

UNIVERSITAET BERN

GEOGRAPHISCHES INSTITUT

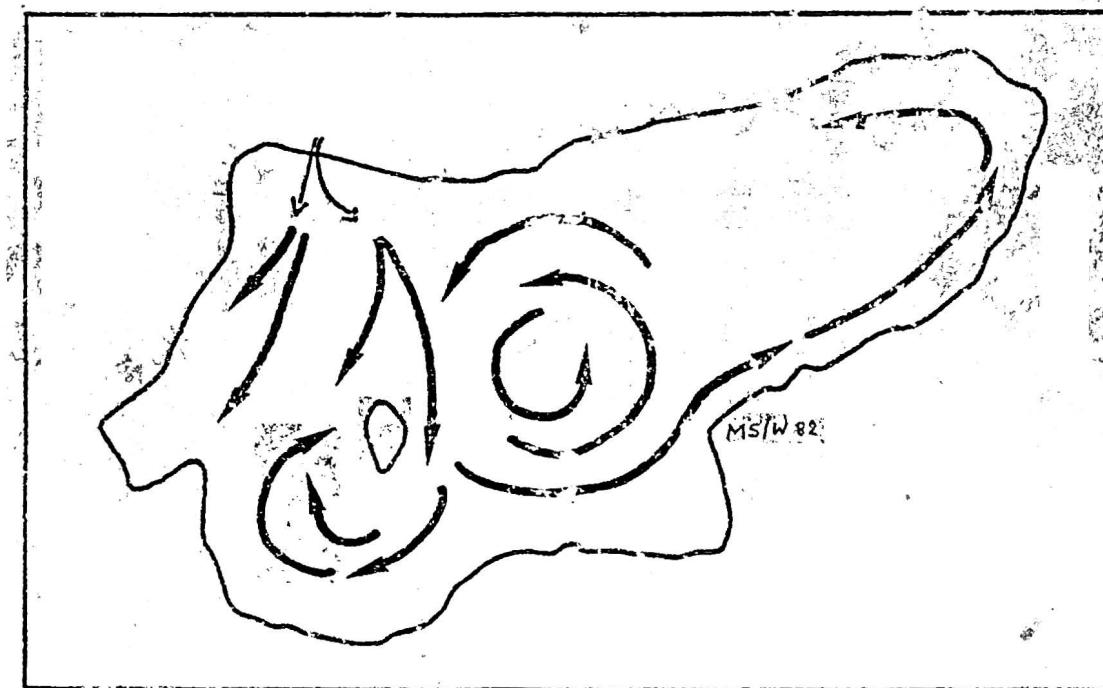
ABTEILUNG GEWÄSSERKUNDE

STROEMUNGSGEWEISERKUNDE

MITTELS TRACERVERSUCHEN IM BLEDSEE

CH. LEIBUNDGUT, TH. MOERI, H. PESCHEL, J. PETERMANN

M. STAMPFLI, R. WÄLTI



BERN 1983

UNIVERSITAET BERN

GEOGRAPHISCHES INSTITUT
ABTEILUNG GEWÄSSERKUNDE

STROEMUNGSUNTERSUCHUNGEN
MITTELS TRACERVERSUCHEN IM BLEDSEE

CH. LEIBUNDGUT, TH. MOERI, H. PESCHEL, J. PETERMANN
M. STAMPFLI, R. WÄLTI

BERN, 1983

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	3
Vorwort	4
1. Einleitung und Problemstellung	5
2. Zum Untersuchungsgebiet	6
3. Vorarbeiten zum Feldversuch	10
4. Limnologische und hydrologische Randbedingungen während des Feldversuches und Vermessung	12
4.1 Zu- und Abfluss	12
4.2 Wind	13
4.3 Thermik	13
4.4 Vermessung	17
5. Erster Tracerversuch (Rhodamin-Versuch)	19
6. Zweiter Tracerversuch (Uranin-Versuch)	27
7. Interpretation der Resultate und Schlussfolgerungen	32
Zusammenfassung	39
Literatur	40

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abb. 1: Einzugsgebiet des Bledsees	7
Abb. 2: Windverhältnisse vom 6. - 16. 7. 82	13
Abb. 3: Temperaturprofil vom 14. 7. 1982 um 06.50 Uhr	14
Abb. 4: Tagesgang der Wassertemperatur der Radovna bei Grabce vom 14. 7. - 16. 7. 1982	15
Abb. 5: Prinzip der Positionsbestimmung mit 1 Theodoliten	18
Abb. 7: Rhodamin B-Versuch, Profilschnitte A - B	21
Abb. 8: Rhodamin B-Versuch, Profilschnitte C - D	22
Abb. 9: Rhodamin B-Versuch, Profilschnitte E - F	23
Abb. 10: Schematische Darstellung der Begrenzung der Tracerwolke durch die Ufertopographie und die thermische Schichtung	25
Abb. 12: Uranin-Versuch, Profilschnitte A - B	29
Abb. 13: Uranin-Versuch, Profilschnitte C - D	30
Abb. 14: Uranin-Versuch, Profilschnitte E - F	31
Abb. 15: Schematisches Strömungsbild des Bledsees	33
Abb. 16: Schematisches Wasser-Wärmehaushaltsmodell	36
Abb. 6: Horizontale Ausbreitung der Tracerwolken des Rhodaminversuches	Anhang
Abb. 11: Horizontale Ausbreitung der Tracerwolken des Uraninversuches	Anhang

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Topographisch-morphometrische Angaben zum Bledsee	8
Tab. 2: Zu- und Abflüsse des Bledsees	9
Tab. 3: Tagesgang der Wassertemperatur der Radovna im Sommer 1982	16
Tab. 4: Durchlaufszeitpunkte des markierten Wassers im Zuleitungsstollen und Dauer der Einspeisung	19
Tab. 5: Ausdehnungsgeschwindigkeiten der Tracerwolken	34
Tab. 6: Tracerkonzentrationen im Abfluss der Tiefenwasserableitung vom 8. 7. - 8. 11. 1982	38

Vorwort

Im Rahmen der "Internationalen Arbeitsgruppe zur Anwendung von Tracermethoden in der Hydrologie" ergeben sich seit vielen Jahren interessante Zusammenarbeiten mit mehreren europäischen Fachinstitutionen. Ein neuestes Beispiel sind die Strömungsuntersuchungen im Bledsee (Slowenien). Gerne folgten wir der Einladung, das "Variosens-Tracerverfahren" zur Untersuchung der Strömungsvorgänge im Bledsee einzusetzen. Die bilaterale Zusammenarbeit der Institutionen aus Bern und Ljubljana/Bled festigten die methodischen Kenntnisse der Tracerhydrologie in Seen. Für den Bledsee brachten die Resultate weitergehende Erkenntnisse zu den Zirkulations- und Strömungsvorgängen. Diese dürften es den verantwortlichen Stellen erlauben, die Entscheide zur Optimierung der Sanierungsmassnahmen besser fällen zu können.

Das Bernerteam möchte an dieser Stelle der Gruppe aus Slowenien - Hydrometeorologische Anstalt SRS und Limnologische Station Bled - ganz besonders danken für die ausgezeichnete Vorbereitung und Organisation und die herzliche Gastfreundschaft. Dem Verband der wasserwirtschaftlichen Gemeinden Sloweniens danken wir für die finanzielle Unterstützung des Unternehmens. Ing. Martina Zupan und Ing. Dušan Gorišek danken wir für das persönliche Engagement und die Fortführung wichtiger Messungen nach den sommerlichen Feldversuchen.

1. Einleitung und Problemstellung

Der Bledsee (Blejsko jezero) in Slowenien ist stark eutroph. Er leidet damit an der gleichen "Krankheit" wie die Mehrzahl der Seen in stark besiedelten und intensiv genutzten Räumen. Die Nährstoff-Uebersättigung ist in den letzten Jahren soweit angestiegen, dass es zu regelmässigen "Algenblüten" besonders der Burgunderblutalge (*Oscillatoria rubescens*) kam. Nach neueren Untersuchungen scheint sich die Tendenz der Verschlechterung der Seewasserqualität zu verstärken (VRHOSEK D., KOSI G., ZUPAN M., 1981). Diese Situation führte u. a. zu einer Beeinträchtigung des touristischen Wertes des Sees. Es mussten Gegenmassnahmen eingeleitet werden.

Verschiedene Umstände und auch Eigenarten führten zu diesem hohen Eutrophierungsgrad:

- Dem Bledsee fehlt ein gröserer Zu- und Abfluss. Der See wird somit kaum durchströmt und durchspült.
- Die unmittelbar um den See herum liegenden Hügel bilden eine Schutzwand gegen starke, langandauernde Winde. Diese windgeschützte Lage ermöglicht im Frühjahr den raschen Aufbau einer sehr stabilen Schichtung, die rasch in die Sommerstagnation übergeht. Im Verband mit der organischen Ueberproduktion im Epilimnion kommt es zu weitgehender Sauerstoffzehrung im hypolimnischen Wasser.
- Ein unvollständiges und defektes Kanalisationsnetz im Einzugsbereich des Sees führt zu belastenden Abwasser-Einflüssen in den See.
- Im Hinterland des Bledsees befindet sich ein stark verschmutzter Fluss, der wahrscheinlich durch sublakustrische Quellen eine hydrologische Verbindung zum See hat.

Von Seiten der verantwortlichen Behörden sind in den vergangenen Jahren verschiedene Anstrengungen zur Verbesserung der Lage im See unternommen worden. So wird das Seewasser seit längerer Zeit regelmässig physikalisch, chemisch und biologisch unter-

sucht (VRHOVSEK D., KOSI G., ZUPAN M., 1981). Die Ergebnisse wurden zur Versuchsplanung herangezogen.

Um die mangelnde Durchflutung des Sees zu erhöhen, wurde bereits in den sechziger Jahren eine künstliche Frischwasser-Zuleitung vom Radovna-Fluss her erstellt. Diese Zuleitung versorgt heute das Hypolimnion des Bledsees mit sauberem Flusswasser. Als ergänzende Massnahme dazu wurde 1980/81 eine Tiefenwasserableitung installiert, die das aufkonzentrierte und anärode Tiefenwasser über dem Grund ableitet (RISMAL M., 1980). Die Sanierung des Kanalisationsnetzes steht noch am Anfang.

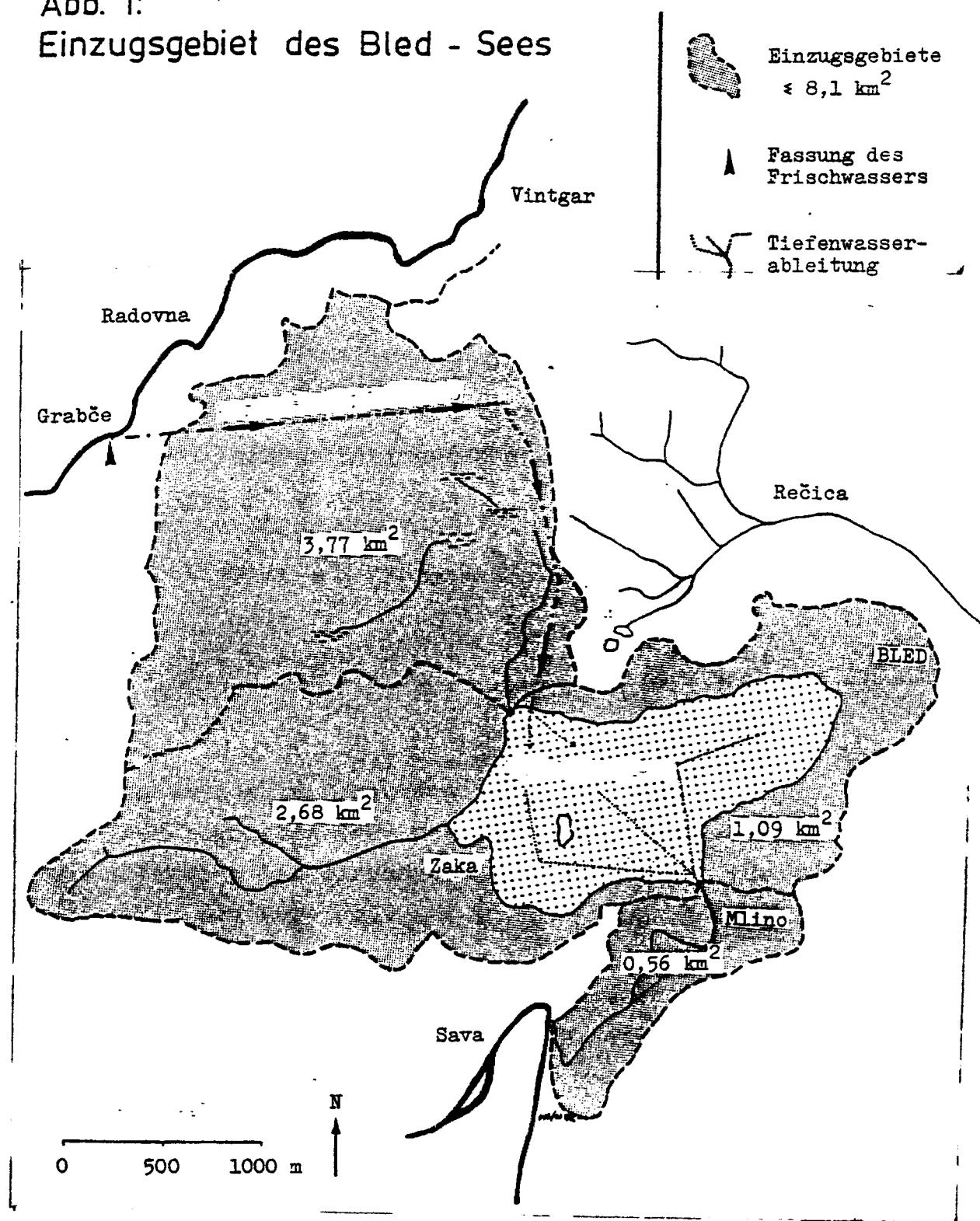
Das Ziel der Tracerversuche und begleitenden Messkampagnen vom Sommer 1982 bestand nun im besonderen darin, die Rolle dieser technischen Massnahmen für das Hypolimnion abzuklären. Dazu musste vor allem dessen Strömungsgeschehen untersucht werden. Die zu erarbeitenden Kenntnisse über die Strömungsvorgänge sollen Grundlage für die weiteren Planungsmassnahmen der Behörden sein.

Als Methode zur Erreichung des gesetzten Ziels wurde die am Geographischen Institut in Bern entwickelte und erprobte Methode der Markierung des Zuflusswassers mittels Fluoreszenztracern gewählt (HIRSIG P., LEIBUNDGUT Ch., NYDEGGER P., 1982). Die Messung der markierten Wassermassen *in situ* erlaubt es, die räumliche und zeitliche Ausbreitung festzustellen und damit die Strömungsvorgänge zu erkennen.

2. Zum Untersuchungsgebiet

Der Bledsee liegt auf 476 m ü. M., rund 50 km nordwestlich von Ljubljana (YU) im Talkessel von Gorenjsko. Die Kulisse bilden die Julischen Alpen und die Karawanken. Der See entstand während der letzten Eiszeit.

Abb. 1:
Einzugsgebiet des Bled - Sees



Das natürliche Einzugsgebiet des Bledsees ist nur rund fünf mal grösser als der See selbst (vgl. Abb. 1 und Tab. 1). Mit einer Fläche von nur $1,47 \text{ km}^2$ gehört der Bledsee zu den kleinen stehenden Gewässern. Er ist aber mit 30 m relativ tief. Die

Seeboden topographie ist gesamthaft nicht sehr bewegt. Die Insel (Otok) und deren ungefähr Nord-Südstreichender submerser Ausläufer trennen den See in ein West- und ein Ostbecken.

Tab. 1: Topographisch-morphometrische Angaben zum Bledsee

Geographische Breite	46 ° 22 ' n. Br.
Geographische Länge	14 ° 5 ' ö. L.
Seespiegelhöhe	476,0 m ü. M.
Fläche des Einzugsgebietes	7,54 km ²
max. Oberfläche des Sees	1,47 km ²
Verhältnis Einzugsgebiet : Oberfläche	5,1 : 1
max. Länge des Sees	2125 m
max. Breite des Sees	1300 m
gr. Tiefe: W-/E-Becken	30 m / 24 m
mittlere Tiefe des Sees	17,48 m
max. Volumen	25,7 . 10 ⁶ m ³

Die Landnutzung im Einzugsgebiet ist unterschiedlich. Sie reicht von einer hochintensiven Nutzung in der Touristik siedlung Bled über intensive Landwirtschaft im Rückland bis zur extensiven Nutzung in den Forsten.

Entsprechend dem Verhältnis von Einzugsgebietsfläche zu Seefläche können die natürlichen Zuflüsse nur verhältnismässig klein sein (Tab. 2). Gesamthaft dürften sie im Mittel bei 200 l/s liegen. Die theoretische Erneuerungszeit liegt damit bei rund vier Jahren. Von Natur aus wird daher der Bledsee nur spärlich durchflutet. In Verbindung mit der intensiven Nutzung im Einzugsgebiet führt dies über den Eintrag von Nährstoffen zum überbelasteten Stoffhaushalt.

Mit Hilfe einer künstlichen Zuleitung wird versucht diese Verhältnisse zu verbessern. Ueber einen 3,5 km langen Stollen wird Radovnawasser von Grabče her in den See geleitet (vgl. Abb. 1).

Tab. 2: Zu- und Abflüsse des Bledsees

<u>natürliche Zuflüsse:</u>	8./9.7.82	Jahresmittel gesch.
Mišca	101,0 l/s	170,0 l/s
Krivica	19,0	30,0
Solznik	0,1	8,0
Ribcev graben	1,0	3,0
Pod Viscami	1,0	1,3
Pri Ribicu	0,9	0,9
<u>künstlicher Zufluss:</u>	8.-11.7.82	11.-16.7.82 normal
Radovna-Wasser	200 l/s	600 l/s 200 l/s
<u>natürlicher Abfluss:</u>	8.-16.7.82	Jahresmittel
Jezernica	0-200 l/s	50-150 l/s
<u>künstlicher Abfluss:</u>	8.-16.7.82	max. Menge
bei Mlino	100-350 l/s	380 l/s

Vermischtes

Stausee

Die Fassung liegt auf 605 m, so dass das Wasser mit Eigengewicht dem Bledsee zufließt. Zwei Sedimentationsbecken liegen im Fassungsbereich vor dem Stollen, zwei weitere im Verlauf des Stollens. Damit wird eine weitgehende Entsandung des Radovnawassers erzielt. Noch an Land wird die Zuleitung in zwei Röhren aufgetrennt, welche dann in den beiden Seebecken jeweils in 18 m Tiefe münden. Das Fassungsvermögen der Zuleitung ist auf maximal $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt. Praktisch wird aber die Zuleitungsgröße durch die Wasserrechte des unterliegenden Kraftwerkes bei Vintgar beschränkt (200 - 600 l/s).

Drei Drainrohre, davon eines im kleinen Westbecken, ziehen Tiefenwasser ab und führen es über Mlino im Hebersystem der Sava zu (vgl. Abb. 1). Durch die Rohre können maximal 380 l/s abfliessen. Der Abfluss muss so geregelt werden, dass eine geringe Restwassermenge im natürlichen Gerinne erhalten bleibt.

3. Vorarbeiten zum Feldversuch

Zur Lösung des gestellten Problems mussten zwei Themenkreise vorbereitet werden. Einmal war dies die Messmethodik selbst, zum anderen waren es die regionale Limnologie und Hydrologie des Bledsees und seines Einzugsgebietes.

Bezüglich der Messmethodik "Variosens" konnten wir davon ausgehen, dass die in zahlreichen Versuchen erprobte Messtechnik der in situ-Messung markierter Wassermassen in Seen auch im Bledsee geeignet sei (LEIBUNDGUT und HIRSIG, 1977; WERTHEMANN, 1980; HIRSIG, 1981; HIRSIG, LEIBUNDGUT und NYDEGGER, 1982). Besondere lokale Schwierigkeiten, wie grosse Tiefen, waren nicht vorweg gegeben.

Gleichzeitig wurde versucht über die hydrologisch-limnologischen Verhältnisse des Sees genügend Informationen zu erhalten und zu erarbeiten, um den Feldversuch optimal planen und durchführen zu können. Mit Hilfe der uns von der Hydrometeorologischen Anstalt SRS zur Verfügung gestellten Karten und Pläne würden die Arbeitskarten im Massstab 1 : 5 000 erstellt. Die Seeboden topographie ist darin mit einer Aequidistanz von 1 m eingetragen.

Die Rekognosierungsfahrt im Februar 1982 erlaubte es, die weiteren Vorarbeiten und die Planung in Kenntnis der natürlichen Verhältnisse vorzunehmen.

Die Thermik - ein Angelpunkt der Zirkulationsvorgänge - zeigte in den Jahren 1979 -1982 einen ähnlichen Jahresverlauf. Ende November, meist im Dezember geht der See in Homothermie und damit zur Vollzirkulation über. Diese hält bis März an, wobei sich häufig noch inverse Schichtung einstellen kann. Im April beginnt bereits der Aufbau der sommerlichen Schichtung. Diese ist sehr ausgeprägt im Juni bis August, in einzelnen Jahren auch noch im September (vgl. Abb. 4). Im Epilimnion liegen die Temperaturen über 20 °C. Als Charakteristikum tritt stets ein starker Temperaturgradient und ein geringmächtiges Epilimnion

auf. Im Oktober/November wird dann diese Schichtung rasch abgebaut und der Zyklus beginnt von neuem. Bereits frühere Untersuchungen in den Jahren 1938 - 40 ergaben das grundsätzlich gleiche Bild (GRADNIK R.).

Vom unmittelbaren Seegebiet selbst liegen keine Windmessungen vor. Die Daten der etwa 2,5 km entfernten Flugplatzstation in Lesce dürften nur mit Vorbehalt auf den Bledsee übertragen werden, da dort durch die Topographie bedingt ein anderes Windregime herrscht. Infolge der Muldenlage des Sees war eine relative Windgeschütztheit mit abgeschwächten Windgeschwindigkeiten zu erwarten. Die Ausbildung des geringmächtigen Epilimnions in den beobachteten Jahren seit 1979 bestätigt diese Folgerungen. Wie weit und wie stark nun im Jahresverlauf dennoch windinduzierte Wasserbewegungen auftreten, kann aus dem vorliegenden Material nicht beurteilt werden. Die Hauptwindrichtungen liegen nach M. ZUPAN (1982) bei NE und SE.

Zur Erfassung der tatsächlichen Windverhältnisse auf dem See wurde von der Hydrometeorologischen Anstalt SRS auf der Insel ein Windmesser installiert. Ab 1. Juli 1982 liegen Aufzeichnungen vor.

Um eine ungefähre Vorstellung vom Strömungsgeschehen im See zu haben wurde ein Vorversuch mit Driftkörpern durchgeführt (P. NYDEGGER, 1967). Wir setzten am 7. Juli im Bledsee sechs Driftkörper aus, je drei in verschiedenen Tiefen in den beiden Becken. Dabei interessierten uns speziell die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen in der Tiefe der künstlichen Zuleitung. Dieser Vorversuch erleichterte uns später das Auffinden und Verfolgen der Tracerwolke im See.

Die in der Planungsphase gewonnenen Erkenntnisse über die limnologischen Verhältnisse des Bledsees führten unter Berücksichtigung der messtechnischen Möglichkeiten zur eigentlichen Versuchsanordnung. Vorgesehen wurden zwei Markiererversuche mit den Fluoreszenztracer Rhodamin B und Uranin bei unterschiedlichen

Zuleitungsmengen. Der erste Versuch sollte mit der Normalmenge von 200 l/s gefahren werden. Die Menge des zweiten Versuches sollte nach dem neuesten Stand der Kenntnisse im Felde unmittelbar vor Versuchsbeginn bestimmt werden.

4. Limnologische und hydrologische Randbedingungen während des Feldversuches und Vermessung

4.1 Zu- und Abfluss

Infolge der stabilen Witterung während des Feldversuches im Juli blieben die natürlichen Zu- und Abflussverhältnisse praktisch konstant. Gesamthaft betragen die Zuflüsse rund 120 l/s (Tab. 2). Mit rund 100 l/s hat der Mišca-Bach den weitaus grössten Anteil. Die übrigen Zuflüsse bringen für unsere Fragestellung nur unbedeutende Mengen.

Der künstliche Zufluss aus der Radovna wurde gemäss Versuchsanplanung einige Tage vor Beginn des ersten Tracerversuches auf 200 l/s eingestellt. Damit sollten Strömungsverhältnisse im See bewirkt werden, die sich auf diese Zuflussmenge eingestellt haben. Die kleinere Zuflussmenge wurde zuerst gewählt, da das Strömungsgeschehen im See länger braucht, um sich auf eine Herabsetzung des Zuflusses einzuspielen als umgekehrt. Am Abend des 11. Juli (18.30 Uhr) wurde die künstliche Zuflussmenge auf 600 l/s erhöht und bis Versuchsende beibehalten. Auf die mengenmässige Verteilung des Zuflusswassers in die beiden Mündungsrohre konnte kein Einfluss genommen werden, da eine Regelvorrichtung fehlt. Es ist aber bekannt, dass entsprechend der Grösse der Seebecken die Zuleitung ins Ostbecken grösser dimensioniert ist. Das Verhältnis der Rohrdurchmesser beträgt 1 : 1,8.

Der künstliche Abfluss über die Tiefenwasserableitung lag zwischen 100 - 350 l/s. Entsprechend variierte auch der natürliche Abfluss (0 - 200 l/s), da dieser in Abhängigkeit des Tiefenwasser-Abflusses als Ueberlauf konzipiert ist.

4.2 Wind

Erwartungsgemäss wurden während des Feldversuches nur schwache Winde im Bereich 1 - 2 der Beaufort-Scala aufgezeichnet (Abb. 2). Windgeschwindigkeiten > 2 m/s wurden nur ganz kurzfristig ausnahmsweise erreicht. Ost- und Nordost-Richtung war vorherrschend.

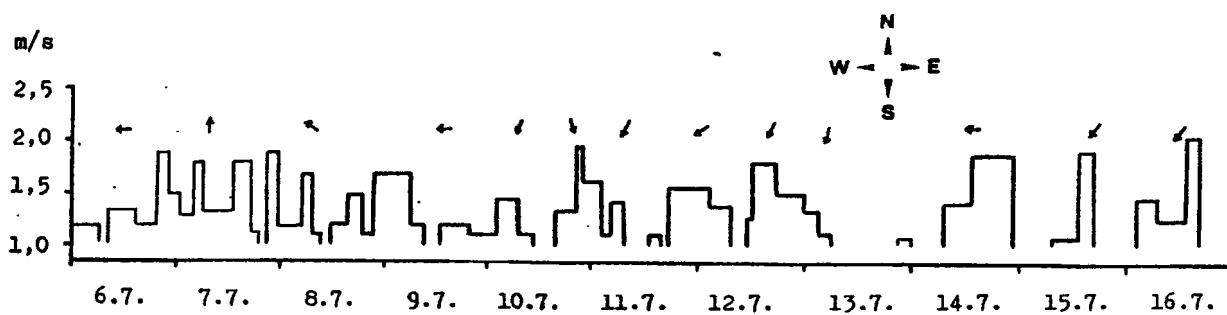


Abb. 2: Windverhältnisse vom 6. - 16. 7. 82 der Station Insel. Die Registrierung erfolgte alle 10 Min. automatisch. In der Auswertung wurde der Mittelwert über 2 Std. gebildet.

Diesen geringen Energien entsprechend, die über den Wind auf die Wasseroberfläche einwirken, wird das warme Oberflächenwasser nur wenig in die Tiefe hinuntergearbeitet. Das geringmächtige Epilimnion von knapp 4 m ist Ergebnis dieses Sachverhaltes. Während der Versuchsdauer traten keine messbaren windbedingten Strömungen oder Schrägstellungen der Sprungschicht (seiches internes) auf.

4.3 Thermik

Ein Vergleich der thermischen Verhältnisse im See zurzeit des Feldversuches mit jenen früherer Jahre zeigt, dass der Versuch während der Hochphase der Sommerstagnation durchgeführt wurde. Ein starker Temperatursprung zwischen 4 und 10 m trennt das

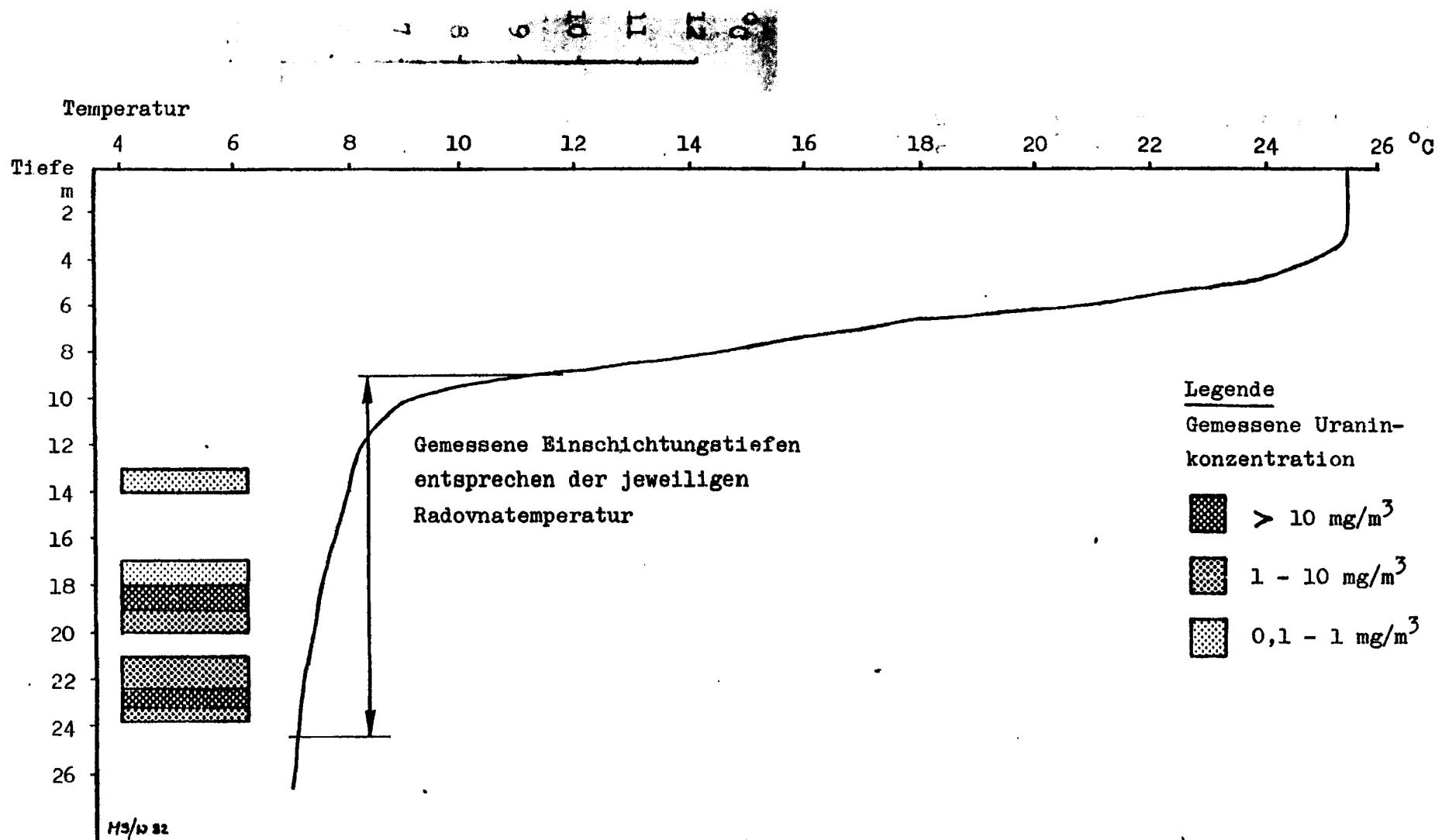


Abb. 3: Temperaturprofil vom 14. 7. 1982 um 06.50 Uhr mit der schematischen Darstellung der Einschichtung des Radovnawassers unter die Sprungschicht im kleinen Becken.

sehr warme Oberflächenwasser vom 6 - 8 °C kalten Tiefenwasser. Der See zeigt damit eine ausnehmend stabile Schichtung.

Das in Abbildung 3 dargestellte thermische Bild des Bledsees darf für die ganze Versuchsdauer als repräsentativ gelten, da keine wesentlichen Änderungen festgestellt wurden. Ebenso waren räumlich keine Unterschiede feststellbar.

Für die Einschichtung des künstlich zugeleiteten Radovnawassers im See ist die Temperatur ein entscheidender Faktor. An warmen sommerlichen Strahlungstagen weist die Radovna einen ausgeprägten täglichen Temperaturlanglauf auf. Die Werte liegen bei 7 - 12 °C (Abb. 4). Das Tagesminimum dürfte in der Morgenfrühe jeweils etwa um 6 Uhr, das Maximum am Spätnachmittag gegen 16 Uhr erreicht werden.

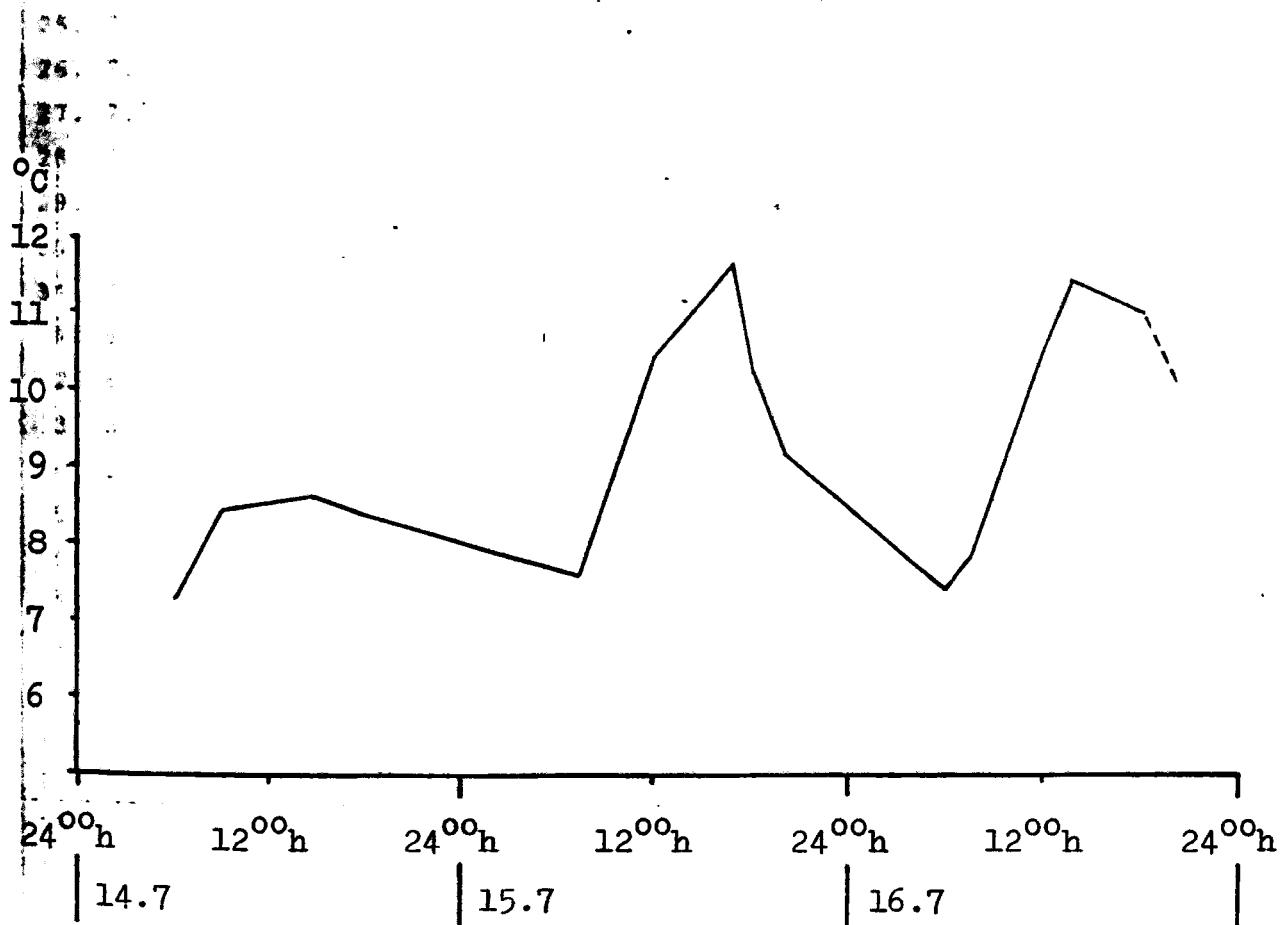


Abb. 4: Tagesgang der Wassertemperatur der Radovna bei Grabce vom 14. 7. - 16. 7. 1982.

Dass dieser Tagesgang im Hochsommer recht gleichmässig ist, zeigen die kontinuierlichen Messungen von M. ZUPAN ab 4. Juli bis 18. August 1982 (Tab. 3). Die Tagesminima liegen bei dem Zweistundenmittel fast ausschliesslich um 6 Uhr morgens. Diese untere Kulmination ist so flach, dass die Tiefstwerte oft schon um 4 Uhr, ausnahmsweise auch schon früher erreicht werden. Ebenso bleibt 16 Uhr jene Zeit an der am häufigsten die Höchsttemperatur erreicht wird. Nur ausnahmsweise liegt das Tagesmaximum früher.

Tab. 3: Tagesgang der Wassertemperatur der Radovna im Sommer 1982. Zweistundenmittel aus kontinuierlichen Aufzeichnungen (Daten-erhebung durch die Hydrometeorologische Anstalt SRS).

Zeit Datum	Stunden											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
24. 7.	7,4	7,3	7,3	7,4	7,9	9,1	9,0	9,0	8,6	8,2	7,7	7,5
25. 7.	7,4	7,3	7,2	7,3	8,0	9,3	9,6	9,6	9,0	9,4	7,8	7,6
26. 7.	7,4	7,3	7,2	7,3	7,5	7,8	7,8	7,8	7,8	7,6	7,4	7,3
27. 7.	7,2	7,2	7,2	7,4	7,9	8,3	8,6	8,6	8,2	7,8	7,5	7,4
28. 7.	7,3	7,4	7,4	7,4	7,4	7,6	7,6	8,0	7,8	7,4	7,1	7,0
29. 7.	6,9	6,9	6,8	7,0	7,9	8,6	8,6	8,8	8,5	7,8	7,4	7,2
30. 7.	7,2	7,2	7,2	7,4	8,0	8,5	8,7	8,9	8,6	8,1	7,7	7,5
31. 7.	7,4	7,3	7,2	7,3	8,0	9,1	9,9	9,2	8,8	8,2	7,6	7,4
01. 8.	7,3	7,2	7,2	7,3	8,3	9,5	10,0	10,5	9,6	8,4	7,8	7,6
02. 8.	7,4	7,4	7,4	7,4	7,8	8,6	9,0	9,0	8,4	8,0	7,7	7,6
03. 8.	7,5	7,4	7,4	7,5	8,0	8,5	9,5	10,2	9,0	8,4	7,8	7,7
4. 8.	7,7	7,6	7,5	7,5	8,3	8,5	8,3	7,9	7,6	7,4	7,3	7,3
5. 8.	7,2	7,2	7,1	7,2	8,2	8,6	8,7	8,8	8,4	7,7	7,4	7,3
6. 8.	7,2	7,2	7,2	7,3	8,3	9,2	9,3	8,6	8,2	7,8	7,6	7,4
7. 8.	7,3	7,3	7,3	7,5	7,9	8,5	9,0	9,0	8,7	8,0	7,6	7,4
8. 8.	7,3	7,1	7,1	7,4	8,2	9,3	9,4	9,1	8,6	8,3	8,0	7,8
9. 8.	7,7	7,6	7,5	7,5	8,0	8,5	9,6	9,4	8,8	8,2	7,8	7,7
10. 8.	7,6	7,4	7,4	7,5	7,7	8,5	9,0	9,3	8,8	8,0	7,7	7,5
11. 8.	7,4	7,3	7,3	7,4	8,4	9,9	10,7	10,9	9,8	8,5	7,8	7,6
12. 8.	7,4	7,3	7,2	7,4	8,5	9,8	10,9	11,1	9,8	8,6	7,9	7,6
13. 8.	7,5	7,4	7,4	7,5	8,6	10,0	10,9	11,2	10,1	8,8	8,1	7,8
14. 8.	7,6	7,4	7,3	7,5	8,5	9,8	11,0	11,2	10,0	9,0	8,3	7,8
15. 8.	7,7	7,6	7,6	7,8	8,6	10,0	11,0	11,2	10,2	9,0	8,2	7,9
16. 8.	7,8	7,7	7,7	7,8	8,9	10,0	10,2	10,0	9,2	8,5	8,1	7,9
17. 8.	7,8	7,8	7,7	7,8	8,1	8,4	9,1	9,4	8,8	8,5	8,1	7,8
18. 8.	7,6	7,3	7,2	7,4	8,6	10,0	11,0	10,4	9,6	8,6	7,8	7,6

von der Temperatur her musste sich das Radovnawasser somit während der Nacht und am Morgen im Hypolimnion einschichten, das Zuflusswasser während der Nachmittagsstunden jedoch vorwiegend im untersten Teil (ca. 1 m mächtig) der Sprungschicht.

Die kleineren natürlichen Zuflüsse können bezüglich Einschichtung und Strömungsgeschehen vernachlässigt werden, da sie mengenmäßig unbedeutend waren. Sie wiesen im übrigen auch keine absonderlichen Temperaturen auf wie die Stichproben-Messungen am 30. Juni und am 8./9. Juli 1982 zeigten (Daten von der Hydro-meteorolog. Anstalt SRS). Der Mišca-Bach als einziger grösserer Zufluss wies am 30. Juni um 14.20 Uhr und am 8. Juli um 12.30 Uhr je 12,5 °C auf (vgl. Tab. 2). Er ist somit in der Phase des Tagesmaximums wärmer als die Radovna und dürfte sich deshalb gesamthaft etwas höher einschichten als das Wasser der künstlichen Zuleitung.

4.4 Vermessung

Die Positionsbestimmung des Bootes wurde mit Hilfe eines Theodoliten durchgeführt. Dazu müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- erhöhter Theodolitenstandort mit Sicht auf die Seeoberfläche
- Kenntnis der Koordinaten des Standortes
- Kenntnis der Koordinaten eines Fixpunktes, zur Bestimmung des Azimutes der jeweiligen Bootsposition
- Kenntnis der Seespiegelhöhe und der Instrumentenhöhe, bzw. deren Höhendifferenz.

Bei der Aufnahme eines Vertikalprofiles oder am Anfang und Ende eines Horizontalprofiles wird das Boot mit dem Theodoliten eingemessen. Horizontalwinkel, Vertikalwinkel und Tageszeit werden abgelesen und protokolliert. Mit diesen Angaben können die Koordinaten der eingemessenen Punkte gerechnet werden (ENGEL et al.,

1979, S. 23 ff). Im Bedarfsfall kann die Berechnung mit einem programmierbaren Taschenrechner im Felde geschehen.

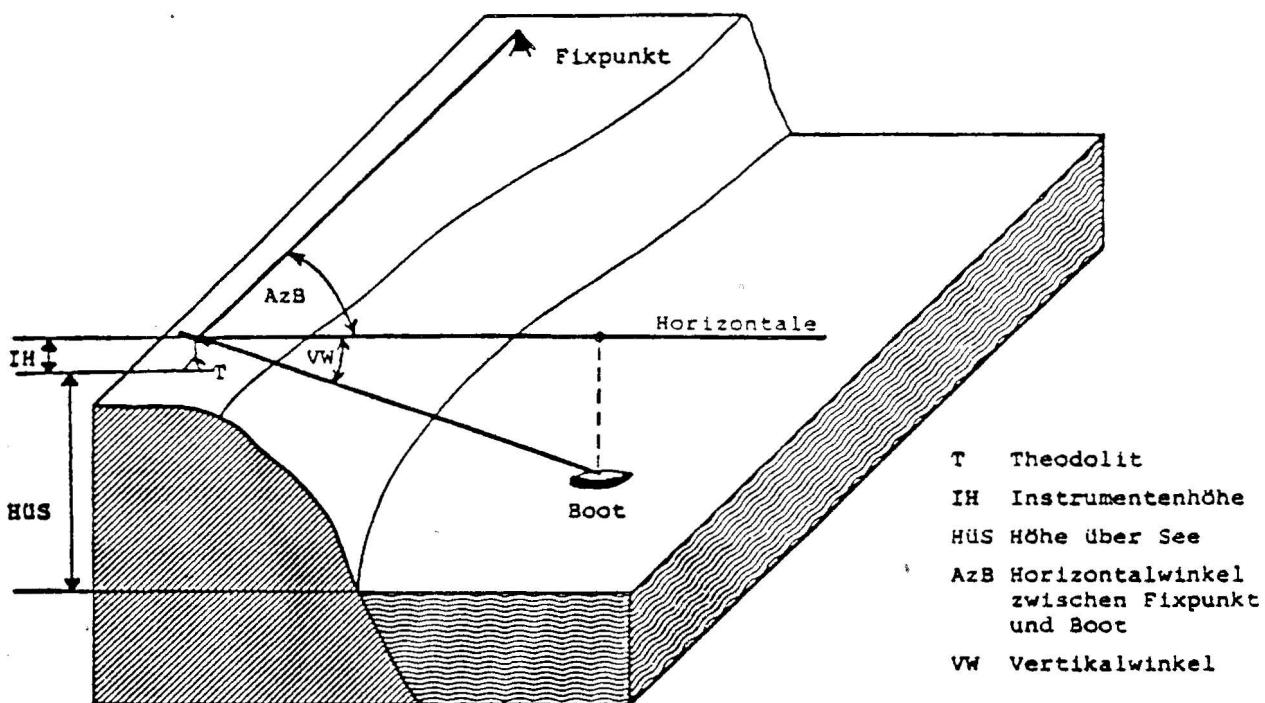


Abb. 5: Prinzip der Positionsbestimmung mit einem Theodoliten (WERTHEMANN, 1980, S. 47).

Eine Aussichtsterrasse der Burg wurde als Theodolitenstandort gewählt. Mit Ausnahme einer kleinen Fläche südwestlich der Insel und in der Bucht der Mišca konnte der ganze See eingesehen werden.

Die Koordinaten des Theodolitenstandortes und dessen Höhe wurden mit Hilfe eines Rückwärtseinschnittes bestimmt. Dazu wurden folgende trigonometrischen Punkte benutzt:

- Kirche Insel Koordinaten y = 430 365.2 x = 135 761.7
Höhe 524,35 m ü. M.
- TP Nr. 523 Koordinaten y = 431 058.9 x = 135 751.9
Höhe 478,76 m ü. M.
- Hilfspunkt an der Uferpromenade von Bled
Koordinaten y = 431 650 x = 136 517
Höhe 467,10 m ü. M.

Der Hilfspunkt wurde durch einen Polygonzug bestimmt vom
TP Nr. 531 Koordinaten y = 431 553.1 x = 136 540.3
Höhe 476,46 m ü. M.

Daraus ergaben sich folgende Standortkoordinaten:

y = 431 179.1 x = 136 546.0
Höhe 595,13 m ü. M.

Die Höhendifferenz Seeoberfläche - Theodolitenstandort betrug
119,2 m.

5. Erster Tracerversuch (Rhodamin-Versuch)

Am 8. Juli 1982 um 10.34 bis 10.52 Uhr wurde der künstliche Zufluss beim Fassungswerk in Grabce mit 8 kg Rhodamin B markiert. Der vorgelöste Farbstoff wurde als konzentrierte Lösung über einen Schlauch direkt in den Stollen eingeleitet. Die anschließende Nachspülung (Gerättereinigung) dauerte noch bis 12.00 Uhr. Die Zuflussmenge betrug 200 l/s, die Wassertemperatur 8,3 °C.

Die im Stollen gelegenen Sedimentationsbecken bewirkten dank der eingeübten Ueberfälle eine gute Durchmischung des Markierstoffes. Durchmischung und Phasenverschiebung zwischen Einspeisung und Eintritt in den See wurden im 2. Sedimentationsbecken durch Probeentnahmen durch die Hydrometeorologischen Anstalt

Tab. 4: Durchlaufszeitpunkte des markierten Wassers im Zuleitungsstollen und Dauer der Einspeisung.

8. Juli 1982	Beginn	Höhepunkt	Ende
Einspeisung (Grabce)	10.34	10.52	12.00
2. Sedimentations-becken	11.15	11.35	13.30
Bledsee (Mündungsbereich der künstlichen Zuleitung)	12.54		~ 16.00 bis 16.30

SRS kontrolliert. Wie die Fliesszeiten der Tabelle 4 zeigen, erreichte das markierte Wasser 41 Minuten nach Einspeisebeginn das 2. Sedimentationsbecken. Bis zum Eintritt in den See benötigte das Wasser dann noch rund doppelt so lange. Das Ende der Einspeisung im See dürfte demnach etwa zwischen 16.00 und 16.30 Uhr gelegen haben.

Die Abgrenzung der Tracerwolken im See erfolgte nach dem in der angegebenen Literatur schon ausführlich beschriebenen Verfahren. Die Bestimmung der Tracer-Fronten zu verschiedenen Zeitpunkten sollte das gesuchte Bild der Strömungsvorgänge aufzeigen. Dazu wurden hauptsächlich horizontale Schleppprofile gefahren. Die Vertikalprofile dienten zur genaueren Erfassung der vertikalen Konzentrationsverteilung. Auf diesen Messfahrten wurde das Messboot durch die auf der Burgplattform stationierte Messmannschaft eingemessen, so dass exakt die räumlich-zeitliche Ausbreitung des markierten Wassers und damit die Strömungen erfasst werden konnten. (vgl. Kap. 4.4).

Da die zwei Mündungen des Zuleitungsstollens je eine Tracerwolke injizierten, mussten zwei sich ausbreitende Farbwolken verfolgt werden. Je nach Grösse einer Tracerwolke benötigte eine solche Abgrenzung zwei bis vier Stunden. Die in Abbildung 6 und 10 fest gelegten einzelnen Wolkenstände liegen deshalb einige Stunden voneinander entfernt.

Die Resultate dieses ersten Versuches mit dem Tracer Rhodamin B sind in den Abbildungen 6, 7, 8 und 9 dargestellt. In den grossen Zügen entsprechen sie den Vorstellungen, die aus den bisherigen Kenntnissen zur Seeströmung ähnlicher Seen dem Versuch modellhaft zugrunde gelegt werden mussten. Erwartungsgemäss schichtete sich das Radovna-Wasser ($8,3^{\circ}\text{C}$) seiner Dichte entsprechend unter der Sprungschicht ein (vgl. Abb. 3). Ebenso ist generell das gesetzmässige Ausbilden der Rechtswirbel mit sekundären Gegenwirbeln und die gesamthaft im See herrschende Linksrotation zu erkennen (Abb. 6). Die doch recht hohen Ausbreitungsgeschwindigkeiten liegen demgegenüber für diesen wenig durchströmten See eher über den Erwartungen.

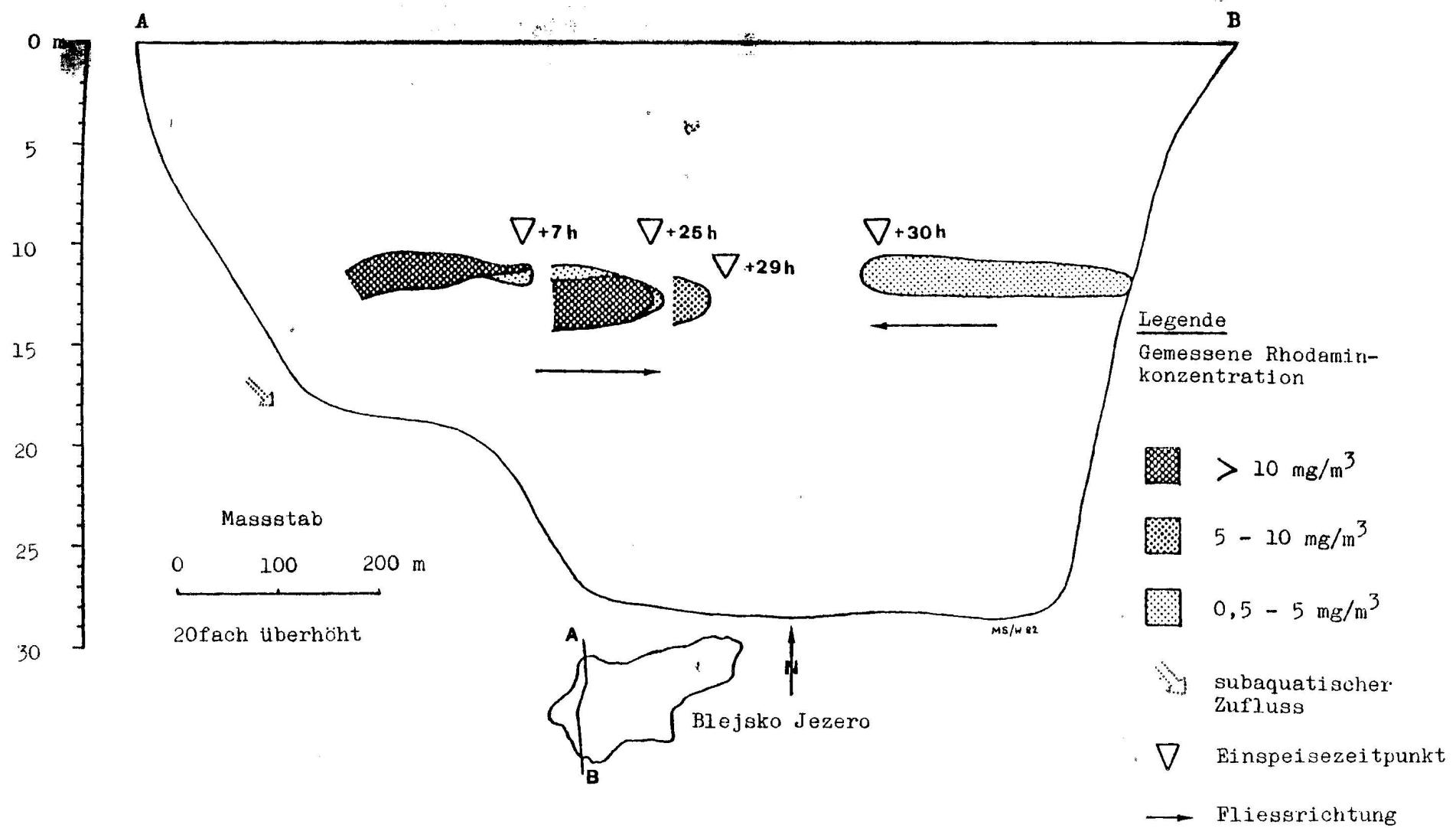


Abb. 7: Rhodamin B-Versuch vom 8. - 12. 7. 1982 im Bledsee
Profilschnitte A - B mit verschiedenen Phasen der Ausbreitung der Tracerwolken
($\nabla + 7 \text{ h}$ = 7 Stunden nach der Einspeisung).

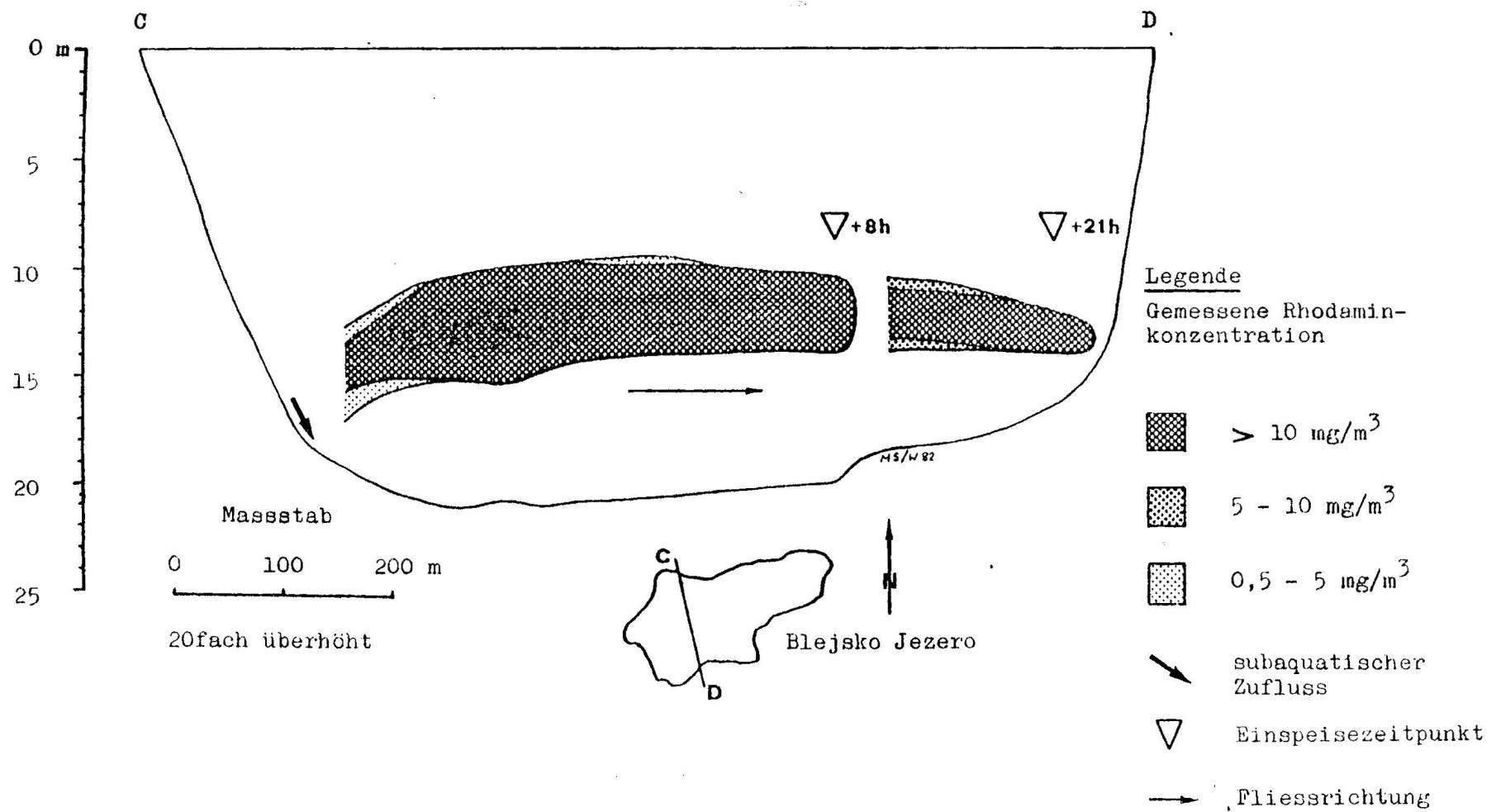


Abb. 8: Rhodamin B-Versuch vom 8. - 12. 7. 1982 im Bledsee
Profilschnitte C - D mit verschiedenen Phasen der Ausbreitung der Tracerwolke
($\nabla + 8 \text{ h} = 8$ Stunden nach der Einspeisung).

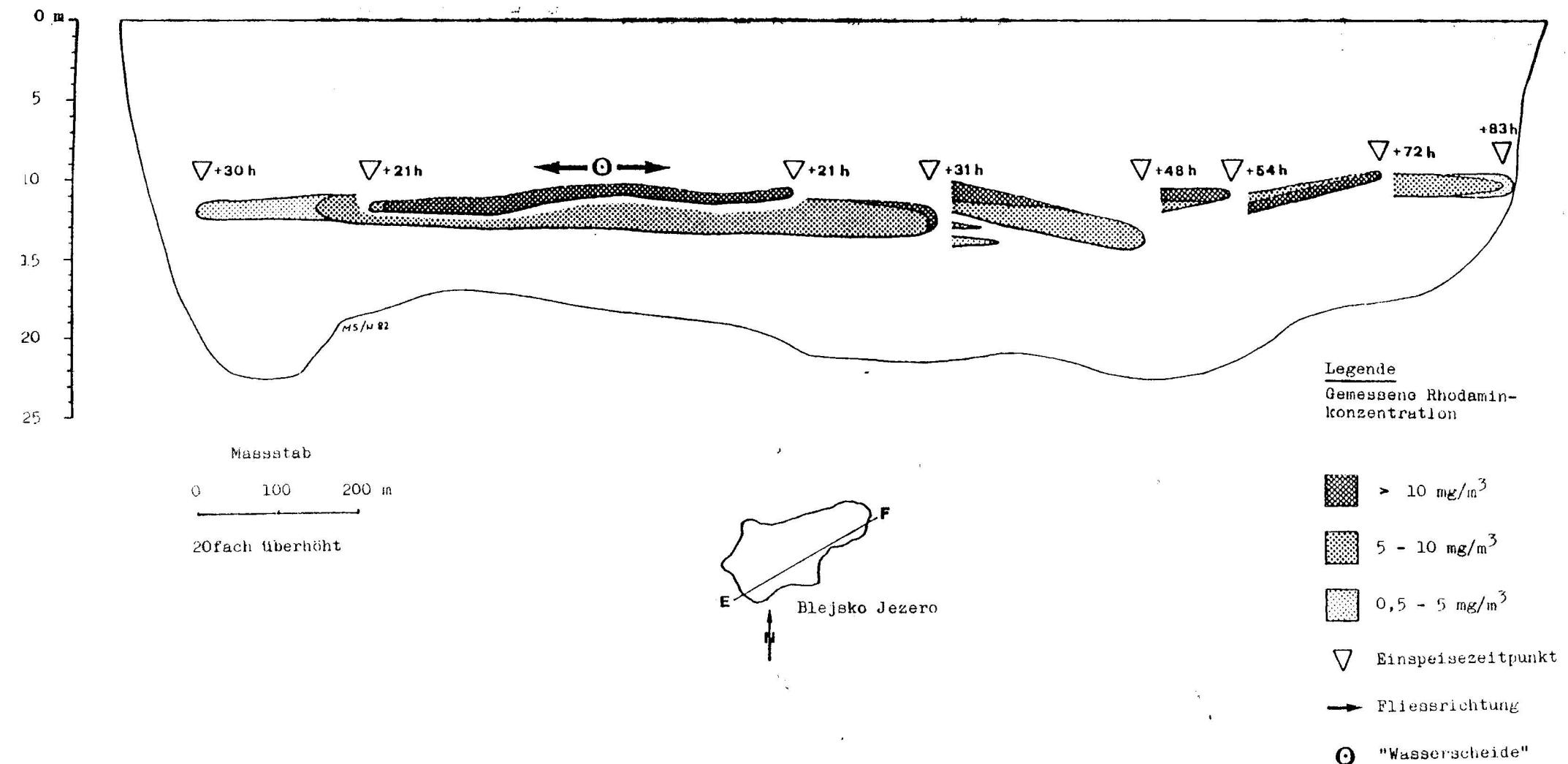


Abb. 9: Rhodamin B-Versuch vom 8. - 12. 7. 1982 im Bledsee
Profilschnitte E - F mit verschiedenen Phasen der Ausbreitung der Tracerwolke
($\nabla + 21\text{ h} = 21$ Stunden nach der Einspeisung).

Resultate und Interpretation können am übersichtlichsten nach den einzelnen Zuständen der Abbildung 6 in zeitlicher Abfolge dargestellt und diskutiert werden.

Die erste Abgrenzung (Stand 8. 7. 1982, mittags) zeigt im Westbecken eine kompakte Tracerwolke, im Ostbecken zeichnet sich zum gleichen Zeitpunkt bereits der beginnende Rechtswirbel ab. Dies sowohl direkt nach dem Austritt als auch an der Front (Abb. 6). Der Vorstoss hält sich mit 150 - 200 m bei beiden Wolken in ähnlicher Größenordnung. Die Konzentrationen liegen noch weit über 10 mg/m^3 .

Der nächste Stand am 8. Juli abends, d. h. rund vier Stunden später, zeigt bereits ein differenziertes Bild. Die Wolke im Westbecken beginnt sich in zwei Lappen aufzuspalten. Der in Rechtsdrehung sich befindende rechte Lappen wird durch die Begrenzung des Ufers gezwungen sich diesem entlang vorwärtszu-schieben. Durch die starke thermische Schichtung wird auch nach oben im Bereich der Sprungschicht "hermetisch" abgeschlossen. Dadurch entsteht eine räumliche Differenz zwischen sichtbarer Uferlinie und der landseitigen Grenze der Tracerwolke um den Betrag Δl (Abb. 10). Neben dieser Farbzunge ist im Westbecken ein Sekundärwirbel zu erkennen, der sich in Richtung Insel ausdehnt. Infolge der zuerst fehlenden Uferbegrenzung kann sich die markierte Wassermasse im Ostbecken freier entfalten. Die schon anfänglich ersichtliche Aufspaltung in zwei Zungen zeigt sich jetzt deutlicher. Dies ist eine Folge der grösseren Dynamik (höhere Zuflussmenge). Der Rechtswirbel direkt nach dem Austritt hat sich weiter in südwestlicher Richtung vorgeschoben. Für die Hauptwassermenge wirken in diesem Stadium die Insel und deren sublimnischer Rücken bereits wie die Uferbegrenzung im Westbecken. Nicht nur die Ausdehnung, auch die Mächtigkeit der beiden "Wolken" ist unterschiedlich. Im Westbecken beträgt sie < 2 m, im Ostbecken ist sie mehr als doppelt so mächtig (Abb. 7 und 8). Da die Lage des Profilschnittes innerhalb der Wolke in den beiden Becken nicht gleich ist, darf daraus nicht zuviel interpretiert werden. Allerdings scheint es doch so, dass der

grössere Zufluss im Ostbecken naturgemäss auch eine mächtigere Tracerwolke injiziert. Die Konzentrationen liegen über 10 mg/m^3 . In Rändlungen, an den "Zungenspitzen" und an der Wurzel können sie infolge Verdünnung geringer sein.

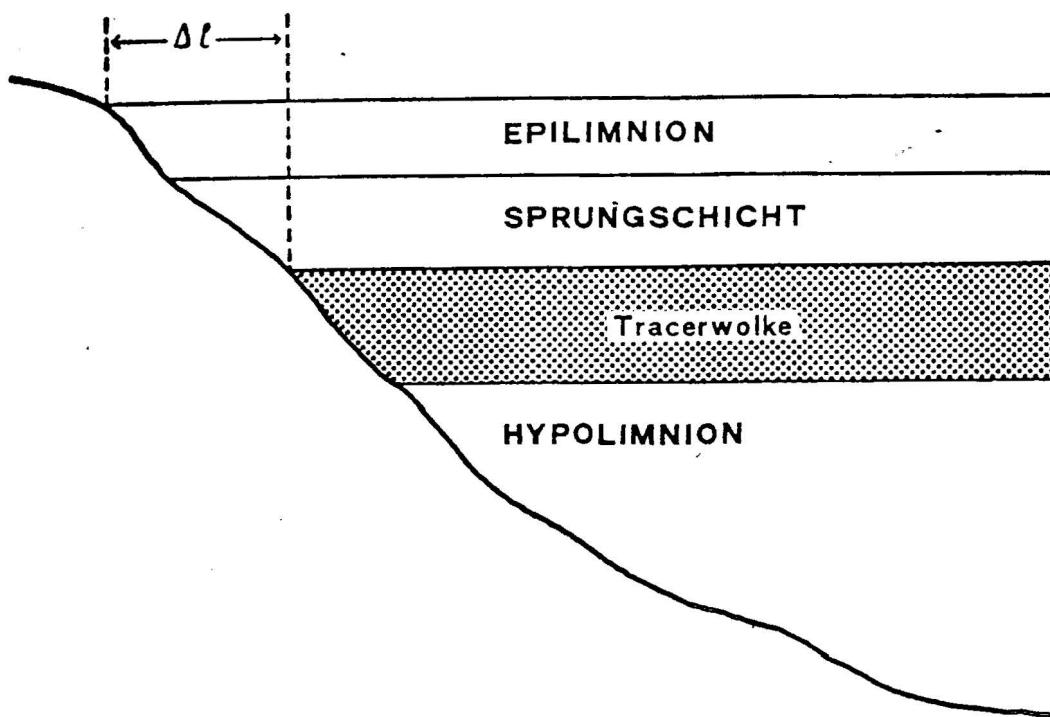


Abb. 10: Schematische Darstellung der Begrenzung der Tracerwolke durch die Ufertopographie und die thermische Schichtung.

Bereits am Morgen des zweiten Tages (9. Juli) hatten die markierten Wassermassen im Ostbecken das Südufer erreicht. In der Folge mussten sie unter dem Druck des nachdrängenden Wassers seitlich ausweichen. Der Beginn dieser Phase entspricht etwa dem "Stand 9. 7. 82 mittags" in Abbildung 6. Im Westbecken verläuft das Strömungsgeschehen langsamer. Die Entwicklung wird stark durch die Seebodentopographie gesteuert. Der rechte, westliche Ast schiebt sich kompakt dem Ufer entlang in Richtung Campingplatz. Der linke, östliche Lappen vermählt sich mit dem küstlichen Teil der Tracerwolke aus dem grossen Becken. Welche Wassermassen aus welcher Zuleitung stammen, kann nicht mehr entschieden werden. Der "Stand 9. 7. 82 mittags" direkt westlich

der Insel dürfte aber hauptsächlich durch die Strömungen aus der östlichen Zuleitung bedingt sein (Abb. 6). Das Profil A - B in Abbildung 7 gibt ungefähr die Verhältnisse im westlichen Teil des kleinen Beckens am frühen Nachmittag des 9. Juli wieder. Die Mächtigkeit der markierten Schicht hat etwas zugenommen. Im Ostbecken dagegen zeigt der Längsschnitt einige Stunden früher eine geringere Mächtigkeit als tags zuvor. Die Konzentration fällt hier bereits in die Stufe $5 - 10 \text{ mg/m}^3$ (Abb. 8). Das Ausweichen dieser Wassermassen infolge der frontalen Uferbegrenzung nach beiden Seiten wird im Querschnitt der Abbildung 9 deutlich. Der Punkt 0 bezeichnet diese "innerlimnische Wasserscheide". Die Geschwindigkeiten haben bereits stark abgenommen. Im Ostbecken liegen sie noch bei $30 - 40 \text{ m/h}$, im Westbecken bei knapp 20 m/h .

Die Ausbreitung beim Stande "9. 7. 82 abends" zeigt die bereits zu Mittag erkennbaren Züge (Abb. 6). Im Westbecken breitet sich das Wasser aus der kleinen Zuleitung nur noch wenig aus. Einerseits wird die "Auffüllung" der Campingplatz-Bucht im Ansatz erkennbar, andererseits werden die Wassermassen weiter dem Ufer entlang vorgeschoben. Die Insel wird nun gänzlich von markiertem Wasser umflossen. Streckenmäßig nochmals weit stösst die Tracerwolke aus der grossen Zuleitung vor. Dabei scheint die Hauptmasse vor dem Südufer nach Osten abgelenkt zu werden. Der Rücken im Seeboden südlich der Insel wirkt als hemmende Schwelle. Trotzdem fliesst eine schmale Wolkenzunge in einem grossen Rechtswirbel weit ins Westbecken vor. Die Längsschnitte in Abbildung 7 zeigen wie sich die immer noch geringmächtigen "Wasserbretter" gegeneinander bewegen ($\nabla + 29 \text{ h}$, $\nabla + 30 \text{ h}$). Der Querschnitt (E - F) durch die Tracerwolke zeigt bezüglich der Mächtigkeit das gleiche Bild. Interessant ist, dass sich nun die höchste Konzentration an der Wolkenspitze befindet und die rückwärtigen Wassermassen bereits stärker verdünnt sind. Die Fliessgeschwindigkeit liegt wieder bei rund 40 m/h im Ostbecken und bei $< 20 \text{ m/h}$ im Westbecken.

Am dritten Tag wird nur noch ein Zustand dargestellt (10. 7. 82 abends). Das Westbecken wird an diesem Tag flächenmäßig vollständig mit markiertem Wasser durchsetzt. Im Ostbecken nimmt die gesetzmässige Linksrotation ihren Fortgang soweit, dass das nördliche Gegenufer und die dort schon markierten Wassermassen wieder erreicht werden. Eingeschlossen bleibt noch ein tracerfreies "Auge" (Abb. 6). Die Mächtigkeit der vorstossenden Zungen wird geringer. Die Konzentrationen sind aber mit $> 5 \text{ mg/m}^3$ weiterhin hoch (Abb. 9). Der Stand im Querprofil bei "V + 48 h" zeigt, dass sich auch lamellenartige weitere Horizonte mit markiertem Wasser nachweisen lassen. Die mittlere Fliessgeschwindigkeit ist auf unter 30 m/h gesunken.

Die Zustände wie sie am 4. und 5. Tag nach der Einspeisung gemessen werden konnten, zeigen die Weiterführung der bisherigen Bewegungen. Das "tracerfreie Auge" in der Seemitte wird ausgefüllt, ebenso eine randliche Partie am Nordufer. Der Vorstoss dem Südufer entlang hält zwar an, aber die am Vortage noch starke Linksrotation der Frontzungen kommt ins Stocken. Die mittleren Fliessgeschwindigkeiten sinken unter 25 m/h. Die Konzentrationen nehmen in der Frontzone ebenfalls stark ab (Abb. 9). Am 12. Juli 1982 wird der Rhodamin-Versuch abgebrochen, da kaum weitere Informationen zu erwarten sind.

6. Zweiter Tracerversuch (Uranin-Versuch)

Für den zweiten Versuch wurde die künstliche Zuflussmenge auf 600 l/s erhöht. Einen Tag später, am Morgen des 13. Juli 1982 wurden 6 kg Uranin von 07.25 bis 07.28 Uhr an der gleichen Stellen in die Zuleitung eingespeist. Die Nachspülung dauerte bis 07.40 Uhr. Die Wassertemperatur betrug 7,3 °C. Zur kleineren Tracermenge entschlossen wir uns, weil infolge des erhöhten Zuflusses eine kürzere Versuchsdauer zu erwarten war. Die Dauer des Einfliessens des markierten Wassers dürfte etwa eine Stunde

betragen haben (08.30 - 09.30 Uhr). Die Messung des markierten Wassers erfolgte nach der gleichen Technik wie im ersten Versuch (vgl. Kap. 5).

Erwartungsgemäss verlief die Ausbreitung der markierten Wassermassen bei diesem zweiten Versuch schneller. Das Muster der einzelnen Zustände zu den verschiedenen Zeitpunkten zeigt aber, dass die flächenhafte Ausbreitung der Wassermassen nach den gleichen Gesetzmässigkeiten abläuft (Abb. 11). Die Corioliskraft-gesteuerten Rechtswirbel treten im Gesamtbild gegenüber der den ganzen See umfassenden Linksrotation zurück. Es ist dies eine Folge der grösseren Stosskraft der nachdrängenden Wassermassen. Obgleich die Dynamik der Strömungen erhöht ist, ergibt sich doch ein gesamthaft weniger differenziertes Bild als im ersten Versuch.

Die Stadien der ersten zwei Tage des Rhodamin-Versuches werden jetzt schon in einem Tag durchlaufen. Das Westbecken wird bereits am zweiten Tag durch markiertes Wasser "aufgefüllt". Im Ostbecken ist ein rasches Vorschieben der Tracerfront zu beobachten. Zum Zeitpunkt des Versuchsabbruches war auch dieser Seeteil fast ganz von "Frischwasser" durchflossen. Allerdings stellt sich auch bei diesem zweiten Versuch im östlichen Beckenteil eine deutliche Verlangsamung der Geschwindigkeiten ein.

Die erhöhte Strömungsdynamik zeigt sich deutlich in den Längsprofil-Darstellungen der Abbildungen 12 und 13. Neben der Ausbildung einzelner "Wasserbretter" (oder Lamellen) sind auch innerhalb der markierten Schicht noch Differenzierungen in Form von stark verschiedener Konzentration vorhanden. Gegenüber dem Rhodamin-Versuch wird nun eine deutlich mächtigere Schicht von rund 8 m von markiertem Wasser eingenommen. Dabei handelt es sich weniger um ein "Auffüllen" als um eine verstärkte Vermischung mit vorhandenem Wasser, das sich dann entsprechend seiner Dichte innerhalb dieser Acht-Meter-Schicht einregelt. Bei der räumlichen Versetzung der Wasserpakete ändern sich offenbar auch die absoluten Einschichtungstiefen.

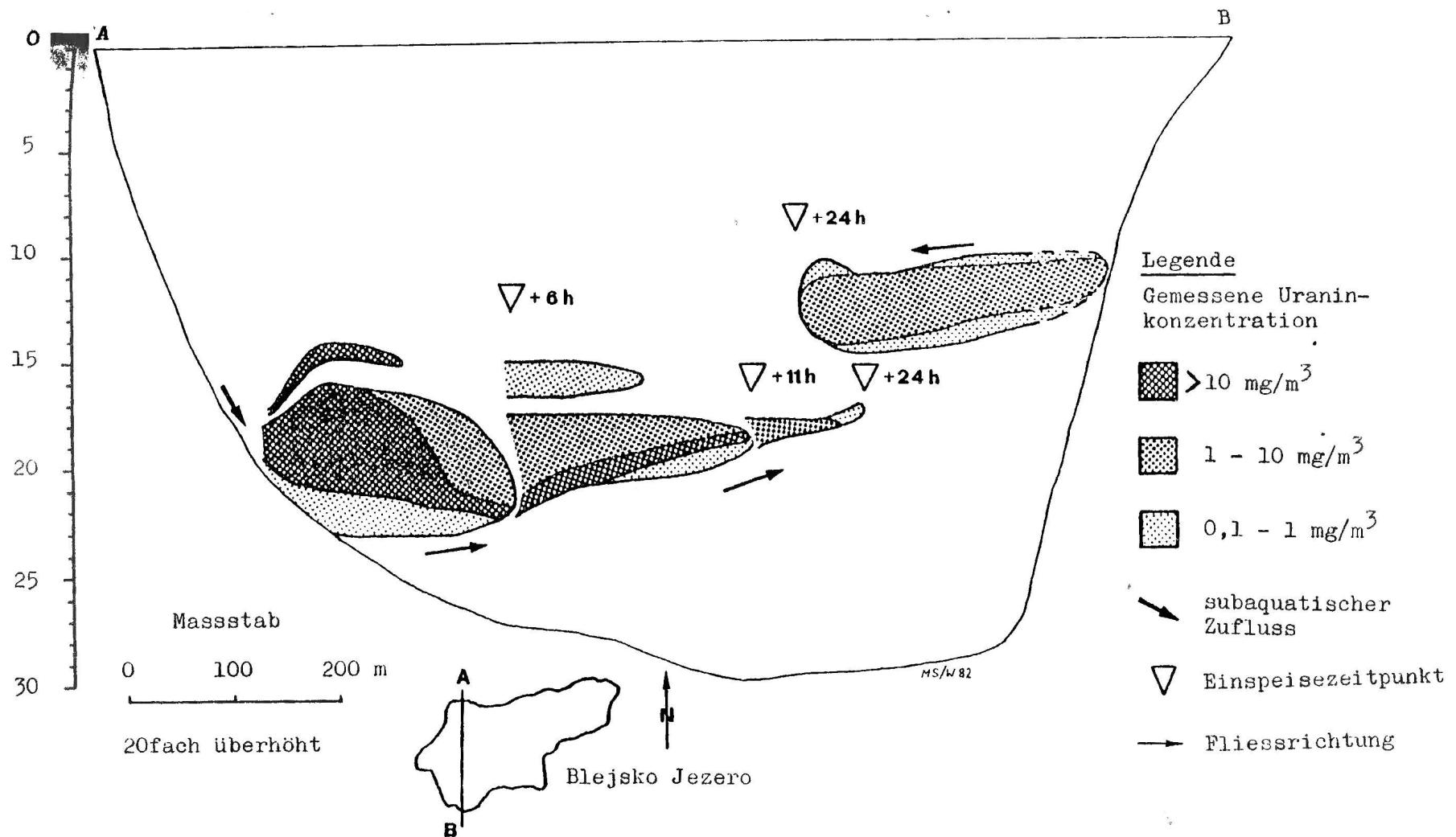


Abb. 12: Uranin-Versuch vom 13. - 16. 7. 1982 im Bledsee
 Profilschnitte A - B mit verschiedenen Phasen der Ausbreitung der Tracerwolken
 ($\nabla + 6 \text{ h} = 6$ Stunden nach der Einspeisung).

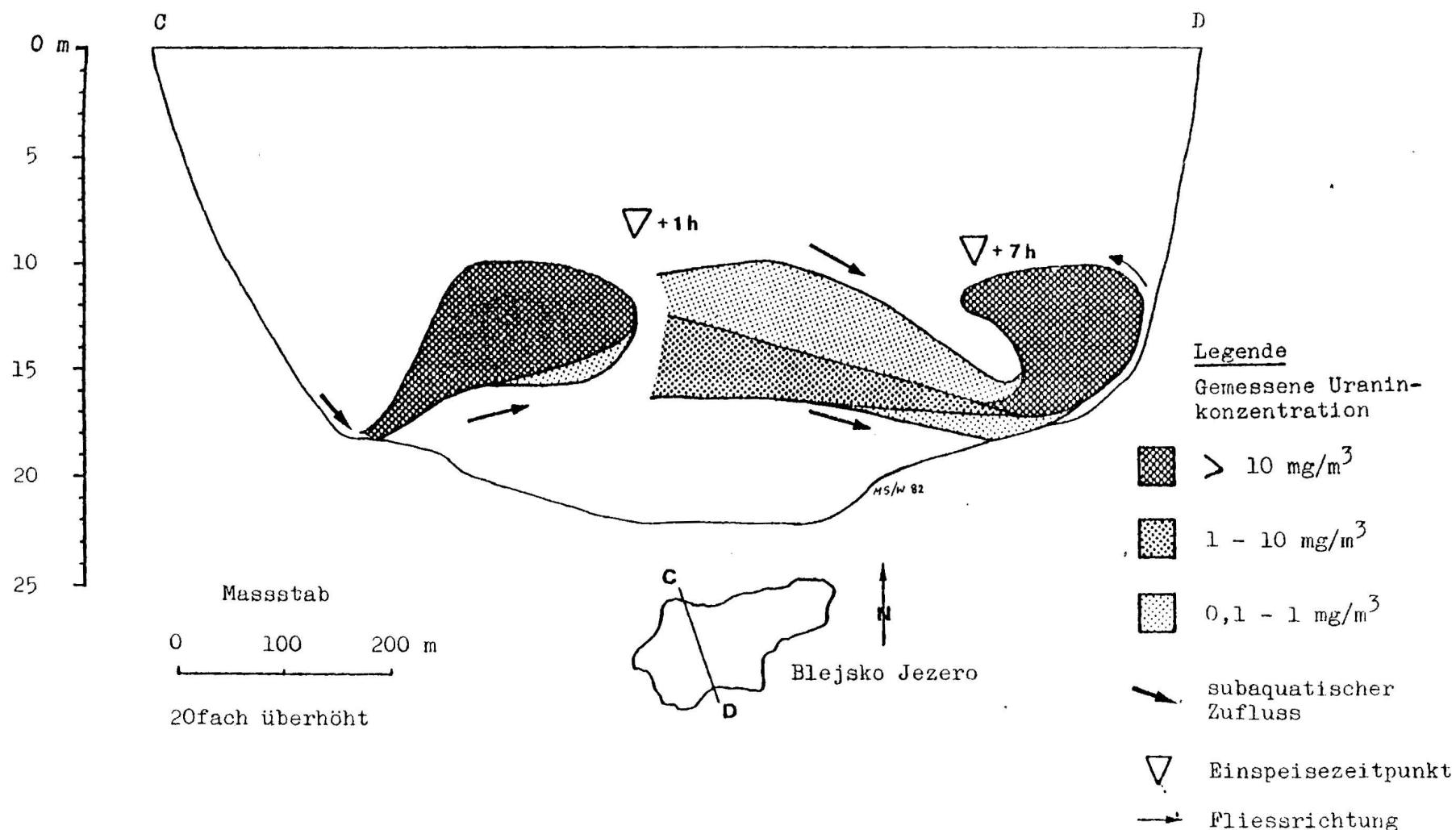


Abb. 13: Uranin-Versuch vom 13. - 16. 7. 1982 im Bledsee
Profilschnitte C - D mit verschiedenen Phasen der Ausbreitung der Tracerwolke
(▽ + 1 = 1 Stunde nach der Einspeisung).

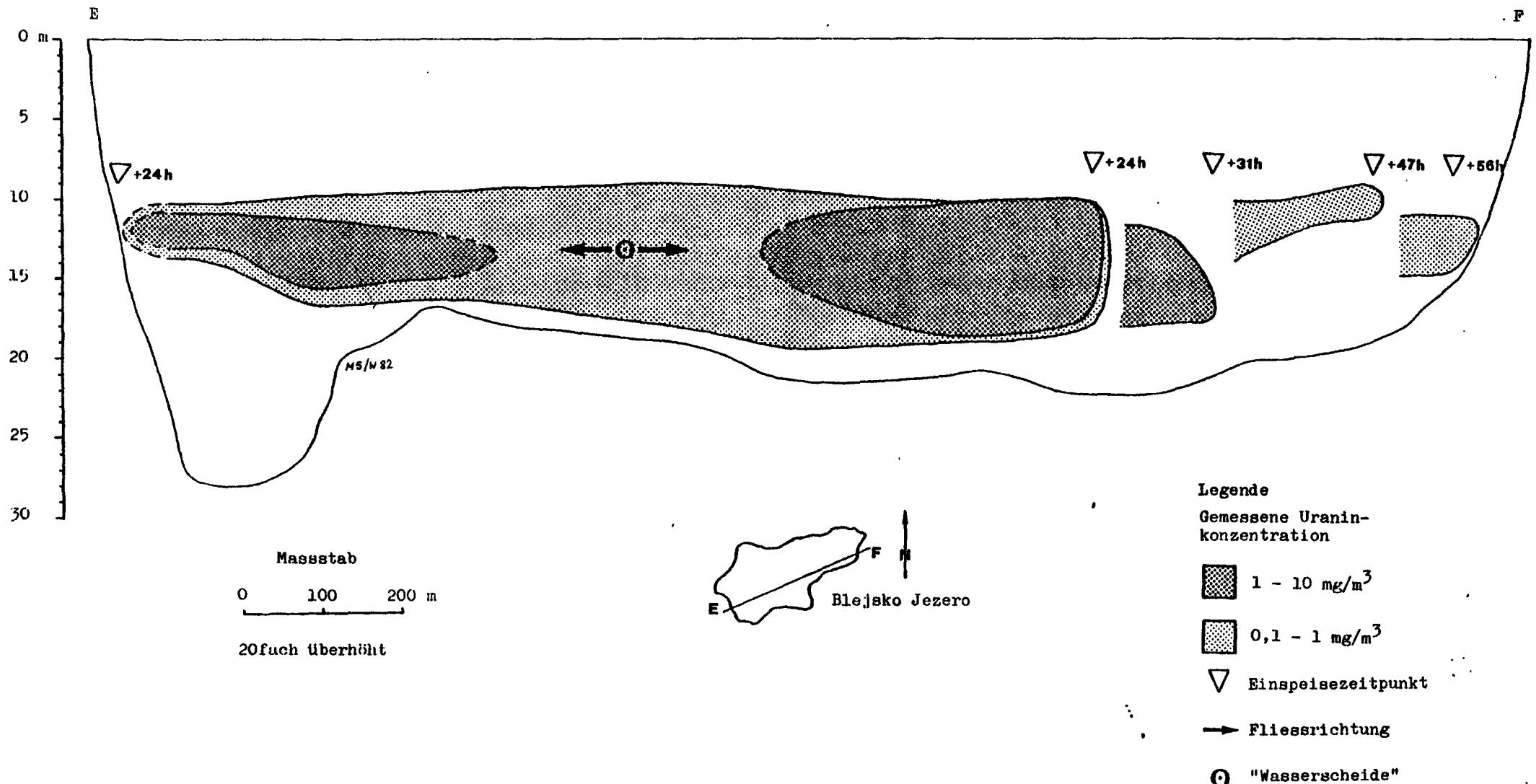


Abb. 14: Uranin-Versuch vom 13. - 16. 7. 1982 im Bledsee
 Profilschnitte E - F mit verschiedenen Phasen der Ausbreitung der Tracerwolke
 ($\nabla + 24 \text{ h}$ = 24 Stunden nach der Einspeisung).

Eine Ursache für diese vertikalen Wellenbewegungen liegt im ausgeprägten Temperatur-Tagesgang des Radovna-Wassers (vgl. Abb. 4). Im Ostbecken steigt die Tracerwolke nach der Zuleitungsmündung bis unter die Sprungschicht auf. Später sinkt sie gegen das Südufer zu wieder auf das Niveau der Mündung ab.

In Abbildung 13 ist das Aufprallen der grossen Wolke am Südufer gut zu sehen. Das rascher nachströmende Radovnawasser bewirkt nicht nur ein beidseitiges Wegfliessen in die zwei Becken, sondern auch ein Aufsteigen bis unter die Sprungschicht (Abb. 13). Im kleinen Becken blieb dann die grosse Wolke gering mächtig, die ausgedünnte, kleine Wolke schob sich darunter. Selbst am letzten Tag konnten noch zwei übereinanderliegende Wolken unterschieden werden. Die Konzentrationen fallen gesamthaft rascher als beim Rhodamin-Versuch.

Im kleinen Becken ergab sich durch die erste Frontabgrenzung eine Einströmgeschwindigkeit von 190 m/h. Später breitet sich die Wolke mit 60, dann mit 50 und schliesslich mit 10 m/h aus. Die grosse Anfangsgeschwindigkeit von 420 m/h im grossen Becken erklärt das geradlinige Fliessen Richtung Süden. Die zweite Abgrenzung ergab noch eine Geschwindigkeit von 150 m/h, die dritte 100 m/h. Am Südufer wurde der nach Westen strömende Teil wieder durch den sublimnischen Rücken auf 30 - 25 m/h abgebremst. Die Zunge entlang des Südufers im grossen Becken bewegte sich zuerst mit 60 und dann mit 25 bis 12 m/h gegen Bled zu.

7. Interpretation der Resultate und Schlussfolgerungen

Aus den Entwicklungsstadien der Ausbreitung des markierten Wassers der beiden Versuche, wie sie in den Abbildungen 6 und 11 flächenhaft dargestellt sind, lässt sich ein generelles Strömungsbild erkennen. Beide Versuche zeigen das gesetzmässige Strömungsverhalten in Rechtswirbel - Linksrotation - Durchflu-

tung eines Seebeckens gemässigter Breiten auf der Nordhalbkugel, wie es P. NYDEGGER (1976) aufgezeigt hat. Seeboden topographie, Seeform, Zuflussmengen, Zu- und Abflussstandorte sowie die thermischen Verhältnisse modifizieren diese grundsätzlichen Verhältnisse von See zu See in anderer Weise. Die Abbildung 15 zeigt die Strömungsbilder für die beiden Versuche. In ihren generellen Linien darf dieses Bild als der prinzipiellen Strömungsmechanismus des Bledsees bei Sommerstagnation im Bereich von 200 - 600 l/s künstlichen Zuflusses bezeichnet werden.

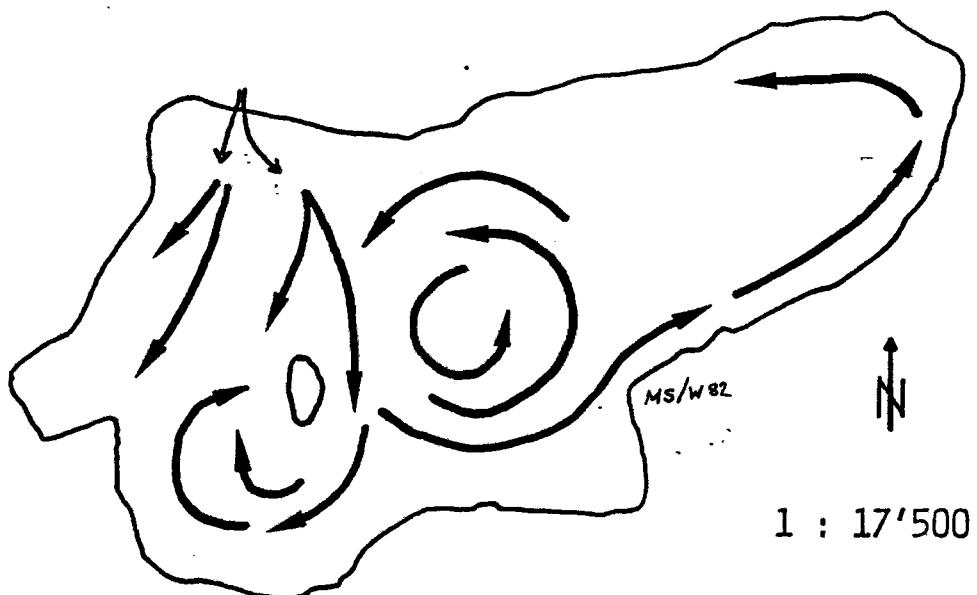


Abb. 15: Schematisches Strömungsbild des Bledsees in der Einschichtungstiefe des künstlichen Zuflusses ($Q = 200 - 600 \text{ l/s}$) bei Sommerstagnation.

Die gezeichneten Strömungslinien der beiden Versuche lassen aber auch Unterschiede erkennen. Entsprechend der verschieden grossen Zuflussmengen und damit Zuflussgeschwindigkeiten sind die Radien der Strömungswirbel beim zweiten Versuch (600 l/s) länger. Die Durchflutung ist bei erhöhter Zuflussmenge vollständiger.

Die aus Frontabgrenzung berechneten Ausdehnungsgeschwindigkeiten der Tracerwolken sind im West- und Ostbecken verschieden. Wie

die Werte der Tabelle 5 zeigen, sind sie auch abhängig von der Zuflussmenge. Die Geschwindigkeiten sind als gemittelte Richtwerte für die angegebenen Tage zu verstehen. In einzelnen Bereichen und Phasen können sie beträchtlich über- oder unterschritten worden sein. Bei 200 l/s Zufluss sind die Ausdehnungsgeschwindigkeiten im Westbecken zwei bis drei mal kleiner als im Ostbecken. Bei 600 l/s Zufluss rund 2 - 4 mal. Ein Vergleich der Geschwindigkeiten der beiden Versuche zeigt, dass bei der höheren Zuflussmenge die Ausdehnungsgeschwindigkeiten ungefähr verdoppelt werden. Der See wird somit bei einer Steigerung von 200 auf 600 l/s Zufluss etwa doppelt so schnell mit Frischwasser versorgt.

Tab. 5: Ausdehnungsgeschwindigkeiten der Tracerwolken im West- und Ostbecken.

	Rhodamin-Versuch		Uranin-Versuch	
	West-B.	Ost-B.	West-B.	Ost-B.
1/2 Tag	28 m/h	63 m/h	50 m/h	150 m/h
1 Tag	15	40	40	100
2 Tag	10	35	20	70
3 Tag	-	25	-	50
4 Tag	-	20	-	40

Neben der flächenhaften Ausbreitung ist für die Beurteilung des Durchflutungsgrades auch die vertikale Ausbreitung des Zuflusswassers zu betrachten. Der Vergleich der vertikalen Ausdehnung beim ersten Versuch (Abb. 7, 8, 9) mit jener im zweiten Versuch (Abb. 12, 13, 14) zeigt die deutlich mächtigere Schicht Zuflusswasser bei höherer Zuflussmenge. Während hier die vertikale Ausdehnung während der Versuchsdauer bis gegen 10 m beträgt, liegt sie beim ersten Versuch nur bei maximal 5 m. Das grössere Zuflussvolumen muss folgerichtig auch ein entsprechend grösseres Seewasservolumen verdrängen. Die vollständigere Durchflutung bei erhöhter Zuflussmenge bestätigt sich auch aus dieser Sicht.

Mit der flächenhaften und vertikalen Ausbreitung und den Ausbreitungsgeschwindigkeiten des markierten Wassers sind Antworten auf die Frage nach der Versorgung des Bledsees mit Frischwasser gegeben. Die vorliegenden Resultate aus den sich über zwei Wochen erstreckenden Feldversuchen, sollten noch bezüglich ihrer längerfristigen Wirkung interpretiert werden. Wir können dabei vom vereinfachten "Wasser - Wärmehaushalts-Schema" für den Bledsee ausgehen, wie es in Abbildung 16 skizziert ist. Diese (natürliche) Ausgangssituation wird durch die künstliche Einleitung von 200 l/s Radovna-Zufluss (Q_1) ins Hypolimnion bei gleichzeitiger Ableitung des Tiefenwassers (Q_2) über Grund verändert. Die Veränderung ist jedoch einrichtig. Da $Q_1 < Q_2$, erfolgt keine Spiegelhebung und damit kein zusätzlicher oberirdischer Abfluss (A_{Q_2}). Das Hypolimnionwasser wird sukzessive unten abgebaut und oben durch "Frischwasser" ersetzt. Dieser Austausch erfolgt langsam. Bei den im Sommer 1982 angetroffenen thermischen Verhältnisse, die als repräsentativ für die Sommerstagnation gelten können, liegt die untere Grenze der Sprungschicht bei rund 12 m. Der aus der hypsographischen Kurve berechnete Inhalt des Hypolimnions liegt demnach bei rund $10,3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Für 200 l/s Zufluss beträgt die theoretische Erneuerungsrate somit rund 2 Jahre. Es gilt zu beachten, dass dies die Zeit für die totale Erneuerung ist, dass jedoch, wie dies die Resultate der Tracerversuche zeigen, die "Durchsetzung" des Hypolimnions mit Frischwasser wesentlich rascher erfolgt.

Durch Beprobung des abfliessenden Tiefenwassers konnten diese modellhaften Ueberlegungen überprüft werden. Die von M. ZUPAN durchgeföhrten Analysen ergaben während rund 2 Monaten einen Rhodamin-freien Tiefenwasserabfluss. Am 30. August beginnt ein schwacher Tracerdurchgang mit gleichbleibender Konzentration von $0,01 \text{ mg/m}^3$ Rhodamin bis 17. September. Die zwei letzten Proben zeigen einen Konzentrationsanstieg. Das zugeführte Radovnawasser brauchte somit knapp zwei Monate, bis es den Seegrund erreichte.

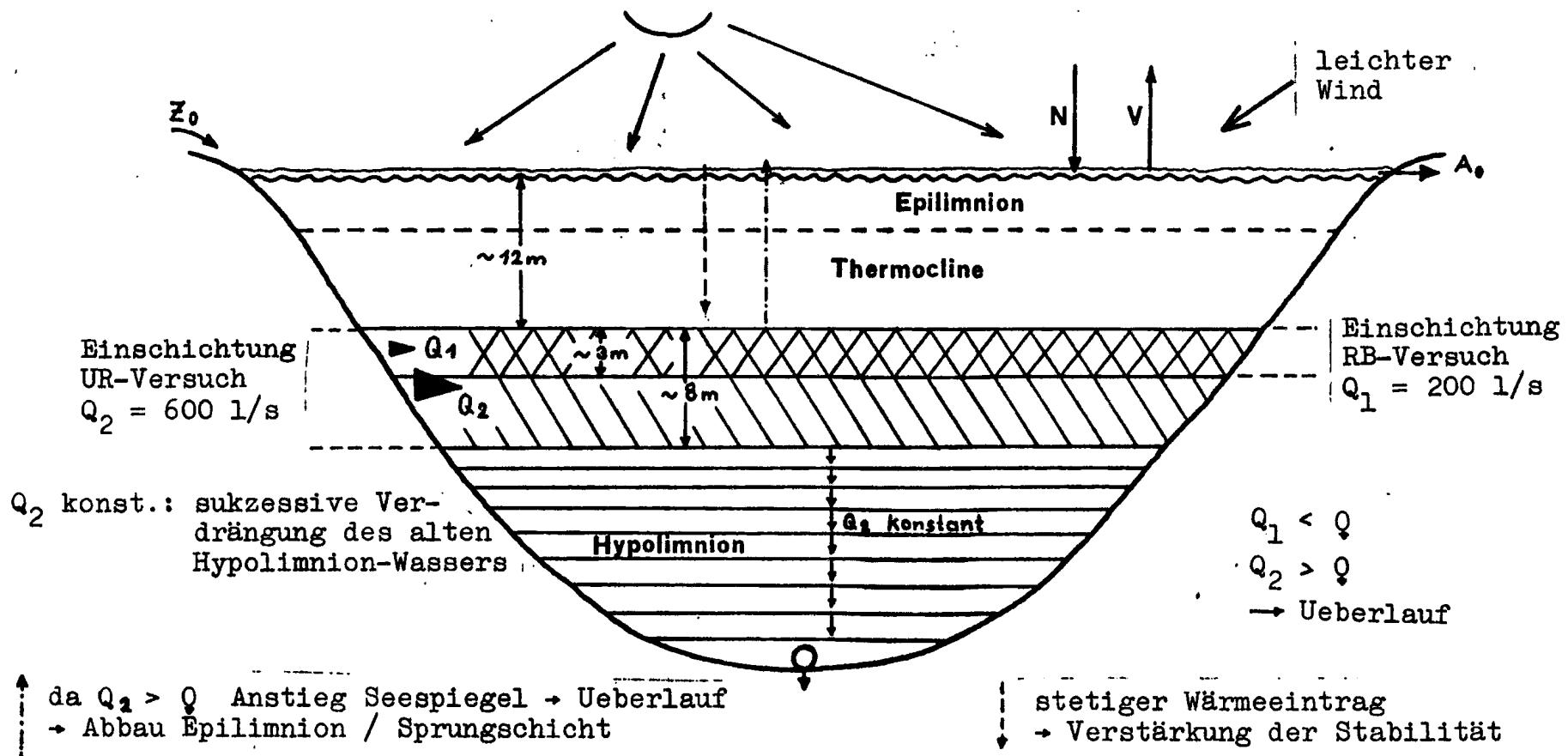


Abb. 16: Schematisches Wasser-Wärmehaushaltsmodell des Bledsees bei Sommerstagnation.
Es zeigt die unterschiedliche Reaktion auf verschiedene Zuflussmengen und die Erhaltung der thermischen Stabilität trotz Einleitung von Wasser ins Hypolimnion ($Q \leq 600 \text{ l/s}$).
Die Einflussgrößen sind nur teilweise quantifiziert.

Wird nun die Zuflussmenge auf 600 l/s erhöht (Q_2), ändern sich weitere Faktoren. Q_2 wird grösser als die Tiefenwasserableitungsmenge Q , die maximal 380 l/s beträgt. Damit ist ein Schwellenwert überschritten. Dies bewirkt, dass die vertikale Ausdehnung der eingeschichteten Frischwassermassen auch nach oben gegen die Sprungschicht hin erfolgt. Als Ganzes werden die überliegenden Wassermassen etwas angehoben. Der resultierende Spiegelanstieg im See hat einen oberirischen Abfluss beim Ueberlauf zur Folge. Der damit verbundene "Abbau" des Epilimnions bleibt aber während des Sommers gering. Der Austausch an der Sprungschicht-Untergrenze durch aufsteigendes Tiefenwasser bleibt auf die Schichtungsverhältnisse ohne Folgen. Der Wärmeverlust wird durch den weiteren Strahlungswärme-Eintrag kompensiert. Die stabile Schichtung wird daher über diesen Mechanismus auch bei 600 l/s nicht merkbar gestört.

Die Verdrängung des Tiefenwassers durch die erhöhte Frischwasserzufuhr erfolgt um den Betrag der grösseren Ableitungsmenge schneller. Die theoretische Erneuerungsrate für die gleichen Schichtungsverhältnisse beträgt nun 200 Tage. Die Kontrolle des abgeleiteten Tiefenwassers auf Uranin ergab denn auch tatsächlich ein wesentlich schnelleres Durchsetzen des Hypolimnions mit Frischwasser. Der Seegrund wurde durch markiertes Wasser bereits am 17. Juli 1982 erstmals erreicht (Tab. 6). Die Konzentrationen und damit der Frischwasseranteil blieben bis anfangs September gering. Ab Mitte September stiegen die Konzentrationen deutlich an. Weitere Interpretationen dazu und zu den auch im Ueberlauf bei Mlino ab Ende August sporadisch auftretenden Tracerkonzentrationen, könnten nur in Kenntnis der hydro-meteorologischen und thermischen Randbedingungen vorgenommen werden.

Die Einleitung von im Tagesgang ungleich erwärmtem Radovnawasser wirkt sich günstig aus, da vertikale Dynamik in Verbindung mit der horizontalen Zirkulation stark angeregt wird. Sollte aus irgendeinem Grunde jemals die Gefahr der Zerstörung der

Schichtung durch die Zuleitungswassermassen bestehen, könnte vorübergehend nur nachtkaltes Wasser (22 - 08 Uhr) eingeleitet werden (Tab. 3).

Tab. 6: Tracerkonzentration im Abfluss der Tiefenwasserableitung vom 8.7. - 8.11.1982 (Datenerhebung: Hydrometeorologische Anstalt SRS).

Datum	T ° C	Uranin mg/m ³	Rhodamin mg/m ³	Datum	T ° C	Uranin mg/m ³	Rhodamin mg/m ³
8.7.		n.n.	n.n.	5.8.	6,5	0,010	n.n.
9.7.		n.n.	n.n.	8.8.		0,005	n.n.
10.7.		n.n.	n.n.	9.8..	6,5	n.n.	n.n.
11.7.		n.n.	n.n.	10.8.		0,007	n.n.
12.7.		n.n.	0,06?	11.8.		0,013	n.n.
13.7.		n.n.	n.n.	12.8.		0,013	n.n.
14.7.		0,15	n.n.	23.8.		0,006	n.n.
15.7.		0,024	n.n.	24.8.		0,009	n.n.
16.7.		0,041	n.n.	25.8.		0,007	n.n.
17.7.		0,008	n.n.	26.8.		0,010	n.n.
19.7.	6,6	0,005	n.n.	30.8.		0,010	0,01
21.7.		0,007	n.n.	31.8.	7,2	0,012	0,01
22.7.	6,6	0,030	n.n.	1.9.	7,3	0,012	0,01
23.7.	6,6	0,015	n.n.	2.9.		0,008	0,01
25.7.	6,5	0,010	n.n.	3.9.		0,006	0,01
26.7.	6,5	0,011	n.n.	13.9.	7,6	0,023	0,01
27.7.	6,6	0,006	n.n.	14.9.	7,5	0,018	0,01
28.7.	6,5	0,010	n.n.	15.9.	7,6	hoher Messuntergr.	
30.7.	6,5	0,006	n.n.	16.9.		0,032	0,01
2.8.		0,005	n.n.	17.9.		0,038	0,01
3.8.	6,5	0,008	n.n.	19.10.		0,042	0,02
4.8.	6,5	0,007	n.n.	8.11.		0,058	0,03

Bezüglich der gestellten Frage nach der Wirkung der unterirdischen Zuflussmenge kann mit Sicherheit gesagt werden, dass die höhere Zuflussmenge von 600 l/s eine wesentlich bessere Durchflutung des Sees erzeugt. Die Wirkung auf die beabsichtigte Sanierung des Bledsees ist deutlich grösser als bei 200 l/s. Eine Gefährdung der stabilen Sommerschichtung ist nicht abzusehen. Allenfalls wird dadurch ein früheres Zusammenbrechen der Schichtung im Herbst in der Grössenordnung von Tagen erwirkt.

Zusammenfassung

In Zusammenarbeit mit der Hydrometeorologischen Anstalt SRS führte die Abteilung Gewässerkunde des Geographischen Instituts der Universität Bern Tracerversuche zur Seeströmung im Bledsee und begleitende limnologische und hydrologische Untersuchungen durch. Getestet wurden zwei verschiedene Zuflussmengen von 200 bzw. 600 l/s der künstlichen Zuleitung aus der Radovna bei Sommerstagnation im See. Als Tracer kamen Rhodamin B und Uranin zum Einsatz. Das angewendete Variosens-Verfahren hat sich zur Untersuchung der Seeströmung wiederum ausgezeichnet bewährt.

Aus den Tracerversuchen ergab sich das Bild der gesetzmässigen Strömungsverhalten in Rechtswirbel - Linksrotation - Durchflutung eines Seebeckens gemässigter Breiten auf der Nordhemisphäre. Die Seeboden topographie hat einen deutlichen Einfluss auf die Seeströmungen. Ein völliges Durchströmen des ganzen Seebeckens ist nur bei 600 l/s Zufluss gewährleistet. Die Wirkung bezüglich Versorgung des Hypolimnions mit Frischwasser ist bei dieser Zuflussmenge wesentlich höher. Die stabile Schichtung wird nicht gestört.

Literatur

- ENGEL J. et al., 1979: Strömungen im Murtensee. Zweitarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- GRADNIK R., o.J.: Toplinski odnošaji v Blejskem in Bohinjskem jezeru. o. Ort.
- HIRSIG P., 1981: Markierung von gereinigtem Abwasser und dessen Verfolgung im See mittels fluoreszierender Tracer, am Beispiel der ARA der Region Murten. Geographisches Institut der Universität Bern.
- HIRSIG P., LEIBUNDGUT Ch., NYDEGGER P., 1982: The present situation regarding the use of fluorescent tracers in limnology. In: Tracermethoden in der Hydrologie, Tagungsbericht des 4. SUWT, Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 28, Teil II, S. 495 - 510, Bern.
- LEIBUNDGUT Ch., HIRSIG P., 1977: Zur Anwendung fluoreszierender Tracer in der Limnologie. In: Gas, Wasser, Abwasser, Nr. 12, S. 833 - 841.
- NYDEGGER P., 1967: Untersuchungen über den Feinstofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflussbedingten Strömungen im Brienzersee und einigen Vergleichsseen. Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 16. Bern.
- NYDEGGER P., 1976: Strömungen in Seen: Untersuchungen in situ und an nachgebildeten Modellseen. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kl. Mitt., Nr. 66. Bern.
- RISMAL M., 1980: The judgement of individual methods for sanitation the lake of Bled. In: Gradbeni vestnik, 29 (2-3), p. 34 - 46.
- VRHOSEK D., KOSI G., ZUPAN M., 1981: The condition of lake Bled from september 1979 to december 1980 evaluated with phytoplankton and physico-chemical parameters. Biološki vestnik, 29 (2), p. 157 - 180.
- WERTHEMANN B., 1980: Physikalisch-limnologische Untersuchungen mittels fluoreszierender Tracer. Lizentiatsarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

