

NUMERISCHE SIMULATION DER WASSERQUALITÄT: EIN EINFACHES NÄHRSTOFFMODELL FÜR DEN ATTERSEE

Numerical simulation of water quality: a simple nutrient-model for Attersee

Kurt FEDRA

Abstract:

Based on a simple simulation model of lake phosphorus dynamics, an analysis was made of the relationship between phosphorus loading and trophic state of Attersee. Taking into account the uncertainty of the available data explicitly in the numerical analysis and simulation, the long-term response of the lake to relative changes in its nutrient loading was simulated. The influence of changed phosphorus loading and time on measures of water quality such as total primary production, algae peak biomass, or ortho-phosphate maximum as well as on the phosphorus budget of the lake, were estimated in terms of probability distributions.

Einleitung:

Im Rahmen einer am Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) in Laxenburg durchgeführten Studie über die Anwendung systemanalytischer Methoden

im Bereiche der Seenforschung werden auch die im Projekt Salzkammergutseen erfassten Gewässer, insbesondere im Einzugsgebiet der Ager, bearbeitet. Dabei bildet die Gewässergüte als Funktion der Nährstoffeinträge ein zentrales Thema, wobei die Nährstoffeinträge wieder als Konsequenz zahlreicher natürlicher wie anthropogener Prozesse im Einzugsgebiet verstanden werden müssen. Über ein quantitatives Verständnis der zweifelsohne komplizierten Zusammenhänge und kausalen Verknüpfungen, und über den Versuch, große Umweltbereiche in ihrer Gesamtheit und unter Einbezug sozio-ökonomischer Faktoren zu betrachten, sollen die Grundlagen für eine rationale und umweltbewußtere Nutzung, Planung und Verwaltung geschaffen werden.

Im dazu verwendeten Methodenkomplex der angewandten Systemanalyse nimmt die numerische Simulation eine zentrale Stellung ein. Sie soll ermöglichen, wesentliche Eigenschaften großer, ökologischer Systeme im "elektronischen Sandkastenspiel" nachzuvollziehen, und dabei helfen, die Grundzüge des Funktionierens unserer Umwelt und unserer Rolle in ihrem Funktionsgefüge besser verstehen zu lernen. Simulationsmodelle als formalisierte und explizit gemachte Gedankenmodelle können dabei sowohl als integrierender Rahmen zur Einordnung vorhandener Information dienen, zum Testen einzelner Hypothesen über Prozesse und kausale Verknüpfungen verwendet werden, und können schließlich unter Umständen zur Vorhersage benutzt werden.

Problemstellung:

Am Beispiel des Attersees soll versucht werden, den Zusammenhang zwischen Wasserqualität (beschrieben etwa durch die Zustandsgrößen Algenbiomasse-Maximum, Ortho-phosphat-Maximum, Jahressummenwert der Primärproduktion, beziehungsweise die Nährstoffbilanz) und Nährstoffzufuhr abzuschätzen.

Methodik:

Da die vorhandenen Meßdaten eine direkte Analyse im Sinne der obigen Fragestellung nicht erlauben, wurde versucht, unter Verwendung eines numerischen Simulationsmodelles die Beziehung zwischen Nährstoff-Zufuhr und Wasserqualität zu erfassen (FEDRA 1979 b).

Die verfügbaren Meßdaten können sowohl auf Grund ihrer hohen Streuung als auch wegen ihrer relativ geringen Dichte in Raum und Zeit sowie des (relativ, gemessen an statistischen Anforderungen) kurzen Untersuchungszeitraumes nicht direkt ausgewertet werden. Für eine Regressionsanalyse von Nährstoffzufuhr und Wasserqualität wäre zu fordern, daß die Meßdaten diese Größen für den See in seiner Gesamtheit ausreichend repräsentativ beschreiben, daß derartige Datengruppen (etwa Jahresmittelwerte) über einen ausreichend großen Bereich der unabhängigen Variablen (also der Nährstoffzufuhr) vorhanden sind, und daß schließlich eine

ausreichende Zahl solcher Beobachtungen vorliegt. Keine dieser Bedingungen ist erfüllt, was zweifelsfrei ein prinzipielles Problem der Untersuchung (und Analyse) großer, räumlich heterogener, dynamischer Systeme ist.

Die vorhandenen Meßdaten (vgl. Abb. 2a) können also nur zu einer groben Abschätzung des Systemzustandes im Untersuchungszeitraum verwendet werden. Dies gilt sowohl für die Nährstoffzufuhr als auch für die zur Beschreibung der Wassergüte herangezogenen Variablen. Sämtliche der im Sinne der Problemstellung zu verknüpfenden Größen können aber als mehr oder weniger enge Bereiche aus den Daten abgeschätzt werden. Dabei sollen möglichst alle willkürlichen Annahmen über die Daten bzw. das System vermieden werden. Solche Annahmen sind z.B. räumliche, zeitliche und funktionelle Homogenität, Linearität, Additivität, oder die Konstanz "stoichiometrischer" Beziehungen. Ausgehend von einer a priori gewählten Modellvorstellung der qualitativen Zusammenhänge, der Modellstruktur, werden (aus den durch die Daten gegebenen Bereichen) jene Kombinationen von Modell-Eingaben identifiziert, die zu einer Modell-Antwort ebenfalls in Übereinstimmung mit den aus den Beobachtungen abgeleiteten Bereichen führen. Das resultierende Ensemble von Modell-Antworten mit seiner Variabilität kann nun als Beschreibung des beobachteten Systemzustandes unter Berücksichtigung der zahlreichen Ungenauigkeiten sowie der Abhängigkeit von der gewählten Modell-Struktur verstanden

werden (Fedra 1979 a, in press a, Fedra et al. in press). Ebenso kann das resultierende Ensemble von Modell-Eingaben nun zur Vorhersage der Reaktion des Systems auf Änderungen in den Eingabe-Bedingungen verwendet werden (Fedra, in press b,c).

Das verwendete Simulationsmodell (Imboden und Gächter, 1979) beschreibt Algen (als partikulären Phosphor) und Nährstoffe (Ortho-Phosphat) für ein vollständig durchmischtes Epilimnion über einem durch Diffusionsgleichungen beschriebenen Hypolimnion (siehe Fedra, 1979 a,b).

Ergebnisse:

Eingabe-Werte und Modell-Antwort: der deskriptive Bereich

Ausgehend von einer Definition des "empirisch"-deskriptiven Bereiches des Systemverhaltens (basierend auf den Meßdaten der Jahre 1975 bis 1979, siehe Jahresbericht 1978) wurden aus mehreren Serien von je 10000 Simulationsläufen über jeweils ein Jahr die Bereiche, Mittelwerte, und paarweisen Korrelationen der für das Modell erforderlichen Eingabe-Werte sowie der für die Fragestellung wichtigen Modell-Antworten ermittelt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht für eine Gruppe von 284 "realistischen Simulationen aus 10000 Läufen. Abbildung 1 zeigt Projektionen der Häufigkeitsverteilung der Modell-Antworten aus diesen 10000 Läufen für jeweils zwei Antwort-Variablen. Der "empirische", zur Definition der

realistischen Simulationen verwendete Bereich ist in den Graphiken kenntlich gemacht. In Abbildung 2 ist ein "realistisches" Ensemble für partikulären Phosphor in seiner Jahresdynamik dargestellt. Beim Vergleich mit dem entsprechenden Datensatz der Abbildung 2a muß jedoch berücksichtigt werden, daß der gemessene partikuläre Phosphor nicht völlig dem im Modell simulierten entspricht und auch "Nicht-Algen" umfaßt.

Die in Tabelle 1 gezeigten Werte entsprechen mehr oder weniger den aus den direkten Meßdaten abgeleiteten Schätzwerten; lediglich bei der Gesamtphosphorbilanz, insbesondere in den Schätzwerten für Ausfuhren bzw. Sedimentation, zeigen sich auffällige Abweichungen: der mittlere Phosphor-Export liegt mit 2,5 t bei nur 56% des direkten Schätzwertes, und die Sedimentation erreicht mit über 19 t bei 115% der Gesamt-Einfuhren; entsprechend würde auch der mittlere Phosphorgehalt des Sees um nahezu 30% im durchschnittlichen Simulationsjahr abnehmen.

Diese Diskrepanz läßt sich zumindest teilweise damit erklären, daß im Modell nur "primärproduzierender" partikulärer Phosphor (Algen) und unmittelbar als Algen-Nährstoff zur Verfügung stehender gelöster Phosphor (Ortho-Phosphat) erfaßt sind. Die Meßergebnisse zeigen allerdings deutlich, daß nicht in diese beiden Kategorien fallende Phosphor-Fractionen einen nicht unbedeutenden Anteil am Gesamtphosphor im See sowie in Ein- und Ausfuhren darstellen.

Eine realistischere Phosphor-Bilanz ergibt sich durch eine weitere Einschränkung des zulässigen Bereiches für

die Modell-Antworten, wobei die Bedingung zyklischer Stabilität auf eine Maximal-Änderung des Gesamt-Phosphorgehaltes von 10% im Laufe eines Jahres festgesetzt wurde. Das resultierende Ensemble von 39 Simulationen erreicht nach wenigen Simulationsjahren ein Equilibrium in der Phosphorbilanz mit folgenden Größen:

Gesamt Einfuhren:	19,5 t	SD: 5,47
Netto-Einfuhren:	17,2 t	SD: 5,36
Gesamt Ausfuhren:	2,3 t	SD: 0,32
Sedimentation:	17,3 t	SD: 5,35
Phosphor-Gehalt (zyklisch stabil):	13,5 t	SD: 1,54

Vorhersage und Extrapolation

Die im Sinne der Definition zulässiger Modell-Antworten realistischen Modell-Eingaben wurden nun zur Extrapolation aus dem empirischen Bereich, also zur Vorhersage, verwendet. Dabei wurden die die Phosphor-Zufuhr beschreibenden Parameter systematisch absolut (von 0 bis 5,0 mg P pro m² und tag) bzw. relativ (25%, 50%, 75%, 150% und 200% der "empirischen" Werte) verändert, und die Systemreaktion jeweils für einen Zeitraum von zehn Jahren simuliert. Abbildung 3 zeigt die aus den Häufigkeitsverteilungen der Modell-Antworten ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilungen am Beispiel der Jahresprimärproduktion als Funktion der Nährstoffzufuhr. Auffallend ist dabei die rasche und mit der

Zeit verstärkte Verflachung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit zunehmender Extrapolation aus dem empirischen Bereich. Damit wird deutlich die Grenze der Vorhersagbarkeit aufgezeigt, die durch die explizite Berücksichtigung der Datenungenauigkeit ein wesentliches Element der Vorhersage bzw. Analyse wird.

Die in Abbildung 3 dargestellten Wahrscheinlichkeitsverteilungen beinhalten sowohl die Unschärfe aus den Meßdaten (bzw. den daraus abgeleiteten Bereichen) als auch die Variabilität des Systems selbst durch die Verwendung der Daten mehrerer Jahre. Sie können als Schätzwerte für mittlere Systemzustände und deren Abweichungen bei gegebener Nährstoffzufuhr verstanden werden. Ebenso kann man die Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Systemzustände, etwa die Über- oder Unterschreitung gegebener Grenzwerte, ablesen; dabei muß aber berücksichtigt werden, daß der größte Teil der in den Verteilungen zum Ausdruck kommenden Variabilität auf unzureichende Information zurückzuführen ist. Und schließlich können die Verteilungen als Maß der Präzision der Vorhersage, abhängig eben von Informationsmangel und der (stochastischen im Sinne der Modells) Variabilität des Systems, sowie dem Grad der Extrapolation und dem Zeitraum der Vorhersage.

Abbildung 4 zeigt zwei Beispiele der relativen Veränderung der Phosphor-Zufuhrwerte, nämlich eine Halbierung und eine Verdoppelung der gegenwärtig geschätzten Mengen. Auch hier gibt die relative Breite der Bereiche ein Maß

für die mögliche Genauigkeit der Vorhersage, wobei auffallend ist, daß hier innerhalb des Jahres Unterschiede festzustellen sind. Während etwa die Werte in der Durchmischungsphase relativ gut abschätzbar erscheinen, zeigt sich beim Frühjahrsmaximum des partikulären Phosphors eine deutliche Zunahme der Unschärfe. Auch hier findet wieder die Variabilität der ursprünglichen Daten ihren Niederschlag und erlaubt damit eine kritische Interpretation der Simulationsergebnisse.

Literatur:

- FEDRA, K. (1979 a): A Stochastic Approach to Model Uncertainty: a lake modelling example.-WP-79-63 International Institute for Applied Systemn Analysis, Laxenburg, Austria; 46pp.
- "- (1979 b): Angewandte Systemanalyse im Rahmen des Österreichischen Eutrophieprogrammes, Projekt Salzkammergutseen.- In: MÜLLER, G. (ed.): Arb. Lab. Weyregg 3/1979: 121-130.
- "- (in press a): Mathematical modelling - a management tool?.- Proc. of the 14th EMBS, Helgolander wissenschaftliche Meeresuntersuchungen.
- "- (in press b): Estimating model prediction accuracy: a stochastic approach to ecosystem modelling.- ISEM, 2nd State-of-the-Art Conferende in Ecological Modelling, Liege, Belgium.
- "- (in press c): A Monte Carlo approach to estimation and prediction.- In: BECK, M.B. and G. VAN STRATEN eds., Uncertainty and prediction of water quality. IIASA CP, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

- FEDRA, K., G. VAN STRATEN and BECK, M.B. (in press):
 Uncertainty and arbitrariness in ecological
 modelling: a lake modelling example.- IIASA WP,
 International Institute for Applied Systems
 Analysis, Laxenburg, Austria.
- IMBODEN, D.M. and R. GÄCHTER (1978): A dynamic lake
 model for trophic state prediction.-
 Ecol. Modelling 4: 77-98.

Abbildungstexte:

Abb. 1: Projektionen der Modell-Antwort eines "plausiblen"
 Eingabebereiches (unkorrelierte Zufallskombinationen) auf
 Ebenen je zweier Ausgabe-Varaabler. Der "empirische"
 Antwort-Bereich ist hervorgehoben.

Abb. 2: Rohdatensatz (Partikulärer Phosphor) und ent-
 sprechendes "realistisches" Ensemble von Simulationen.
 Mittelwert eines mit Monte-Carlo Verfahren generierten
 Ensembles mit begleitenden Minima und Maxima.

Abb. 3: Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Jahres-
 primärproduktion (Schaetzwerte aus dem Monte-Carlo
 Ensemble) für unterschiedliche Werte der Geamt-Phosphor
 Zufuhr. Verteilungen für erstes Simulationsjahr
 (Ausgangsstand: empirischer Bereich) und für Jahr 10
 der Simulation.

Abb. 4: Vorhersage der Systemantwort auf Halbierung
 beziehungsweise Verdoppelung des empirischen Bereiches
 der Phosphor-Zufuhr. Equilibrium-Situation nach 10
 Simulationsjahren.

**Tabelle 1: Automatic parameters space analysis program
Correlation analysis for well behaving runs**

Runs to be evaluated: 284

		Mean
1	MICHAELIS CONSTANT	mg/m ³ 1,0034
2	RESP./MINERALIZATION EPILIMNION	day ⁻¹ 0,1133
3	RESP./MINERALIZATION HYPOLIMNION	day ⁻¹ 0,0141
4	NET SEDIMENTATION VELOCITY EPILIMNION	m/day 0,2573
5	NET SEDIMENTATION VELOCITY HYPOLIMNION	m/day 1,4174
6	MINIMUM PRODUCTION RATE	day ⁻¹ 0,3777
7	MAXIMUM PRODUCTION RATE	day ⁻¹ 6,3439
8	TIME LAG OF PRODUCTIVITY MAXIMUM	day 218,5848
9	DIFFUSION COEFFICIENT HYPOLIMNION	cm ² /sec 0,2784
10	DIFFUSION COEFFICIENT THERMOCLINE	cm ² /sec 0,1312
11	EXTINCTION COEFFICIENT	m ⁻¹ 0,2887
12	SELF SHADING COEFFICIENT	m ² /mg 0,0150
13	INITIAL THERMOCLINE DEPTH	m 4,4836
14	FINAL THERMOCLINE DEPTH	m 17,6395
15	BEGIN OF STRATIFIED PERIOD	day 155,3908
16	END OF STRATIFIED PERIOD	day 302,6746
17	THICKNESS OF THERMOCLINE	m 7,5369
18	ORTHOPHOSPHATE INPUT	mg/m ² /day 0,1073
19	PARTICULATE PHOSPHOROUS INPUT	mg/m ² /day 0,9231
20	HYDRAULIC LOADING	m/day 0,0422
21	INITIAL ORTHOPHOSPHATE MIXED PERIOD	mg/m ³ 1,0670
22	INITIAL PARTICULATE PHOSPHOROUS MIXED P.	mg/m ³ 3,4425

M O D E L O U T P U T D A T A

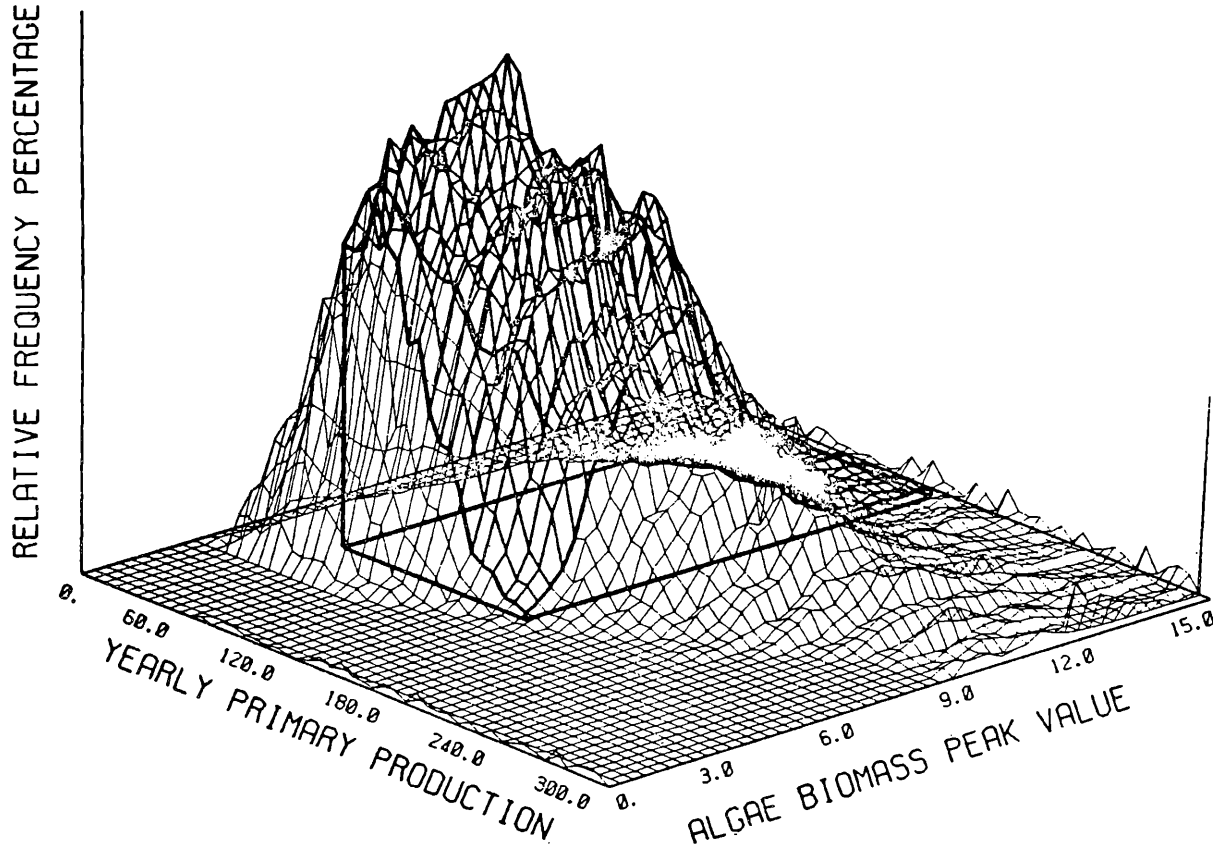
1	PRIMARY PRODUCTION	g C/m ² /year ₃	80,5503
2	OP MAXIMUM MIXED PERIOD	mg/m ₃	2,1762
3	PP EPILIMNION MINIMUM	mg/m ₃	0,4084
4	PP EPILIMNION MAXIMUM	mg/m ₃	4,4536
5	DAY OF EPILIMNION PP MAXIMUM	day	135,4018
6	TOTAL PHOSPHOROUS INPUT	tons/year	17,0385
7	NET PHOSPHOROUS LOADING	tons/year	14,4565
8	TOTAL PHOSPHOROUS OUTPUT	tons/year	2,4921
9	LAKE CONTENT TOTAL P TIME = START	tons	17,7357
10	LAKE CONTENT TOTAL P TIME = END	tons	12,5872
11	SEDIMENTATION TOTAL P	tons/year	19,6197

Stand.Dev.	Minimum	Maximum
0,5150	0,2041	1,9930
0,0529	0,0219	0,2000
0,0034	0,0100	0,0244
0,1617	0,0119	0,7438
0,4226	0,3231	1,9983
0,0736	0,2505	0,4994
2,2221	1,3207	9,9996
25,3802	180,0387	269,8400
0,1404	0,0200	0,4986
0,0683	0,0100	0,2498
0,0562	0,2003	0,3979
0,0030	0,0101	0,0200
0,8430	3,0053	5,9889
1,4053	15,0251	19,9728
16,7323	120,9221	179,8988
14,9862	280,0211	329,7845
1,4771	5,0062	9,9848
0,0510	0,0116	0,1989
0,3347	0,2604	1,4997
0,0050	0,0301	0,0500
0,4991	0,2000	1,9893
0,7121	2,5156	6,1065
15,8056	50,3616	128,9642
0,2453	1,3256	2,4969
0,1958	0,0714	1,1612
0,8396	3,0174	8,2083
31,8800	61,0000	185,0943
5,6754	5,7596	27,7315
5,6149	3,4143	25,1839
0,3837	2,0007	3,8662
3,3315	11,6538	29,3214
1,6815	8,4954	17,5518
5,8454	5,8417	34,4694

Abbildung 1a:

MODEL RESPONSE-SPACE PROJECTION

ATTERSEE PHOSPHORUS MODEL: STANDARD INPUT RANGE



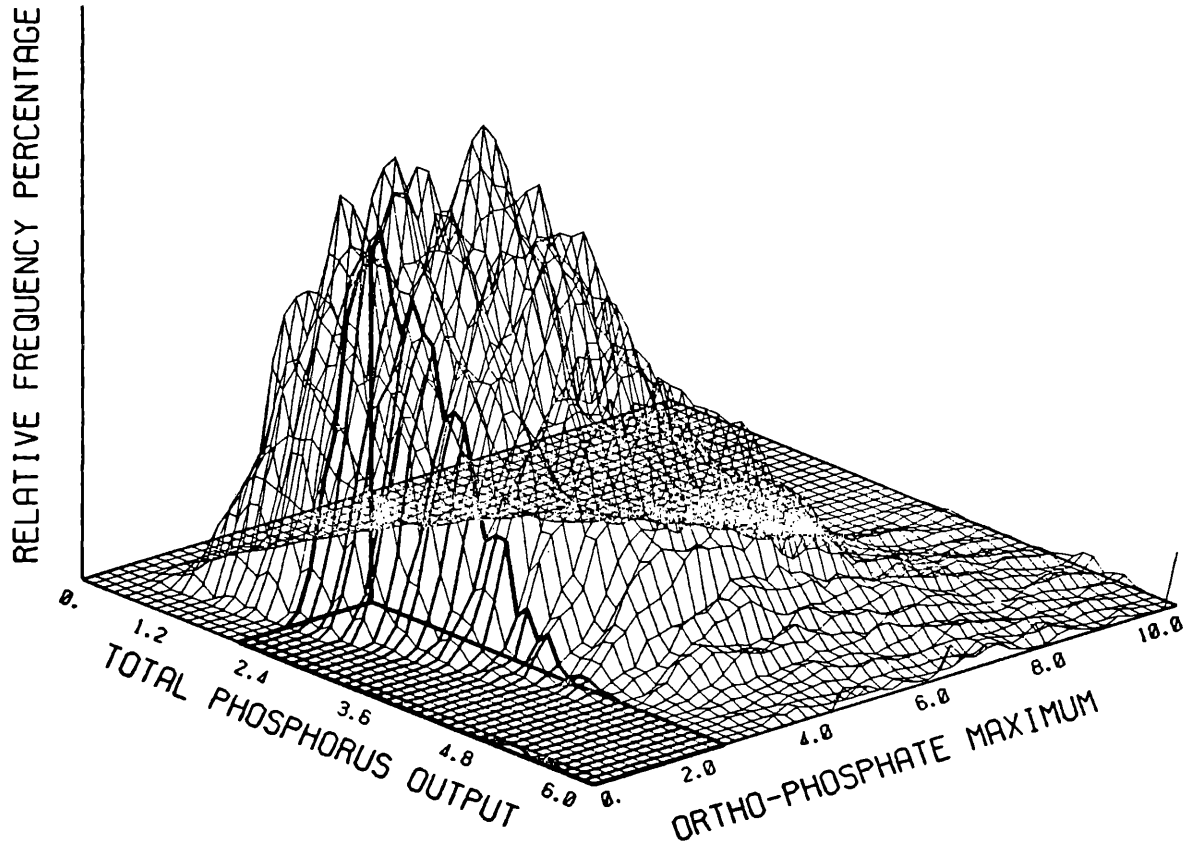
UNITS ON X-AXIS: G C/SQM AND YEAR
UNITS ON Z-AXIS: MG P/CUBIC METER

K. FEDRA FECLT
A. D. MCMLXXX

Abbildung 1b:

MODEL RESPONSE-SPACE PROJECTION

ATTERSEE PHOSPHORUS MODEL: STANDARD INPUT RANGE



206

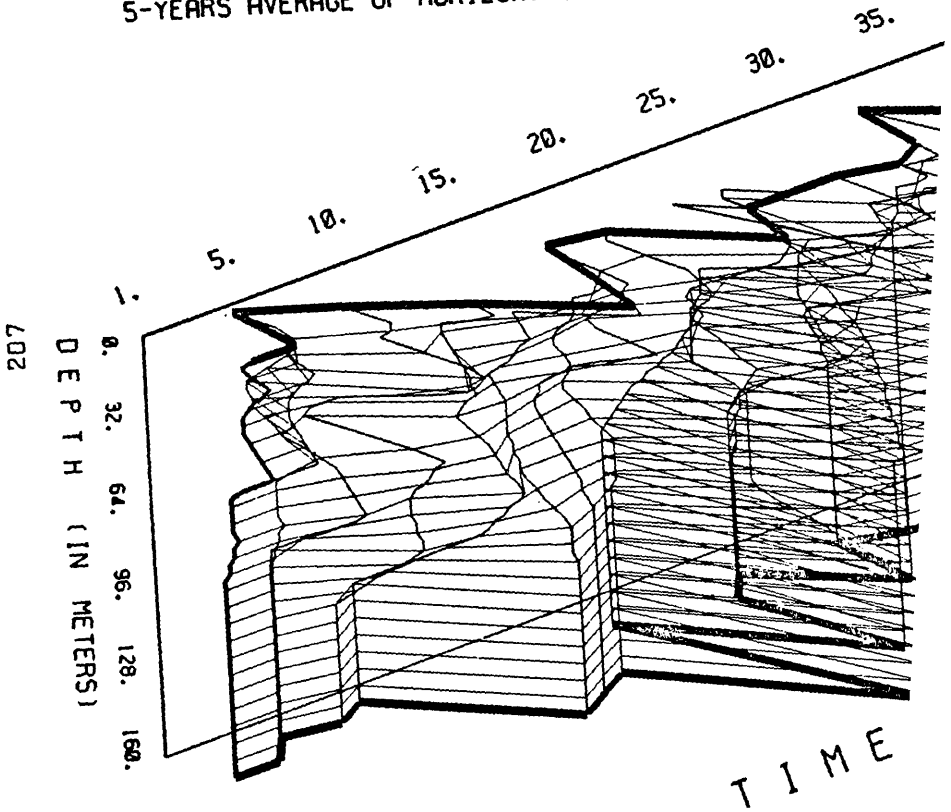
UNITS ON X-AXIS: METRIC TONS
UNITS ON Z-AXIS: G C/SQM AND YEAR

K. FEDRA FEC11
A.D. MCMLXXX

Abbildung 2a:

ATTERSEE LAKE CHEMISTRY:

PARTICULATE PHOSPHORUS FOR THE YEARS 1975 TO 1979
(TOTAL PHOSPHORUS - SOLUBLE PHOSPHORUS)
5-YEARS AVERAGE OF HORIZONTALLY POOLED DATA



RAW DATA

CONCENTRATION (MG/CUBIC METER)

50. 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10.

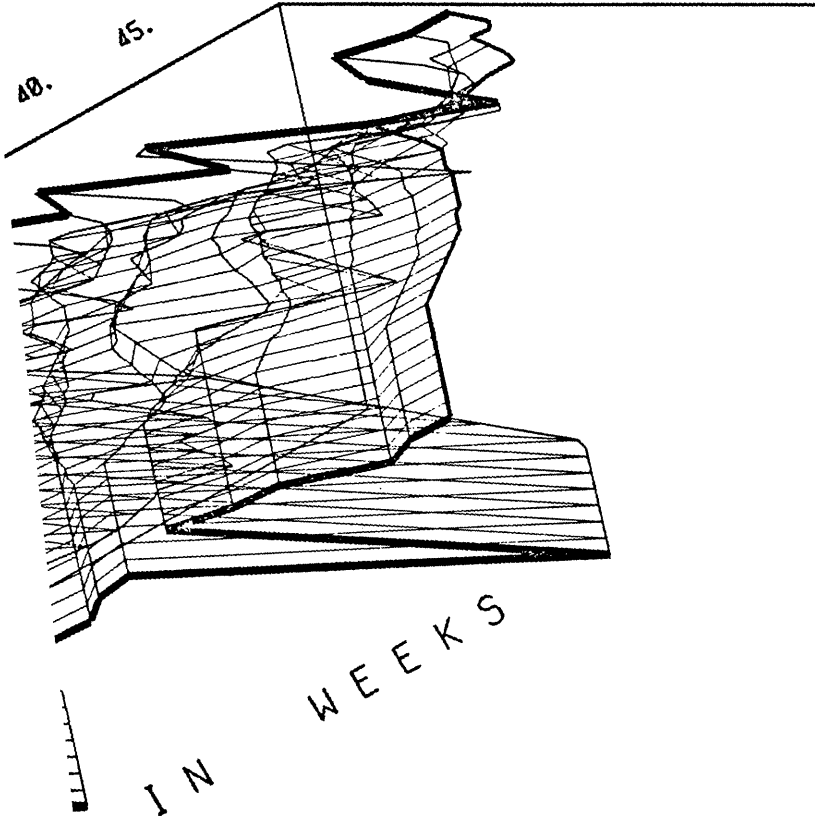


Abbildung 2b:

MONTE CARLO SIMULATION: PARTICULATE PHOSPHORUS BEHAVIOR ENSEMBLE: MEAN WITH MIN/MAX ENVELOPE

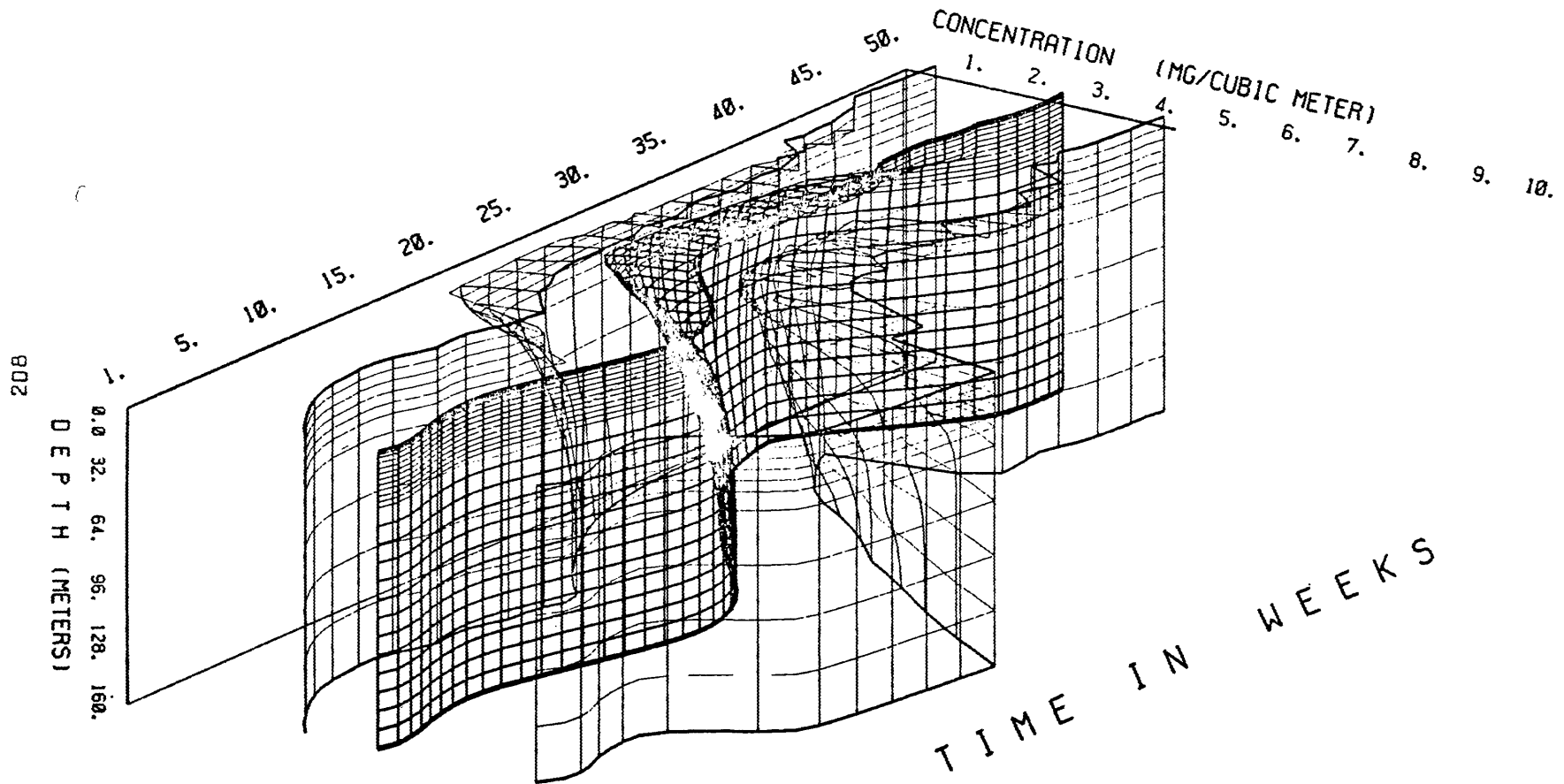


Abbildung 3g:

ATTERSEE PHOSPHORUS BUDGET MODEL

ESTIMATES OF PRIMARY PRODUCTION VS NUTRIENT LOADING
SIMULATION YEAR: 1

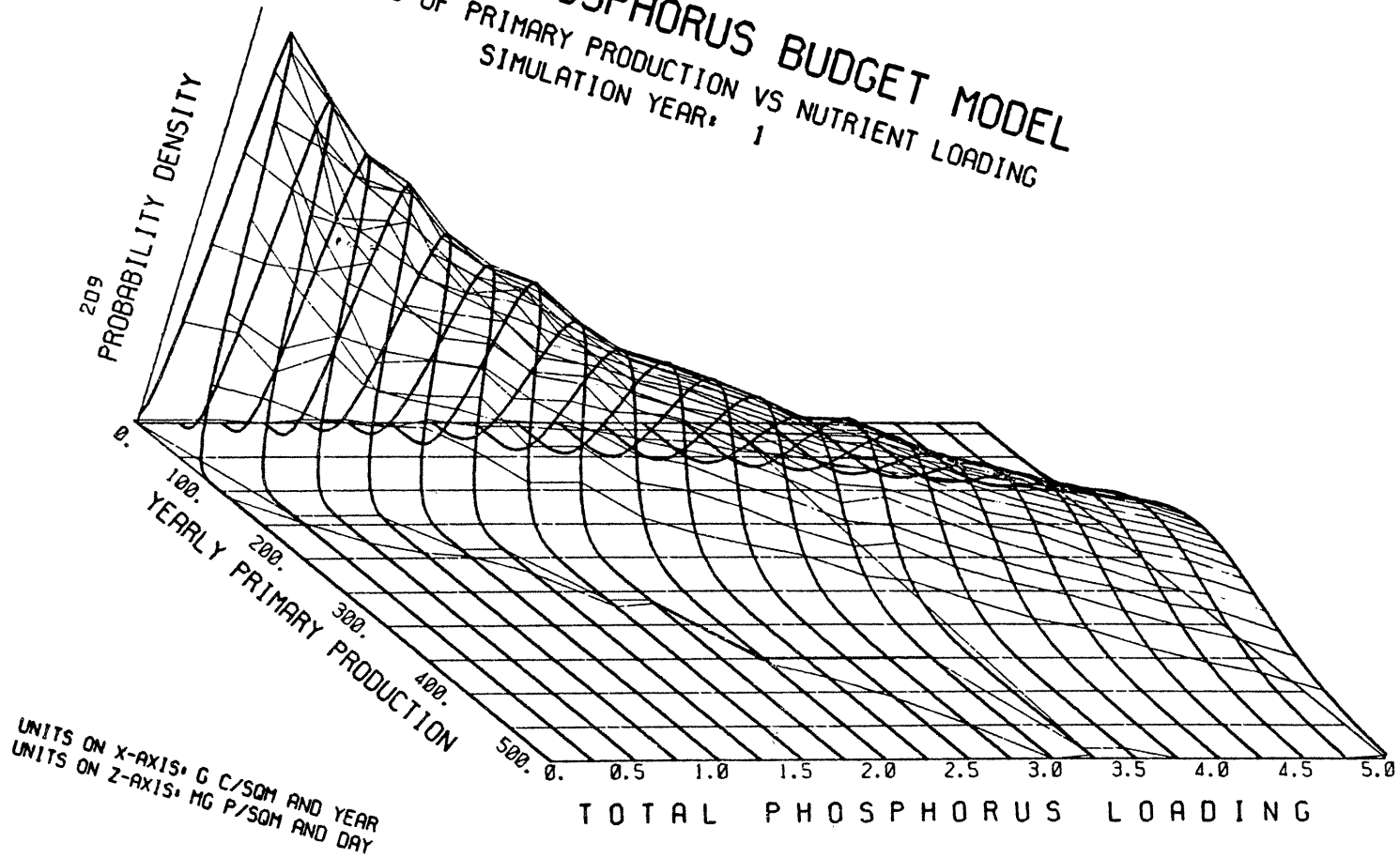


Abbildung 3b:

ATTERSEE PHOSPHORUS BUDGET MODEL

ESTIMATES OF PRIMARY PRODUCTION VS NUTRIENT LOADING
SIMULATION YEAR: 10

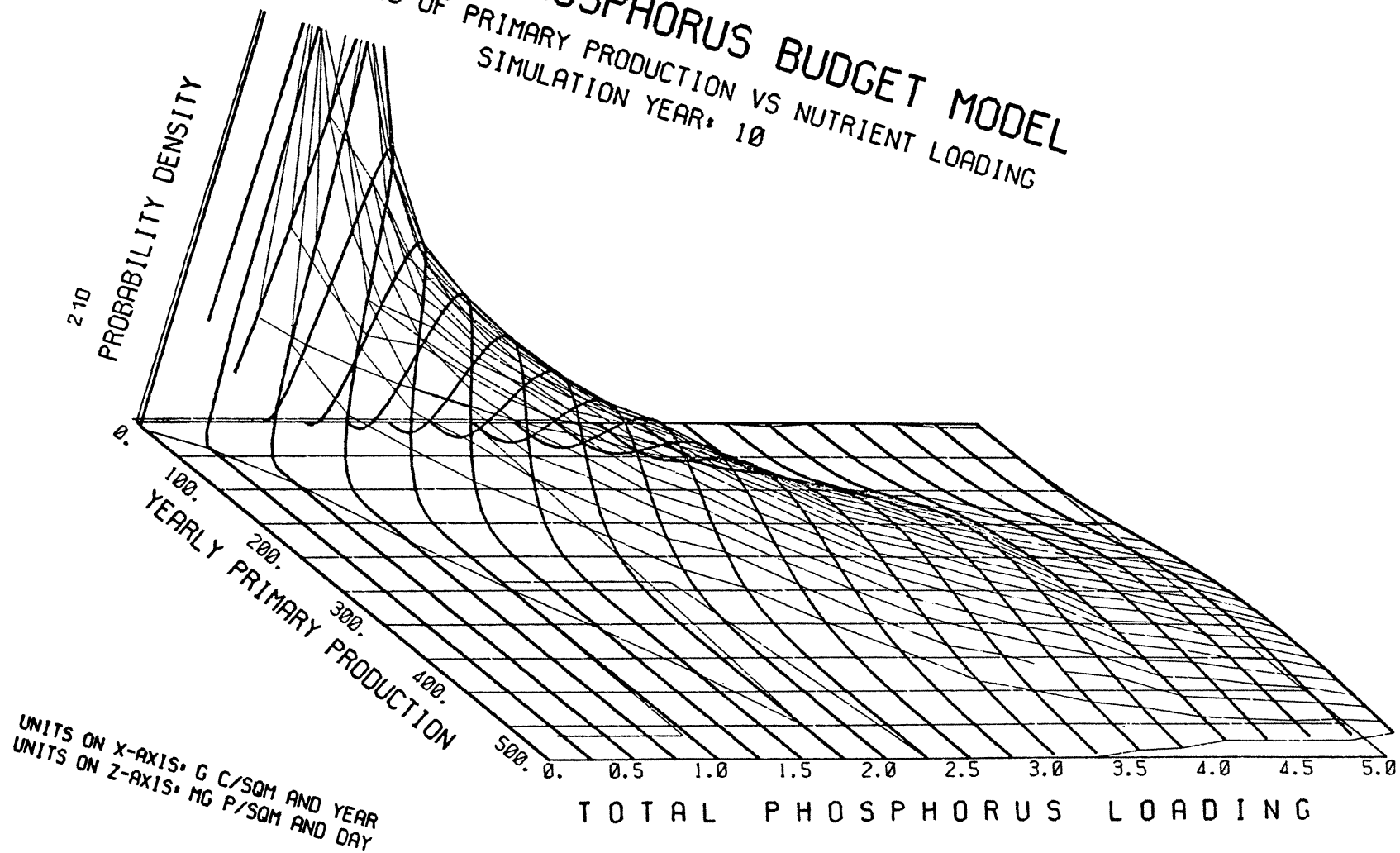


Abbildung 4a:

MONTE CARLO SIMULATION: PARTICULATE PHOSPHORUS LOADING CHANGED TO 50% - SIMULATION YEAR 10

PHOSPHORUS BUDGET OF THE SIMULATIONS (39. RUNS)

| | | | |
|---------------------|---------------|-----|------|
| TOTAL P-LOADING: | 9.84 TONS | SD: | 2.73 |
| NET P-LOADING: | 8.60 TONS | SD: | 2.68 |
| TOTAL P-OUTPUT : | 1.23 TONS | SD: | 0.17 |
| P-SEDIMENTATION: | 8.57 TONS | SD: | 2.67 |
| P-CONTENT (START): | 7.14 TONS | SD: | 0.73 |
| P-CONTENT (END): | 7.14 TONS | SD: | 0.73 |
| PRIMARY PRODUCTION: | 27.91 G C/SOM | | |

211

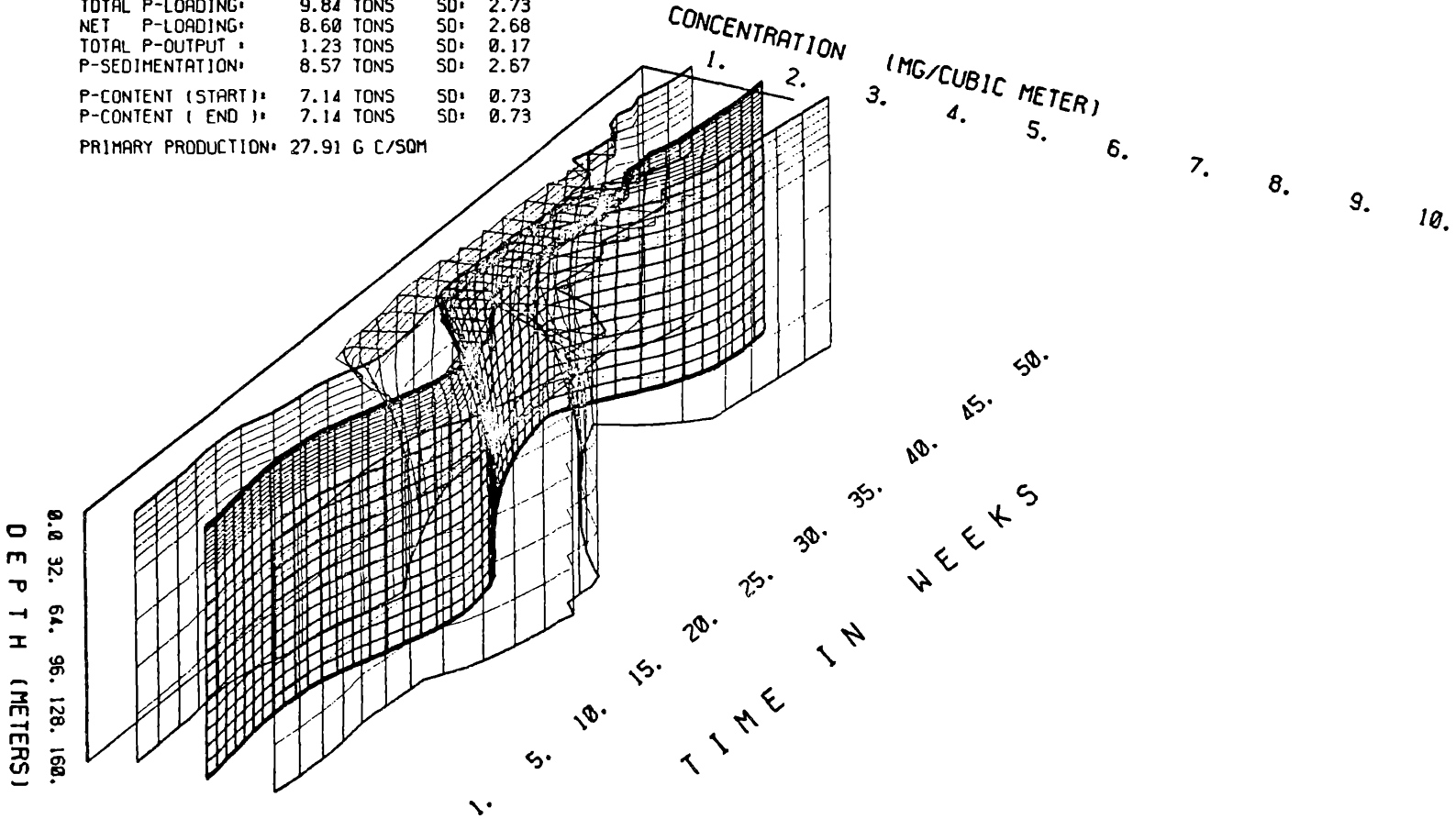
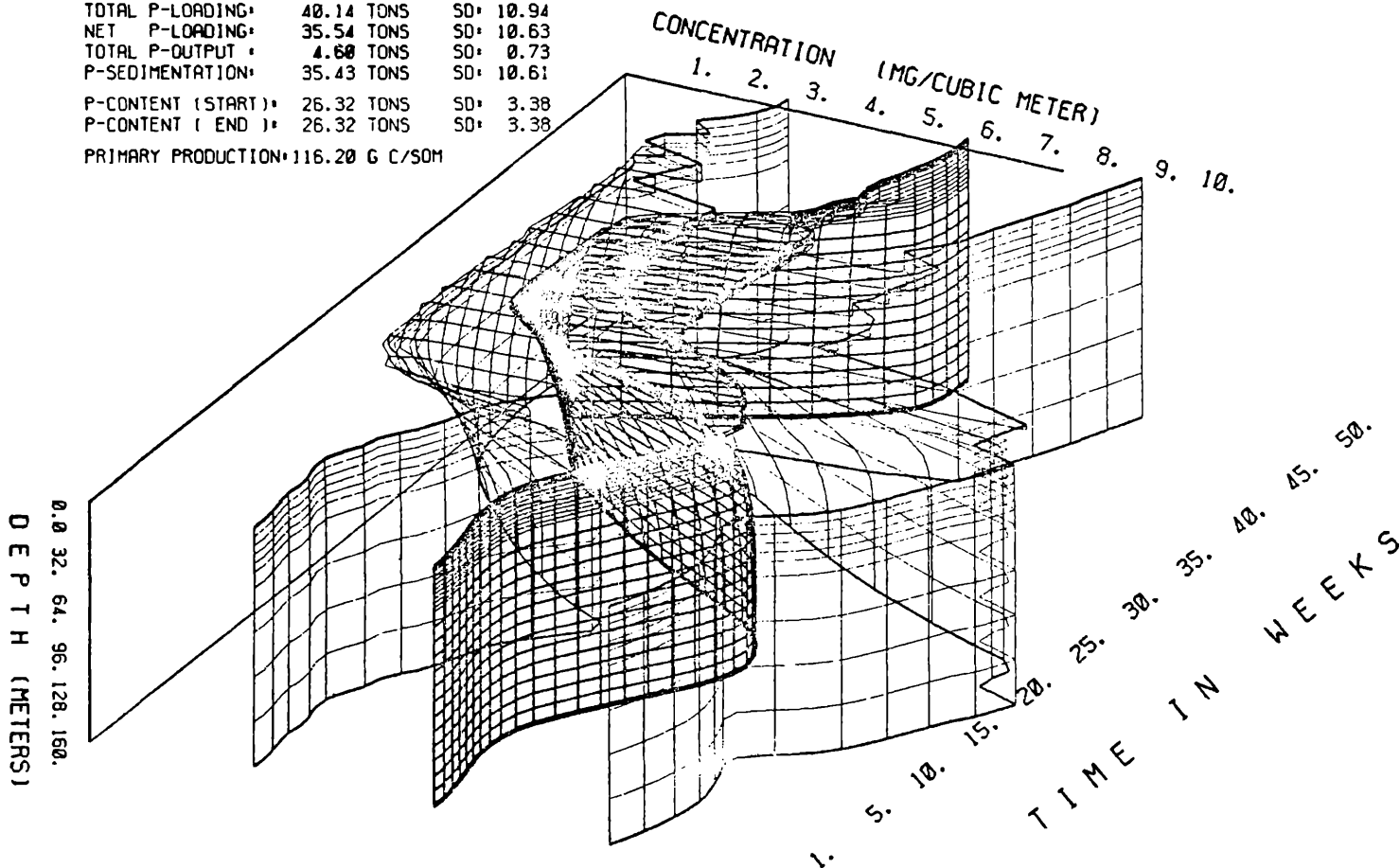


Abbildung 4b:

MONTE CARLO SIMULATION: PARTICULATE PHOSPHORUS LOADING CHANGED TO 200% - SIMULATION YEAR 10

PHOSPHORUS BUDGET OF THE SIMULATIONS (39. RUNS)

| | | | |
|---------------------|----------------|-----|-------|
| TOTAL P-LOADING: | 40.14 TONS | SD: | 10.94 |
| NET P-LOADING: | 35.54 TONS | SD: | 10.63 |
| TOTAL P-OUTPUT : | 4.60 TONS | SD: | 0.73 |
| P-SEDIMENTATION: | 35.43 TONS | SD: | 10.61 |
| P-CONTENT (START): | 26.32 TONS | SD: | 3.38 |
| P-CONTENT (END): | 26.32 TONS | SD: | 3.38 |
| PRIMARY PRODUCTION: | 116.20 G C/SOM | | |



212

0.0 32. 64. 96. 128. 160.
D E P T H (M E T E R S)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Arbeiten aus dem Labor Weyregg](#)

Jahr/Year: 1980

Band/Volume: [4_1980](#)

Autor(en)/Author(s): Fedra Kurt

Artikel/Article: [NUMERISCHE SIMULATION DER WASSERQUALITÄT: EIN EINFACHES NÄHRSTOFFMODELL FÜR DEN ATTERSEE](#) Numerical Simulation of waterquality: a simple nutrient - model for Attersee 194-212