Zie verder bijlage Ia.

leeswijzer

De opbouw van dit rapport is zodanig dat voor zowel beleidsmakers als inhoudelijke specialisten de informatie makkelijk is terug te vinden. Het hoofdrapport is kort en bondig. In de bijlagen wordt er parallel aan het hoofdrapport uitgebreider stilgestaan bij de achterliggende keuzes. Bovendien is er een begrippenlijst in opgenomen (bijlage Ib). De opbouw van het rapport is als volgt:

- hoofdstuk 2 samenvatting fase 1: een korte samenvatting van de eerste fase van het onderzoek (modelsimulaties met PCLake);
- hoofdstuk 3 methode: beschrijving van de methodiek: afleiden van kritische P-belasting, statistische analyse, validatie;
- hoofdstuk 4 resultaten: vergelijking van verschillende methoden met een onafhankelijke set modelresultaten;
- hoofdstuk 5 interpolatietabel: uitleg over gebruik van de interpolatietabel voor het berekenen van de kritische P-belasting;
- hoofdstuk 6 conclusies en aanbevelingen: bruikbaarheid van resultaten voor afleiden van KRW-doelstellingen.

2. UITGEVOERDE SIMULATIES

In een voorafgaand project, hier 'fase 1' genoemd, zijn een groot aantal (ruim 220.000) modelsimulaties met PCLake uitgevoerd (Schep & Klinge, 2005). In deze simulaties zijn de in tabel 2.1. genoemde invoerfactoren en systeemkenmerken gevarieerd. Voor elk van de mogelijke combinaties (23328) is voor een simulatieperiode van 25 jaar de kritische P-concentratie voor de omslag tussen de troebele en heldere toestand bepaald. Hiervoor is de P-concentratie in het inkomende water stapsgewijs gevarieerd is. In tabel 2.2. zijn de uitvoervariabelen genoemd onderverdeeld naar de kwaliteitselementen van de KRW.

De resultaten zijn verwerkt in spreadsheets en er zijn globale analyses gedaan naar de spreiding in de kritische belasting. In bijlage II zijn aanvullende opmerkingen gemaakt.

Tabel 2.1. Invoerfactoren en systeemkenmerken (zomer van april t/m september, winter overige maanden, totaal P is gemiddelde van neerslag, grondwater en oppervlaktewater)

waterkwaliteit	<p>totaal-P concentratie in het inkomend water (mg/l) (n=8): eerst 8 waarden variërend van 0,03 tot 0,5 mg/l, daarna aanvullende concentraties;</p> <p>N/P ratio in inkomend water (-) (n=2): 3,5 (N-gelimiteerd) en 10 (P-gelimiteerd);</p> <p>fractie opgelost materiaal, het overig deel is particulier (-) (n=2): gelijk voor zowel P als N: 0,25 en 0,75;</p>
systeemkenmerken	<p>strijklengte (m) (n=3): de strijklengte wordt bepaald a.h.v. de oppervlakte (strijklengte = wortel (oppervlak)) 50 ha --> 707; 500 ha --> 2236; 3000 ha --> 5477;</p> <p>gemiddelde waterdiepte in de zomer (m) (n=3): 1,2 (ondiep), 2,0 (gemiddeld) en 3,0 (diep);</p> <p>gemiddelde verblijftijd (d) (n=3): 30 (kort), 90 (gemiddeld) en 300 (lang);</p> <p>bodemtype (-) (n=3): veen (1), klei (5), zand (6);</p>
beheer	<p>peilverschil winter t.o.v. zomer (m) (n=3): +0,5 (natuurlijk), 0 (gelijk) en -0,25 (tegennatuurlijk);</p> <p>verhouding verblijftijd in zomer t.o.v. winterhalfjaar (-) (n=2): 1 (geen verschil) en 3 (verblijftijd in zomer 3x verblijftijd in winter);</p> <p>aandeel moeraszone (oppervlakte t.o.v. meeroppervlak) (-) (n=3): 0 (geen moeras), 0,15 (15% moeras naast oppervlak) en 0,5 (50% moeras naast oppervlak);</p> <p>visserijdruk (d-1) (n=2): 0 (geen druk) en 0,01 (per dag wordt 1% vis weggevangen);</p>
initiële toestand	<p>initiële toestand (-) (n=2): heldere (1) of troebele (2) begintoestand.</p>

Tabel 2.2. Uitvoer PCLake

waterkwaliteit	<p>jaargemiddelde en zomergemiddelde concentraties totaal-N , DIN, totaal-P en DIP; zomergemiddeld doorzicht;</p>
fytoplankton	<p>zomergemiddelde chlorofyl-a concentratie; zomergemiddelde en maximale biomassa cyanobacteriën;</p>
macrofyten	<p>abundantie ondergedoken waterplanten;</p>
vissen	<p>totale visbiomassa (kg/ha), en de aandelen juveniele en adulte witvis en piscivore vis.</p>

3. METHODE

3.1. Inleiding

Het onderzoek is hoofdzakelijk gericht op de relatie tussen waterkwaliteit, systeemkenmerken, beheer en de kritische P-belasting van een watersysteem. Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een instrument, waarmee op een sterke vereenvoudigde wijze de kritische P-belasting van een watersysteem kan worden berekend. De minimale vereisten voor dit instrument zijn:

- het instrument moet een gebruiksvriendelijk alternatief zijn voor het complexe model PCLake;
- de uitkomsten van het instrument moeten betrouwbaar zijn (afwijking maximaal 0,7-1,4x de berekende waarde, vergelijkbaar met de modelonnauwkeurigheid van PCLake (Janse 2005)).

De in deze studie uitgewerkte instrumenten zijn:

- een metamodel gebaseerd op een multi-pele lineaire regressie;
- een interpolatietabel.

Er wordt in dit rapport gebruik gemaakt van de begrippen kritische P-concentratie en kritische P-belasting. De modelsimulaties zijn uitgevoerd op basis van een variatie in P-concentratie (mg/l) in het inkomende water. De concentratie in het inkomende water, waarbij sprake is van een omslag wordt de kritische P-concentratie genoemd. De kritische P-concentratie is omgerekend tot een kritische P-belasting ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$), waarmee analyses zijn uitgevoerd (zie paragraaf 3.2.).

In dit hoofdstuk wordt eerst beschreven hoe de kritische P-belasting wordt bepaald. Daarna wordt de methodiek achter de bovengenoemde instrumenten op hoofdlijnen gepresenteerd. In de bijlagen wordt hier uitgebreider op ingegaan.

3.2. Bepaling van kritische P-concentratie

De kritische P-belasting (kP) wordt bepaald op basis van de kritische P-concentratie in het inkomende water (CPIN in mg/l), de verblijftijd (V in dagen) en de diepte (D in meter) (zie formule 1). De in deze studie gehanteerde eenheid van de kritische P-belasting is $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$. Er is een omrekening nodig van de kP in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ naar kP in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$ (zie formule 2).

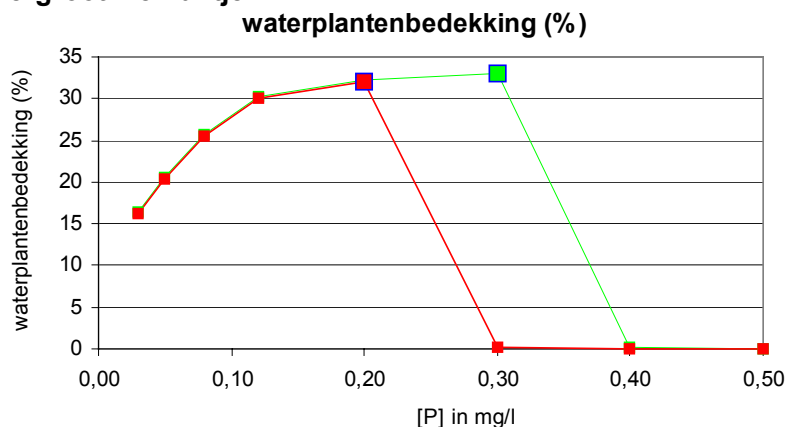
$$\text{kP} (\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}) = \text{CPIN} * \text{D} / \text{V} \quad (\text{formule 1})$$

$$\text{kP} (\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}) = \text{kP} (\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}) * 365 \quad (\text{formule 2})$$

De kritische P-concentratie is gedefinieerd vanuit een heldere (punt 1) en troebele (punt 2) situatie:

1. de maximale P-concentratie in het inkomende water, waarbij de ecologisch toestand van een watersysteem, te weten helder en gedomineerd door waterplanten nog gehandhaafd blijft;
2. de P-concentratie in het inkomende water, waarbij de ecologisch toestand van een watersysteem verandert van troebel en gedomineerd door algen in helder en gedomineerd door waterplanten.

Afbeelding 3.1. Afleiden van kritische P-concentratie: groen = heldere begintoestand, rood = troebele begintoestand, de kritische P-concentraties zijn aangegeven met een vergroot vierkantje



De kritische P-concentratie wordt gerelateerd aan de bedekking met waterplanten (in bijlage IIIa is een vergelijking gemaakt met alternatieve afleidingsmethoden): de plantenbedekking neemt in beginsel toe bij toenemende P-concentratie tot de kritische P-concentratie (fase 1), waarna de plantenbedekking sterk afneemt (fase 2). Bij overschrijding van de grens van 5 % plantenbedekking in fase 2 is sprake van een omslag (zie ook het voorbeeld in afbeelding 3.1.). Er is niet altijd sprake van een omslag binnen de gehanteerde range. In dat geval kan geen kritische P-belasting op basis van een kritische P-concentratie worden afgeleid en is een schatting gemaakt (zie verder bijlage IIIc).

3.3. Statistische analyses

Het doel van de statistische analyse is:

- inzicht in de relatie tussen de ecologische toestand (helder of troebel) en de zomergemiddelde P-concentratie in een watersysteem;
- inzicht in de relatie tussen de invoervariabelen (waterkwaliteit, systeemkenmerken en beheer) en de kritische P-belasting;
 - het afleiden van een regressieformule, waarmee op basis van de relatie tussen waterkwaliteit, systeemkenmerken en beheer de kritische P-belasting kan worden berekend. Een regressieformule is afgeleid op basis van multi-pele lineaire regressie;
 - het afleiden van een interpolatietabel, door middel van lineaire interpolatie, waarmee de kritische P-belasting op basis van met PCLake gesimuleerde waarden kan worden berekend.

3.3.1. Ecologische toestand en zomergemiddelde P-concentratie

Deze studie is met name gericht op het afleiden van een relatie tussen de invoervariabelen waterkwaliteit, systeemkenmerken en beheer en de kritische P-belasting van een watersysteem. Deze kritische P-belasting is berekend op basis van de plantenbedekking, waarbij nog sprake is van een heldere toestand (plantenbedekking > 5 %).

Een tweede doel van de studie is het afleiden van de zomergemiddelde P-concentratie bij het omslagpunt. Om een goede inschatting te kunnen maken van deze concentratie moet naast de kritische P-belasting ook de eerstvolgende gesimuleerde (hogere) P-belasting worden gebruikt om de concentratie te berekenen. Deze hogere P-belasting is berekend op basis van de P-concentratie, waarbij de waterplantenbedekking al onder de bedekkingsgrens van 5 % is gekomen (in afbeelding 3.1. is dit voor de rode lijn 0,30 mg/l P en voor de groene lijn 0,40 mg/l P).

3.3.2. Watersystemen in relatie tot kritische P-belasting: multi-pele regressie analyse

Regressieanalyse is een statistische techniek die wordt gebruikt voor het onderzoeken van een specifieke samenhang binnen een dataset. Deze samenhang houdt in dat de waarde van een afhankelijke variabele (in dit geval de P-belasting) verklaard kan worden door één of meer onafhankelijke variabelen (in dit geval de systeemkenmerken, waterkwaliteit en beheer). Hiervoor wordt de kleinste-kwadratenmethode gebruikt. Voor elke onafhankelijke variabele worden voor de lijn $y=a+bx$ de coëfficiënten a en b zodanig berekend dat de som van de kwadraten van alle afwijkingen van het meetpunt ten opzichte van de lijn minimaal is. De onafhankelijke variabele met de beste benadering (uitgedrukt in R^2) wordt als eerste geselecteerd (methode Stepwise). Het resterende onverklaarde deel wordt opnieuw benaderd. Wederom wordt de best verklarende onafhankelijke variabele geselecteerd. Dit gaat door totdat de resterende onafhankelijke variabelen geen significante bijdrage meer hebben aan het resterende onverklaarde deel. De methode is vergelijkbaar met de door Janse (2005) gebruikte methode. Echter, het aantal gevarieerde onafhankelijke variabelen is groter.

Door het gebruik van transformatie van een aantal onafhankelijke variabelen werd de nauwkeurigheid van het regressiemodel verbeterd. Deze transformaties komen overeen met de door Janse (2005) toegepaste transformaties bij een soortgelijke analyse. Aanvullende transformaties gaven geen duidelijke verbetering (> 1 %) van de nauwkeurigheid en zijn weggelaten. De toegepaste transformaties zijn:

- 1/diepte in plaats van diepte;
- 1/verblijftijd in plaats van verblijftijd.

3.3.3. Watersystemen in relatie tot kritische P-belasting: interpolatietabel

Met behulp van lineaire interpolatie kan voor alle systeemkenmerken en maatregelen een kritische P-belasting worden afgeleid aan de hand van berekende kritische P-belastingen. De berekende kritische P-belastingen zijn gerangschikt in een tabel (zie verder bijlage IIIc). Na invoer van de systeemkenmerken (in het bestand 'systeemkenmerken.xls') worden de meest gelijkende systeemkenmerken opgezocht in de tabel. Op basis van deze systeemkenmerken wordt m.b.v. een lineaire relatie de kritische P-belasting afgeleid. De interpolatietabel (inttabel.m) is geprogrammeerd in Matlab.

Naast de kritische P-belasting kan tevens een waarde worden afgelezen voor alle overige uitvoervariabelen (totaal stikstof en fosfor in het watersysteem, chlorofyl-a, waterplanten, vis etc.) behorende bij deze kritische P-belasting (behorende bij zowel de heldere als de troebele toestand rond het omslagpunt).

De interpolatietabel is benaderbaar op twee manieren:

- nearest: de waarde van het meest gelijkende meer wordt toegekend;
- linear: de waarde wordt berekend door lineaire interpolatie van de best gelijkende waarden.

De interpolatietabel is zo opgebouwd dat in eerste instantie een oplossing gezocht wordt op basis van lineaire interpolatie tussen de best gelijkende waarden (linear). Als deze waarde niet kan worden berekend wordt de dichtstbijzijnde waarde gezocht (nearest).

3.4. Validatie

De multiële lineaire regressie en de interpolatietabel zijn gevalideerd met een onafhankelijke set nieuwe simulatieresultaten, op basis waarvan nieuwe kritische P-belastingen (n=1536) zijn berekend. Hierbij is de P-concentratie opnieuw gevarieerd tussen 0,03 en 0,5 mg/l. In bijlage IIId zijn de waarden gegeven voor de verschillende variabelen in de validatieset. De samenstelling van waarden voor de validatieset is zodanig gekozen dat:

- de waarden zoveel mogelijk overeenkomstig zijn met de karakteristieken van de meest voorkomende Nederlandse meren;
- de waarden die niet voorkomen in de simulatieset (tabel 2.1) waarmee de tabel is afgeleid.

De resultaten van de validatie (multiële lineaire regressie en interpolatietabel) zijn vergeleken met de resultaten die verkegen zijn met de door Janse (2005) afgeleide multiële lineaire regressie. De kritische belasting in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ is daarbij omgerekend in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$.

De regressiefomule (Janse 2005), waarmee de kritische P-belasting (in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) vanuit de heldere toestand (helderheid behouden) kan worden berekend is:

$$\ln(\text{kritische P-belasting}) = -0,05 + 0,02 \cdot \left(\frac{\text{diepte}}{\text{verblijftijd} \cdot 1000}\right) + 2,97/\text{diepte} + 0,63 \cdot \text{aandeel_moeras} - 4,56 \cdot 10^{-4} \cdot \text{strijklengte} - 0,30 \cdot \text{veen} - 0,10 \cdot \text{klei}$$

en vanuit de troebele toestand (omslag forceren):

$$\ln(\text{kritische P-belasting}) = -2,33 + 0,03 \cdot \left(\frac{\text{diepte}}{\text{verblijftijd} \cdot 1000}\right) + 4,98/\text{diepte} + 0,96 \cdot \text{aandeel_moeras} - 6,11 \cdot 10^{-4} \cdot \text{strijklengte} - 0,53 \cdot \text{veen} - 0,32 \cdot \text{klei}$$

met de bijbehorende eenheden:

- diepte: diepte in meter;
- verblijftijd: verblijftijd in dagen;
- aandeel moeras: aandeel moeras in fractie ten opzichte van wateroppervlakte exclusief moeras;
- strijklengte: strijklengte in meter, afgeleide (wortel) van wateroppervlakte;
- 'veen': als veenbodem, wordt hier 1 ingevuld, voor 'klei' wordt 0 ingevuld;
- 'klei': als kleibodem, wordt hier 1 ingevuld voor 'veen' wordt 0 ingevuld; als zandbodem wordt voor zowel 'veen' als 'klei' wordt 0 ingevuld.

4. RESULTATEN

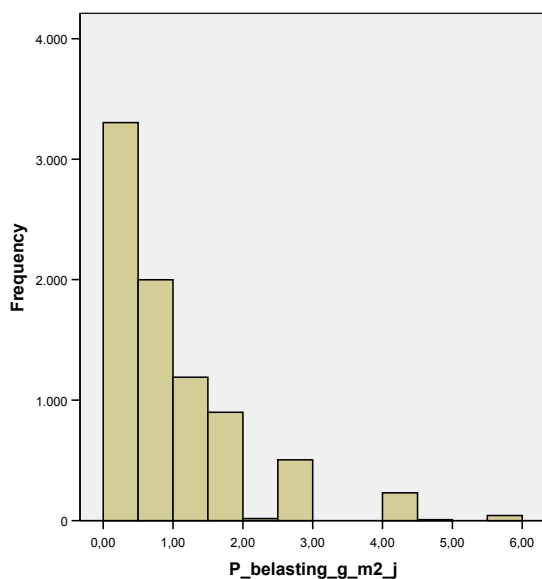
4.1. Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van het onderzoek gepresenteerd. Het uitgangspunt is de kritische P-belasting in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$. De resultaten voor de kritische P-concentratie in het inkomende water zijn weergegeven in bijlage IIb. Van de P-concentratie in het meer behorend bij de kritische P-concentratie is de frequentieverdeling weergegeven in dit hoofdstuk. De boxplots zijn weergegeven in bijlage IV.

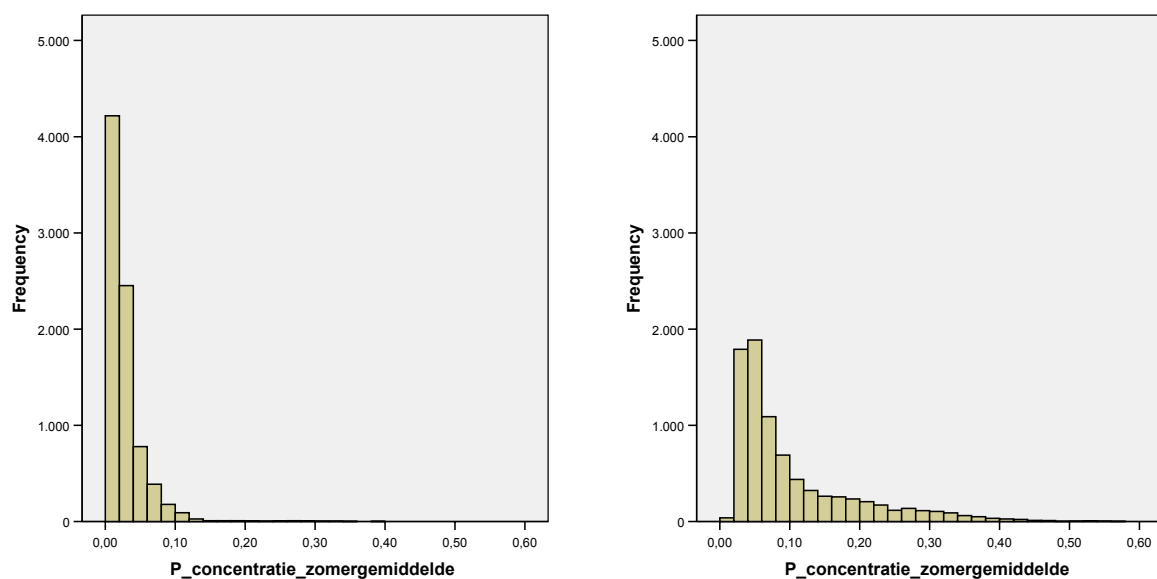
4.2. Frequentieverdeling

De frequentieverdeling voor de kritische P-belasting is weergegeven in afbeelding 4.1. Het grootste deel van de kritische P-belastingen ligt in het gebied van 0 tot $1\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$. De 'gaten' in de grafiek ontstaan omdat niet met alle P-belastingen is gerekend. Er is slechts een beperkt aantal combinaties mogelijk op basis van de gevarieerde P-concentratie, verblijftijd en diepte ($n=72$).

Afbeelding 4.1. Frequentieverdeling van de kritische P-belasting , $n=8197$, N/P-ratio = 10



Afbeelding 4.2. Frequentieverdeling van de kritische P-concentratie, links in de heldere toestand ($n=8197$), rechts in de troebele toestand ($n=8175$), N/P-ratio = 10



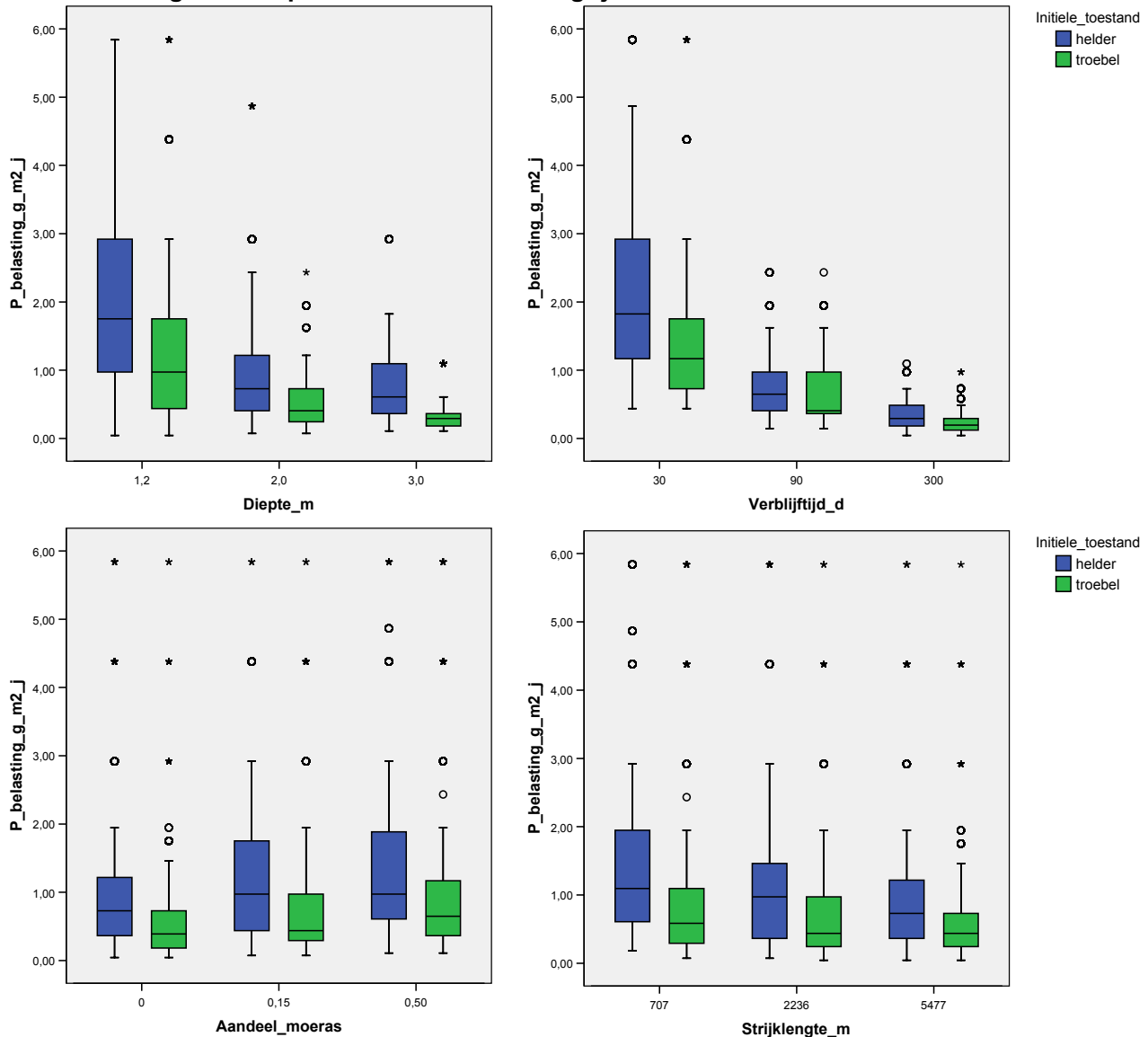
In afbeelding 4.2. zijn de frequentieverdelingen weergegeven voor de zomergemiddelde P-concentratie rond het omslagpunt. In de linkergrafiek is de frequentieverdeling weergegeven voor de heldere toestand behorend bij de kritische P-belasting, in de rechtergrafiek voor de troebele toestand behorend bij de eerstvolgende hogere gesimuleerde P-belasting.

De zomergemiddelde P-concentratie bij het omslagpunt uitgaande van de heldere toestand is gemiddeld 0,02 mg/l en ligt in 95 % van de gevallen lager dan 0,07 mg/l. Dit beeld wordt bevestigd door herberekening van de P-concentratie op basis van de kritische P-belasting m.b.v. een door RIZA (1996) afgeleide formule (hier niet afgebeeld). De zomergemiddelde P-concentratie bij het omslagpunt uitgaande van de troebele toestand is echter 0,10 mg/l en ligt in 95 % van de gevallen lager dan 0,30 mg/l.

4.3. Box-plots

De belangrijkste boxplots voor kritische P-belasting zijn weergegeven in afbeelding 4.3. De boxplots geven de range in de kritische P-belasting bij een bepaalde waarde van de factor die onder de afbeelding staat (bijvoorbeeld de diepte bij de afbeelding linksboven). Een totaaloverzicht is opgenomen in bijlage IVa (kritische P-belasting). In bijlage IVb zijn bovendien boxplots weergegeven voor de zomergemiddelde P-concentratie in het meer, behorend bij de kritische P-belasting.

Afbeelding 4.3. Boxplots voor de vier belangrijkste variabelen



De kritische P-belasting wordt het best verklaard door diepte en verblijftijd. Ook het aandeel moeras, de strijklengte en het bodemtype zijn van belang. De bijbehorende zomergemiddelde P-concentratie in het meer wordt grotendeels verklaard door diepte. Het verband voor de zomergemiddelde P-concentratie is minder duidelijk dan voor de kritische P-belasting. De verbanden die uit de boxplots komen, kunnen als volgt worden samengevat:

- de kritische P-belasting voor zowel heldere als troebele watersystemen wordt hoger (en het watersysteem robuuster) wanneer:
 - de diepte en de strijklengte (of oppervlakte) afneemt;
 - de verblijftijd afneemt;
 - het aandeel moeras toeneemt;
 - er een zand- of kleibodem is.
- de kritische P-belasting voor heldere watersystemen is hoger dan voor troebele watersystemen.
- de spreiding rond de mediaan is groot voor zowel de kritische P-belasting als de bijbehorende zomergemiddelde P-concentratie in het meer. Bij troebele watersystemen is de spreiding beperkter dan bij heldere watersystemen.

4.4. Multipiele regressie analyse

De gespecificeerde resultaten van de multipiele lineaire regressie zijn weergegeven in bijlage IVc. Er is een transformatie toegepast op diepte en verblijftijd (zie ook 3.3.1).

De vijf belangrijkste verklarende variabelen zijn in afnemende volgorde:

- verblijftijd;
- diepte;
- moeras;
- strijklengte;
- bodemtype (veen).

Dit komt overeen met de bevindingen van Janse (2005). De in deze studie aanvullend gekozen variabelen zijn weliswaar van belang voor de ligging van de kritische P-belasting, maar minder belangrijk dan bovenstaande variabelen.

De regressieformule (kP in $g \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$) vanuit een heldere toestand (helderheid behouden) is als volgt:

$$\ln(\text{kritische } P\text{-belasting}) = -0,31 + 21,47/\text{verblijftijd} + 0,95/\text{diepte} + 0,54 \cdot \text{aandeel moeras} - 7,47E-5 \cdot \text{strijklengte} - 0,17 \cdot \text{veen} - 0,01 \cdot \text{klei} + 0,05 \cdot \text{verblijftijd zomer ten opzichte van winter} - 0,11 \cdot \text{winterpeil ten opzichte van zomerpeil} + 0,30 \cdot \text{fractie } PO_4 + 6,62 \cdot \text{visdruk}$$

en vanuit een troebele toestand (omslag forceren):

$$\ln(\text{kritische } P\text{-belasting}) = -0,33 + 15,79/\text{verblijftijd} + 0,94/\text{diepte} + 0,51 \cdot \text{aandeel moeras} - 4,75E-5 \cdot \text{strijklengte} - 0,24 \cdot \text{veen} - 0,18 \cdot \text{klei} + 0,05 \cdot \text{verblijftijd zomer ten opzichte van winter} - 0,12 \cdot \text{winterpeil ten opzichte van zomerpeil} + 0,12 \cdot \text{fractie } PO_4 + 3,18 \cdot \text{visdruk}$$

met de bijbehorende eenheden:

- diepte: diepte in meter;
- verblijftijd: verblijftijd in dagen;
- aandeel moeras: aandeel moeras in fractie ten opzichte van wateroppervlakte exclusief moeras;
- strijklengte: strijklengte in meter, afgeleide (wortel) van wateroppervlakte;
- 'veen': als veenbodem, wordt hier 1 ingevuld, voor 'klei' wordt 0 ingevuld;
- 'klei': als kleibodem, wordt hier 1 ingevuld, voor 'veen' wordt 0 ingevuld; als zandbodem wordt voor zowel 'veen' als 'klei' wordt 0 ingevuld;
- verblijftijd zom...: verblijftijd zomer ten opzichte van winter uitgedrukt in een factor;
- winterpeil t.o.v...: winterpeil ten opzichte van zomerpeil in meter, zomerpeil is gemiddeld waterpeil;

- fractie PO₄: fractie opgelost fosfaat ten opzichte van totaal fosfaat;
- visdruk: visdruk in fractie weggevangen vis per dag ten opzichte van totaal (kg/kg).

4.5. Interpolatietabel

De resultaten van de interpolatietabel kunnen niet worden weergegeven. In paragraaf 4.6. (validatie) wordt uitgebreid ingegaan op de interpolatietabel.

4.6. Validatie

In onderstaande afbeeldingen zijn de validatieresultaten weergegeven in boxplots met een bijbehorende frequentieverdeling (afbeelding 4.4. en 4.8.) voor de regressieformule van Janse (2005) (afbeelding 4.5. en 4.9.), de in deze studie gevonden regressieformule (afbeelding 4.6. en 4.10.) en de in deze studie gevonden interpolatietabel op basis van linear en nearest (afbeelding 4.7. en 4.11.), waarbij onderscheid is gemaakt tussen een initieel heldere toestand en een initieel troebele toestand.

In de frequentieverdeling is te zien dat met de validatieset met name kritische P-belastingen (kP) zijn berekend in de range van 0 - 2 g·m⁻²·j⁻¹. Verder is een onderscheid gemaakt in twee kleuren. Hiermee is het onderscheid weergegeven tussen de waarden die zijn berekend op basis van de linear-methode en de waarden die zijn berekend op basis van de nearest-methode (interpolatietabel, zie paragraaf 3.3.3.). Te zien is dat met name in de range van 0 - 1 g·m⁻²·j⁻¹ veel waarden zijn berekend op basis van de nearest-methode.

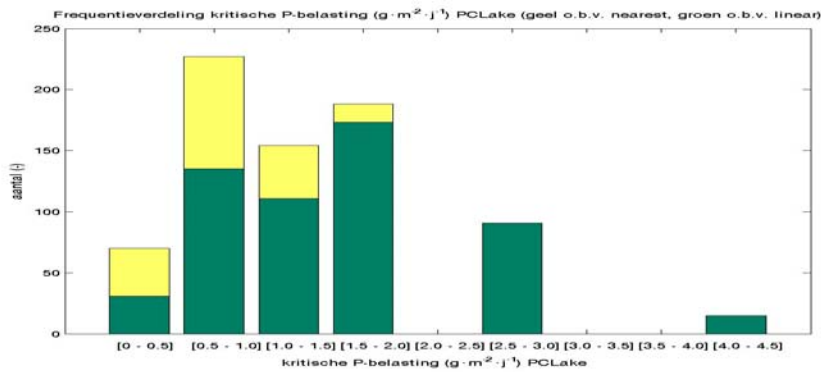
In de boxplots is het verschil tussen de door één van de modellen berekende kritische P-belasting en de door PCLake gesimuleerde kritische P-belasting uitgezet tegen de door PCLake gesimuleerde kritische P-belasting. In het ideale geval zouden de berekende kritische P-belasting en de gesimuleerde kritische P-belasting gelijk zijn. Deze ideale situatie is weergegeven door middel van een stippellijn. Hoe meer de boxplots afwijken van deze lijn, hoe slechter het model. Opgemerkt dient te worden dat de boxplots evenwichtig zowel boven als onder de lijn verdeeld moeten liggen. Omdat de validatieset specifiek gericht is op de typisch Nederlandse kleinere ondiepe watersystemen (en daarmee maar een deel van de totale bandbreedte van de simulatieset valideert) is dat in deze resultaten niet het geval.

Te zien is dat de kritische P-belasting berekend met de interpolatietabel (linear + nearest) het best overeenkomt met de kritische P-belasting berekend met PCLake. De in deze studie gevonden kritische P-belastingen op basis van de regressieformule vertoont een grotere afwijking ten opzichte van de kritische P-belastingen berekend met PCLake dan de kritische P-belastingen op basis van de regressieformule van Janse (2005). De meest voor de hand liggende rede is dat Janse (2005) minder factoren heeft gevarieerd, maar wel meer variatie toegepast heeft voor de belangrijkste factoren (5 waterdieptes, 4 oppervlakten, 4 verblijftijden, 4 aandelen moeras in plaats van 3 variaties).

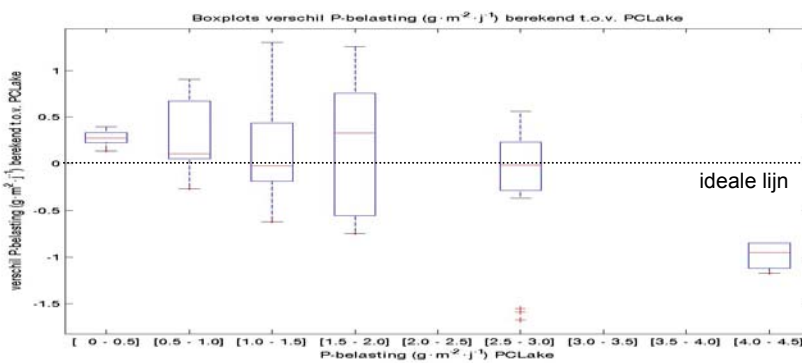
De spreiding binnen de kritische P-belastingen op basis van de in deze studie gevonden regressieformule is echter kleiner. Dit komt overeen met de hogere R²-waarde (zie bijlage IVc). Dit houdt in dat de kritische P-belasting weliswaar preciezer (minder grote bandbreedte) wordt ingeschat, maar wel met een grotere afwijking (ofwel bandbreedte bevindt zich op de verkeerde plek) dan de kritische P-belasting berekend door Janse (2005).

De interpolatietabel geeft de beste resultaten voor het afleiden van de kritische P-belasting. In afbeelding 4.11. is de relatie te zien tussen de kritische P-belasting berekend met de interpolatietabel en de kritische P-belasting berekend met PCLake. Hierbij zijn drie lijnen getekend. De middelste lijn geeft de door PCLake berekende kritische P-belasting aan. De twee andere lijnen geven de foutenmarge weer binnen PCLake. Te zien is dat de meeste punten binnen de buitenste lijnen vallen. Met name de omcirkelde punten vallen erbuiten. Dit zijn de punten berekend op basis van de nearest-methode.

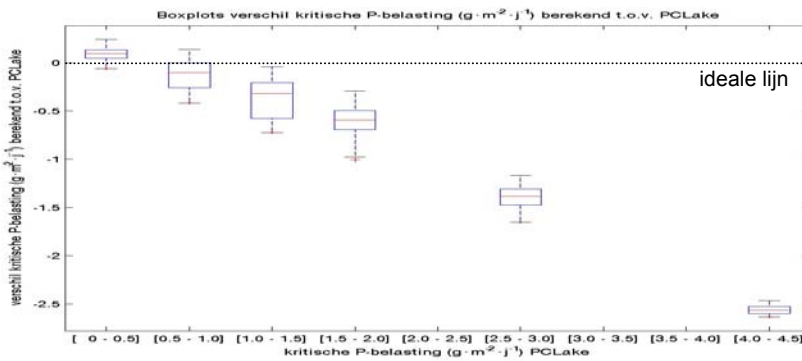
Afbeelding 4.4. Frequentieverdeling kP helder ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) validatieset (kleurverdeling specifiek voor interpolatietabel, geel op basis van nearest, groen op basis van linear)



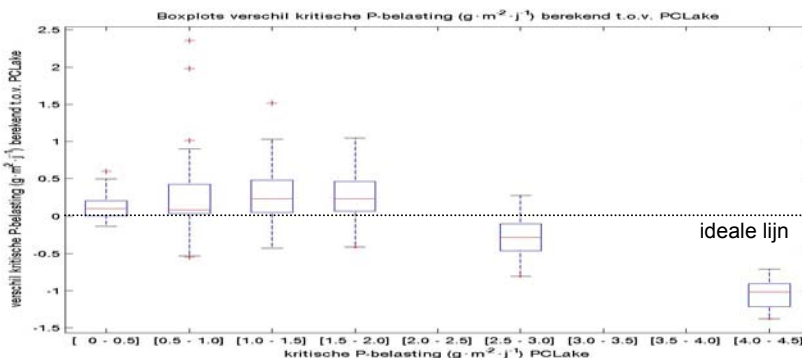
Afbeelding 4.5. Boxplots verschil kP helder Janse (2005) ten opzichte van PCLake op basis van validatieset



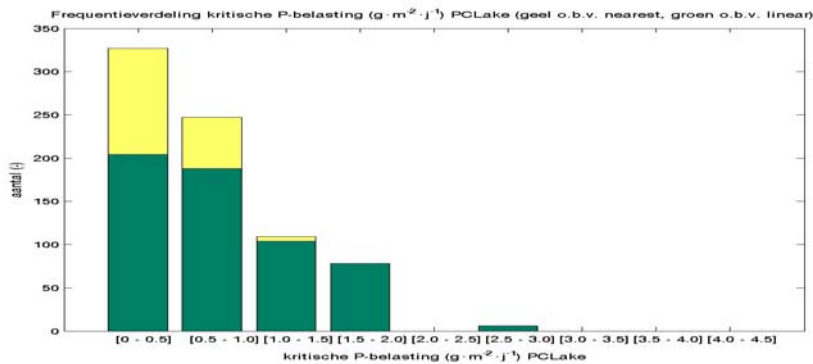
Afbeelding 4.6. Boxplots verschil kP helder regressieformule ten opzichte van PCLake op basis van validatieset



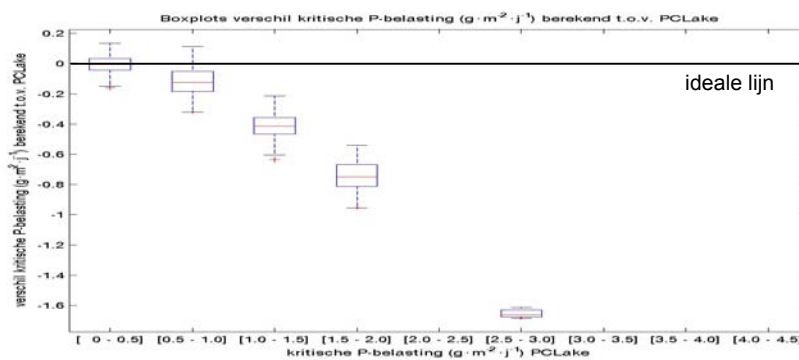
Afbeelding 4.7. Boxplots verschil kP helder interpolatietabel ten opzichte van PCLake op basis van validatieset



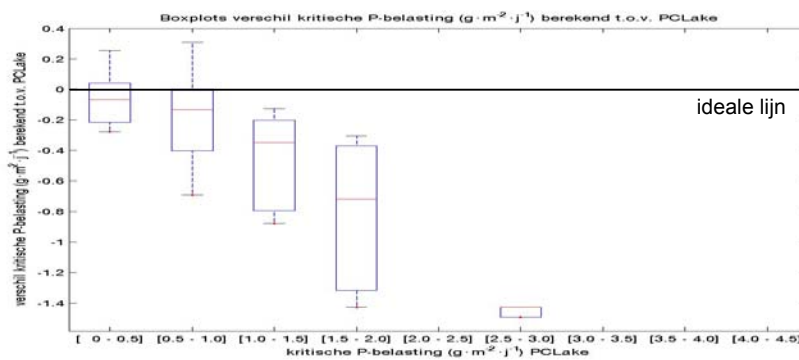
Afbeelding 4.8. Frequentieverdeling kP troebel ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) validatieset (kleurverdeling specifiek voor interpolatietabel, geel op basis van nearest, groen op basis van linear)



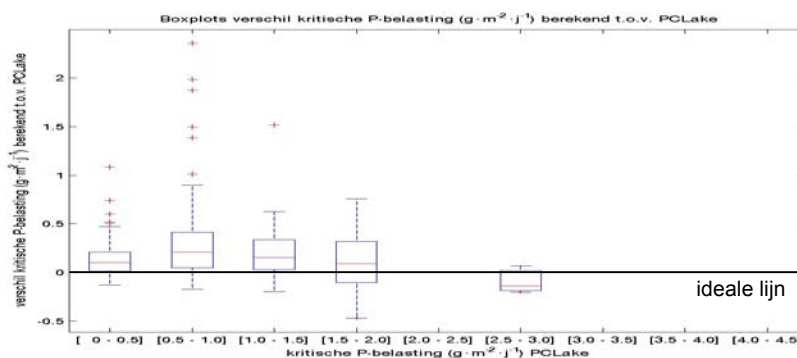
Afbeelding 4.9. Boxplots verschil kP troebel Janse (2005) ten opzichte van PCLake op basis van validatieset



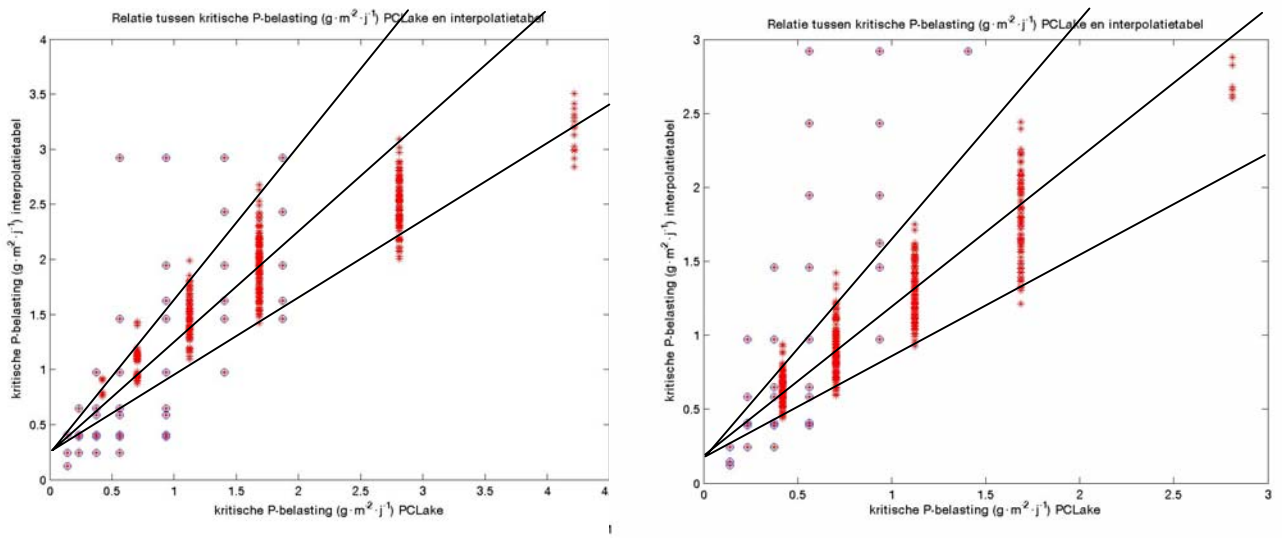
Afbeelding 4.10. Boxplots verschil kP troebel regressieformule ten opzichte van PCLake op basis van validatieset



Afbeelding 4.11. Boxplots verschil kP troebel interpolatietabel ten opzichte van PCLake op basis van validatieset



Afbeelding 4.12. Relatie kP helder (links) en troebel (rechts) interpolatietabel ten opzichte van PCLake op basis van validatieset: lijnen geven foutenmarge PCLake aan (0,7 - 1,4 * berekende kP), berekende kP's op basis van nearest-methode zijn omcirkeld



5. INTERPOLATIETABEL

De interpolatietabel blijkt geschikt voor toepassing in KRW-studies. Waterbeheerders en andere geïnteresseerden kunnen de interpolatietabel via internet raadplegen op de site van STOWA (www.stowa.nl) of het Milieu- en Natuurplanbureau (www.mnp.nl). De interpolatietabel wordt voorzien van een gebruikershandleiding, waarbij tevens de bandbreedte wordt aangegeven, waarbinnen de methodiek resultaten geeft (zie ook tabel 4.1. en 4.2.). In deze tabellen wordt bovendien een toelichting gegeven bij de verschillende invoervariabelen. De belangrijkste onafhankelijke variabelen voor het berekenen van een betrouwbare kritische P-belasting staan in tabel 4.1. Dit zijn respectievelijk verblijftijd, waterdiepte, aandeel moeras, strijklengte en bodemtype.

Aangeraden wordt om de waarde voor het peilverschil tussen zomer en winter niet te gebruiken. Op basis van expert knowledge kan een inschatting worden gemaakt van het effect van peilverandering. Verlaging van het zomerpeil (natuurlijk peilbeheer) geeft een verhoging van de kritische P-belasting.

Tabel 4.1. Bandbreedte (onder en boven) voor de belangrijkste onafhankelijke invoervariabelen

invoervariabele	onder	boven	toelichting
verblijftijd (dagen)	20	450	De gemiddelde verblijftijd kan direct worden ingevuld. Een alternatief is het invullen van jaarlijkse neerslag, bruto kwel en instromend oppervlaktewater. Standaard verblijftijd is 90 dagen.
waterdiepte (meter)	0,8	4,5	De gemiddelde waterdiepte is standaard 2 meter.
aandeel moeras (-)	0	0,75	Het aandeel moeras kan als fractie worden berekend, maar kan ook als oppervlakte worden ingevoerd. Het wateroppervlak moet ook zijn ingevuld. Standaard staat aandeel moeras op 0 (geen moeras).
strijklengte (meter)	470	8200	De strijklengte kan worden berekend aan de hand van de overheersende windrichting en de vorm van het watersysteem. Als dit onbekend is, kan als alternatief het wateroppervlak worden ingevuld. Standaard is 1000 meter (100 hectare).
op basis van oppervlak (hectare)	33	6750	
bodemtype (-)	-	-	Bij bodemtype moet een keuze worden gemaakt tussen <u>klei</u> , <u>veen</u> of <u>zand</u> . Wanneer niks wordt ingevuld, wordt standaard klei ingevuld.

Tabel 4.1. Bandbreedte (onder en boven) voor aanvullende onafhankelijke invoervariabelen

invoervariabele	onder	boven	toelichting
fractie opgelost P (-)	0,17	1	De fractie opgelost materiaal (fosfaat) kan worden ingevuld. Een alternatief is het invullen van de gemiddelde fosfaatconcentratie en de gemiddelde totaal P-concentratie. Standaard is 50 % opgelost materiaal (0,5).
verhouding verblijftijd winter ten opzichte van zomer (-)	0,67	4,5	De verhouding verblijftijd winter ten opzichte van zomer is een factor. Een alternatief is het invullen van de gemiddelde zomer verblijftijd (april t/m september) en de gemiddelde winter verblijftijd (oktober t/m maart). Standaardwaarde is 1.
visserijdruk (-)	0	0,015	De visserijdruk wordt ingevuld als factor vis weggevangen per dag ten opzichte van totaal vis (kg/kg). Standaardwaarde is 0.
peilverschil winter ten opzichte van zomer (meter)	0	0	Peilverschil winter ten opzichte van zomer geeft waarschijnlijk minder betrouwbare resultaten. Aangeraden wordt om deze variabele niet te variëren. Op basis van expert knowledge kan een inschatting worden gemaakt van het effect van peilverlaging of peilverhoging in de zomer op de kritische P-belasting. Standaard staat deze op 0 (geen peilverschil).

6. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

6.1. Conclusie

Deze studie is gericht op het afleiden van gekwantificeerde relaties, waarmee op basis van systeemkenmerken kritische P-belastingen kunnen worden afgeleid en tevens gerelateerde variabelen als zomergemiddelde N- en P-concentratie in het meer, bedekking met waterplanten, concentratie chlorofyl-a etc. Dit alles om waterbeheerders een handvat te bieden, zodat een goede beleidsafweging kan worden gemaakt op basis van inzicht in effectiviteit van (generieke) maatregelen gericht op nutriëntenreductie en aanvullende gebiedsgerichte maatregelen.

De conclusie is dat de op grond van deze studie afgeleide interpolatietabel goede mogelijkheden biedt om op een vereenvoudigde manier de kritische P-belasting van een watersysteem af te leiden. De interpolatietabel is dan ook een bruikbaar instrument voor waterbeheerders en andere geïnteresseerden. De interpolatietabel blijkt geschikt voor toepassing in KRW-studies en kan via internet geraadpleegd worden. Aanbevolen wordt om bij de berekening van de kritische P-belasting mogelijke peilvariatie buiten beschouwing te laten. Invloed van de peilvariatie moet op basis van expert knowledge worden vastgesteld. Daarnaast mag niet worden vergeten dat gewerkt wordt met modelresultaten. De werkelijkheid is in het algemeen vaak gecompliceerder. Dit instrument is echter het meest betrouwbare generieke hulpmiddel wat er op dit moment beschikbaar is voor toepassing in ondiepe meren.

Naast de interpolatietabel zijn bruikbare gekwantificeerde relaties afgeleid in de vorm van een regressieformule. Verder onderzoek is echter nodig om de regressieformule te verbeteren. Toepassing van de eerder door Janse (2005) afgeleide regressieformule geeft betere resultaten voor veel voorkomende Nederlandse meren (diepte: 1 tot 2 meter, oppervlak: 100 tot 250 ha, verblijftijd: 60 tot 180 dagen) dan de in deze studie afgeleide regressieformule. Aanbevolen wordt dan ook om bij gebruik van een regressieformule deze formule te gebruiken en niet de in deze studie afgeleide regressieformule.

Op basis van deze algemene verkenning kunnen de volgende zaken worden vastgesteld:

- van de systeemkenmerken zijn met name waterdiepte en verblijftijd sterk bepalend voor de kritische P-belasting en verder strijklengte (of de oppervlakte) en bodemtype. Deze staan over het algemeen vast en zijn moeilijk te veranderen;
- beheersmaatregelen als visstandbeheer en aanleg moeras zorgen voor verhoging van de kritische P-belasting, biomanipulatie kan in bepaalde situaties een goede aanvullende maatregel zijn om een duurzame omslag te forceren (in het geval de P-belasting tussen de berekende kritische P-belasting voor een heldere en een troebele begintoestand ligt en de huidige toestand troebel is);
- alle invoervariabelen hebben een significante bijdrage in de bepaling van de kritische P-belasting;
- de kritische P-belasting varieert met name tussen de 0 en $2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$, maar kan voor specifieke watersystemen oplopen tot $6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$. Deze hoge kritische P-belastingen gelden voor watersystemen met een geringe diepte, een korte verblijftijd, een groot aandeel moeras, een klein oppervlak en verkerend in een heldere plantenrijke toestand. Watersystemen die aan bovenstaande voorwaarden voldoen maar een veenbodem hebben, zullen een wat lagere kritische P-belasting hebben;
- op basis van de kritische P-belasting is de zomergemiddelde P-concentratie berekend rond het omslagpunt (zowel in de heldere als troebele toestand). Door de stapgrootte in mogelijke kritische P-belastingen (zie paragraaf 3.2) wordt deze P-concentratie enigszins onderschat (bij een heldere toestand) respectievelijk overschat (bij een troebele toestand):
 - de zomergemiddelde P-concentratie behorend bij een heldere plantenrijke toestand rond het omslagpunt is (op basis van de PCLake-resultaten en de in deze studie gehanteerde range) in 95% van de gevallen lager dan 0,07 mg/l P. De zomergemiddelde P-concentratie behorend bij de kritische P-belasting aan de heldere kant van de 'medaille' is gemiddeld 0,02 mg/l P;
 - de zomergemiddelde P-concentratie behorend bij een troebele algrijke toestand rond hetzelfde omslagpunt is in 95% van de gevallen 0,30 mg/l P. De zomergemiddelde P-concentratie behorend bij de kritische P-belasting aan de troebele kant van de 'medaille' is gemiddeld 0,10 mg/l P.

- de zomergemiddelde P-concentratie kan uitgaande van de twee eerder genoemde punten rond het omslagpunt sterk uiteenlopen, afhankelijk van de ecologische toestand zelf (helder of troebel). De zomergemiddelde P-concentratie is blijkbaar een afgeleide van de ecologische toestand en slechts beperkt een stuurvariabele. Dit kan worden verklaard door zelfversterkende ecologische processen (hysterese (o.a. Scheffer 1998)) die in een watersysteem optreden:
 - in een troebel watersysteem wordt fosfor opgenomen door algen en veel minder vastgelegd in de bodem door o.a. brasem die de bodem opwoelt en de afwezigheid van waterplanten. Het fosfor bevindt zich in de waterfase en wordt in de waterfase gemeten.;
 - in een helder watersysteem, verdwijnt fosfor uit de waterfase door o.a. opname in waterplanten, versterkte sedimentatie en graas van algen door watervlooien. De gemeten P-concentratie in de waterfase is dan ook lager dan bij een troebel watersysteem.
- op basis van bovenstaande kan worden geconcludeerd dat de zomergemiddelde P-concentratie geen goede indicator voor de ecologische kwaliteit van een watersysteem is. Gebruik van zomergemiddelde P-concentraties als norm voor de goede ecologische toestand of het goed ecologisch potentieel is dan ook af te raden. Beter is het de norm te baseren op de fosfaatbelasting of eventueel de fosfaatconcentratie in het inkomende water.

In deze studie is de kritische P-belasting afgeleid op basis van de zomergemiddelde submerse waterplantenbedekking. De maximale P-belasting waarbij minimaal 5 % plantenbedekking (overeenkomstig de cijfers uit de Vierde Eutrofiëringsequête (RIZA 1998)) wordt bereikt is als kritische belasting gedefinieerd. Dit is een methodische op PCLake gebaseerde keuze. In werkelijkheid is er bijvoorbeeld variatie in waterdiepte, terwijl in PCLake met één denkbeeldig bakje wordt gewerkt. Het is dus een voor PCLake geschikte maat om een omslag te bepalen. In werkelijkheid kan een omslag bij 5 % plantenbedekking

Groot voordeel van deze studie is dat een groot aantal invoervariabelen is gevarieerd, waardoor inzicht ontstaat in de relatie van deze invoervariabelen met de kritische P-belasting en dus het ecologisch functioneren van watersystemen. Het nadeel van deze keuze is dat de spreiding binnen de verschillende invoervariabelen beperkt gehouden is. De spreiding is beperkt gehouden, omdat het totaal aantal uit te voeren simulaties anders te groot zou worden (het totaal was nu al meer dan 200.000).

Deze studie moet dan ook gezien worden als een verkennend onderzoek, waarbij

- de mogelijkheden van het gebruik van regressiemodellen voor een gebruiksvriendelijke toepassing van een complex model als PCLake verder onderzocht zijn;
- onderscheid kan worden gemaakt in de relatie tussen verschillende invoervariabelen (waterkwaliteit, systeemkenmerken en beheer) en de kritische P-belasting;
- de belangrijkste invoervariabelen onderscheiden kunnen worden.

6.2. Discussie

Deze studie geeft aanleiding voor een aantal discussiepunten:

- de methode waarmee de kritische P-belasting is afgeleid is mede bepalend voor de ligging van de kritische P-belasting: het is dus belangrijk om gezamenlijk vast te stellen op basis waarvan de kritische P-belasting gedefinieerd moet worden. Voorgesteld wordt ook in andere studies gebruik te maken van het criterium 5 % plantenbedekking;
- de keuze van waarden voor de verschillende variabelen is bepalend voor het wel of niet optreden van een omslag. Tevens zijn ze bepalend voor de uitkomsten van de regressieanalyse: hoe extremer de waardeverschillen, hoe belangrijker de variabele in de regressieanalyse (voor moeras is gekozen voor de waarden 0 %, 15 % en 50 % moeras, in de praktijk komen dergelijke bedekkingen nauwelijks voor). Voorgesteld wordt om bij de keuze van deze waarden in het vervolg rekening te houden met:
 - veel voorkomende watertypen in Nederland;
 - de invloed van hysterese: bij een diepte van 3 meter is er nauwelijks nog sprake van hysterese. Daarom zijn dieptes tussen 1 en 2 meter interessanter (ook voor de waterbeheerder);

- meer variatie in waarden voor belangrijke variabelen: deze variabelen zijn bepalend voor de uitkomsten van de analyse;
- de methode waarmee de invloed van peilfluctuatie (winter ten opzichte van zomerpeil) is onderzocht, zal moeten worden aangepast, waarna nieuwe simulaties moeten worden gedaan. Eerst zal het gemiddeld peil moeten worden bepaald. Vervolgens kunnen het winter- en zomerpeil hiervan worden afgeleid. Voorlopig wordt afgeraden peilvariatie mee te nemen bij het berekenen van de kritische P-belasting op basis van de interpolatietabel

6.3. Aanbevelingen

Deze studie moet in eerste instantie gezien worden als verkennende studie. De studie heeft weliswaar een goed bruikbaar instrument opgeleverd, het was niet mogelijk direct bruikbare gekwantificeerde relaties af te leiden uit de dataset. De relaties afgeleid door Janse (2005) zijn dan ook beter. De analyse heeft wel inzicht gegeven in welke parameters belangrijk zijn voor de bepaling van de kritische P-belasting. Voor de verfijning van de relaties zijn aanvullende PCLake berekeningen nodig. Hierbij moet de nadruk liggen op de factoren waterdiepte, strijklengte, verblijftijd, bodemtype en aandeel moeras:

- waterdiepte (vooral tussen 1 en 2 meter);
- strijklengte (focus op kleinere watersystemen);
- verblijftijd (kortere verblijftijden);
- aandeel moeras (met name tussen 0 en 15 %);
- variatie in bodemtypen (definiëren van aanvullende bodemsamenstellingen).

Bovendien zal de invloed van peilfluctuatie opnieuw moeten worden onderzocht, waarbij uitgegaan wordt van het gemiddelde waterpeil. Hierbij kan dezelfde set worden aangehouden, te weten zomerpeil 50 cm lager dan winterpeil (natuurlijk peil), gelijk peil en zomerpeil 25 cm hoger dan winterpeil (tegen-natuurlijk peil). In afbeelding 6.1. is dit gevisualiseerd.

Afbeelding 6.1. Zomer (lichtblauw) en winterpeil (donkerblauw) ten opzichte van gemiddeld peil (gestippeld), van links naar rechts gelijk peil, natuurlijk peil en tegennatuurlijk peil



7. LITERATUURLIJST

Molen, D.T. van der (redactie), 2004. Referenties en conceptmaatlaten voor meren voor de Kaderrichtlijn Water STOWA 2004-42.

Janse, J.H. 2005. Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches. (en) [sn, sl], 2005. 376 p.

Janse J.H. 1997. A model of nutrient dynamics in shallow lakes in relation to multiple stable states. *Hydrobiologia* 342/343: 1-8.

L.M. Vleeshouwers, J.H. Janse, T. Aldenberg and J.M. Knoop. 2004. A metamodel for PCLake. RIVM report 703715007/2004.

RIZA. 1996. Deckere, E.M.G.T. de, Rijdsdijk, R.E., Boers, P.C.M., Molen, D.T. van der, Handleiding Bestrijding Eutrofiëring; Effecten van de reductie van de fosfaatbelasting in ondiepe plassen en meren. Lelystad, RIZA nota 96.049E, 97 p.

RIZA. 1998. Portielje & van der Molen, Relaties tussen eutrofiëeringsvariabelen en systeemkenmerken van de Nederlandse meren en plassen. Deelrapport II voor de vierde Eutrofiëeringsenquête, RIZA rapport nr: 98.007, ISBN nr:9036951585, RIZA, Lelystad.

Scheffer, M. (1998) *Ecology of Shallow Lakes*. Chapman and Hall, London.

BIJLAGE Ia INLEIDING: KRITISCHE P-BELASTING, WAAROM P?

In tegenstelling tot de simulaties, waarbij zowel N- als P-gelimiteerde watersystemen zijn geanalyseerd, is bij dit onderzoek alleen gekeken naar P-gelimiteerde systemen (NP-ratio = 10). Systemen met een N/P-ratio van 3,5 zijn derhalve buiten beschouwing gelaten. De rede hiervoor is ten eerste dat het model voor het gedrag van N minder betrouwbaar is. Ten tweede zijn de meeste watersystemen in Nederland P-gelimiteerd.

Om de kritische P-belasting te bepalen is eerst de kritische P-concentratie bepaald (zie hoofdstuk 3). De P-concentratie in het inkomende water is hiervoor in 8 stappen gevarieerd van 0,03 mg/l tot 0,50 mg/l (0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50). In fase 1 (simulaties) zijn aanvullende simulaties gedaan met nieuwe P-concentraties. Echter deze aanvullende P-concentraties zijn gebaseerd op de kritische P-concentratie per set van systeemkenmerken. De bepaling van deze kritische P-concentratie (op basis van 30 µg/l chlorofyl-a) verschilt van de in deze studie gebruikte bepaling (op basis van 5 % waterplantenbedekking). Daarom zijn de aanvullende simulaties in deze studie niet bruikbaar en wordt alleen gebruik gemaakt van de basisset.

BIJLAGE Ib INLEIDING: BEGRIPPENLIJST

<u>DIN:</u>	Dissolved Inorganic Nitrogen, ofwel opgelost anorganisch stikstof (NH ₄ +NO ₃);
<u>DIP:</u>	Dissolved Inorganic Phosphorus, ofwel opgelost anorganisch fosfor (PO ₄);
<u>fractie opgelost P:</u>	fosfor kan in verschillende vormen in het water voorkomen. Grofweg wordt een onderverdeling gemaakt in opgelost fosfor (in de vorm van PO ₄ ³⁻ en direct beschikbaar voor waterplanten en algen) en particulier fosfor (gebonden aan zwevend stof, incl. algen);
<u>N/P-ratio:</u>	de verhouding tussen de hoeveelheid stikstof (N) en fosfor (P) in mg/l in het inkomende water. Bij een N/P-ratio van 3,5 bepaalt de hoeveelheid stikstof de ontwikkeling van algen en waterplanten, bij een N/P-ratio van 10 is de hoeveelheid fosfor bepalend;
<u>kritische P-concentratie:</u>	de P-concentratie (mg/l) in het inkomende water (neerslag, grondwater en oppervlaktewater), waarbij de ecologisch toestand van een watersysteem, te weten helder en gedomineerd door waterplanten gehandhaafd blijft ofwel de P-concentratie in het inkomende water, waarbij de ecologisch toestand van een watersysteem verandert van troebel en gedomineerd door algen in helder en gedomineerd door waterplanten;
<u>kP:</u>	kritische P-belasting
<u>kritische P-belasting:</u>	de P-belasting (g·m ⁻² ·j ⁻¹) op een watersysteem, waarbij de ecologisch toestand, te weten helder en gedomineerd door waterplanten gehandhaafd blijft ofwel de P-belasting in het inkomende water, waarbij de ecologisch toestand van een watersysteem verandert van troebel en gedomineerd door algen in helder en gedomineerd door waterplanten;
<u>P-belasting:</u>	de hoeveelheid fosfor die per jaar (belasting uitgedrukt in g·m ⁻² ·j ⁻¹) of per dag (belasting uitgedrukt in mg·m ⁻² ·d ⁻¹) een watersysteem binnenkomt, gecorrigeerd voor het totale oppervlak van een watersysteem;
<u>P-limitatie:</u>	in deze studie is alleen gewerkt met 'P-gelimiteerde watersystemen', ofwel de N/P-ratio is 10 en de ontwikkeling van algen en waterplanten wordt bepaald door de hoeveelheid P. In sommige wateren (met name brakke wateren) kan N-limitatie optreden;
<u>strijklengte:</u>	de ononderbroken afstand waarover de wind over het water kan waaien, noemt men de strijklengte. De strijklengte is bepalend voor de grootte van de golven en bepaalt mede de opwerveling van bodemdeeltjes. De strijklengte wordt overwegend bepaald door de zuidwesten wind. De lengte vanuit deze hoek bepaalt dan ook de strijklengte. In deze studie is uitgegaan van de wortel van de totale oppervlakte van een watersysteem;
<u>verblijftijd:</u>	tijd (in dagen) die nodig is om de totale hoeveelheid water in een meer te verversen. De verblijftijd wordt berekend door het volume te delen door de inlaat (neerslag, grondwater, oppervlaktewater) per dag.

BIJLAGE II SAMENVATTING FASE 1: AANVULLENDE OPMERKINGEN

Er zijn een drietal opmerkingen te maken, v.w.b. het voorafgaande onderzoek in fase 1:

- een deel van de set was niet bruikbaar, omdat bij deze specifieke combinatie droogval optreedt;
- zomergemiddelde concentratie en maximale concentratie fytoplankton zijn niet goed weggeschreven;
- er zijn numerieke verschillen tussen pc's, waardoor verschillen in resultaten mogelijk zijn.

droogval

Eén combinatie geeft ongeldige waarden voor alle uitvoervariabelen en wordt beschouwd als een irreële variant. Het gaat om de volgende combinatie:

- verblijftijd = 300 dagen;
- verhouding verblijftijd zomer ten opzichte van winter = 3;
- diepte = 1,2 meter.

Dit wordt veroorzaakt doordat het ingaande debiet (Q_{in}) in deze variant in een deel van de zomer kleiner is dan de verdamping (Q_{ev}), waardoor netto-Q negatief wordt. Als gevolg hiervan neemt de waterdiepte in de loop van de tijd af, waardoor het watersysteem droog valt. Als uitvoerwaarde wordt NaN ('not a number') als gedefinieerde waarde voor gestrande runs verkregen. Deze variant is verder buiten beschouwing gelaten.

zomergemiddelde en maximale concentratie fytoplankton

Daarnaast is bij een deel van de simulaties door een invoerfout de zomergemiddelde en maximale hoeveelheid fytoplankton (odphytw) niet weggeschreven. Alle overige uitvoervariabelen zijn wel bruikbaar.

numerieke verschillen

Uit de eerste fase is naar voren gekomen dat door numerieke verschillen tussen PC's kleine verschillen in resultaten mogelijk zijn. Om preciezer te zijn: er zijn twee mogelijke resultaten. Rond het omslagpunt zijn de verschillen groot. In het ene geval is het systeem net wel omgeslagen, terwijl in het andere geval het systeem nog niet is omgeslagen. Dit heeft echter een geringe invloed op de voorspelling van de kritische P-concentratie, ten opzichte van de totale onzekerheidsmarge van PCLake, welke is geschat op 0,7 tot 1,4 maal de nominale waarde (J. Janse, persoonlijk commentaar).

**BIJLAGE IIIa METHODE: AFLEIDEN VAN DE KRITISCHE P-CONCENTRATIE, BESCHRIJVING
METHODIEK**

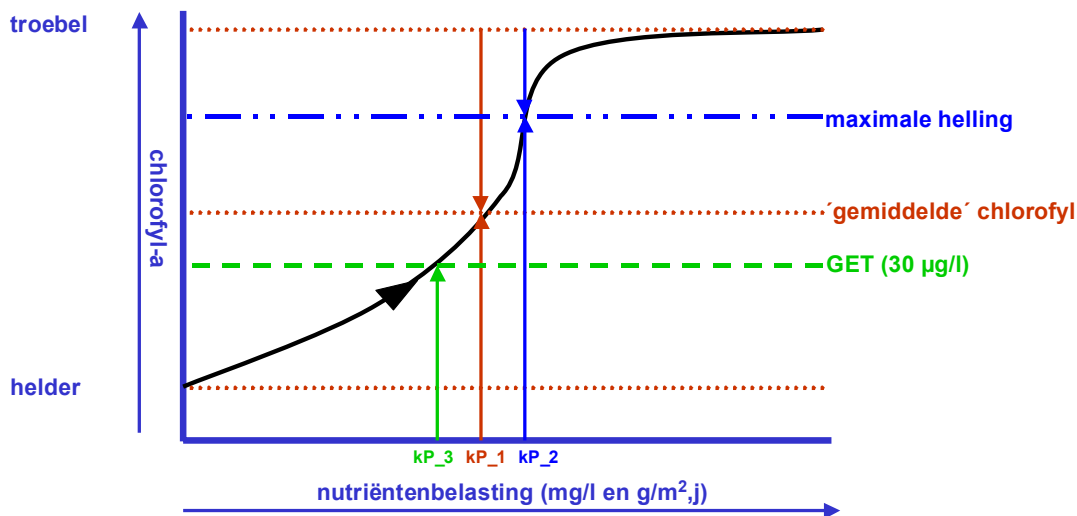
De kritische P-concentratie (kP) is afgeleid op basis van de waterplantenbedekking, waarbij de gehanteerde grenswaarde 5 % is. Voor dat hiervoor is gekozen is de kP op alternatieve manieren afgeleid. Hierdoor is inzicht ontstaan over de relatie van de gekozen kP met de resultaten. De kP kan op verschillende manieren worden afgeleid. Hierbij kunnen drie vragen afwegingen worden meegenomen:

- welke onafhankelijk variabelen bepalen de omslag: doorzicht, chlorofyl-a of plantenbedekking?;
- wordt de kritische P-concentratie bepaald aan de hand van een vaste waarde of wordt de kritische P-concentratie bepaald aan de hand van een (substantiële) verandering voor deze onafhankelijke variabele?;
- wordt de kritische P-concentratie bepaald onafhankelijk van het feit of zich wel of geen 'omslag' in het ecologisch functioneren van het watersysteem heeft voorgedaan?

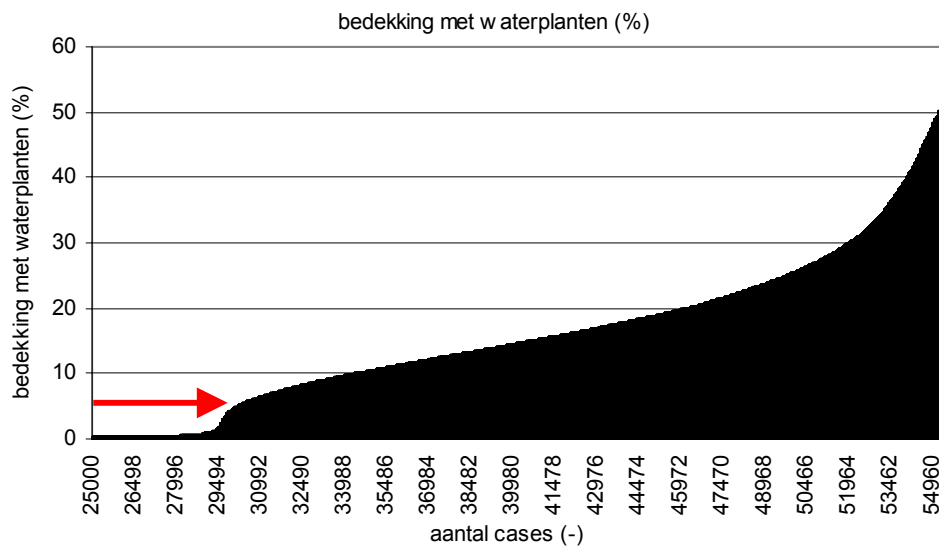
Voor vier van deze methoden (grafisch weergegeven in afbeelding III.1.) zijn statistische analyses uitgevoerd, te weten:

1. kP_1: de methode die gebruikt is in fase 1 (simulaties, zie hoofdstuk 2), het **gemiddelde** van de maximale en minimale **concentratie chlorofyl-a** volgens de formule: $\text{chlorofyl-}a_{\text{midden}} = (\text{chlorofyl-}a_{\text{max}} + \text{chlorofyl-}a_{\text{min}})/2$:
 - de berekende concentratie chlorofyl-a wordt gekozen die het dichtst ligt bij de concentratie chlorofyl- a_{midden} , waarbij de berekende concentratie chlorofyl-a altijd lager ligt dan de concentratie chlorofyl- a_{midden} ;
 - het met de berekende concentratie chlorofyl-a corresponderende P-concentratie wordt als kritisch genomen;
2. kP_2: het **buigpunt** van de **concentratie chlorofyl-a**. Dit is de maximale toename van chlorofyl-a ten opzichte van de toename in P-concentratie (ook wel buigpunt genoemd), oftewel $d(\text{chlorofyl}/P)$: de maximale helling in een grafiek, waarin het chlorofylgehalte is uitgezet tegen de concentratie P;
3. kP_3: een omslag op basis van de **GET-waarde** voor **chlorofyl**, zoals deze wordt vastgesteld in het kader van de KRW. Voorlopig ligt deze waarde op 30 $\mu\text{g/l}$;
4. kP_4: de methode die uiteindelijk gekozen is, een omslag op basis van de **GET-waarde** voor de **bedekking met waterplanten** (%): de bedekking met waterplanten is onderdeel van de KRW-indicator macrofyten. De bedekking met waterplanten is naast het chlorofylgehalte onder andere afhankelijk van de dieptevariatie. Het chlorofylgehalte bij de kritische P-concentratie is dan ook variabel. Omdat PCLake werkt met een fictief bakje zonder dieptevariatie is er of plantenbedekking (de eis is dat licht tot op de bodem reikt) of geen plantenbedekking. Aan de hand van een frequentieverdeling (zie afbeelding III.2.) is vastgesteld dat de kritische bedekkingsgrens op 5 % ligt (grens ontoereikend-matig submerse vegetatie KRW). De GET-waarde is 25 %. Over het algemeen maakt het niet uit of de bedekking uitgedrukt wordt in een percentage of in drooggewicht ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).

Afbeelding III.1. Grafische weergave afleiding kP 1 t/m 3, kP_4 vergelijkbaar met kP_3



Afbeelding III.2. Frequentieverdeling waterplantenbedekking voor deeldataset welke representatief wordt geacht voor gehele dataset: nr 1-24999 zijn weggelaten (bedekkingspercentage 0-0,21 %): rond een bedekkingspercentage van 5 % is een scherpe overgang te zien, het verschil tussen wel of geen plantengroei



De methode waarmee de kritische P-concentratie wordt afgeleid, bepaalt of en in welke gevallen er een kritische P-concentratie kan worden berekend en of er in alle gevallen daadwerkelijk sprake is van een omslag. In tabel III.1. is per kP te zien in hoeveel gevallen sprake is van een kritische P-concentratie (wat duidt op een kwantitatief op basis van de methode afgeleide omslag) en of er daadwerkelijk sprake is van een omslag (zie kader).

Tabel III.1. aantal kP's en aantal omslagen ten opzichte van aantal kP's (absoluut en %), n=22032

kP	aantal kP's	wel omslag	geen omslag
kP_1	22032	16913 (76,8 %)	5119
kP_2	22032	16913 (76,8 %)	5119
kP_3	21631	16913 (78,2 %)	4718
kP_4	18848	16612 (88,1 %)	2236

Gekozen is voor een kritische P-concentratie afgeleid op basis van de bedekking met waterplanten (%). De bedekking met waterplanten is onderdeel van de KRW-indicator macrofyten. Daarnaast zijn de waterplanten van doorslaggevend betekenis voor het ecologisch functioneren van het watersysteem. Ten slotte geeft deze methode een betere relatie dan de vergelijkbare methode op basis van chlorofyl (kP3, zie bijlage IIIb). Het blijkt dat bij het passeren van de bedekkingsgrens van 5 % van de waterplanten in 86 % van de gevallen daadwerkelijk sprake is van een omslag. In de andere gevallen is het watersysteem of altijd helder of altijd troebel binnen de variatie in P-concentratie van het inkomende water.

Bepalen van omslag

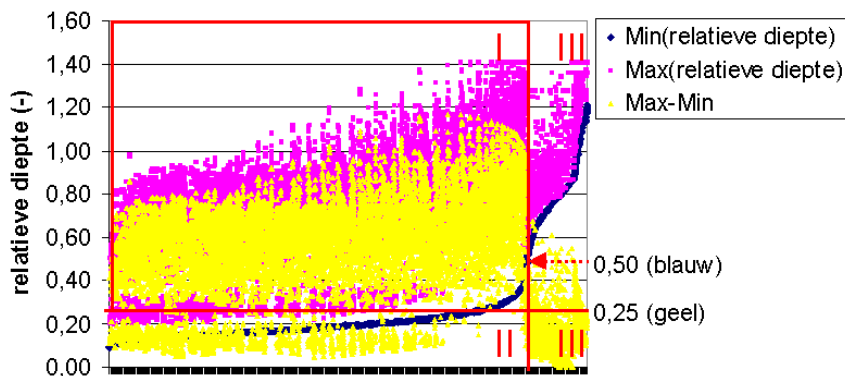
Om te bepalen of een watersysteem wel of niet is omgeslagen is gebruik gemaakt van een te kwantificeren redenatie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een 'relatieve zichtdiepte'. Dit is de zichtdiepte gedeeld door de waterdiepte. De relatieve zichtdiepte zegt iets over het wel of niet mogelijk zijn van plantengroei. Bij een relatieve zichtdiepte groter dan een half (is licht tot op de bodem) mag worden aangenomen dat er sprake is van plantengroei. De redenatie is:

als het minimum van de relatieve zichtdiepte in een reeks (P-concentratie van 0,03 t/m 0,5 mg/l) kleiner dan een half is en het verschil tussen de minimale en maximale relatieve zichtdiepte in een reeks groter dan een kwart is, is er sprake van een omslag
Voor de meeste gevallen zal deze vergelijking voldoen. In afbeelding 3. is dit grafisch weergegeven.

Er zijn grofweg drie gebieden in de grafiek te onderscheiden, gelet op de gele punten:

- I (omslag):** Dit is het gebied, waarin sprake is van een omslag. De minimale diepte (blauwe lijn) ligt onder een 0,5. Dit betekent dat in dit geval sprake is van een troebele situatie (er reikt onvoldoende licht tot op de bodem). De gele punten liggen boven de rode lijn (0,25). Dit betekent dat de maximale relatieve diepte voldoende is voor plantengroei (uitgaande van minimale diepte + 0,25 > 0,5). Er is dus sprake van een omslag.;
- II (troebel):** In dit gebied is sprake van een troebele situatie, ongeacht de P-concentratie. De blauwe lijn ligt onder een 0,5, terwijl de gele punten onder een 0,25 liggen. Ook de maximale relatieve zichtdiepte is onvoldoende voor plantengroei. (uitgaande van minimale diepte + 0,25 > 0,5);
- III (helder):** In dit gebied is sprake van een heldere situatie, ongeacht de P-concentratie. De minimale relatieve diepte is in alle gevallen groter dan de minimale relatieve diepte vereist voor plantengroei.

Afbeelding 3. Minimale en maximale relatieve zichtdiepte (zichtdiepte gedeeld door de waterdiepte), waarbij per reeks het maximum, het minimum en het verschil daartussen is afgebeeld. De reeks is gesorteerd op minimum zichtdiepte (de blauwe lijn): een relatieve zichtdiepte groter dan 0,5 duidt op plantengroei, wanneer de minimale relatieve zichtdiepte kleiner is dan 0,5 en de maximale relatieve zichtdiepte groter dan 0,5 is sprake van een omslag. In gebied I is sprake van een omslag.



Bij de analyses is voor kP_1 en kP_2 alleen gerekend met fictieve watersystemen die daadwerkelijk zijn omgeslagen, terwijl voor kP_3 en kP_4 (volgend uit de KRW-gerelateerde normen) gerekend is met alle fictieve watersystemen. Voor de KRW is het in principe niet van belang of een watersysteem wel of niet is omgeslagen. Het gaat erom dat voldaan wordt aan een norm (misschien is dit niet de intentie, maar op dit moment zit dit wel in de beoordelingsmethodiek).

BIJLAGE IIIb METHODE: AFLEIDEN VAN DE KRITISCHE P-CONCENTRATIE, RESULTATEN

Er zijn boxplots gemaakt (SPSS 13.0),

In afbeelding III.4. t/m III.7. is voor de verschillende afleidingsmethoden (zie bijlage IIIa) de relatie tussen de kritische P-concentratie en de verschillende onafhankelijke invoervariabelen weergegeven in de vorm van boxplots. Er is onderscheid gemaakt in een heldere en troebele begintoestand.

De volgende afkortingen zijn gebruikt:

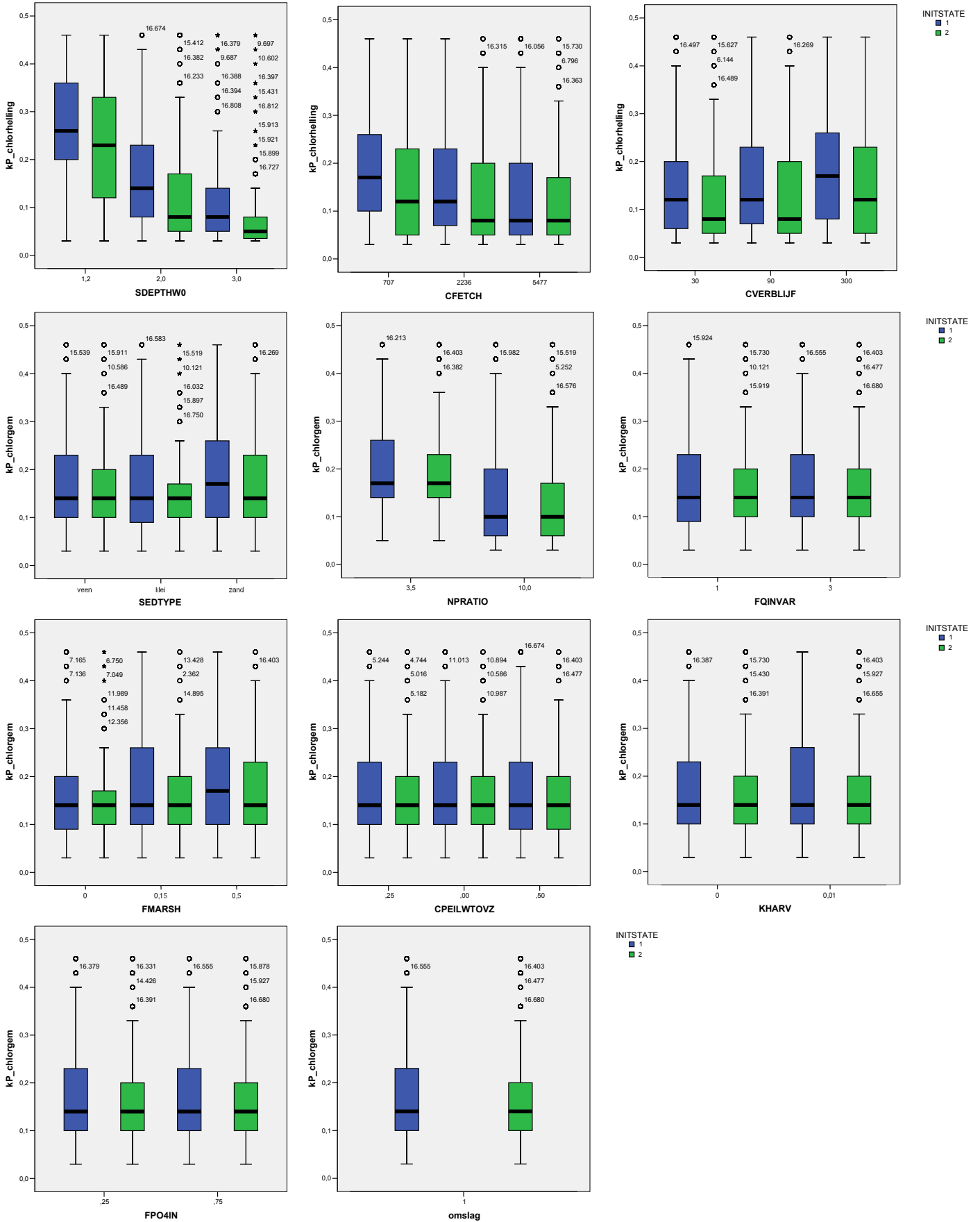
CFETCH	strijklengte (m): indien onbekend wortel van oppervlak
CPEILWTOVZ	peil in de winter t.o.v. de zomer (m)
CVERBLIJF	gemiddelde verblijftijd (d)
FMARSH	aandeel moeras (in fractie t.o.v. gehele oppervlak) (-)
FPO4IN	fractie PO4 t.o.v. totaal P (-)
FQINVAR	factor voor variatie in verblijftijd (zomer t.o.v. winter) (-)
INITSTATE	initiele toestand (1=helder, 2= troebel) (-)
KHARV	visdruk (fractie weggevangen per dag) (-)
NPRATIO	verhouding tussen hoeveelheid N en P, eigenlijk altijd 10 (-)
SDEPTHW0	waterdiepte (m)
SEDTYPE	bodemtype (zand, klei of veen) (-)

Op basis van deze boxplots kunnen met name uitspraken worden gedaan over:

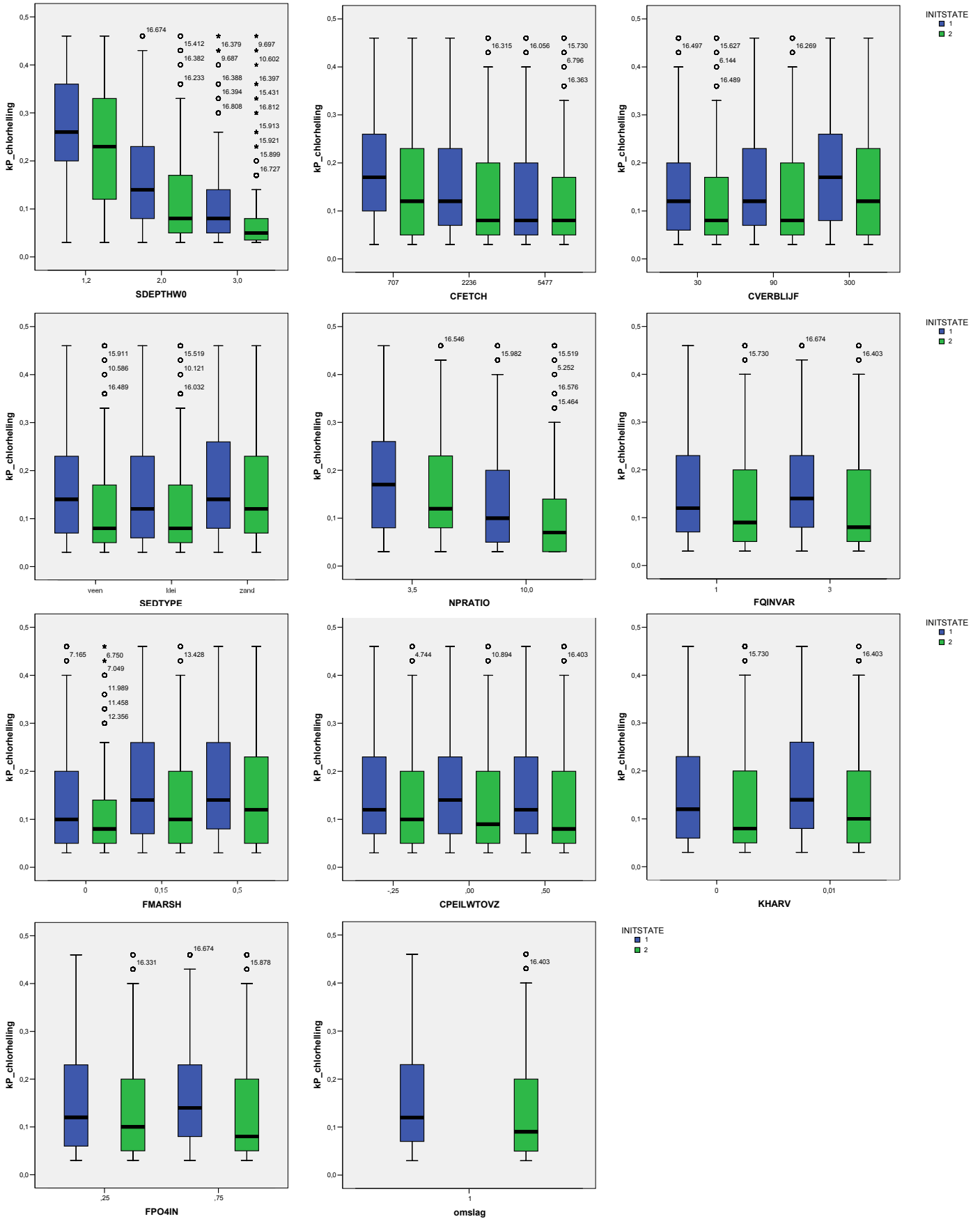
- invloed van de systeemkenmerken op de bepaling van de kritische P-concentratie;
- invloed van de systeemkenmerken op hysteresis.

De relaties voor de verschillende afleidingsmethoden zijn vergelijkbaar, hoewel de spreiding verschillend is. De spreiding is het grootst voor kP3, ofwel de afleiding op basis van het chlorofylgehalte (grenswaarde 30 µg/l). De relaties voor het percentage plantenbedekking (grenswaarde 5%) lijken gezien de boxplots beter. De invoervariabelen met de grootste invloed op de kritische P-concentratie zijn diepte, strijklengte, verblijftijd en N/P-ratio. N/P-ratio is verder buiten beschouwing gelaten. Er is alleen onderzoek gedaan naar de kritische P-belasting (zie ook inleiding en bijlage 1). De invloed op hysteresis is vergelijkbaar.

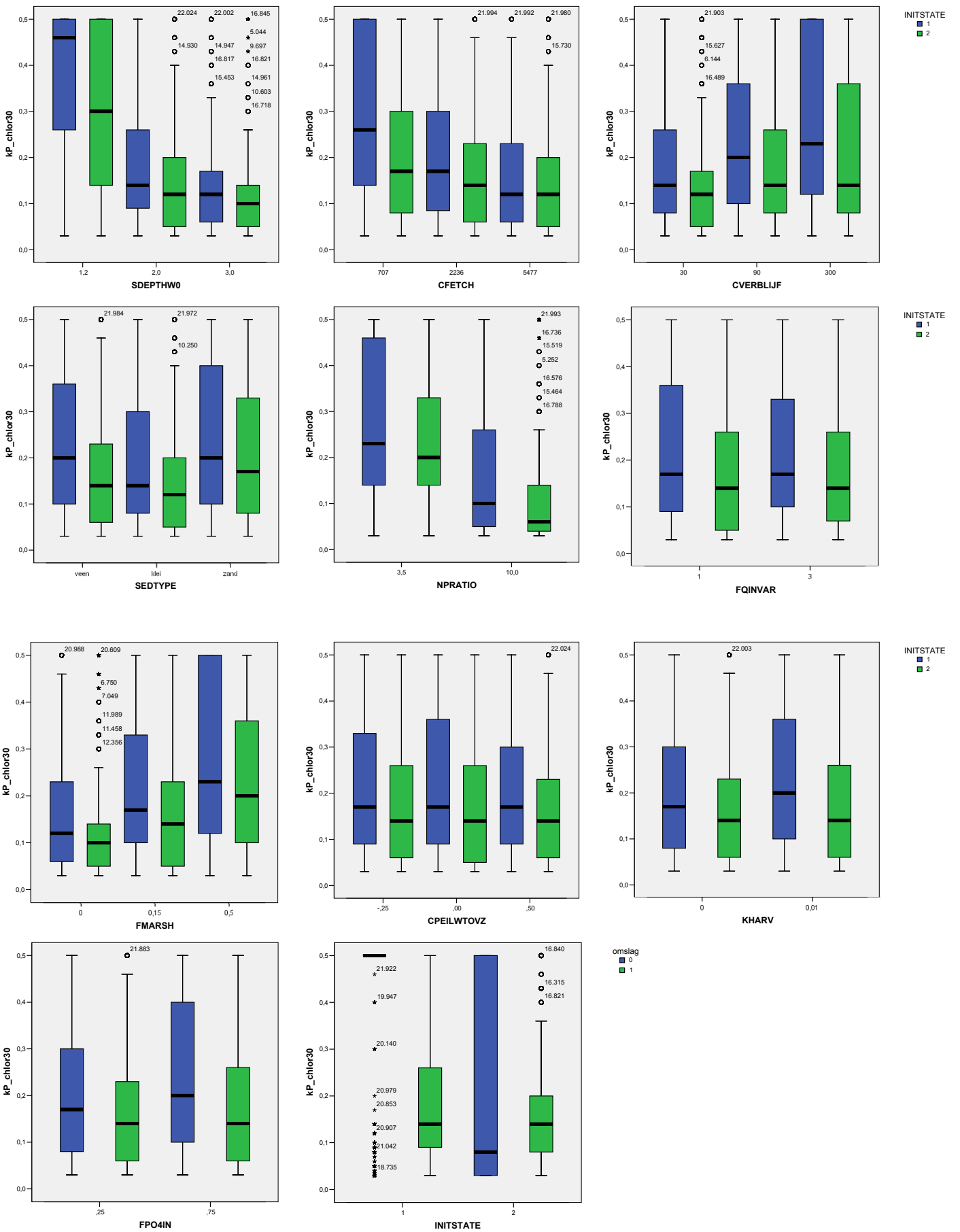
Afbeelding III.4. Resultaten kP_1 met omslag (n=16913): blauw=helder, groen=troebel



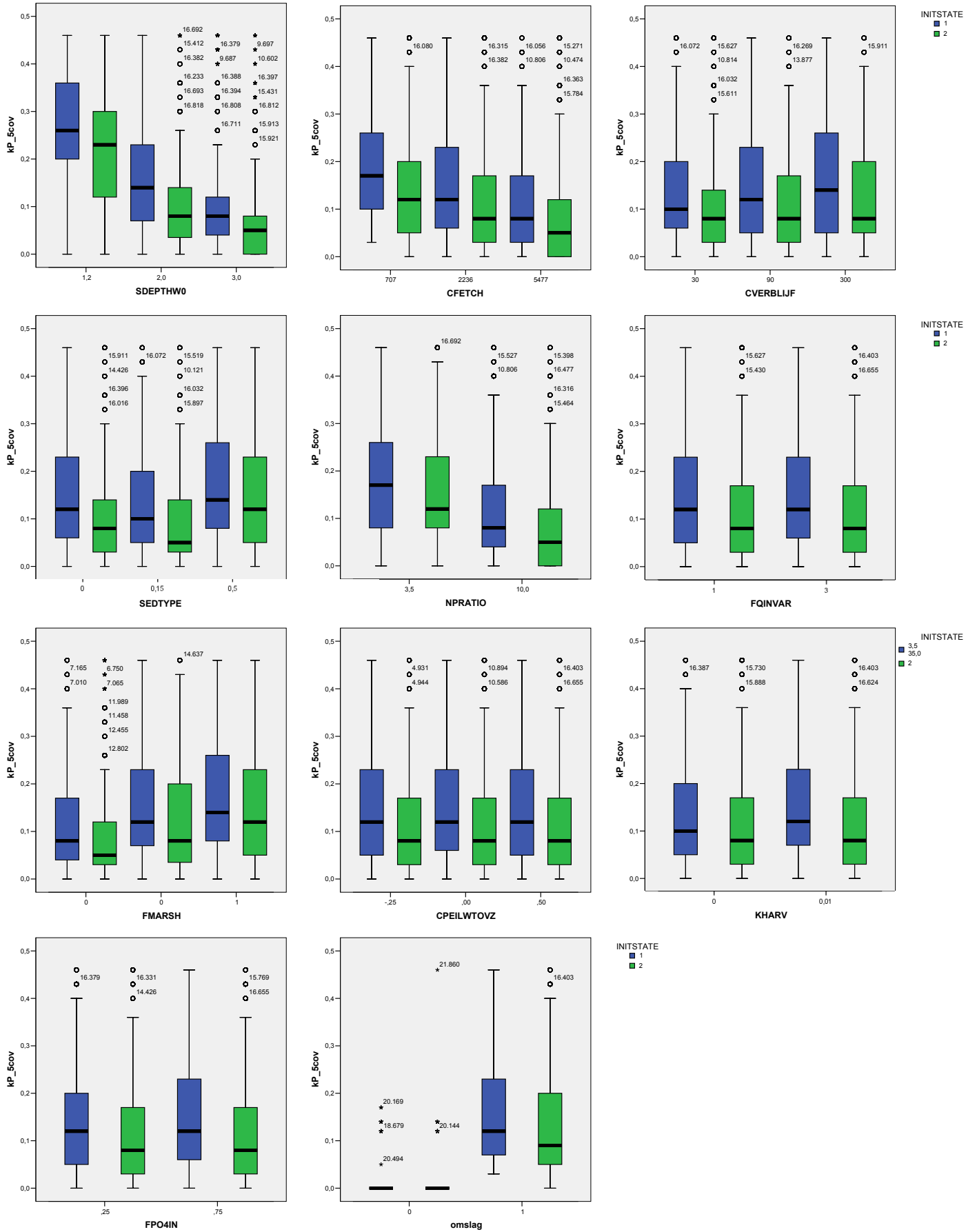
Abbeelding III.5. Resultaten kP_2 met omslag (n=16913): blauw=helder, groen=troebel



Afbeelding III.6. Resultaten kP_3 alle resultaten (n=21631): blauw=helder, groen=troebel



Afbeelding III.7. Resultaten kP_4 alle resultaten (n=18848): blauw=helder, groen=troebel

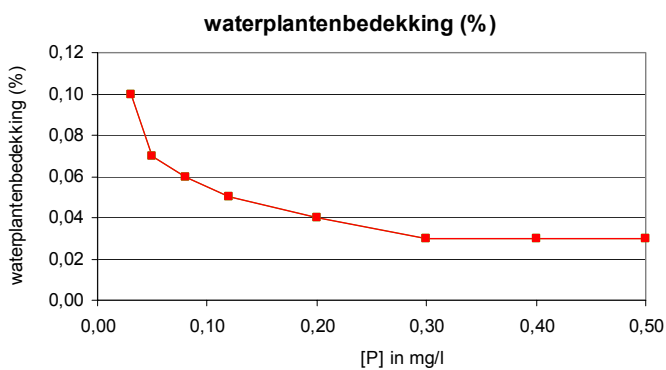


BIJLAGE IIIc METHODE: AANVULLEN INTERPOLATIETABEL, VERSCHILLENDE TYPE RELATIES TUSSEN P-CONCENTRATIE EN PLANTENBEDEKKING

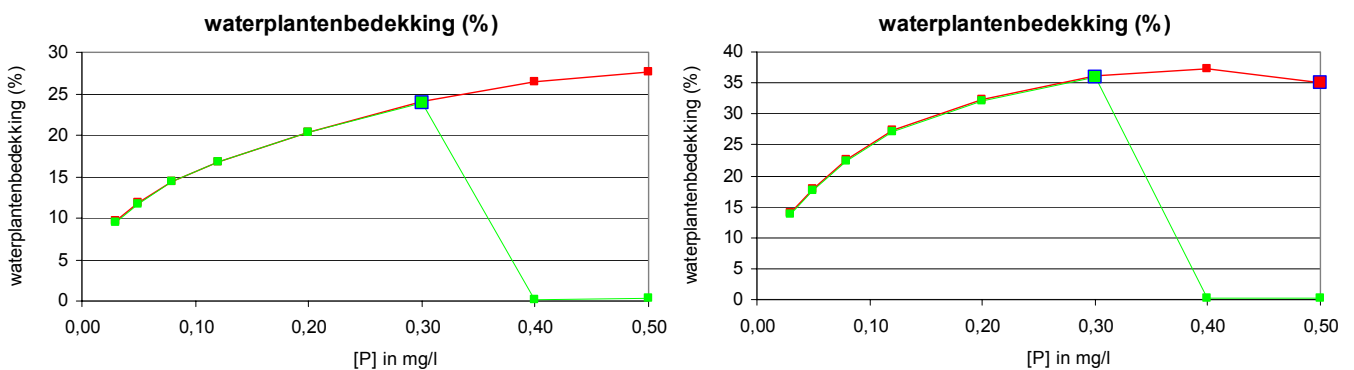
Door de gaten in de tabel met kritische P-belastingen (zie onder andere paragraaf 3.2.) kan niet altijd een kritische P-belasting worden afgeleid. Daarom is de dataset (tabel) aangepast. Daarbij zijn de gaten gevuld door een kritische P-belasting toe te wijzen aan watersystemen, waarvoor geen P-belasting kon worden berekend. De volgende aanpassingen zijn gedaan:

1. waterplantenbedekking komt nooit boven de 5 %:
 - kritische P-concentratie = 0,015 mg/l (geen omslag, afbeelding III.8.).
2. waterplantenbedekking zit in stijgende lijn boven de 5 %:
 - kritische P-concentratie = 0,6 mg/l (helder, nog geen omslag naar troebel, afbeelding III.9. links).
3. waterplantenbedekking boven de 5 % en neemt af maar komt nog niet onder de 5 %:
 - kritische P-concentratie = 0,5 mg/l (helder, maar in omslag naar troebel, afbeelding III.9. rechts).

Afbeelding III.8. Rode en groene lijn: waterplantenbedekking nooit boven de 5 % (kP1)



Afbeelding III.9. Rode lijn: waterplantenbedekking in stijgende lijn boven de 5 % (kP2, links) en idem maar met afname (kP3, rechts)



In afbeelding III.8. en III.9. zijn de relaties te zien voor de waterplantenbedekking ten opzichte van de P-concentratie in het inkomende water voor die watersystemen, waarvoor geen kritische P-concentratie (en dus indirect geen kritische P-belasting) is af te leiden. De bijbehorende waarden voor de verschillende systeemkenmerken staan vermeld in tabel III.2.

Tabel III.2. Waarden voor kenmerken behorende bij bovenstaande grafieken (kP1 t/m kP3)

relatie	kP1 (0,015 mg/l)		kP2 (0,60 mg/l)		kP3 (0,50 mg/l)	
	groen	rood	groen	rood	groen	rood
parameter	helder	troebel	helder	troebel	helder	troebel
initiële toestand (-)						
peilverschil winter ten opzichte van zomer (m)	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25
aandeel moeraszone (-)	0	0	0	0	0	0
verhouding verblijftijd in zomer ten opzichte van winterhalfjaar (-)	0	0	0	0	0	0
fractie opgelost materiaal, het overig deel is particulier (-)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
gemiddelde verblijftijd (d)	30	30	90	90	30	30
N/P ratio in inkomend water (-)	10	10	3,5	3,5	3,5	3,5
visserijdruk (d^{-1})	0	0	0	0	0,01	0,01
bodemtype (-)	1	1	1	1	6	6
gemiddelde waterdiepte in de zomer (m)	3	3	1,2	1,2	1,2	1,2
strijklengte (m)	5477	5477	707	707	707	707

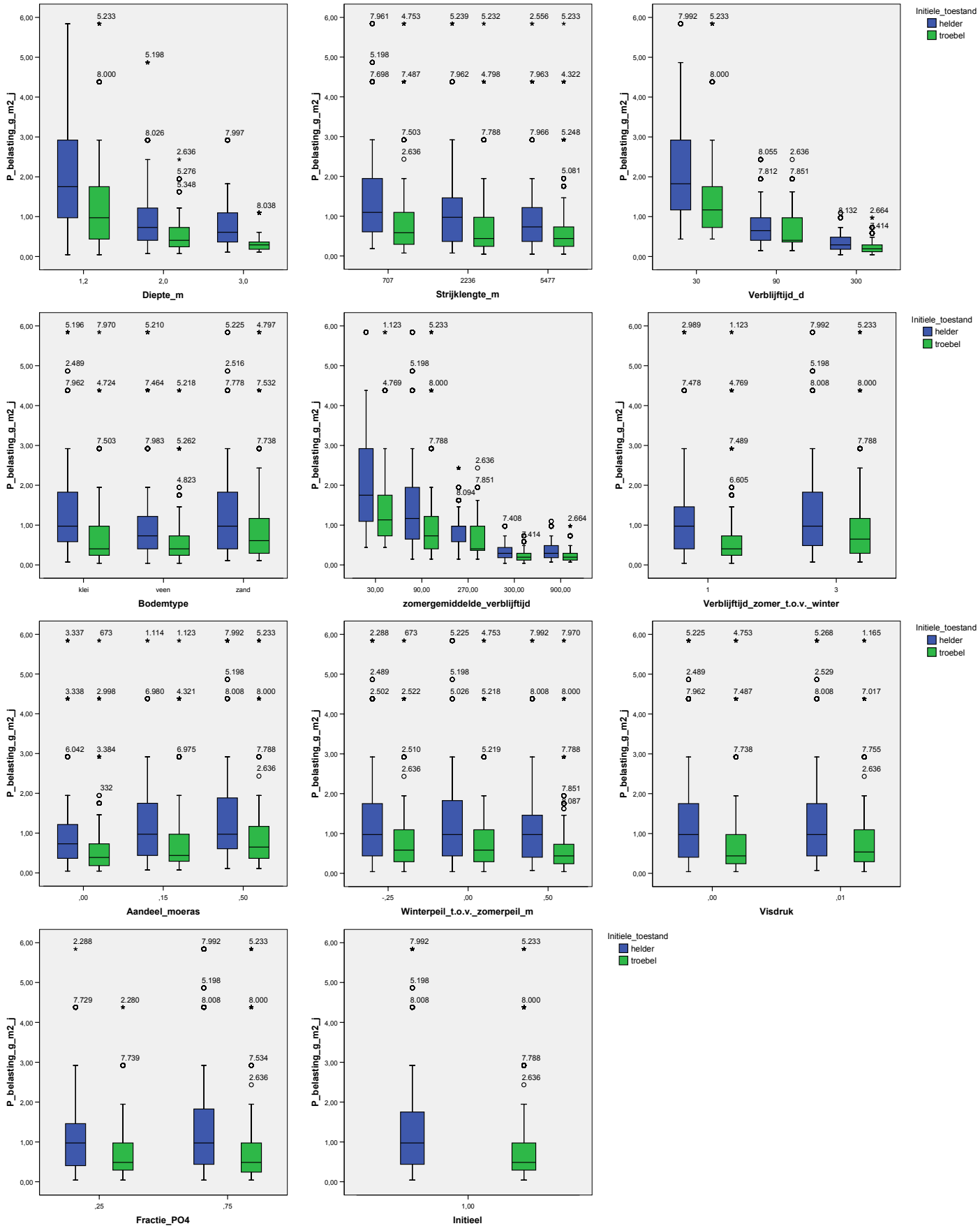
BIJLAGE III d METHODE: SAMENSTELLING VALIDATIESET

In onderstaande tabel is te zien welke variaties in waarden zijn toegepast voor de validatieset. De samenstelling van de validatieset is zodanig dat de karakteristieken representatief zijn voor de meest voorkomende Nederlandse watersystemen. Er is bijvoorbeeld gekozen voor de wat kleinere (validatieset 100 - 250 ha, simulatieset 50 - 3000 ha) en ondiepere watersystemen (validatieset 1,2 - 3 m, simulatieset 1,4 – 1,6 m). Daarnaast is er op gelet dat de waarden in de validatieset niet overeenkomen met de waarden die gebruikt zijn in de simulatieset.

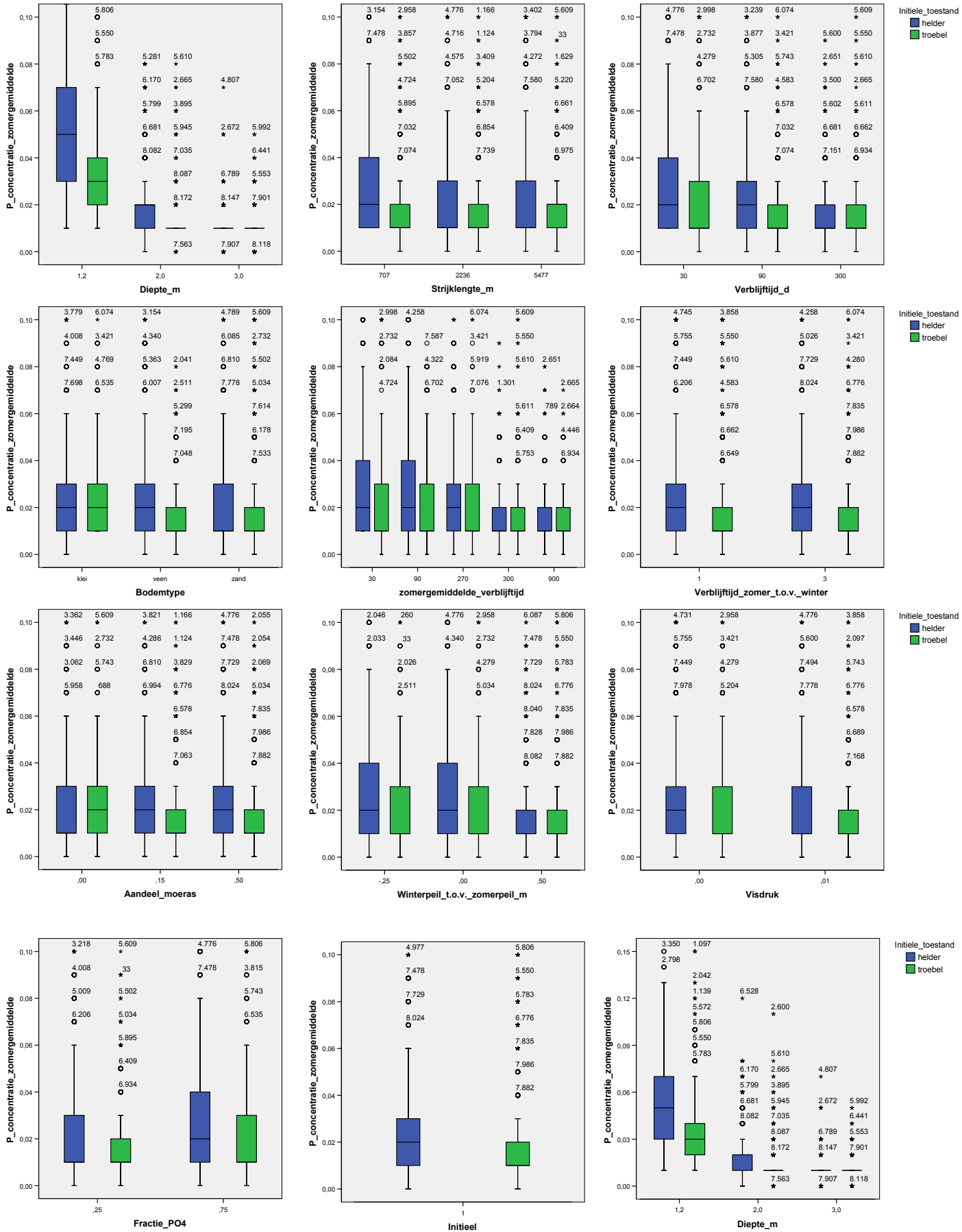
Tabel III.3. Waarden voor variabelen validatieset (n=12288)

waterkwaliteit	totaal-P concentratie in het inkomend water (mg/l) (n=8): 8 waarden variërend van 0,03 tot 0,5 mg/l (als basisset)
	N/P ratio in inkomend water (-) (n=1): 10 (P-gelimiteerd);
	fractie opgelost materiaal, het overig deel is particulier (-) (n=2): gelijk voor zowel P als N: 0,4 en 0,6
systeemkenmerken	strijklengte (m) (n=2): de strijklengte wordt bepaald a.h.v. de oppervlakte (strijklengte = wortel (oppervlak)) 100 ha --> 1000; 250 ha --> 1581;
	gemiddelde waterdiepte in de zomer (m) (n=2): 1,4 (ondiep-gemiddeld), 1,6 (ondiep-gemiddeld);
	gemiddelde verblijftijd (d) (n=2): 60 (kort-gemiddeld), 180 (gemiddeld-lang);
	bodemtype (-) (n=3): veen (1), klei (5), zand (6);
beheer	peilverschil winter t.o.v. zomer (m) (n=2): +0,25 (natuurlijk) en -0,1 (tegennatuurlijk);
	verhouding verblijftijd in zomer t.o.v. winterhalfjaar (-) (n=2): 1,2 (verblijftijd in zomer 1,2x verblijftijd in winter) en 1,7 (idem maar 1,7x);
	aandeel moeraszone (oppervlakte t.o.v. meeroppervlak) (-) (n=2): 0,05 (5% moeras naast oppervlak) en 0,1 (10% moeras naast oppervlak);
	visserijdruk (d-1) (n=2): 0,0025 (per dag wordt 0,25% vis weggevangen) en 0,005 (idem maar 0,5%);
initiële toestand	initiële toestand (-) (n=2): heldere (1) of troebele (2) begintoestand.

BIJLAGE IVa RESULTATEN: BOXPLOTS P-BELASTING (AFBEELDING IV.10.)



**BIJLAGE IVb RESULTATEN: BOXPLOTS ZOMER GEMIDDELDE P-CONCENTRATIE IN MEER
(AFBEELDING IV.11.)**



BIJLAGE IVc RESULTATEN: MULTIPELE REGRESSIE ANALYSE

In onderstaande tabellen zijn respectievelijk de totale verklaarde variantie (tabel III.4.) te zien van de multi-pele lineaire regressie, welke is vergeleken met de resultaten van de Janse (2005) als de specifieke verklaarde variantie per onafhankelijke variabele (tabel III.5.). Janse (2005) heeft een multi-pele lineaire regressie uitgevoerd met en zonder interactie. De regressie zonder interactie is eenvoudiger, elk systeemkenmerk wordt afzonderlijk meegenomen in de regressie. Bij de regressie met interactie worden aanvullend factoren tussen kenmerken meegenomen.

Tabel III.4. Samenvatting multi-pele regressie analyse: verklaring variantie binnen dataset met simulatieresultaten

	regressieformule	Janse (2005) zonder interactie	Janse (2005) met interactie
R ² helder	0,93	0,72	0,78
R ² troebel	0,89	0,61	0,71

Tabel III.5. Coëfficiënten multi-pele lineaire regressieformule met R², onafhankelijke variabele In_kritische P-belasting in g·m⁻²·j⁻¹ initieel helder

initieel helder	R ²	Unstand. Coefficients		Stand. Coefficients		t	Sig.
		B	Std. Error	Beta			
		(Constant)		-0,307	0,011		
inv_verblijftijd	0,75	21,471	0,176	0,669		121,91	0,00
inv_diepte	0,81	0,954	0,012	0,443		77,56	0,00
Strijklengte_m	0,85	-7,47E-05	0,000	-0,348		-62,84	0,00
Aandeel_moeras	0,89	0,539	0,011	0,272		49,57	0,00
veen	0,90	-0,174	0,006	-0,196		-31,55	0,00
Fractie_PO4	0,92	0,299	0,009	0,180		33,37	0,00
Verblijftijd_zomer_ten opzichte van_winter	0,93	0,046	0,002	0,112		20,81	0,00
Winterpeil_ten opzichte van_zomerpeil_m	0,93	-0,110	0,007	-0,083		-15,46	0,00
Visdruk	0,93	6,618	0,447	0,080		14,80	0,00
klei	0,93	-0,014	0,005	-0,016		-2,68	0,01

Tabel III.6. Coëfficiënten multi-pele lineaire regressieformule met R², onafhankelijke variabele In_kritische P-belasting in g·m⁻²·j⁻¹ initieel troebel

initieel troebel	R ²	Unstand. Coefficients		Stand. Coefficients		t	Sig.
		B	Std. Error	Beta			
		(Constant)		-0,331	0,013		
inv_verblijftijd	0,71	15,786	0,225	0,549		70,05	0,00
inv_diepte	0,78	0,943	0,015	0,522		61,89	0,00
Aandeel_moeras	0,81	0,505	0,013	0,295		38,36	0,00
Strijklengte_m	0,83	-4,75E-05	0,000	-0,253		-32,80	0,00
veen	0,85	-0,238	0,007	-0,298		-34,90	0,00
klei	0,87	-0,176	0,006	-0,229		-27,30	0,00
Verblijftijd_zomer_ten opzichte van_winter	0,88	0,048	0,003	0,134		17,83	0,00
Winterpeil_ten opzichte van_zomerpeil_m	0,89	-0,116	0,009	-0,101		-13,61	0,00
Fractie_PO4	0,89	0,118	0,011	0,082		11,08	0,00
Visdruk	0,89	3,176	0,533	0,044		5,96	0,00

BIJLAGE IVd RESULTATEN: PEILVARIATIE TUSSEN ZOMER EN WINTER

Het resultaat van dit onderzoek is onder andere een regressieformule. Opmerkelijk is dat er een negatief verband ($-0,11$ en $-0,12 * \text{winterpeil_ten opzichte van_zomerpeil}$ in de formule) wordt verondersteld tussen 'winterpeil ten opzichte van zomerpeil' en de (ln van de) kritische P-belasting. Ofwel een hoger winterpeil ten opzichte van het zomerpeil zou leiden tot een lagere kritische P-belasting. Verwacht wordt juist dat een hoger winterpeil (dat wil zeggen een lager zomerpeil) leidt tot meer doorzicht in de zomer, waardoor waterplanten een betere positie krijgen in de concurrentie om voedingsstoffen met algen. Waterplanten kunnen zich bij een lager zomerpeil dus langer handhaven bij een toenemende P-belasting. Hierdoor gaat de kritische P-belasting juist omhoog.

Waarschijnlijk heeft dit te maken met de methode. Het zomerpeil is gelijk gesteld met het gemiddelde waterpeil. Een hoger winterpeil ten opzichte van het zomerpeil betekent dus niet dat het zomerpeil omlaag gaat, maar alleen dat het winterpeil omhoog gaat. In het groeiseizoen is er dus geen verschil in waterpeil en treden de bovenbeschreven processen niet op.

BIJLAGE IVe RESULTATEN: M-FILES

De voor de validatie gebruikte M-files (Matlab) zijn:

- intmod.m: aanroepen interpolatietabel, uitvoer .mat-bestanden PintH, PintT, PintHN en PintTN;
- linregmod_J.m: aanroepen multiële lineaire regressie Janse (2005), uitvoer .mat-bestanden Plr1H en Plr1T;
- linregmod_N2.m; aanroepen multiële lineaire regressie deze studie, uitvoer .mat-bestanden Plr2H en Plr2T;
- vgl_pcl_model.m: vergelijken van verschillende modellen met validatieset met subfiles:
 - MaakBoxplotsSort.m, script voor grafische weergave;
 - nieuwecombinaties.m, dit is de validatieset.

Voor het berekenen van de kritische P-belasting van een watersysteem zijn de volgende bestanden nodig:

- systeemkenmerken.xls: in het eerste veld moeten de systeemkenmerken worden ingevuld. Wanneer niks wordt ingevuld zal een defaultwaarde worden gebruikt. Met name de invoervariabelen diepte, verblijftijd, strijklengte (op basis van oppervlakte), bodemtype en aandeel moeras zijn van belang voor een goede inschatting van de kritische P-belasting;
- inttabel.m: hierin staat het script, waarmee de kritische P-belasting voor een watersysteem kan worden berekend. Bovendien kan de jaar- en zomergemiddelde P-concentratie worden berekend behorend bij de kritische P-belasting;
- map2.xls: hierin staan de resultaten van de modelsimulaties: op basis van hiervan wordt de kritische P-belasting berekend.