

Diss. ETH Nr. 7419

# **Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz**

Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung

**ABHANDLUNG**

zur Erlangung des Titels eines  
Doktors der technischen Wissenschaften  
der

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH**

vorgelegt von  
**FRITZ ZOLLINGER**  
Dipl. Kulturing. ETH  
geboren am 4. August 1949  
von Zürich und Küsnacht (Kanton Zürich)

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. H. Grubinger, Referent  
Prof. Dr. D. Vischer, Korreferent

**Zürich 1983**

Als Reserveversicherung wird die Anlage  
eines Geschiebeablageplatzes an der  
Ausmündung in das Thal empfohlen.

F. Wang, 1902

I N H A L T

=====

Vorwort	9
Zusammenfassung, Résumé, Abstract	10
<u>1. Einleitung</u>	15
1.1. Goethes Zauberlehrling und die Geschiebeablagerungsplätze	15
1.2. Begriffe	15
1.3. Geschiebeablagerungsplätze und umfassende Wildbachverbauung	17
1.4. Ziele der Arbeit	20
1.5. Zur Methodik der Arbeit	21
1.5.1. Grundsätzliches	21
1.5.2. Praktische Beispiele	22
1.5.3. Literatur	22
1.5.4. Modellversuche	23
1.6. Inhalt und Aufbau der Arbeit	23
<u>2. Modellversuche</u>	25
2.1. Uebersicht	25
2.2. Modellanordnung	25
2.2.1. Ablagerungsplatz und Zulauf	25
2.2.2. Wasser- und Geschiebebeschickung	26
2.2.3. Modellauslauf	28
2.3. Versuche	29
2.3.1. Geschiebeablagerungsplatz Schächen	29
2.3.2. Ablagerungsformen	30
2.3.3. Spülformen	31
2.3.4. Simulation von Hochwasserganglinien	31
2.3.5. Optimale Sperröffnungen	33
2.3.6. Treibholz	35
2.4. Messungen im weiteren Sinn	36
2.5. Auswertung und Umsetzbarkeit der Modellversuche	38
2.5.1. Photogrammetrische Auswertungen	39
2.5.2. Ueberlegungen zur Reproduzierbarkeit der Versuche	40
2.5.3. Modellgesetze	45
2.6. Modellversuche und Praxis	48
<u>3. Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz (Ueberblick)</u>	49
3.1. Die Teile eines Ablagerungsplatzes	49
3.2. Das Wasser im Geschiebeablagerungsplatz	49
3.3. Das Geschiebe im Ablagerungsplatz	49
3.4. Das Treibholz im Ablagerungsplatz	52
3.5. Parameter zur Steuerung von Ablagerungen und Spülungen	52
<u>4. Die Ablagerungsformen</u>	54
4.1. Uebersicht	54
4.2. Der geomorphologische Begriff des Schwemmkegels	54

4.3. Freie Schwemmkegelbildung	56
4.3.1. Veraltete Vorstellungen	56
4.3.2. Neueste Erkenntnisse	58
4.3.2.1. Uebersicht	58
4.3.2.2. Schwemmkegelbildung Phase 1	59
4.3.2.3. Schwemmkegelbildung Phase 2	62
4.3.2.4. Schwemmkegelbildung Phase 3	71
4.4. Behinderte Schwemmkegelbildung	72
4.4.1. Uebersicht	72
4.4.2. Wasserstau	72
4.4.3. Begrenzungen längs der Fließrichtung	76
4.4.4. Begrenzungen quer zur Fließrichtung	79
4.4.4.1. Begrenzung nach hinten	79
4.4.4.2. Begrenzung durch die Rückhaltesperre	79
4.4.5. Topographische Behinderungen	82
4.4.6. Mischformen	83
4.5. Ablagerungen ohne Einlaufabsturz	85
4.5.1. Einleitung	85
4.5.2. Ohne Wasserstau	85
4.5.3. Mit Wasserstau	85
4.6. Zusammenfassung	87
5. <u>Die Spülformen</u>	90
5.1. Uebersicht	90
5.2. Die Ursachen für die Spülungen	90
5.3. Spülungen bei sinkendem Wasserstau	91
5.4. Spülungen bei Wasserstau	96
5.5. Spülungen ohne Wasserstau	97
5.6. Allgemeines zu den Spülungen	98
5.6.1. Spülungen aus überdimensionierten Ablagerungsplätzen	98
5.6.2. Selektive Spülung des Materials	98
5.6.3. Berechnung der Spülungen	100
5.7. Zusammenfassung	100
6. <u>Selbsttätige Entleerungen</u>	103
6.1. Einführung in das Problem	103
6.2. Untersuchungen und praktische Abklärungen	104
6.2.1. Modellversuche	104
6.2.2. Praktische Erfahrungen	110
6.3. Ergebnisse	110
6.3.1. Ablauf einer selbsttätigen Entleerung	112
6.3.2. Wasser- und Geschiebezufuss	112
6.3.3. Stauverhältnisse im Ablagerungsplatz	113
6.3.4. Ablagerungsplatz	114
6.3.5. Rückhaltesperre	114
6.3.6. Allgemeines	115



6.4. Künstliche Hilfen	116
6.4.1. Lösung von Verklausungen	116
6.4.2. Baggerungen	116
6.4.3. Einbauten	119
6.5. Zusammenfassende Voraussetzungen für erfolgreiche selbsttätige Entleerungen	119
7. Die Parameter zur Steuerung von Ablagerungen und Spülungen	121
7.1. Uebersicht	121
7.2. Das Einlaufbauwerk	121
7.3. Das Rückhaltebauwerk	121
7.3.1. An Rückhaltebauwerke gestellte Erwartungen	122
7.3.2. Die Sperrentypen	122
7.3.3. Retendieren, dosieren, sortieren	123
7.3.4. Schlitze	127
7.3.5. Balken und ihre Zwischenräume	127
7.3.5.1. Balkenabstand	127
7.3.5.2. Vergleich mit den Schlitzen	128
7.3.5.3. Zur Balkenkonstruktion	131
7.3.6. Zum Ausfluss und Rückstau von Sperrenöffnungen	131
7.4. Zum Volumen eines Geschiebeablageungsplatzes	134
7.4.1. Die zu erwartende Geschiebefracht	134
7.4.1.1. Denudation	135
7.4.1.2. Schwemmkegel	135
7.4.1.3. Stattgefundene Ereignisse	136
7.4.1.4. Beurteilung des Einzugsgebietes	137
7.4.1.5. Formeln	137
7.4.1.6. Abschliessende Bemerkungen	139
7.4.2. Die Optimierung des Beckenvolumens	140
7.4.2.1. Der Wasserrückstau im Ablagerungsbecken	140
7.4.2.2. Die Länge des Beckens	140
7.4.2.3. Das Verlandungsgefälle	145
7.4.2.4. Das Rückhaltevermögen der Ablagerungsplätze	146
7.5. Zur Form der Ablagerungsplätze	150
7.5.1. Praktische Erfahrungen	150
7.5.2. Modellversuche von Hampel	152
7.5.3. Eigene Modellversuche	153
7.5.3.1. Qualitative Auswertungen	153
7.5.3.2. Quantitative Auswertungen	155
7.6. Zusammenfassung	156
8. Das Treibholz und die damit verbundenen Probleme	158
8.1. Das Treibholz als Material	158
8.1.1. Materialeigenschaften	158
8.1.2. Herkunft	

8.1.3. Menge des Treibholzes	161
8.1.4. Grössenverteilung und Sperrigkeit des Treibholzes	162
8.2. Transport	162
8.2.1. Zum Zeitpunkt	162
8.2.2. Zur Art des Transportes	163
8.3. Ablagerungen	166
8.3.1. Zu den Modellversuchen	166
8.3.2. Ablagerungen mit Verklausungen	168
8.3.3. Ablagerungen ohne Verklausungen	168
8.3.4. Folgen der Holzablagerungen	169
8.4. Gegenmassnahmen	171
8.4.1. Grundsätzliches	171
8.4.2. Massnahmen im Gerinne oberhalb des Ablagerungsplatzes	171
8.4.3. Massnahmen im Geschiebeablagerungsplatz	172
8.4.3.1. Massnahmen im Ablagerungsplatz	172
8.4.3.2. Balkensperren	173
8.4.3.3. Schlitzsperren	174
8.4.3.4. Gittersperren	174
8.4.3.5. Vorgeschaltete Rechen	174
8.4.3.6. Holztrift über die Rückhaltesperre	179
8.4.4. Unterhalt	180
8.5. Zusammenfassung	180
9. Folgerungen	182
9.1. Grundsätze für den Entwurf eines Geschiebeablagerungsplatzes	182
9.1.1. Einleitung	182
9.1.2. Gesamtanordnung und Zweck	182
9.1.2.1. Wahl des Ortes	182
9.1.2.2. Probleme der Mehrzwecknutzung	183
9.1.3. Das Zulaufgerinne	185
9.1.4. Das Einlaufbauwerk	187
9.1.5. Form und Grösse des Ablagerungsplatzes	187
9.1.6. Umfassungsdämme	188
9.1.7. Das Rückhaltebauwerk	189
9.1.8. Das Unterlaufgerinne	191
9.1.9. Der Zufahrtsweg	191
9.2. Folgerungen aus den Untersuchungen	192
9.2.1. Folgerungen aus den besichtigten praktischen Beispielen	192
9.2.2. Folgerungen aus den Modellversuchen	192
9.2.3. Mögliche Folgeprojekte	192
9.3. Abschliessende Bemerkungen	193

10. Anhang	195
10.1 Bezeichnungen und Definitionen der Wildbachsperren	195
10.1.1. Einleitung	195
10.1.2. Versuch einer systematischen Darstellung	195
10.1.2.1. Unterteilung nach der Konstruktion	196
10.1.2.2. Unterteilung nach der Funktion	196
10.1.2.3. Unterteilung nach dem Baumaterial	197
10.1.2.4. Unterteilung nach der Statik	197
10.1.3. Die Begriffe und ihre Definitionen	197
10.2 In der Schweiz und in Liechtenstein besichtigte Geschiebe- ablagerungsplätze	211
10.3 Ausflussmengen aus verschiedenen Sperrenöffnungen	214
10.3.1. Grundsätzliches zu den Berechnungen	214
10.3.2. Berechnungen für die konischen Schlitze	215
10.3.3. Ergebnisse	217
10.4 Die Versuche mit nicht konstantem Wasser- und Geschiebeabfluss	224
10.5 Dreidimensionale Darstellung einiger Ablagerungsformen	249
10.6 Zusammenstellung aller durchgeführten Versuche	252
10.6.1. Hauptversuche	252
10.6.2. Sperrenöffnungen	255
10.6.3. Treibholz	256
10.7 Literatur	257



## V o r w o r t

=====

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1980 - 1983 am Institut für Kulturtechnik (IfK) und an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich aufgrund einer Anregung des früheren Sektionschefs auf dem Amt für Strassen- und Flussbau in Bern, Prof. C. Lichtenhahn. Sie wäre jedoch nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung meines Doktorvaters Prof. DDr. H. Grubinger, der mir die Modelluntersuchungen des Schächenbaches an der VAW ermöglichte und mich später sehr selbstständig arbeiten liess. Im weiteren verdanke ich ihm viele praktische Besichtigungen in Oesterreich, dem europäischen Land der Wildbachverbauung, und die Anregung, dem Problem des Treibholzes nachzugehen. Dem Korreferenten und Direktor der VAW, Prof. Dr. D. Vischer, danke ich für die vorbehaltlose organisatorische und materielle Unterstützung, indem er mir einen Arbeitsplatz und die Infrastruktur seiner Versuchsanstalt zur Verfügung stellte.

Mein weiterer Dank gilt besonders Dr. Martin Jäggi für die fachlich kompetente Betreuung und die vielen Tips bei der Durchführung der Modellversuche; ausserdem meinem Bruder Hansjürg vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH, der mich bei den photogrammetrischen Auswertungen aktiv unterstützte und mir die modernsten Möglichkeiten seines Institutes erschloss.

Im übrigen danke ich

- Herrn A. Baumer und seinem Werkstattteam (insbesondere den Herren A. Gantner, H. Andreoli, E. Moser und G. Wanner) für die immer zuvorkommende und prompte Erledigung aller Wünsche,
- Cica Grünwald vom IfK für die unentbehrliche Hilfe bei der Durchführung der Modellversuche,
- Martin Fritsch für die hydraulischen Berechnungen,
- Herrn A. Schreiber und vor allem Bruno Wyss für die Zeichenarbeiten und Skizzen,
- nicht zuletzt Herrn H. Grunow und meiner lieben Frau als Lektoren
- und natürlich Frau B. Schweizer für die saubere Abschrift der Arbeit und das aktive Mitdenken dabei.

Die ETH unterstützte die Arbeit in materieller Hinsicht als internes Forschungsprojekt trotz gespannter Finanzlage mit einem Beitrag. Auch dafür danke ich den zuständigen Stellen.

Ich hoffe, dass diese Arbeit nicht nur an Hochschulen und Universitäten gelesen wird, sondern ihren Weg auch zum praktischen Ingenieur in der Wildbachverbauung findet.

Otelfingen, im November 1983

F. Zollinger

## Zusammenfassung

=====

Unter Geschiebeablagerungsplätzen werden in der vorliegenden Arbeit relativ kleine (Oberfläche unter 10'000 m<sup>2</sup>), nicht dauernd eingestaute Becken verstanden, die einer zeitweisen oder definitiven Ablagerung von Wildbachgeschiebe dienen. Bei Hochwasser sollen sie Geschiebespitzen brechen, bei kleineren Abflüssen hingegen ermöglichen, das abgelagerte Geschiebe unter Umständen wieder auszuspülen. Die Vorgänge in solchen Becken werden abgehandelt (Ablagerungen und Spülungen), und die Möglichkeiten der Steuerung durch geeignete bauliche Konstruktionen aufgezeigt. Die Arbeit beruht auf Besichtigungen von ausgeführten Projekten, hydraulischen Modellversuchen und Literaturstudien.

Als Grundlage wird eine Morphologie der Ablagerungen und der Spülungen aufgestellt, wobei die selbsttätigen Entleerungen besondere Berücksichtigung finden. Diese Vorgänge laufen je nach Grösse und Kombination der verschiedenen Parameter eines Geschiebeablagerungsplatzes mehr oder weniger ungestört oder gestört ab. Unter anderen wurden die folgenden Parameter variiert: Volumen und Form des Beckens, Einlaufbauwerk, Rückhaltesperre, Wasserstau, Wasser- und Geschiebezulauf.

Neben Wasser und Geschiebe bringt ein Wildbach oft in grösseren Mengen auch Treibholz. Dieses führt zu kaum kontrollierbaren Verklausungen der Rückhaltebauwerke mit unberechenbaren Stauverhältnissen und behinderten, bzw. verhinderten Spülungen als Folgen. Im Gegensatz zu Wasser und Geschiebe ist das Treibholz in seinem Verhalten mit den heutigen Berechnungs- und Vorhersagemethoden noch nicht befriedigend erfassbar. Ein Kapitel der Arbeit befasst sich darum mit den Materialeigenschaften, dem Verhalten bei Transport und Ablagerung des Treibholzes sowie den Möglichkeiten seiner Kontrolle bzw. der Gegenmassnahmen.

Neben ihrer Funktion als "state of the art report" bringt die Arbeit an Neuem

- die Zusammenstellung der in einem Geschiebeablagerungsplatz möglichen Ablagerungs- und Spülformen (Morphologie),
- die neuesten praktischen und theoretischen Erfahrungen und Voraussetzungen zu den selbsttätigen Entleerungen,
- die Abhandlung der Wirkungen von verschiedenen, insbesondere den heute gängigen Sperrenöffnungen,
- eine vertiefte Uebersicht über die Probleme beim Anfall von Treibholz und über die möglichen Gegenmassnahmen,
- eine Zusammenstellung aller in Literatur und Praxis gefundenen Sperrtypen der Wildbachverbauung und ihre deutschsprachigen Bezeichnungen.

Einerseits kann damit ein Beitrag zur wissenschaftlichen Grundlagenforschung geliefert werden, andererseits liegt die Bedeutung der Arbeit für die Praxis in konkreten Aussagen über

- Grundrissformen, Volumen, Länge, Längsgefälle eines Ablagerungsplatzes,
- die Wirkung eines Wasserstaus im Becken,
- das Verlandungsgefälle von Geschiebeablagerungen,

- die Rückhaltebauwerke (Typen, Oeffnungen, Wirkungen),
- den Dosier- und Sortiereffekt von Geschiebeablagerungsplätzen,
- die Voraussetzungen zu wirkungsvollen selbsttätigen Entleerungen und ihre Unterstützung durch Baggerungen,
- wirkungsvolle Massnahmen gegen das Treibholz (Schrägreden u.a.),
- die Gesamtanlage eines Geschiebeablagerungsplatzes.

## Les phénomènes dans une place de dépôt de sédiments de torrent

---

(Morphologie et possibilités de contrôle)

### R é s u m é

=====

Dans cette recherche, l'on entend par "place de dépôt de sédiments" des bassins relativement petits (surface de moins de 10'000 m<sup>2</sup>), qui ne représentent pas de retenue d'eau permanente et qui servent à la sédimentation définitive ou passagère des matériaux charriés par les torrents. En cas de crues, ils doivent couper les pointes de débit de charriage; lors de débits plus petits, les matériaux déposés devraient être emportés. Ce travail traite des processus dans les places de dépôt (sédimentation et chasse) et présente les possibilités de les influencer par des constructions. Les études sont basées sur des inspections de projets réalisés et sur des recherches dans un modèle hydraulique réduit.

Comme base, une morphologie des sédimentations et des purges est établie, en tenant compte d'une chasse naturelle. Ces processus sont plus ou moins dérangés, ces dérangements dépendant des valeurs et des combinaisons des paramètres des places de dépôt. Les paramètres suivants ont été variés: volume et forme du bassin, ouvrage de tête, barrage de retenue, capacité de retenue d'eau, débit d'eau et des matériaux charriés.

Normalement, un torrent transporte également du bois d'embâcle en quantités plus ou moins grandes. Ce bois d'inondation produit des obstructions des ouvrages de retenue. Ce fait crée des retenues d'eau incalculables et empêche une chasse. Les connaissances actuelles ne permettent pas de décrire le comportement du bois d'embâcle d'une façon satisfaisante. Pour cette raison, un chapitre traite des caractéristiques, du comportement pendant le transport et de la sédimentation du bois et indique les mesures à prendre pour éliminer les conséquences non-désirés.

Outre l'état actuel des connaissances, ce travail présente de nouveaux résultats concernant

- une combinaison des formes de sédimentation et de chasses possibles dans une place de dépôt (morphologie),
- de nouvelles connaissances pratiques et théoriques sur la chasse naturelle,
- les effets des pertuis de barrages,

- une vue d'ensemble approfondie des problèmes en relation avec le bois d'embâcle et des contre-mesures possibles,
- un résumé de tous les types de barrages servant à la correction des torrents trouvés dans la littérature et dans la pratique.

D'une part, ce travail livre une contribution à la recherche fondamentale, d'autre part il apporte à l'ingénieur des précisions concernant

- la forme, le volume, la longueur, la pente longitudinale d'une place de dépôt,
- l'effet de la retenue d'eau dans un bassin,
- la pente d'atterrissement de la sédimentation,
- les barrages de retenue (types, effets, pertuis),
- l'effet de trier et de doser les sédiments dans une place de dépôt,
- les bases pour une chasse naturelle efficace et son appui par dragage,
- des mesures efficaces contre le bois d'embâcle (barrage-rateau avec des barres inclinées etc.),
- la construction et la planification entière d'une place de dépôt.

## The processes in debris detention basins for torrent control

(A morphology and the possibilities of control)

### A b s t r a c t

=====

In this publication debris detention basins are understood as relatively small pools (surface less than 10'000 m<sup>2</sup>) containing no continuous back-water for the purpose of temporary or definitive deposition of sediment and debris (rock, soil and driftwood) washed down by a torrent. They should reduce the peak of water and flow of debris during heavy storms and eventually pass most of the deposited material during periods of smaller flows. The processes in debris detention basins are discussed (loading and unloading) and the possibilities of control by adapted constructions are presented. The results of these examinations are based on investigating realized projects and on experiments with hydraulic models.

The fundamentals are a morphology of depositions and degradations under special consideration of the self-cleaning degradation (scouring). As a function of the dimensions and the combinations of various parameters these processes take place more or less disturbed. Among others, the following parameters were varied: volume and shape of the basin, inlet structure, debris detention dam, backwater, runoff of water and sediment.



Normally a torrent transports driftwood also, which can form log jams hardly to control. Plugging of split dams, incalculable backwaters and hindered or even prevented degradations are the result. In contrast to the water and the sediment, the behaviour of the timber debris is hardly calculable and predictable with the actual methods and knowledge. Therefore, a chapter deals with the characteristic peculiarity, the behaviour during transportation and deposition of the driftwood and with the possibilities of its control.

This proceeding is a state of the art report and presents new results on

- possible processes in a debris detention basin (morphology of loading and unloading),
- newest practical experiences, theoretical considerations and presuppositions for efficient self-cleaning degradation,
- discussion on the efficiency of the usual outlets of detention dams,
- deepened synopsis of the problems in connexion with the driftwood and means of its control,
- a survey of all types and names of the dams used in torrent control.

In addition to its contribution to the basic scientific research, the importance of this publication is shown by practical statements to

- the outline, volume, length, longitudinal slope of a debris detention basin,
- the effect of backwater in a basin,
- the slope of siltation of the deposits,
- sediment and debris detention dams (types, outlets, efficiency),
- the effect of measuring out and sorting of debris and sediments in a debris detention basin,
- the presuppositions for efficacious self-cleaning capability of the basins and its assistance through dredging,
- efficient measures against driftwood (slanting grided weirs, "trash racks" etc.),
- overall lay-out of a debris detention basin.



Hat der alte Hexenmeister  
Sich doch einmal wegbegeben!  
Und nun sollen seine Geister  
Auch nach meinem Willen leben!

(Anfang von J.W. von Goethes  
"Zauberlehrling")

## 1. Einleitung

=====

### 1.1. Goethes Zauberlehrling und die Geschiebeablagerungsplätze

Im bekannten Gedicht von Goethe versucht sich der Lehrling in Abwesenheit seines Meisters in dessen Künsten, indem er sich von einem zum Leben erweckten Besen Wasser tragen lässt. Doch aus dem gewünschten Bad werden unkontrollierbare Wasserfluten. Voller Verzweiflung ruft er denn aus:

"Die ich rief, die Geister,  
Werd' ich nun nicht los!"

Der Begriff "Geschiebeablagerungsplatz" ist - abgesehen vom Bezug zum Wasser - ganz im Sinne des Gedichtes: Er enthält die Geister (das Geschiebe) und den Wunsch, diese herbeizurufen (sich abzulagern). Was zu tun ist, wenn die Geister einmal da sind, davon ist nicht die Rede. Und doch ist es klar, dass die Geister - das Geschiebe - wieder einmal verschwinden müssen.

Neben den Ablagerungen spielen darum in einem Geschiebeablagerungsplatz auch die Entleerungen eine zentrale Rolle. Für ihre Verwirklichung gibt es die Möglichkeit des Krafteinsatzes (Maschinen und Finanzen), oder jene der eleganten Delegation der Arbeiten an die Natur (Kräfte des Baches). Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt denn auch bei den Ablagerungen, ein zweiter jedoch bei den Entleerungen (Spülungen).

Trotz dieser einleitenden Worte ist der Entwurf eines Geschiebeablagerungsplatzes keine Hexerei, auch wenn dazu gewisse Grundlagen und Erfahrungen notwendig sind. Die vorliegende Arbeit will mit der Erarbeitung von Grundlagen, der Auswertung vieler Modellversuche und den Ergebnissen von Felduntersuchungen zur verbesserten und weitsichtigen Planung von Ablagerungsplätzen beitragen. Die Situation des Zauberlehrlings ist vermeidbar!

### 1.2. Begriffe

Für die Anlage des Geschiebeablagerungsplatzes gibt es in der Literatur recht mannigfache Bezeichnungen: Schotterfang, Geschiebehof, Rückhaltebecken, Schuttfang, Geröllfänger, Geschiebestaubbecken, Kiesfang, Geschieberetentionsbecken, Sandfang. Im Hinblick auf die korrekte Bezeichnung des abgelagerten Materials und auf den Hauptvorgang in der Anlage wird in dieser Arbeit der Begriff des Geschiebeablagerungsplatzes verwendet.

Mit der Festlegung dieser wichtigsten Bezeichnung ist gleichzeitig gesagt, dass es sich beim abgelagerten Material weder um Schutt noch um Schotter, Kies, Geröll oder Sand, sondern um Geschiebe handelt. In diesem Zusammenhang sei

erwähnt, dass bei den Modellversuchen keine Murgänge simuliert worden sind. Bei allen Versuchen handelte es sich um normalen Geschiebetrieb, auch wenn dieser oft Werte bis 40 Vol.% annahm, so dass andere Autoren bereits von Muren sprechen würden. Rein optisch beurteilt handelte es sich jedoch nie um einen dicken, zähflüssigen Brei (Mure), sondern um Wasserabfluss mit hohem Geschiebeanteil.

Abflüsse mit Feststoffanteilen über 50 Gew.% zeigen ein anderes Fließverhalten als die normalen Newton'schen Flüssigkeiten. Diese pseudoplastischen, dilatanten und plastischen Eigenschaften sind zur Zeit noch zu wenig erforscht, als dass das Fließverhalten der Muren befriedigend berechnet werden könnte, bzw. die Uebertragung ins Modell gesetzmässig bekannt wäre.

Das von einem Hochwasser mitgebrachte Holz führt in der Literatur und Umgangssprache ebenfalls verschiedene Bezeichnungen: Unholz, Wildholz, Triebholz und Treibholz. In dieser Arbeit wird der letzte Begriff verwendet.

Die gegen hundert Bezeichnungen für Wildbachsperrren, welche in der deutschen Literatur existieren, werden alle - nicht nur jene, die im Zusammenhang mit den Geschiebeablagerungsplätzen Verwendung finden - im Anhang 10.1. zusammengestellt und erklärt.

In den Modellversuchen wurde beim Wasser nicht zwischen Zu- und Abfluss in den bzw. aus dem Geschiebeablagerungsplatz unterschieden, weil die Speicherwirkung desselben in jedem Fall vernachlässigbar klein war. Es wird daher immer der übliche Begriff "Abfluss" verwendet. Im weiteren sei darauf hingewiesen, dass unter dem Begriff "Einlaufabsturz" in das Becken des Ablagerungsplatzes nicht ausschliesslich ein vertikaler Absturz verstanden wird, sondern jede Vergrößerung des Längsgefälles bis zu einem Wert deutlich über dem Verlandungsgefälle des transportierten Geschiebes.

Im folgenden sind alle verwendeten Symbole und Abkürzungen aufgeführt. Bei nur einmal verwendeten Formeln anderer Autoren wurden zum Teil ihre in der Originalpublikation verwendeten Symbole übernommen. Sie werden am entsprechenden Ort erklärt.

Symbol	D i m e n s i o n		D e f i n i t i o n
	Natur	Modell	
A	m	cm	Höhe des Einlaufabsturzes in den GAP
a	m	cm	Dolenhöhe
B	m	cm	Breite des GAP
b	m	cm	Schlitzbreite bei Schlitz- und Balkensperrren
c	m	cm	Dolenbreite
d	cm	cm	Korndurchmesser
d <sub>m</sub>	cm	cm	mittlerer Korndurchmesser
E	km <sup>2</sup>		Einzugsgebiet
e	cm	mm	Balkenabstand bei Balkensperrren
f	cm	mm	Balkendurchmesser

Symbol	D i m e n s i o n		D e f i n i t i o n
	Natur	Modell	
G	$m^3/s$	l/s	Geschiebetrieb
$G_{sp}$	$m^3$	l	gespülte Geschiebefracht
$G_t$	$m^3$	l	total (beschickte) Geschiebefracht
g	$m/s^2$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
Fr	-	-	Froude'sche Zahl
H	m	cm	Sperrenhöhe (Bachsohle - Ueberfallsektion)
h	m	cm	Wasserstauhöhe im GAP
GAP	-	-	Geschiebeablagerungsplatz
I	%	%	Längsgefälle eines Gerinnes
J	%	%	Verlandungsgefälle des Geschiebes
L	m	cm	Länge (allgemein), Länge des GAP
m	-	-	Index: Modell
n	-	-	Index: Natur
Q	$m^3/s$	l/min	Wasserabfluss
Re	-	-	Reynold'sche Zahl
T	s, h	min.:s	Zeit
V	$m^3$	l	Volumen
$V_{tot}$	$m^3$	l	totales Volumen des GAP
v	m/s	m/s	Geschwindigkeit
$\lambda$	-	-	Massstabszahl
$\nu$	$m^2/s$	$m^2/s$	kinematische Zähigkeit
$\rho$	$kg/m^3$	$kg/m^3$	Dichte

### 1.3. Die Geschiebeablagerungsplätze im Rahmen der umfassenden Wildbachverbauung

Eine kontrollierte Geschiebeablagerung wird in der Wildbachverbauung in zwei Fällen notwendig:

1. Der Unterlauf oder Vorfluter kann oder soll - wegen ungenügender Transportkapazität oder Mündung in eine Stauhaltung - nicht mehr mit dem unter natürlichen Verhältnissen anfallenden Geschiebe belastet werden.
2. Der Schwemmkegel eines Wildbaches oder ein Teil davon soll vor Ueberschwemmungen mit unkontrollierten Geschiebeablagerungen geschützt werden.

Man kann in diesem Zusammenhang zwei Typen von Ablagerungsplätzen unterscheiden, nämlich solche

- mit endgültiger Ablagerung des Geschiebes, und solche
- mit nur zeitweiser Ablagerung.

Der erste Typ verlangt eine maschinelle Leerung, der zweite eine mindestens partielle selbsttätige Entleerung.

Aus dem Gesagten geht hervor, dass es sich bei den Geschiebeablagerungsplätzen im Rahmen der Wildbachverbauungen um eine reine Symptombekämpfungsmassnahme handelt. Das Bild 1 zeigt eine mögliche Gliederung der prinzipiellen Massnahmen in der Wildbachverbauung.

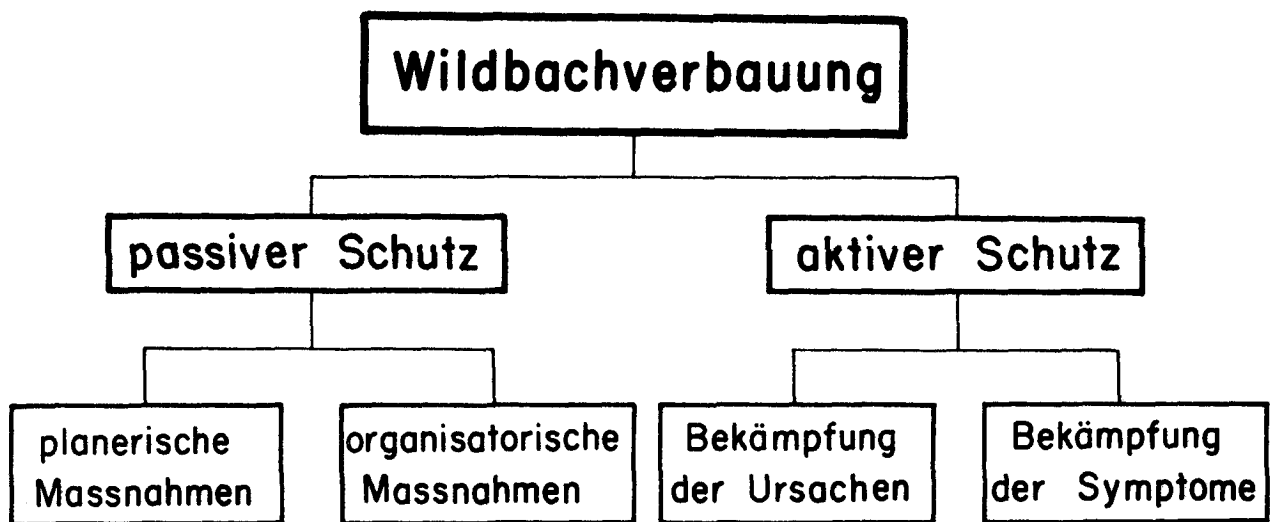


Bild 1 Gliederung der Massnahmen in der Wildbachverbauung

Einige Beispiele zu dieser Gliederung seien im folgenden erwähnt:

- |                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| - Planerische Massnahmen:      | - Gefahrenzonenpläne         |
|                                | - Nutzungspläne              |
| - Organisatorische Massnahmen: | - Alarmsysteme               |
|                                | - Evakuationspläne           |
|                                | - Notunterkünfte             |
| - Bekämpfung der Ursachen:     | - Erosionsschutz             |
|                                | - Rutschungssanierungen      |
| - Bekämpfung der Symptome:     | - Geschiebeablagerungsplätze |
|                                | - Ablenkdamme                |

Aus dem Blickwinkel einer sinnvollen Wildbachverbauung gehört der Bau von Geschiebeablagerungsplätzen zu jenen Massnahmen, die man nur ganz zuletzt einsetzen sollte, da sie nur Symptome bekämpfen, an den Ursachen - und damit an der übergeordneten Gefahrensituation - nichts ändern. In der Praxis ist es aber oft umgekehrt, wenn man gezwungen ist, vor dem Beginn grösserer Verbauungen einen Ablagerungsplatz zu erstellen, damit die Unterlieger fürs

erste geschützt sind. Solche Sofortmassnahmen sind oft das einzig Richtige, sollten aber möglichst bald von den Ursachenbekämpfungen und den planerischen und organisatorischen Massnahmen mindestens unterstützt, wenn nicht gar abgelöst werden - ganz im Sinne des als Vorspann der Arbeit zitierten Satzes von F. Wang (1902).

Da man jedoch die natürlichen Erosionsvorgänge, welche in einem Wildbacheinzugsgebiet besonders stark sind, nie ganz unterbinden kann, erweist sich die Anlage von Geschiebeablagerungsplätzen hin und wieder als notwendige Langzeitmassnahme. In diesen Fällen lassen sich die roten Zonen der Gefahrenzonenpläne (Bauverbot) vielfach stark einschränken, womit sicherere Wohnzonen gewonnen werden (Zollinger 1976). Wie weit es allerdings erstrebenswert ist, mit dem Bau von Geschiebeablagerungsplätzen die Bautätigkeit in Gebiete auszudehnen, die von Natur aus gefährdet sind, ist mindestens sehr fraglich und sollte im konkreten Fall eher zu Gunsten der Natur entschieden werden.

Wo stehen die Geschiebeablagerungsplätze im übergeordneteren Rahmen des Hochwasserschutzes? Vischer (1978) unterscheidet drei Hochwasserschutz-Konzepte:

1. Verringerung der Hochwasserspitzen
2. Erhöhung der Abflusskapazität
3. Verbesserungen im Ueberschwemmungsgebiet

Die Ablagerungsplätze gehören ins dritte Konzept, welches Vischer in vier Untergruppen gliedert: Planerische, bauliche Massnahmen (Ablagerungsplätze u.a.), Warn- und Rettungsdienst.

Nach Weber (1967) stammt der älteste bekannte Ablagerungsplatz aus der Zeit um 1500. Vor allem im letzten Jahrhundert begannen dann die Wildbachverbauer mit den Formen zu experimentieren. Viele Beispiele dazu stammen aus der Schweiz. In neuerer Zeit konzentrierten sich die Experimente vor allem auf die Oeffnungsformen der Rückhaltebauwerke, wobei vornehmlich von Oesterreich mit seiner gut organisierten Wildbachverbauung immer neue Impulse kamen. Weniger Beiträge stammen aus den Alpenländern Frankreich und Italien, praktisch keine aus der Bundesrepublik Deutschland. Interessant ist auch die Feststellung, dass in der englischsprachigen Literatur zum Thema extrem wenig zu finden ist. Der Grund dafür dürfte sein, dass dort, wo solche Probleme anstünden - z.B. in den Rocky Mountains - der Bevölkerungsdruck noch nicht so gross ist, dass Siedlungen auf die gefährlichen Schwemmkegel gebaut werden. Trotzdem gibt es die Idee der kontrollierten Geschiebeablagerung auch. Es sei dazu eine Abbildung von Winsor (1938) zu seinem "Barrier System of Flood Control" angefügt.

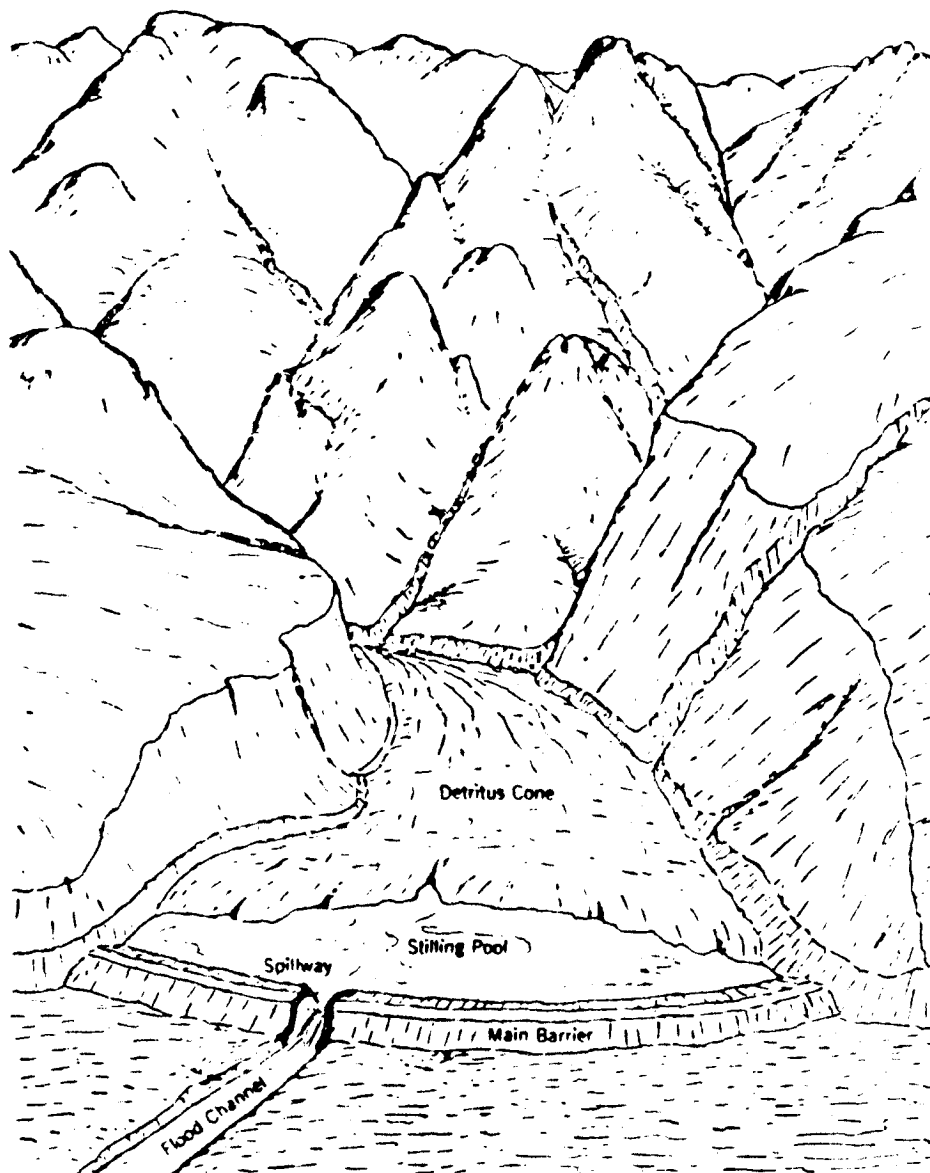


Bild 2 Prinzipskizze von Winsor (1938) zum "Barrier System of Flood Control"

#### 1.4. Ziele der Arbeit

Die Hauptziele der vorliegenden Untersuchungen können in fünf Punkten dargelegt werden:

1. Uebersicht der Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz (Ablagerungen, Spülungen, selbsttätige Entleerungen, Wasserstau, Treibholzverhalten).
2. Zusammenstellung des heutigen Wissens zum Thema (ergänzt durch eine Terminologie aller Wildbachsperrern).
3. Erarbeitung und Erweiterung der Grundlagen zur Planung von Geschiebeablagerungsplätzen.
4. Abhandlung aller Parameter, mit welchen die Vorgänge im Geschiebeablagerungsplatz gesteuert werden können.



5. Vertiefte Behandlung von wenigen Detailfragen (Form der Ablagerungsplätze, Massnahmen gegen das Treibholz, Sperröffnungen).

## 1.5. Zur Methodik der Arbeit

### 1.5.1. Grundsätzliches

Die Ausgangslage bestand in wenigen Literaturangaben zu praktisch durchgeführten Projekten, in empirischen Erkenntnissen, die von Fall zu Fall meistens ungeprüft übernommen worden waren, und in extrem spärlich vorhandenen Untersuchungen über den Allgemeinfall des Geschiebeablagerungsplatzes. Unter diesen Gesichtspunkten und den oben aufgeführten Zielen gab es für die vorliegende Arbeit grundsätzlich zwei mögliche Betrachtungsweisen in der Arbeitsmethodik:

- die streng mathematisch-physikalische Methode (quantifizierend),
- die beobachtend-beschreibende Methode (vor allem qualifizierend).

Die erste Methode eignet sich für klar definierte Probleme mit bereits vorhandenen Grundlagen. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den Vorgängen in einem Geschiebeablagerungsplatz um einen vielschichtigen Problemkreis mit sehr wenigen Grundlagen. Pilotartig musste darum zuerst eine Uebersicht erarbeitet werden. Anschliessend wurden die Grundlagen erweitert. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf diesen beiden Untersuchungen, wofür sich eine halb-quantitative, oft sogar nur qualitative Arbeitsweise aufdrängte. Einige wenige Detailprobleme konnten streng quantitativ abgehandelt werden. Sie sind aber Ausnahmen in dieser Arbeit.

Die beschreibende, qualitative Arbeitsmethodik rechtfertigte sich zusätzlich mit der Erkenntnis, dass man sowohl in der Natur wie auch im Modell immer Einzelereignisse beobachtet, die sich kaum je ein zweites Mal in gleicher Art und Weise abspielen. Die Reproduzierbarkeit und Empfindlichkeit der Modellversuche erwiesen sich denn auch als ein nicht zu vernachlässigendes Problem.

Nicht nur in der Natur, sondern auch im Modell gibt es in den Abläufen Schwankungen, Pulsationen und Unregelmässigkeiten, die nicht immer einfach zu werten sind. Wo es möglich war, wurden darum fluss- und geomorphologische Gesichtspunkte in die Untersuchungen einbezogen.

Die Arbeit ruht auf den folgenden drei Säulen:

- Praktische Beispiele (Besichtigung und Beurteilung von ausgeführten Projekten),
- Hydraulische Modellversuche,
- Literaturstudium.

### 1.5.2. Praktische Beispiele

Bereits nach den ersten Feldaufnahmen zeigte sich, dass eine auch nur einigermassen repräsentative oder gar annähernd vollständige Bestandesaufnahme der in der Schweiz gebauten Ablagerungsplätze einen Aufwand mit sich gebracht hätte, der den zeitlichen Umfang der geplanten Arbeit bei weitem gesprengt hätte. Es ist anzunehmen, dass in der Schweiz weit über 1000 Geschiebeablagerungsplätze existieren. Mit der Besichtigung von 130 Objekten in den Kantonen Schwyz, Glarus, Obwalden, Luzern, Uri, St. Gallen, Bern, Graubünden und Wallis beschränkten sich darum die Feldaufnahmen auf den Herbst 1979 und den Sommer 1980. Die Objekte wurden aufgrund von Angaben der kantonalen Wasserbauämter und nach eigenen Kenntnissen und Kartenstudien ausgewählt. Unter diesen Umständen war eine Systematik nur bedingt möglich. Die Besichtigungen und Aufnahmen geschahen praktisch ausschliesslich unter der Fragestellung, wie Geschiebeablagerungsplätze in der Schweiz gebaut wurden und werden. Die konstruktiven Elemente standen damit im Vordergrund. Einerseits wurden die immer wieder verwendeten Bauformen zusammengestellt und andererseits Besonderheiten festgehalten. Neben Kurzprotokollen entstanden als Resultate vor allem Fotos.

Abgesehen von diesen Ausführungen ist den Feldbegehungen in der Arbeit kein eigenes Kapitel gewidmet. Einzelne praktische Beispiele sind je nach ihren Besonderheiten in die entsprechenden Ausführungen eingebaut. Auf der anderen Seite dienten die Ergebnisse der Besichtigungen einer gezielteren Abwicklung des Versuchsprogrammes.

### 1.5.3. Literatur

Es fiel auf, dass es in der Literatur nur ganz wenige Beiträge gibt, welche sich konkret mit den Problemen der Geschiebeablagerungsplätze von Wildbächen befassen. Verschiedene Informationen liessen sich zusätzlich aus Artikeln gewinnen, die sich mit verwandten Problemkreisen beschäftigen (Sperrbau, Geschiebetrieb in Wildbächen u.a.), sowie aus - vor allem österreichischen - Exkursions- und Baubesichtigungsberichten. Die meisten der aus der Praxis stammenden Beiträge kommen aus Oesterreich, Italien und Frankreich. Obschon viele von den in der Literatur erwähnten ältesten Ablagerungsplätzen in der Schweiz gebaut worden sind, und unser Land auch eine weit zurückreichende Praxis der Wildbachverbauung hat, fällt auf, dass praktisch keine Schweizer Literatur zum Thema vorhanden ist.

Im Gegensatz dazu stammt viel Grundlagenliteratur (Schwemmkegelbildung, Auffüllvorgänge in Reservoirs u.a.) aus den USA. Daneben gibt es vereinzelte andere Beiträge aus verschiedenen Teilen der Welt. Es sei noch erwähnt, dass dem Autor die relativ reichhaltige japanische Wildbachliteratur nicht zur Verfügung gestanden hat.

In keinem besonderen Kapitel wird eine kommentierte Literaturübersicht gegeben. Als Uebersicht dient lediglich das Literaturverzeichnis. Die einzelnen Beiträge sind thematisch verteilt in den entsprechenden Kapiteln besprochen.

Es sei noch auf den Anhang "Bezeichnungen und Definitionen der Wildbachsperrren" aufmerksam gemacht. Dabei handelt es sich um eine reine Literaturarbeit. Sie entstand aus der Erkenntnis, dass es in der deutschsprachigen Literatur sehr viele Bezeichnungen für die verschiedenen Sperrtypen gibt, die sich

z.T. überschneiden, unrichtig verwendet werden oder nirgends klar definiert sind. Da die meisten Bautypen bei Geschiebeablagerungsplätzen verwendbar sind, rechtfertigt sich dieser von der Arbeit jedoch losgelöste Anhang. Er soll etwas Licht in die gegen hundert deutschen Begriffe bringen.

#### 1.5.4. Modellversuche

Die Vorgänge in der Natur lassen sich im Modellversuch übersichtlicher, kontrolliert und zeitlich gerafft nachvollziehen. Wegen der wichtigen Stellung der Modellversuche im Rahmen dieser Arbeit ist ihnen das ganze Kapitel 2 gewidmet.

#### 1.6. Inhalt und Aufbau der Arbeit

Die wichtigsten neuen Aussagen der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Erstmals wird eine Morphologie der möglichen Ablagerungen und Spülungen in einem Ablagerungsplatz gegeben. Dies war vor allem durch den Einsatz der Photogrammetrie möglich, welche detaillierte Vergleiche erlaubte.
2. Ergänzt durch verschiedene Modellversuche, bringt ein Kapitel den neusten Stand der praktischen Erfahrungen und theoretischen Erkenntnisse mit den selbsttätigen Entleerungen.
3. Die Modellversuche ermöglichten gesicherte Aussagen über die Wirkungen von Sperrenöffnungen (Form, Grösse, Wasserstau, Sortier- und Dosiereffekt u.a.).
4. Die Problematik des Treibholzes und die möglichen Gegenmassnahmen werden in vertiefter Uebersicht mit Modellversuchen und Vergleichen zu den Vorgängen in der Natur studiert.
5. Erstmals sind sämtliche in der deutschen Literatur gefundenen Begriffe für die Wildbachsperren mit Definitionen und Skizzen zusammengestellt.

Der Aufbau der Arbeit erfolgte nicht getrennt nach den drei erwähnten Grundsäulen, sondern in thematischer Art und Weise, indem zu einem bestimmten Aspekt (z.B. Ablagerungen, Sperrenöffnungen usw.) alle erarbeiteten und gefundenen Ergebnisse gesammelt dargestellt werden.

Die ersten drei einführenden Kapitel bringen nach der Einleitung Ausführungen über die Modellversuche und eine Uebersicht über die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz. Ein erster Schwerpunkt in den eigentlichen Grundlagenkapiteln 4 und 5 ist die Morphologie der Ablagerungen und Spülungen. Der zweite Schwerpunkt in den beiden folgenden Kapiteln ist die eher praktische Anwendung der Grundlagen für selbsttätige Entleerungen und die Möglichkeit der Steuerung der Ablagerungen und Spülungen. Etwas für sich steht das letzte Schwerpunktkapitel, das aber doch eine zentrale Ergänzung ist: Das Treibholz-Problem.

Die Arbeit wird mit Folgerungen und Hinweisen zum Entwurf eines Ablagerungsplatzes abgerundet. Dieses Schlusskapitel soll u.a. dem praktisch tätigen Wildbachverbauer ermöglichen, die Ergebnisse der Arbeit vor allem in qualitativer Art und Weise auf den konkreten Fall anzuwenden. Auf die nicht sehr zahlreichen quantitativen Ergebnisse in der Arbeit wird dabei verwiesen.

Seine Wort und Werke  
Merkt ich und den Brauch,  
Und mit Geistesstärke  
Tu ich Wunder auch.

## 2. Modellversuche =====

### 2.1. Uebersicht

Dieses Kapitel befasst sich mit der allgemeinen Anordnung des hydraulischen Modells bzw. der Modelle, mit den verschiedenen Typen der durchgeführten Versuche und mit dem Problem der Auswertung und Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse sowie deren Umsetzung in die Natur. Die Modellversuche gliedern sich in sechs Gruppen:

1. Beispiel Schächten
2. Ablagerungsformen
3. Spülformen
4. Simulation von Hochwasserganglinien
5. Treibholz
6. Ausflussöffnungen aus Sperren

Auf Modellanordnungen, Versuchsdurchführungen usw. wird im Prinzip in diesem Kapitel eingegangen. Bei der Darstellung der Ergebnisse (Kapitel 4 bis 8) werden nur noch Besonderheiten erwähnt, und es müssen Hinweise auf diese Ausführungen genügen.

### 2.2. Modellanordnung

Auch wenn für die verschiedenen Versuchstypen z.T. grössere Anpassungen und Umbauten nötig waren, wurde doch im Prinzip für alle Versuche dasselbe Modell benutzt.

#### 2.2.1. Ablagerungsplatz und Zulauf

Der zentrale Teil bestand aus dem Geschiebeablageplatz, dessen Länge zwischen 50 und 150 cm variiert werden konnte. Die grösste Breite betrug 100 cm und der grösste Einlaufabsturz (und damit die maximale Wasserstauhöhe) 30 cm. Beim Auslaufbauwerk handelte es sich um eine Art Schlitzsperre, bei welcher der Schlitz durch Einschieben von vertikalen und horizontalen Elementen zwischen null und 30 cm variiert, aber auch zu einer grossen Dole umgestaltet werden konnte.

Der Ablagerungsplatz hatte demnach die in der Natur kaum je anzutreffende Ausgestaltung eines horizontalen Beckens mit vertikalen Umrandungen. Auf diese Tatsache muss später noch eingegangen werden. Vertikale Bleche verschiedener Länge (im Grundriss z.T. gerundet) ermöglichten die Aenderung der Rechteckform des Ablagerungsplatzes in eine beliebige andere.

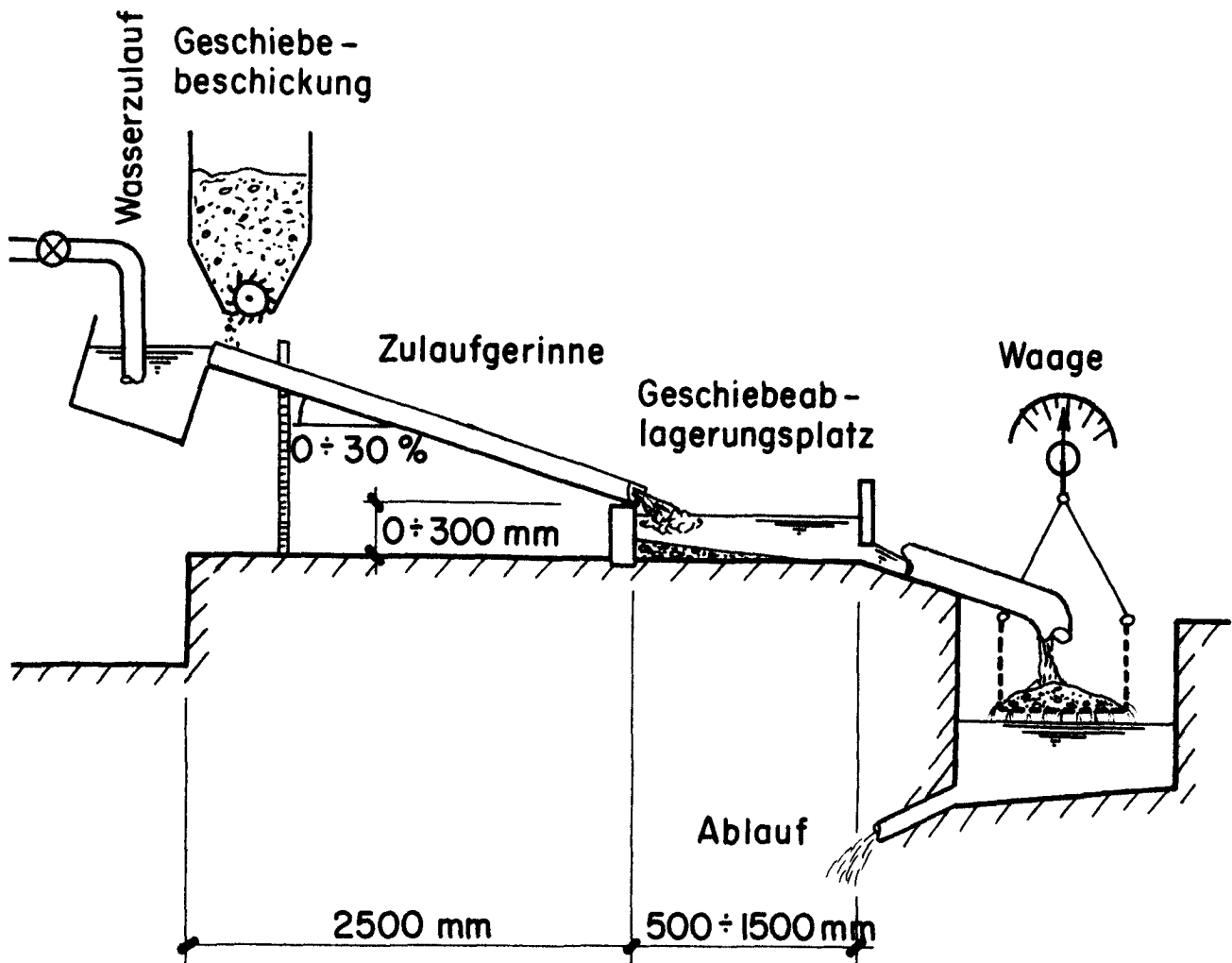


Bild 3 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung im Labor.

Wasser und Geschiebe gelangten über ein 250 cm langes, meistens 15 cm breites Zulaufgerinne in den Ablagerungsplatz. Die Rinne konnte zwischen 0 und 30% geneigt werden, war auf beiden Seiten durch 10 cm hohe Plexiglaswände begrenzt und enthielt auf dem Grund über die gesamte Länge alle 5 cm eine Art Sohlgurten (1 cm hoch), welche bewirkten, dass das Geschiebe den Ablagerungsplatz nicht als rutschende Masse, sondern - wie normalerweise in der Natur - als rollende Einzelkörner erreichte.

Im Gegensatz zur beschriebenen Anordnung wurde für die Untersuchung der Schächten-Rückhaltesperre die natürliche Topographie im 5 m langen Modell maßstabsgetreu 1 : 50 nachgebildet. Eine klare Unterscheidung zwischen Zulaufgerinne und Ablagerungsplatz gab es nicht, weil ein Einlaufbauwerk fehlte. Variabel war in diesem Modell in beschränktem Rahmen lediglich die Sperrenöffnung.

### 2.2.2. Wasser- und Geschiebebeschickung

Mit dem Zulaufgerinne fest verbunden war ein je nach Neigung etwa 80 l fassendes Beruhigungsbecken, in welches der Schlauch der Wasserzuleitung mündete. Die Steuerung des Wasserzulaufes geschah für  $Q \geq 1$  l/s manometrisch (Düse), für  $Q \leq 1$  l/s mit einer am Schieberrad eigens zu diesem Zweck angebrachten und geeichten improvisierten Skala.

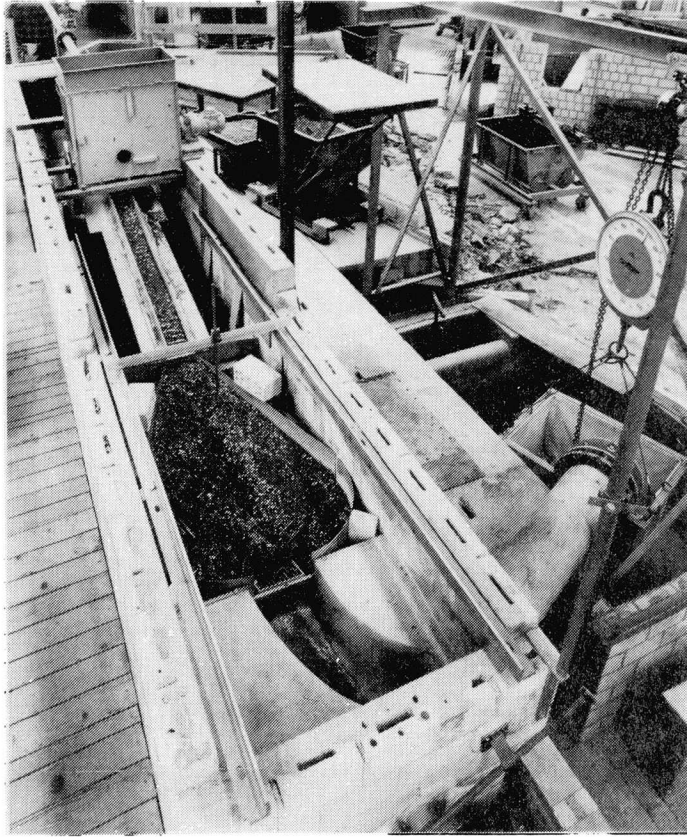


Bild 4 Ansicht des Modelles in der Halle der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH. Links oben Wasserzuführung und Beschickungsmaschine, darunter Gerinne und Ablagerungsplatz, rechts die Geschiebewaage über dem Sandfang.

Das Geschiebe gelangte in nassem Zustand durch eine Beschickungsmaschine am oberen Ende ins Zulaufgerinne. Die maximale Beschickungsmenge betrug 14 l/min. ( $\approx 0,23$  l/s). Bild 5 zeigt die für die meisten Versuche verwendete Geschiebemischung, welche als angenäherte Fullerkurve den Schächten-Versuchen zugrunde gelegt war. Es handelt sich dabei um eine einigermaßen typische Wildbachgeschiebemischung mit grosser Bandbreite, die allerdings noch bedeutend extremer sein könnte. Wie bekannt, kann sich die Kornzusammensetzung in einem Wildbach innerhalb kürzester Strecken - weniger Meter - je nach aktuellen lokalen Geschiebeeinstössen sichtbar ändern. Bis hinunter zum Geschiebeablageplatz im Talboden gleichen sich solche Schwankungen wieder einigermaßen aus, aber sie können auch dort noch gross sein. Zur Vereinfachung

der Versuche (Reduktion der variablen Parameter) wurde bei praktisch allen Versuchen mit dieser mittleren Sieblinie gearbeitet. Einige wenige Versuche (Schächen) berücksichtigten Extrema nach unten und oben.

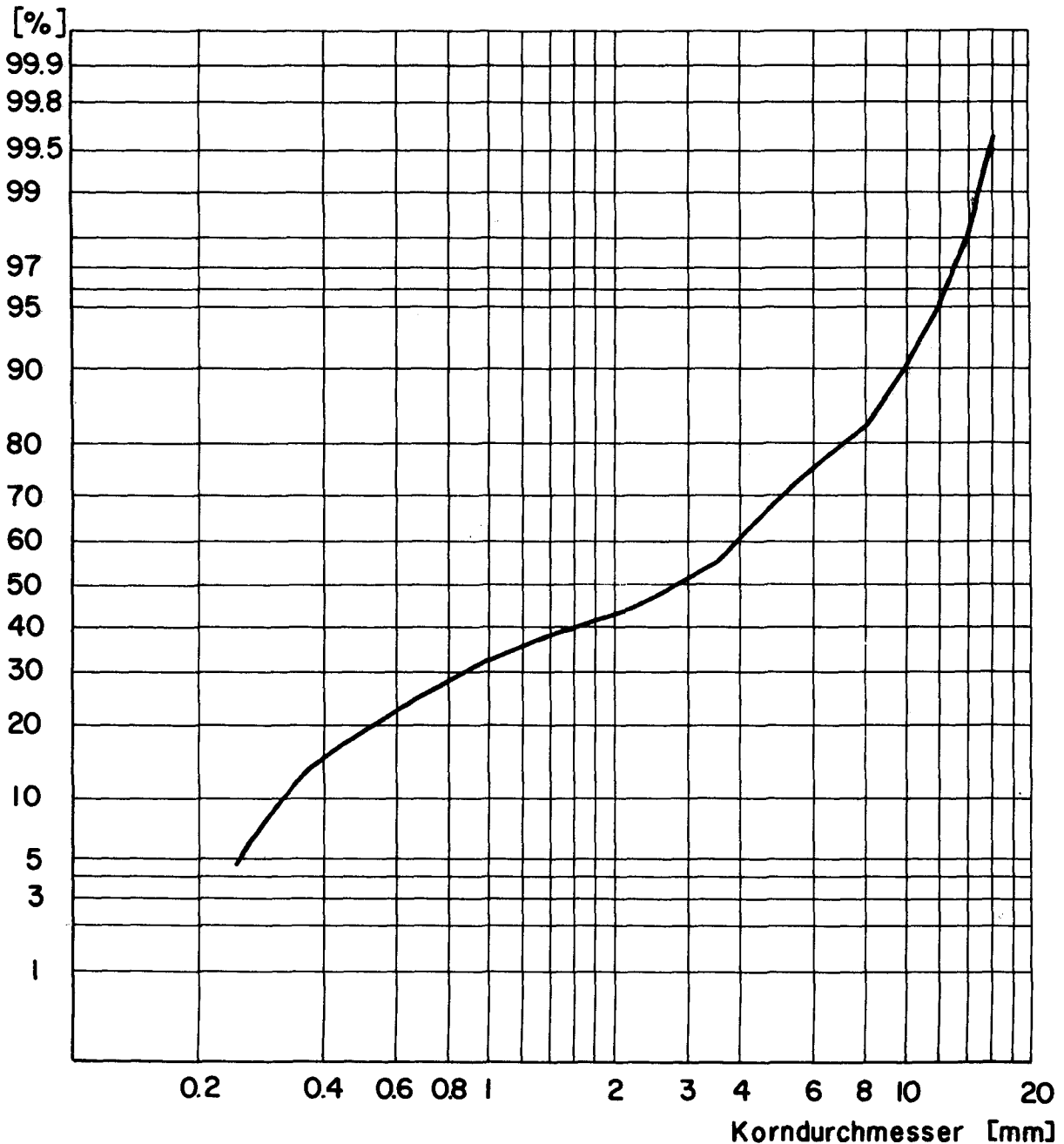


Bild 5 In den meisten Modellversuchen verwendete Geschiebemischung.

### 2.2.3. Modellauslauf

An die Rückhaltesperre schloss sich ein kurzes, zur Verhinderung von Verstopfungen stark geneigtes Gerinne und schliesslich ein Rohr an, welches Wasser und Geschiebe in einen wasserdurchlässigen Korb führte. Dieser Korb verhinderte einerseits, dass Geschiebe oder Holz in die Entwässerungsanlagen der Versuchshallen gelangte, und andererseits konnte im Korb das aus



dem Ablagerungsplatz gespülte Geschiebe kontinuierlich gemessen werden, da er an einer Waage aufgehängt war. Unter 2.4. soll darauf näher eingegangen werden.

## 2.3. Versuche

### 2.3.1. Geschiebeablagerungsplatz Schächen

Die Ergebnisse aus diesen Modellversuchen wurden - soweit sie den Auftrag des Kantons Uri betrafen - bereits an anderer Stelle (Zollinger 1981 und 1982) ausführlich dargestellt. Trotzdem wird auf sie im Rahmen dieser Arbeit nochmals eingegangen, falls es sich um Ergebnisse handelt, die nicht nur für den Fall des Schächens gültig sind. Zusätzlich führten diese Untersuchungen aber auch zu Erkenntnissen, die den Rahmen des Urner Auftrages gesprengt hätten und darum in den erwähnten Berichten keinen Niederschlag gefunden haben. Sie werden darum in dieser Arbeit präsentiert.

Nach den extremen Hochwasserereignissen im Jahre 1977 wurde bei Bürglen oberhalb von Altdorf für den Schächen eine knapp 20 m hohe und über 80 m breite Geschieberückhaltesperre projektiert und inzwischen (1982) fertig erstellt. Da es sich um ein für Schweizer Verhältnisse wie auch von der Bedeutung für die Unterlieger (Altdorf, Munitionsfabrik) her umfangreiches Projekt handelte, sollte die Funktionstüchtigkeit der Balkensperre im hydraulischen Modellversuch überprüft werden. In sechs Fragestellungen ging es um die Schlitzbreite, die Kolkverhältnisse unterhalb der Sperre und um die Erosion am linken Ufer des oberliegenden Ablagerungsplatzes. Genau genommen ging es allerdings nicht um einen eigentlichen Ablagerungsplatz, sondern um die Auffüllung des vorhandenen, relativ breiten, etwa 10 m tief eingeschnittenen Bachlaufes.

Für die vorliegende Arbeit interessierten drei weitere, oben noch nicht erwähnte Fragen, nämlich,

- ob das Volumen des Ablagerungsplatzes gross genug ist, um die Projektgeschiebefracht von 100'000 m<sup>3</sup> Material aufzunehmen,
- wie weit sich die Vorgänge der Ablagerung und der selbsttätigen Entleerung mit einer Veränderung des Balkenabstandes beeinflussen lassen,
- wie gross die Chancen für eine wirkungsvolle selbsttätige Entleerung sind, bzw. ob der Grossteil der Ablagerung maschinell weggeräumt werden muss.

Von den 80 durchgeführten Versuchen (in dieser Arbeit mit S 01 bis S 80 bezeichnet) brachten die folgenden Gruppen auch für den allgemeinen Fall interessante Ergebnisse:

1. Schlitzvarianten (Einfluss von Schlitzbreite, Schlitzlage und Balkenabstand auf Ablagerungen und Spülungen).
2. Einbauten im Ablagerungsplatz (Einfluss von Bühnen vor allem auf selbsttätige Entleerungen).

3. Baggerungen im Verlandungskörper als Unterstützung der Spülungen.
4. Treibholz (Einfluss auf die Spülungen, Bildung von Verklausungen u.a.).
5. Extreme Kornverteilungen (Änderung der Ablagerungs- und Spülvorgänge).

### 2.3.2. Ablagerungsformen

Wie in Kapitel 4 noch gezeigt werden soll, unterscheidet man bei den Ablagerungen - genau wie bei der Schwemmkegelbildung - drei Phasen. Bei der Füllung eines Ablagerungsplatzes spielen vor allem die ersten beiden Phasen eine Rolle. Die Versuche 1 - 125 befassten sich mit der Bildungsphase 1, Versuche 127 - 179 mit der Phase 2. Zur Numerierung der Versuche ist zu sagen, dass nach jeder Ablagerung eine Spülung durchgeführt worden ist. Ungerade Versuchsnummern bezeichnen Ablagerungsversuche, gerade Nummern die jeweils folgenden Spülversuche.

Das Ziel dieser Untersuchungen war eine systematische Zusammenstellung der in einem Geschiebeablagerungsplatz möglichen Ablagerungsformen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern. Die folgenden Grössen wurden in möglichst allen Kombinationen variiert:

- Ablagerungsplatz:
  - Länge
  - Breite
  - Höhe des Einlaufabsturzes
  - Auslaufbauwerk (einziges Ziel: Regulierung des Wasserrückstaus im Becken)
- Zulaufgerinne:
  - Gefälle
  - Breite
- Beschickung:
  - Wassermenge absolut
  - Geschiebemenge absolut
  - Verhältnis Wasser : Geschiebe

Wie man sich durch Aufstellung einer Kombinationsmatrix (alle Parameter sowohl auf der Ordinate wie auf der Abszisse) leicht überzeugen kann (die Matrix ist symmetrisch und die Diagonalglieder sind uninteressant), ergeben sich für die Kombination von zwei Parametern  $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 = 28$  Möglichkeiten. Variiert man nun jeden Parameter mit nur zwei Extremwerten, so ergeben sich für jede Kombinationsmöglichkeit vier Versuche. Insgesamt wären demnach  $28 \times 4 = 112$  Versuche zu machen, bei dreifacher Variation jedes Parameters sogar deren 252 ( $28 \times 9$ ).

Bei den errechneten Versuchszahlen handelt es sich um theoretische Werte. Beim rein gedankemässigen Durchgehen der verschiedenen Versuche erkennt man, dass einige Kombinationen weggelassen werden können. Bei der Durchführung des Versuchsprogramms entfielen noch einige andere Kombinationen. So erwies sich z.B., dass die Breite des Zulaufgerinnes für die Ablagerungen relativ uninteressant ist. Oder es zeigte sich, dass man im relativen Vergleich dasselbe erreicht, wenn man entweder die Höhe des Einlaufabsturzes oder die Breite des Ablagerungsplatzes vergrössert oder verkleinert. Mit solchen und ähnlichen Erkenntnissen konnte das theoretisch sehr umfangreiche Versuchsprogramm stark verkleinert werden, so dass für die Ablagerungsphase 1

(inklusive noch nicht vorhandene Versuchserfahrungen und oben erwähnte Erkenntnisse) noch 63, für Phase 2 sogar nur noch 27 Versuche durchgeführt werden mussten.

Sowohl die Wasser- als auch die Geschiebemenge waren bei jedem Versuch über die Zeit konstant (und damit auch der Rückstau im Becken). Bei Wasserstau im Ablagerungsbecken musste dieser am Ende des Versuches sehr langsam reduziert werden, damit die Ablagerungsformen nicht durch Grundbrüche zerstört wurden. Der Einsatz der Photogrammetrie ermöglichte die genaue Aufnahme aller Endstadien und nach Auswertung der Bilder deren Vergleich untereinander.

### 2.3.3. Spülformen

Wie erwähnt, folgte jedem Ablagerungsversuch eine Spülung, die allen geraden Versuchsnummern zwischen 2 und 180 entsprechen. Das Ziel war, wie bei den Ablagerungen, die Aufstellung einer Morphologie der möglichen Spülformen. Die bei den Ablagerungen erwähnten neun Variablen blieben sich im wesentlichen gleich, ausser dass

- das Auslaufbauwerk immer voll geöffnet war und damit kein Wasserstau eintrat,
- kein Geschiebe beschickt wurde.

Im weiteren wurde die Wassermenge nicht konstantgehalten, sondern innerhalb von 40 Minuten in drei Stufen von der halben auf die ganze Menge gesteigert, mit welcher im vorhergehenden Versuch die Ablagerung stattfand. Alle Ablagerungen wurden auf diese Art und Weise zu einem mehr oder weniger grossen Teil gespült, also auch jene, die unter vollem Wasserstau entstanden waren. Weil alle Spülungen auch zu Beginn nicht ohne Wasserstau abliefen, gab es damit natürlich Situationen, welche in der Natur nie eintreffen, und die bei den Auswertungen nur bedingt berücksichtigt werden konnten.

Zudem erkennt man aus dem oben Gesagten, dass eine Morphologie der Spülungen nur auf Grund dieser Versuche unvollständig ausfallen müsste, da Spülungen vor allem bei Hochwasserspitzen auch bei Wasserstau, besonders aber bei zurückgehendem Stau ablaufen. Für eine umfassende Uebersicht der Spülungen war darum der Bezug der Ergebnisse aus den Versuchen mit der Simulation von Abflussganglinien unerlässlich.

Die Ergebnisse der Spülversuche fanden ihren Niederschlag in Protokollen, verbal und photographisch mit Schrägbildern. Die Spülmengen konnten nur bedingt gemessen werden, weil es sich oft nur um Verlagerungen im Ablagerungsplatz handelte. Diese Feststellung ist übrigens sehr bemerkenswert, da es sich bei den Spülwassermengen um (geschiebelose!) Grössen handelte (50 - 100% der Ablagerungs-, d.h. Hochwassermenge), welche in der Natur kaum je auftreten. Photogrammetrische Aufnahmen fanden nicht statt.

### 2.3.4. Simulation von Hochwasserganglinien

Bild 6 zeigt die all diesen Versuchen zugrunde gelegten Ganglinien für Wasser und Geschiebe. Da man in der Natur nicht immer klar zwischen einer Ablagerungs- und einer Spülphase unterscheiden kann, ja, bei Hochwasser oft beides

gleichzeitig stattfindet, sollte mit der Simulation einer typischen Hochwassersituation ein realistischer, immer wieder auftretender Fall untersucht werden, bei welchem der Ablagerung unmittelbar eine Spülung folgt. Daneben dienten die Versuche noch der Klärung anderer Fragen. Die Durchläufe 181 - 186 und 196 - 204 enthielten Voruntersuchungen (Bestimmung der geeigneten Ganglinien und der vier Staufälle), die anderen Versuche lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Variation der Länge des Ablagerungsplatzes (Versuche 205 - 260)

In Abhängigkeit von vier Staufällen (Vollstau im Ablagerungsplatz während 15 Min. (Stau 3), 9 Min. (Stau 2), 4 Min. (Stau 1) und gar nicht eintretend (Stau 0); Vollstau = Wasserrückstau im Becken bis mindestens auf die Höhe 12,5 cm (Höhe der Ueberfallsektion der Rückhaltesperre) bewirkt durch vier entsprechende Durchflussöffnungen) kamen drei Längen des Ablagerungsbeckens zum Einsatz: 50, 100 und 150 cm. In weiteren Versuchsserien blieb der Ablagerungsplatz nach dem Durchgang des ersten Hochwassers unverändert gefüllt, bevor ein zweites, identisches Hochwasser eintrat. Auch vor dem dritten Durchlauf erfolgte keine Leerung. In dieser Art folgten für jede der drei Längen sechs Hochwasserwellen hintereinander. Ziel war es, die grösstmögliche Füllung des Ablagerungsplatzes zu erreichen.

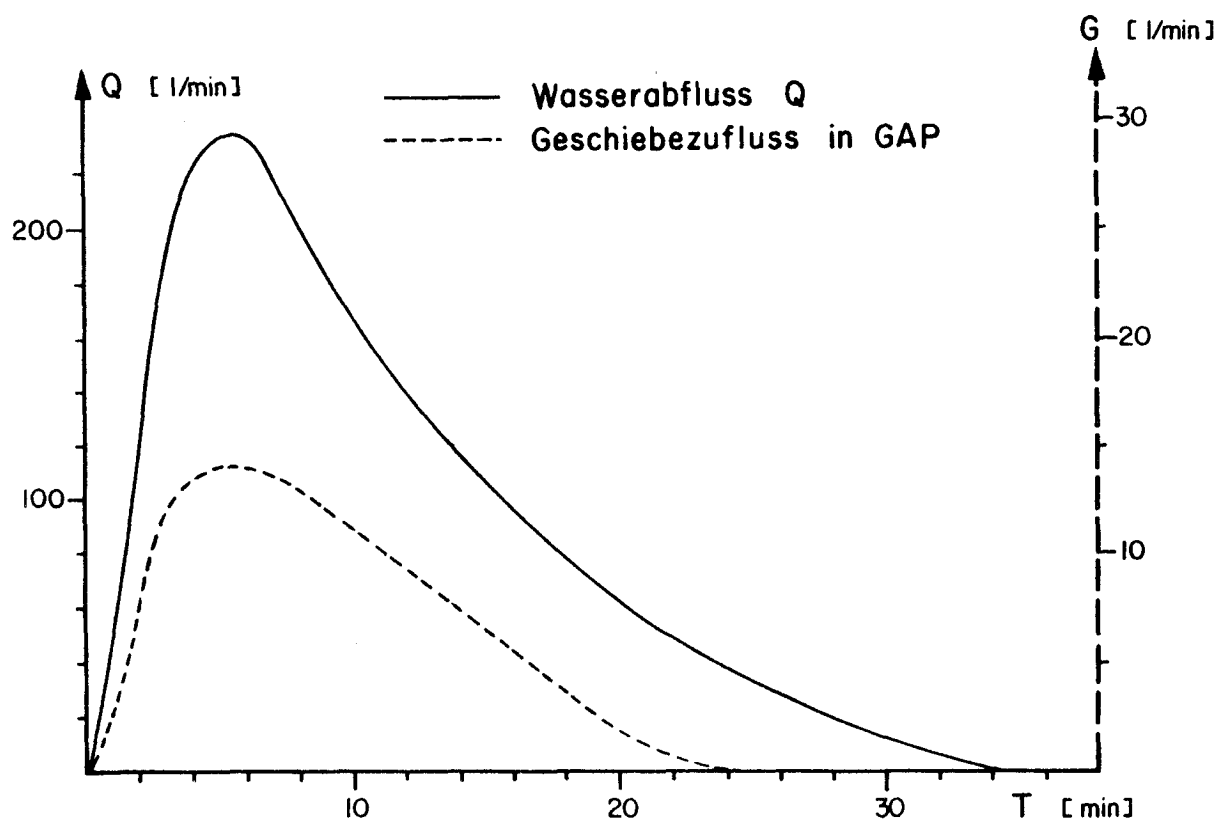


Bild 6 Bei den Modellversuchen verwendete Standardganglinien für Wasser und Geschiebe.

- Veränderte Ganglinien (Versuche 271 - 286)

Die beiden Grundganglinien für Wasser und Geschiebe wurden einerseits parallel zueinander und andererseits unabhängig voneinander zeitlich gestreckt und quantitativ überhöht oder gesenkt. Dadurch entstanden Geschiebekonzentrationsänderungen im Zufluss, bzw. die gleiche Geschiebefracht wurde bei weniger Wasser in längerer Zeit transportiert.

- Reproduzierbarkeit und Empfindlichkeit (Versuche 261 - 270)

In dieser Serie wurde ein Versuch unter möglichst identischen Bedingungen fünfmal wiederholt. Der Vergleich der nicht identischen Ergebnisse sollte Hinweise auf die Empfindlichkeit bzw. die stochastisch bedingten Einflüsse auf die Versuche allgemein geben.

- Ablagerungsplatz ohne Absturz beim Einlauf (Versuche 289 - 300)

Bei den Versuchen mit den kurzen Längen des Ablagerungsplatzes (50 cm) zeigte es sich, dass die Wurfweite des schiessenden Wassers so nahe zum Rückhaltebauwerk reichte, dass dieses noch voll in den entstehenden Wassersprung zu liegen kam. Gar nicht im Sinne eines Ablagerungsplatzes konnte sich das Wasser im Becken kaum mehr beruhigen, und das Geschiebe wurde zum grossen Teil direkt durch die Sperrenöffnung oder sogar über die Abflusssektion gerissen. Um diesen ungünstigen Fall zu vermeiden oder mindestens zu mildern, wurde der Absturz beim Einlauf weggelassen, so dass der Beckenboden direkt ans Gerinne anschloss. In den Versuchen variierten Beckenlänge und Stauverhältnisse.

- Form des Ablagerungsplatzes (Versuche 301 - 322)

Alle bisher durchgeführten Versuche - mit Ausnahme der Untersuchungen zum Schächchen - betrafen Geschiebeablagerungsplätze in viereckiger Form, wie man sie in der Praxis aus verschiedenen Gründen kaum je baute und nie mehr bauen wird. Den bisherigen Untersuchungen genügte die Viereckform. Es liess sich aber vermuten, dass das Beckenvolumen, die Ablagerungen und vor allem die Spülungen mit anderen Grundrissformen optimiert werden könnten. Zur Anwendung kam die sich nach oben oder unten verengende Birnenform unter geänderten Stauverhältnissen sowie mit und ohne Absturz beim Beckeneinlauf.

Bei allen Versuchen mit Ganglinien wurde die Geschiebewaage eingesetzt. Sie ermöglichte die dauernde Messung des aus dem Ablagerungsplatz ausgespülten Geschiebes. Die hauptsächlichen Ergebnisse aus den Versuchen waren denn auch die Vergleiche dieser gemessenen Ausflussganglinien untereinander und mit den Zuflussganglinien.

### 2.3.5. Optimale Sperrenöffnungen

Im Zusammenhang mit der Ermittlung eines möglichst langen Staus bei gegebener Ganglinie stellte sich die Frage, wie klein die Ausflussöffnung an der Rückhaltesperre gewählt werden konnte, ohne dass bei den hohen, aber üblichen

Geschiebestößen Verklausungen entstanden, die den gesamten Geschiebetrieb aus dem Ablagerungsplatz sofort unterbunden hätten. Für die speziellen Bedürfnisse konnte die Öffnung relativ problemlos im Modell geprüft werden. Für die Praxis stellt sich aber beispielsweise die Frage: Sind vertikale oder horizontale Öffnungen (Dolen) geeigneter?

Die Versuche 401 - 442 sollten diese Frage beantworten. Die Versuchsanordnung sah wie folgt aus: Am Ende des Zulaufgerinnes befand sich eine Art Gitter aus parallelen Stäben. Es war möglich, den Stababstand zu verändern und die Stäbe senkrecht oder parallel zur Fliessrichtung anzuordnen. Damit hatte man entweder viele nebeneinander stehende vertikale Öffnungen, oder übereinander liegende horizontale. Nun wurde das Zulaufgerinne so lange konstant mit Wasser und Geschiebe beschickt, bis die Auflandung hinter dem Gitter eine Höhe von 10 cm (Gerinnehöhe) erreicht hatte. Dazu wurde die Zeit gemessen.

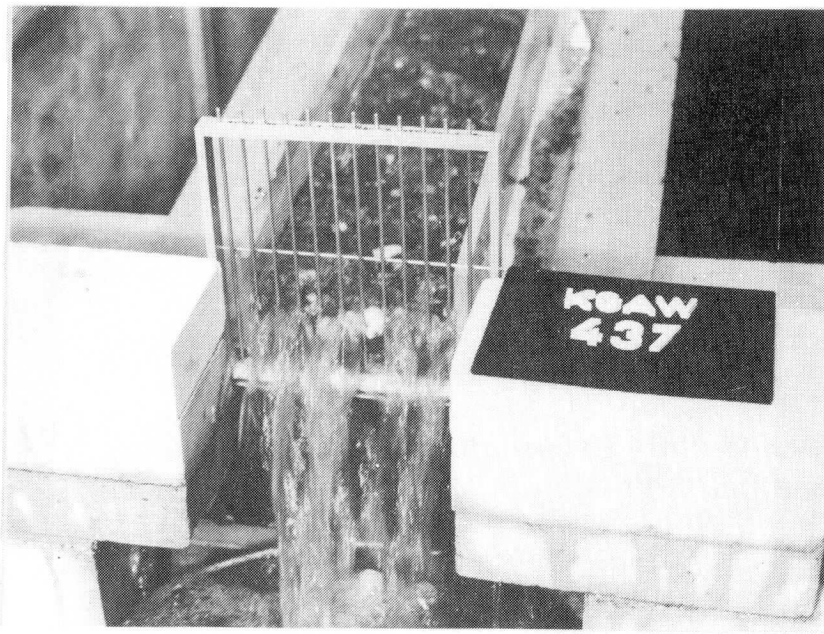


Bild 7 Versuchsanordnung zur Optimierung der Sperrenöffnungen (vertikale und horizontale Öffnungen).

Die Numerierung der Versuche erfolgte derart, dass gerade Nummern die Versuche mit horizontalen Stäben, ungerade Nummern jene mit vertikalen Stäben bezeichneten. Folgende Parameter wurden variiert:

1. Stababstand (5, 9, 13, 17, 21 und 25 mm, die Stabdicke betrug 2 mm)
2. Wassermenge (0,5, 1 und 2 l/s)
3. Geschiebemenge (0,03 und 0,1 l/s)
4. Gefälle des Zulaufgerinnes (11, 13, 16, 19 und 22%)

Die Ergebnisse liessen sich aus Vergleichen der verschiedenen Verlandungszeiten anhand von Diagrammen darstellen (siehe 7.3.5.2.).

### 2.3.6. Treibholz

Bei den Untersuchungen zum Schächen kam in den letzten Versuchen (S 65 - S 80) Treibholz zum Einsatz. Dort wurde vor allem auf den Vergleich einer Hochwasserganglinie mit und ohne Treibholz Wert gelegt. Die entsprechenden Ergebnisse werden in dieser Arbeit nochmals dargelegt.

Bei diesen Versuchen beobachtete man verschiedene Phänomene, die man damals einfach zur Kenntnis nahm. Ihren Ursachen und Randbedingungen nachzugehen, war im Rahmen des Schächen-Auftrages nur sehr bedingt möglich. Hier bestand daher eine Lücke, welche mit Versuchen allgemeiner Natur zum Teil geschlossen werden sollte. Die Versuche 501 - 554 dienten dazu, einige Hinweise zu Antworten auf die folgenden Fragen zu finden:

1. Wie wird das Treibholz vom Einlauf in den Ablagerungsplatz bis zum Rückhaltebauwerk transportiert?
2. Unter welchen Bedingungen und wo bleibt das Treibholz im Ablagerungsplatz liegen? Wann wird es eingeschottert?
3. Wie entsteht eine Verklausung hinter der Rückhaltesperre?
4. Unter welchen Bedingungen bildet sich im Ablagerungsplatz ein Holzteppich? Was geschieht in diesem Fall mit dem nachfolgenden Geschiebe?
5. Wie kann Treibholz durch und vor allem auch über die Rückhaltesperre getriftet werden?
6. Mit welchen baulichen Massnahmen kann man die Unberechenbarkeit der Folgen von Treibholzanschwemmungen möglichst wirkungsvoll mildern?

Zum Problem des Treibholzes existieren weder in der Modelltechnik noch in der Praxis fundierte Erfahrungen. Neben den oben erwähnten Modellversuchen ging es darum zusätzlich um die Klärung von Fragen grundlegender Natur:

- Was hat man unter Treibholz zu verstehen?
  - Art der Holzstücke (Baumstrünke, Stämme, Aeste, Zweige, Laub)
  - Masse des Holzes (Länge, Durchmesser)
- Mit welchen Treibholzmengen muss man rechnen?
- Zu welchem Zeitpunkt einer Hochwasserwelle fällt das für unangenehme Folgen ausschlaggebende Holz an?
- Wie wird Treibholz transportiert?
  - Schwimmt es (wie üblich für Holz) im einen Extremfall?
  - Oder wird es (schwerer als Wasser?) ähnlich dem Geschiebe teilweise unter Wasser rollend und geschleppt vorwärtsbewegt (sog. Senker bei der Holztrift)?

- Wird das Holz an den Oeffnungen des Rückhaltebauwerkes durch Druck und Stau zerbrochen, und müsste dieser Vorgang demnach auch im Modell simuliert werden?

Das Herantasten an die Antworten auf diese Fragen geschah durch Gespräche mit Praktikern, durch eigene Beobachtungen und das Studium der extrem spärlich vorhandenen Literatur.

#### 2.4. Messungen im weiteren Sinn

Bild 8 zeigt die wichtigsten Messmethoden in einer Uebersicht.

	Protokoll (verbal)	<u>M E S S M E T H O D E N</u>						
		Beschickungsmaschine	Geschiebewaage	Messkübel	Stechpegel	Manometer	Schrägfotos	Stereofotos
<u>Messgrößen:</u>								
Geschiebe : - Volumen				X	X			X
- Zufluss		X						
- Abfluss			X					
- Topographie	X			X			X	X
Wasser : - Abfluss						X		
- Stauhöhen					X			
Treibholz : - Ablagerungen	X						X	
- Verkläusungen	X						X	
Allgemeiner Versuchsablauf	X						X	

Bild 8 Die wichtigsten Messmethoden bei den Modellversuchen.



## Versuchsprotokolle

Auf einem vorgedruckten Formular wurden festgehalten: Grunddaten der Versuchsdurchführung, Messungen, Beobachtungen, Hinweise auf Beiblätter (Spüldaten, Skizzen, Schrägaufnahmen, Stereophotos).

## Geschiebemessungen

Während eines Versuchs wurde das Volumen kontinuierlich gemessen, nach Abschluss zusätzlich das Gesamtvolumen ermittelt. Zu beiden Methoden sind noch einige Bemerkungen notwendig.

### - Messungen von abgelagerten Gesamtvolumina

.....

Zum einen wurde das Geschiebe in einen Messkübel geschaufelt und das Volumen in Litern abgelesen. Zum anderen resultierten die Volumina direkt aus den photogrammetrischen Auswertungen der Stereoaufnahmen. Vergleiche zeigten Differenzen von einem durchschnittlichen Faktor 1,1, weil angeschwemmtes Geschiebe bedeutend dichter gelagert ist als relativ locker in einen Kübel geschaufeltes. Je nach verglichenen Messungen musste diese Differenz berücksichtigt werden.

### - Kontinuierliche Geschiebemessungen

.....

Dazu diente ein wasserdurchlässiger Korb, in welchem sämtliches Geschiebe aufgefangen wurde. Der Korb hing an einer Waage, woran von einer Hilfsperson mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  kg kontinuierlich Ablesungen vorgenommen werden konnten. Mit diesen Angaben liess sich die Abflussganglinie aus dem Ablagerungsplatz nachträglich graphisch darstellen.

Diese Geschiebewaage war an der VAW für ein anderes Modell konstruiert worden, wobei die Wägung des Geschiebes während der Versuche unter Wasser erfolgte, d.h., der ganze Korb hing im Wasser und die Zuleitung mündete unter dem Wasserspiegel in ihn. Damit wurden Messungen erreicht, die unabhängig von den Wassermengen bzw. von der Sättigung des sich bereits im Korb befindlichen Geschiebes waren.

Wegen der lokalen Platzverhältnisse (insbesondere wegen des Niveaus des untenliegenden Sandfanges, in welchem der Korb hängen musste) war eine Messung unter Wasser bei den vorliegenden Versuchen nicht möglich. Aus einem zweiten Grund war sie zudem nicht sehr erwünscht: Bekanntlich werden Wägungen im Wasser vom Auftrieb beeinflusst. Beim gegebenen spezifischen Gewicht des Geschiebes von 1,75 kg/l hätte dies eine Reduktion der Messgrößen um 57% ergeben. Da einerseits auch kleine Geschiebemengen gemessen werden sollten und andererseits die Messgenauigkeit bei  $\pm 2$  kg lag, erschien es unvorteilhaft, die Messgrößen so stark zu reduzieren (Geschiebemengen unter 3 l hätten kaum mehr sicher gemessen werden können).

Dafür musste nun der Fehler korrigiert werden, der durch das in den Korb gelangende Wasser entstand. Grundsätzlich ist dazu zu sagen, dass dieser Fehler insofern nicht so schwerwiegend war, als für die erzielten Ganglinien die absoluten Werte im Gegensatz zu den relativen (Differenzen) nicht primär interessierten. Diese relativen Differenzen konnten hingegen einfach korrigiert werden, da sie nur

durch die kinetische Energie des fallenden Wassers verfälscht wurden. Dieses "Gewicht" konnte vor den Versuchen in Abhängigkeit von der Wassermenge gemessen werden und änderte in der interessanten Phase nach der Hochwasserspitze langsam und kontinuierlich, so dass es wiederum praktisch vernachlässigt werden konnte.

Eine Korrektur musste hingegen am Ende eines jeden Versuchs am Gesamtgewicht des gespülten Materials angebracht werden. Sie wurde nach dem Abtropfen des Materials (nach ca. 24 Stunden) ermittelt und betrug je nach Füllungsgrad des Korbes zwischen 6 und 9%. Dazu wurden bei den ersten Versuchen Messungen durchgeführt, aufgrund derer die späteren Versuche korrigiert werden konnten, ohne dass das Material jedesmal vollständig abtropfte.

### Pegelstände

Bei einzelnen Versuchen wurden die Wasserstände mit Stechpegeln kontrolliert oder gemessen (Staukurven), in anderen Versuchen wurden einzelne Ablagerungskoten zur späteren Ueberprüfung der photogrammetrischen Auswertungen gemessen.

### Zeitmessungen

In den Versuchen 401 - 442 (optimale Sperrenöffnungen) stellten die Zeitmessungen direkte Ergebnisse dar. In anderen Versuchen liessen sich die abgelagerten Kubaturen mit den Zeiten, den Einstellungen der Geschiebeschickungsmaschine und deren Eichkurve kontrollieren.

### Stereoaufnahmen

An einem Mast an der linksufrigen Umfassungsmauer des Modells befand sich, 3,5 m über diesem, ein schwenkbarer Arm zur Befestigung einer Wild C 40-Stereokamera. Zum Zweck der detaillierten topographischen Auswertung bzw. zu einfachen aber präzisen Vergleichen wurden sämtliche Endstadien der Ablagerungsversuche 1 - 179 in stereoskopischen Vertikalaufnahmen festgehalten. Die Methode (inkl. Auswertungen, siehe 2.5.1.) erwies sich als äusserst elegant und zeitsparend.

### Schrägphotos

Optisch interessante, wichtige oder besonders anschauliche Versuchsstadien wurden bei Notierung der genauen Versuchszeiten mit einer Kleinbildkamera von Hand festgehalten. Die Aufnahmen dienten der Dokumentation von Versuchsabläufen und der rein qualitativen Ergänzung der Protokollnotizen.

## 2.5. Auswertung und Umsetzbarkeit der Modellversuche

Im grossen ganzen erfolgten die Versuchsauswertungen ohne Zwischenphasen in Form von Grafiken und Diagrammen. Ergänzende Bemerkungen dazu erübrigen sich. Eine Ausnahme wurde unter 2.4. diskutiert. Es handelt sich um die notwendigen Korrekturen an den Geschiebemessungen. Eine zweite Ausnahme bildeten die photogrammetrischen Auswertungen.

### 2.5.1. Photogrammetrische Auswertungen

Die vom Institut für Kulturtechnik der ETH erstmals eingesetzte Methode der topographischen Auswertung von Modellversuchen mit Hilfe der Photogrammetrie (Schmid 1972) wurde in dieser Arbeit den modernsten Möglichkeiten angepasst. Zum ersten Mal erfolgte die Auswertung von wasserbaulichen Modellen über die C 40-Stereobilder am analytischen Plotter (AP) des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH auf dem AC1 von Wild/Heerbrugg. Der AP ist eine der modernsten Weiterentwicklungen des Analogauswertegerätes. Während am Analoggerät das mathematische Modell der physikalischen Abbildung (Zentralperspektive in der klassischen Photogrammetrie) auf optisch-mechanischem Weg erstellt wird, geschieht dies am AP rechnerisch mit Hilfe eines Echtzeit-Computers.

Zur Auswertung eines Stereomodelles werden zuerst die Orientierungselemente beider Kammern (Lage des Projektionszentrums in bezug auf die Bildebene, Kamerastandorte und Drehwinkel), soweit sie nicht bekannt sind, bestimmt. Wie in einem Stereokomparator werden unabhängige Bildkoordinaten im linken und rechten Bild gemessen, und zwar von Passpunkten (bekannte Objektkoordinaten  $X$  und/oder  $Y$  und/oder  $Z$ ) und Neupunkten. Daraus kann das konkrete Abbildungsmodell Objekt  $\rightarrow$  Bild, bzw. können die Orientierungselemente berechnet werden. Bei entsprechender Einstellung dieser Elemente im Analoggerät ist das Stereomodell erstellt, indem sich homologe Strahlen (dem gleichen Objektpunkt zugehörig) bei richtiger Einstellung der Höhe ( $Z$ -Wert) innerhalb gewisser Fehlergrenzen schneiden.

Die Auswertung am AP erfolgte ohne mechanische Einstellung dieser Orientierungselemente. Dem Echtzeit- (= sehr schnellen) Rechner werden die Koordinaten ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) des auszuwertenden Objektpunktes eingegeben und aufgrund der jetzt bekannten Abbildungsgleichungen Objekt  $\rightarrow$  Bild in Bildkoordinaten umgerechnet, welche dann vom Gerät mittels Servomotoren angefahren werden. Die beiden Messmarken sitzen somit auf dem eingegebenen Objektpunkt. Die Eingabe der Objektkoordinaten erfolgt einerseits kontinuierlich (Suchen des Punktes) durch Drehen von zwei Handrädern und einer Fusscheibe, und andererseits soll die Bewegung der beiden Messmarken unmittelbar ausgeführt werden, damit der Operateur das Gefühl hat, er bewege die räumlich erscheinende Messmarke direkt. Diese beiden Forderungen erfüllt der Echtzeit-Rechner, der die Bewegung der Messmarken "dauernd" veranlasst. Beim AC1 erfolgte 50 mal pro Sekunde eine Neuberechnung der Abbildung und dazwischen eine lineare Interpolation zur Steuerung dieser Bewegungen, so dass dem Operateur ein absolut zitterfrei bewegtes Bild vorgezeigt wird.

Die eigentliche Auswertung der Modelle erfolgte punktweise, indem ein vorgegebenes quadratisches Gitter (Maschenweite 10 cm im Modell) lagemässig vom AC1 automatisch angesteuert und die Höhe des Punktes vom Operateur eingestellt (und damit gemessen) und registriert wurde. Die Auswertung dieses digitalen Geländemodelles erfolgte mit einem Programm von Dr. Zumofen (Institut für Geodäsie und Photogrammetrie). Die einzelnen Gitterpunkte wurden dabei zu einem Netz vermascht, auf den Vermaschungslinien die Höhen interpoliert und sodann die Höhenschichtlinien auf dem elektronischen Zeichentisch Wild TA2 ausgedruckt.

Die beschriebene Auswertungsart wurde aus drei Gründen gewählt:

- Der Orientierungsvorgang eines Stereomodelles am AP ist einfacher, rascher und besser als an einem Analoggerät.

- Die punktweise Auswertung verlangt weniger Erfahrung und Können vom Operateur. Sie ist damit schneller als die direkte Auswertung der Höhenschichtlinien.
- Die analytische Berechnung und der Ausdruck der Schichtlinien führten ohne den Einsatz eines Zeichners (Kosten!) zu brauchbaren Zeichnungen.

Im Vergleich zur Arbeit am Analoggerät (die Schächen-Versuche wurden darauf ausgewertet) war die Einarbeitungszeit (Elektronik, Software) etwas grösser. Sämtliche etwa 100 Modelle wurden vom Autor selbst ausgewertet. Zu Beginn dauerte die Orientierung und Auswertung eines Bildpaares etwa eine Stunde. Später reduzierte sich diese Zeit in günstigen Fällen (kleine Modelle) bis auf eine Viertelstunde. Die Arbeitsmethode erwies sich damit als äusserst rationell.

Die Auswertungen bildeten nach dem Abschluss der Versuche die erste, objektive Phase der Weiterverarbeitung der Ergebnisse. Darauf folgte die zweite Phase, die Interpretation der ausgewerteten Ergebnisse. Dabei machte es oft den Anschein, als ob es sich mindestens teilweise um einen subjektiv bedingten Arbeitsgang handle. Anlass zu dieser Annahme gab die z.T. überraschend grosse Streubreite der Ergebnisse.

#### 2.5.2. Ueberlegungen zur Reproduzierbarkeit der Versuche

Im Verlaufe der Arbeit stimmten zwei immer wieder gemachte Beobachtungen nachdenklich:

1. In ähnlichen oder sogar identischen Versuchsphasen fiel auf, dass die Versuchsabläufe mindestens über kürzere oder längere Zeiten nicht ähnlich oder identisch verliefen. Trotzdem unterschieden sich dann aber die Endergebnisse oft nicht wesentlich.
2. Absolut identisch durchgeführte Versuche brachten nicht die gleichen Ergebnisse. Diese wichen z.T. sogar erheblich voneinander ab.

Es seien dazu drei Beispiele erwähnt:

- Serie 261 - 270 zur Reproduzierbarkeit  
.....

Diese Serie von fünf Versuchen wurde im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit durchgeführt. Bild 9 zeigt die Zuflussganglinien (Wasser und Geschiebe), und unten die Spülganglinie aus dem Ablagerungsplatz für den Versuch 261/262. Bild 10 bringt die Spülganglinien der vier identischen Folgeversuche 263 - 270. Beim Vergleich erkennt man einige Unterschiede:

- Die gespülten Mengen liegen zwischen 45 und 59 l (Extreme), sind also um einen Faktor 1,3 voneinander verschieden.
- Die Geschiebetransportspitzen liegen zwischen 12 und 16 l/min. (Faktor 1,3).
- Der Geschiebetrieb begann im einen Extrem bei 14,0 min., im anderen erst bei 16,5 min.

Versuch 261/262

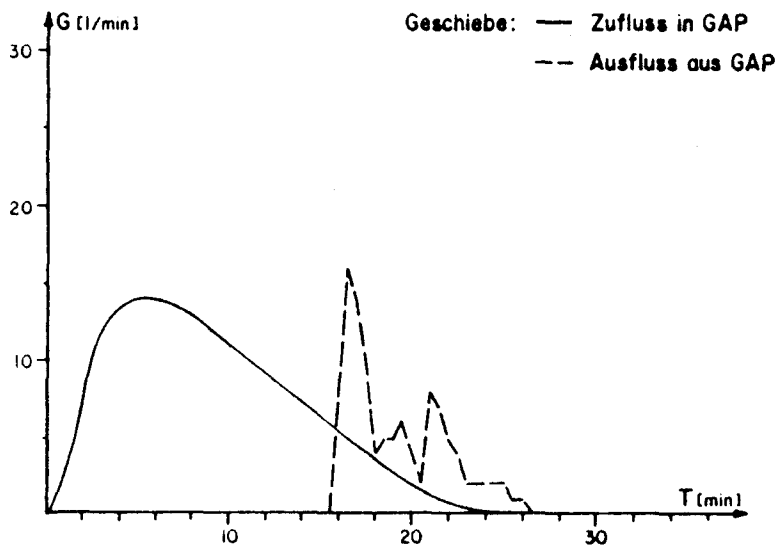
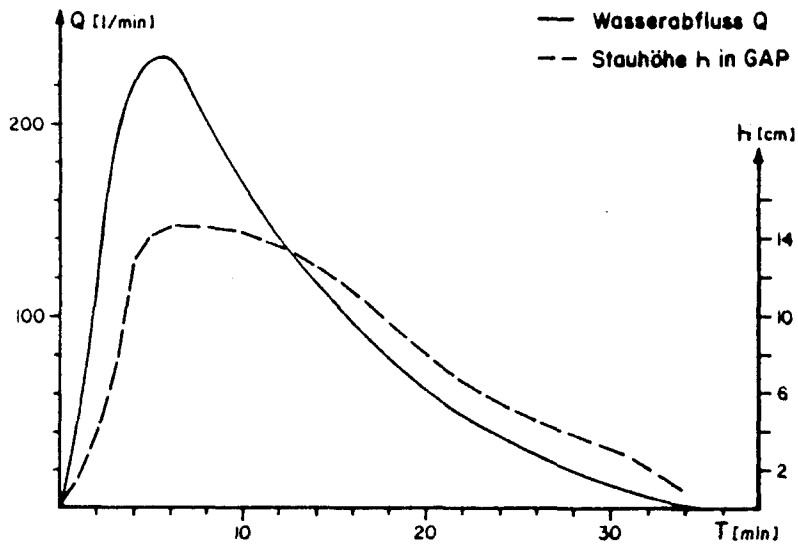


Bild 9 Versuch 261/262 (Absturz = 12 cm,  $I = 18\%$ , Beckenlänge = 100 cm, Breite = 100 cm).

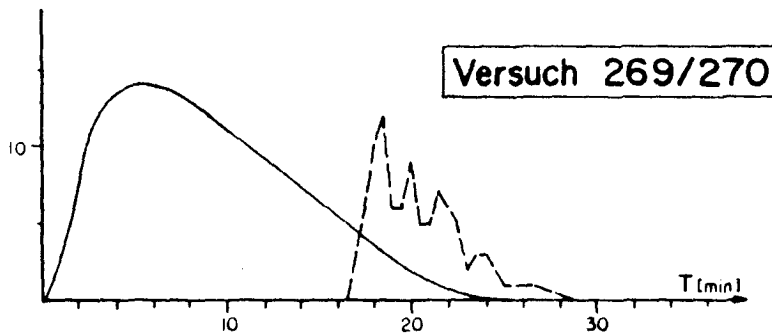
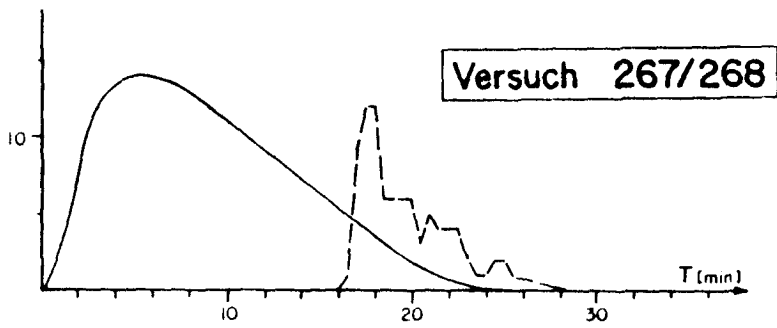
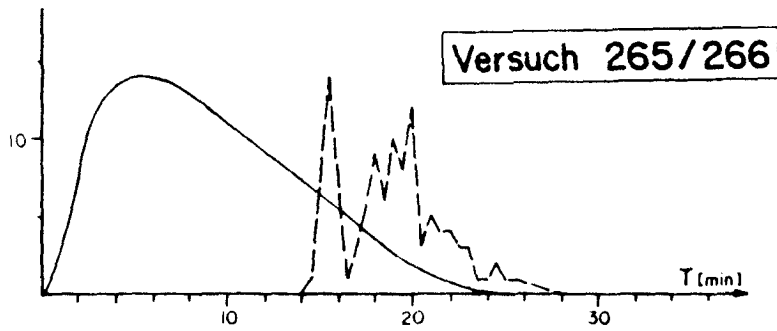
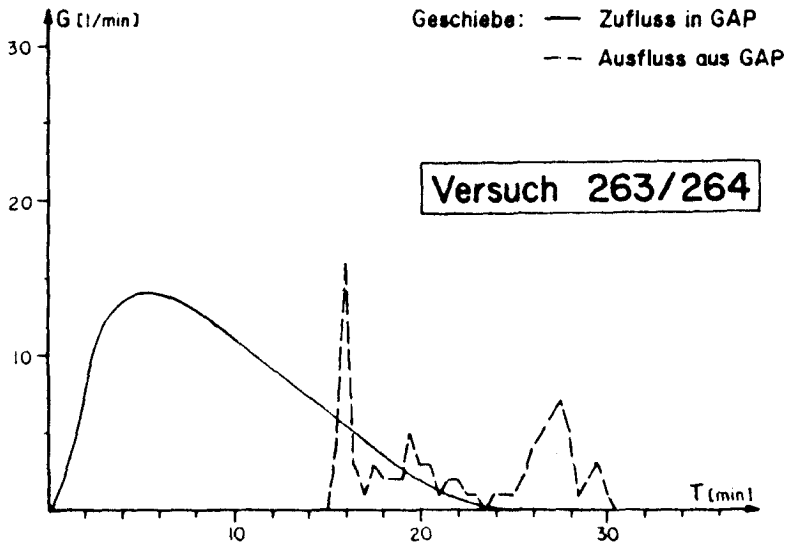


Bild 10 Ganglinien der Spülungen bei den Versuchen 263 - 270 (identische Versuchsbedingungen wie bei Versuch 261/262 in Bild 9)

- Das Ende des Geschiebetriebes erfolgte zwischen 26,5 und 30,5 min.
- Zum Teil gibt es nicht nur eine, sondern zwei oder noch mehr ausgeprägte Geschiebetriebspitzen.

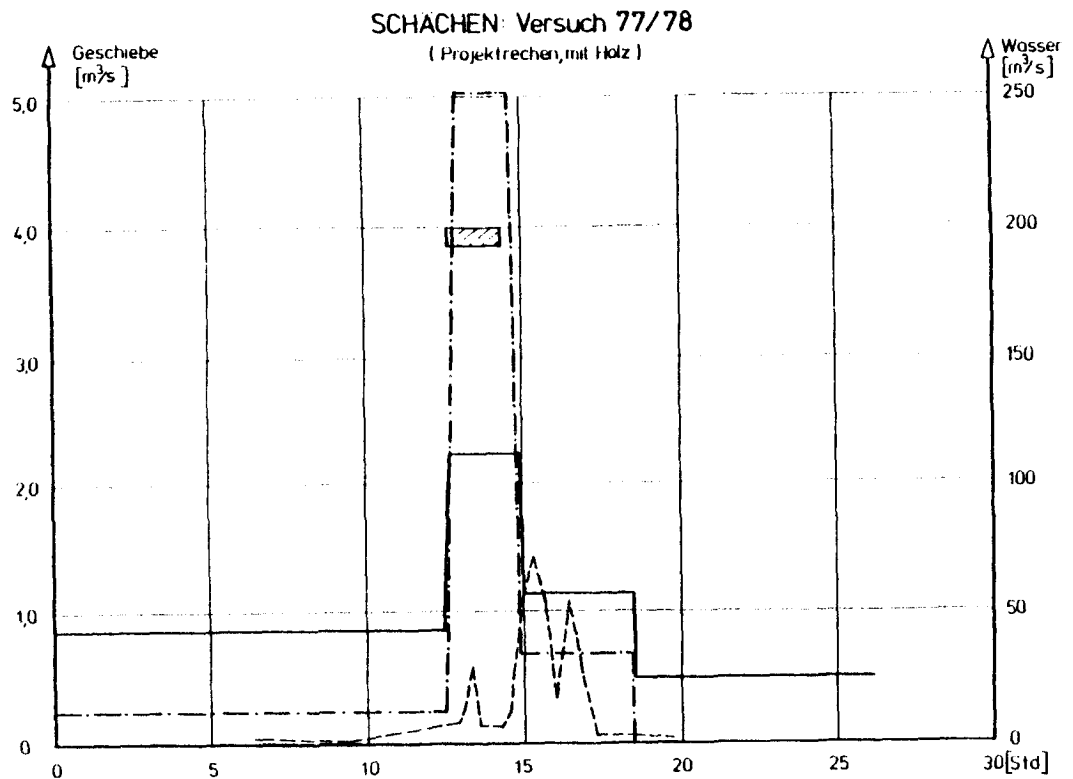
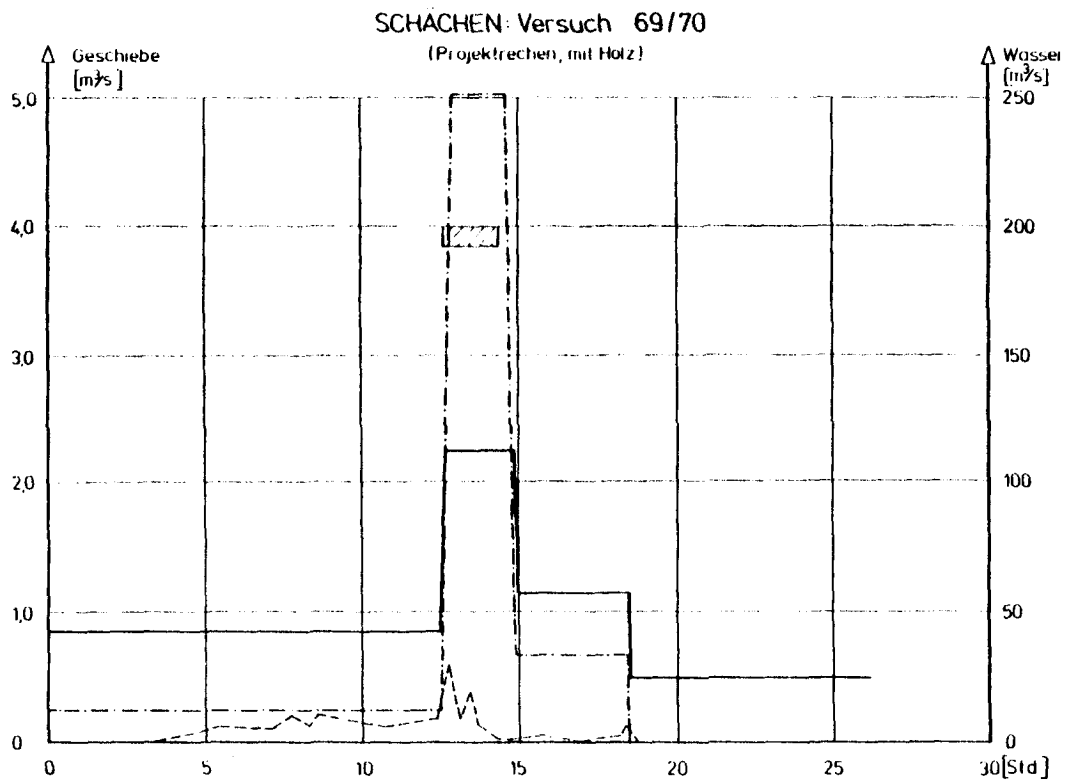
Neben diesen z.T. unübersehbaren Unterschieden gibt es aber auch gemeinsame Merkmale festzuhalten: Grösste Geschiebetriebspitze gleich zu Beginn, Tendenz des darauf langsam zurückgehenden Geschiebetriebes. Man muss aber bemerken, dass gerade die zweite Aussage nur möglich ist, weil man fünf verschiedene Ergebnisse miteinander vergleichen konnte. Sie wäre auch möglich gewesen, wenn man zum Vergleich z.B. nur die beiden Versuche 267/268 und 269/270 gehabt hätte. Es lässt sich nun aber ohne weiteres denken, dass man statt der ganzen Serie zufällig nur den Versuch 263/264 zur Interpretation zur Verfügung hätte. Dabei könnten nicht typische oder sogar falsche Auslegungen gemacht werden, weil man eben zufällig einen Fall vor sich hat, der relativ stark vom Normalfall abweicht.

- Schächen-Versuche S 69/70 und S 77/78  
.....

Die Ergebnisse können bei Verwendung von Treibholz noch bedeutend unterschiedlicher ausfallen, wie die Ganglinien der Versuche S 69/70 und S 77/78 in Bild 11 zeigen.

In beiden Versuchen bildete sich auf dem im Ablagerungsplatz gestauten Wasser ein Holzteppich. In S 69/70 entstand an der Balkensperre relativ kurz nach Beginn der Holzbeschickung eine Verklauung, welche den Geschiebetransport durch den Schlitz praktisch vollständig unterband. Nicht so bei S 77/78, wo sich die ebenfalls entstandene Verklauung weniger zwischen den Balken verkeilte und sich darum gegen Ende der Hochwasserspitze mit dem Stau und dem Holzteppich anheben konnte. Gleichzeitig oder wenig später erfolgte an der Spitze des bereits nahe zur Sperre gewachsenen Ablagerungskörpers ein Grundbruch, so dass das Geschiebe tunnelartig unter dem Holzteppich durch den Schlitz und aus dem Becken transportiert werden konnte. Die ausgespülte Geschiebemenge erhöhte sich damit von 6000 m<sup>3</sup> (S 69/70) um einen Faktor 2,3 auf 14'000 m<sup>3</sup> (S 77/78).

Im Gegensatz zur beschriebenen Reproduzierbarkeitsserie erkennt man nun bei diesen beiden identisch durchgeführten Versuchen eindeutig grundlegende Unterschiede im Ergebnis. Die Ursache ist ohne Zweifel das Treibholz, welches als Element im wahren Sinn des Wortes am ehesten unberechenbare Folgen mit sich bringen kann. Zusätzlich muss man allerdings auch noch festhalten, dass man Versuche mit Treibholz noch schwieriger als mit Geschiebe "identisch" durchführen kann, da es - im Gegensatz zu einem Geschiebekorn - unter Umständen sehr darauf ankommen kann, wann und wie ein grösseres Holzstück oder ein Baumstrunk ins Gerinne gelangt. Um einigermaßen identische Versuche zu erhalten, müssten alle Treibholzstücke gekennzeichnet und jeweils wieder zur gleichen Zeit und auf die gleiche Art ins Zulaufgerinne gegeben werden. Es ist klar, dass der damit verbundene Aufwand sehr gross ist. Zudem würden auch dann noch bedeutende Unterschiede im Versuchsablauf auftreten.



- Ganglinie Wasser
- - - Ganglinie Geschiebe in den Ablagerungsplatz
- - - Ganglinie Geschiebe aus dem Ablagerungsplatz
- ▨ Holzbeschickung

Bild 11 Ganglinien der Versuche S 69/70 und S 77/78 als Vergleich von Vorgängen mit und ohne Treibholz.



- Coanda-Effekt  
.....

Unter dem Coanda-Effekt versteht Rechten (1976) das Phänomen, dass die Lage der Hauptströmung mitten durch ein symmetrisches Becken instabil ist. Vielmehr besteht immer die Tendenz, entlang der linken oder rechten Beckenbegrenzung zu fließen, anstatt mitten durch das Becken direkt vom Einlauf auf den Auslauf zu. Dieses Anlegen an eine der beiden seitlichen Begrenzungen wird durch die Druckunterschiede verursacht, welche zwischen ruhendem und bewegtem Wasser entstehen. Interessant war es, zusätzlich festzustellen, dass in gewissen Fällen sowohl der Zustand rechts als auch jener links stabil war. Dabei konnte man mit manueller Einwirkung in den Wasserstrom den einen Zustand in den anderen überführen, ohne dass der Strom darauf sofort zurückpendelte. - Wegen der relativ grossen Breiten der Ablagerungsplätze bei den Versuchen 1 - 322 und 501 - 553 konnte der Coanda-Effekt nur selten beobachtet werden. Bei den Schächchen-Versuchen trat er jedoch - trotz asymmetrischem, gekrümmtem Becken - regelmässig auf.

Diese Beobachtungen zeigten, dass es wahrscheinlich bei allen Versuchen von vielen kleinen Zufälligkeiten (Unregelmässigkeiten im Geschiebetrieb, Ablagerungen einzelner grösserer Steine u.a.) abhing, wie nun eine Ablagerung oder eine Spülung im Detail ablief. Wenn aber solche nicht vorhersehbaren Vorgänge selbst in Modellversuchen im Labor auftreten, bei denen alle Randbedingungen optimal kontrolliert werden können, um wieviel wahrscheinlicher müssen dann solche "Unregelmässigkeiten" in einem typischen Wildbach mit seinen extrem schwankenden Abflüssen und Geschiebestössen auftreten!

Die drei diskutierten Beispiele sollten zeigen, dass die Ergebnisse der optimal kontrolliert durchgeführten Modellversuche trotzdem bedeutende Streuungen aufweisen müssen. Um einzelne Resultate gut zu sichern, wäre jeweils eine grosse Anzahl von Versuchen notwendig gewesen. Dies war aus zeitlichen Gründen nicht immer möglich, da das Hauptziel der vorliegenden Arbeit eine fundierte Uebersicht über das ganze Problem der Geschiebeablagerungsplätze war und nicht in erster Linie zu Detailergebnissen führen sollte. Die nicht allzu positiven Erfahrungen mit der Reproduzierbarkeit der Modellversuche einerseits und andererseits die oft relativ geringe Anzahl Versuche zu Einzelproblemen bewirkten, dass die Ergebnisse dieser Arbeit vorwiegend qualitativer Natur sind und weniger in quantitativer, verallgemeinerbarer Form ausfielen. Es resultierten darum keine vom Praktiker - oft aber gerade auch vom Theoretiker - gewünschten, neuen, rezeptbuchartig anwendbaren Formeln und nur wenige Diagramme, welche direkt auf andere Fälle übertragen werden können. Trotzdem sollten die Ergebnisse vom ingenieurmässig denkenden Wasserbauer in qualitativer Art und Weise auf den konkreten Fall angewendet werden können.

### 2.5.3. Modellgesetze

Neben der geometrischen Aehnlichkeit muss bei Modellversuchen mit Strömungen unter Schwerkrafteinfluss die Froudezahl  $Fr$  in Natur und Modell gleich gross sein, d.h. es gilt das allgemeine Froude'sche Gesetz:

$$(1) \quad Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} = 1 \quad \text{wobei} \quad v = v_n / v_m \quad n = \text{Natur}$$
$$g = g_n / g_m \quad m = \text{Modell}$$
$$L = L_n / L_m$$

Dabei sind sowohl die Trägheitskräfte und die Schwerkraft als auch die Mittelwerte der Kräfte aus der inneren Reibung im gleichen Verhältnis in der Natur wie im Modell. Aus dem verallgemeinerten Froude'schen Gesetz ergeben sich die folgenden Massstabszahlen bei einer Verkleinerung von  $1 : \lambda$ .

Längen	(m)	$1 : \lambda$
Volumen und Gewichte	(m <sup>3</sup> ) (N)	$1 : \lambda^3$
Zeiten und Geschwindigkeiten	(s) (m/s)	$1 : \lambda^{1/2}$
Abflüsse pro Zeit	(m <sup>3</sup> /s)	$1 : \lambda^{5/2}$
Rauhigkeiten nach Strickler	(m <sup>1/3</sup> /s)	$1 : \lambda^{-1/6}$

Die Gültigkeit des Froude'schen Gesetzes bedingt volle Turbulenz des Abflusses in der Natur und im Modell. Dadurch werden die Reibungsverluste unabhängig von der Reynoldszahl  $Re$ ,

$$(2) \quad Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\nu} \quad \text{wobei man } \rho \text{ mit } 1 \text{ g/cm}^3 \text{ vernachlässigen kann,}$$

$\nu$  die kinematische Zähigkeit ist (m<sup>2</sup>/s)

Nach Kobus (1978) ist die volle Turbulenz bei Reynoldszahlen über 3000 gegeben. Davon wird im folgenden ausgegangen, auch wenn andere Literaturangaben zwischen 600 und 5000 schwanken.

Für einmal stellt sich bei den durchgeführten Modellversuchen nicht die Frage der Umrechnungen bei gegebenem Massstab, sondern umgekehrt das Problem, bis zu welchem Massstab die gegebenen Modelle umgesetzt werden können. Zur Klärung dieser Frage dient das Bild 12. Die Kurven wurden für  $Re = 3000$  und  $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (für 10° C) berechnet.

Das Diagramm zeigt die Beziehungen zwischen den Geschwindigkeiten in der Natur (Ordinate) und den Längen in Naturgrösse (Abszisse), welche im Modell einer Reynoldszahl von 3000 entsprechen. Es wurden fünf Geraden für die Massstäbe 1:10, 1:20, 1:50, 1:100 und 1:200 gerechnet. Für Punkte über bzw. rechts einer Geraden ist die Bedingung der vollen Turbulenz für den entsprechenden Massstab erfüllt. Für die Längen sind der Geschiebekörnerdurchmesser und die Abflusstiefe massgebend. Nach den angegebenen Umrechnungsfaktoren musste von der Modell-Reynoldszahl  $Re_m$  ausgegangen werden:

$$(3) \quad Re_m = \frac{v_m \cdot L_m}{\nu} = \frac{v_n}{\lambda} \cdot \frac{L_n}{\lambda} \cdot \frac{1}{\nu} = 3000$$

Aus dem Diagramm kann man folgende Schlüsse ziehen:

1. Je kleiner der Massstab, desto weniger ist die Bedingung  $Re \geq 3000$  erfüllt.
2. Je kleiner die Geschiebekörner (die Wassertiefe), desto grösser muss die Geschwindigkeit sein, damit  $Re \geq 3000$ .
3. Eine Uebertragung in die Massstäbe 1:100 und 1:200 ist nicht mehr realistisch, da dort die Gültigkeit selbst bei Geschwindigkeiten von

etwa 10 m/s nur mehr für Geschiebe mit einem Durchmesser von etwa 1 m gewährleistet ist (für  $v = 1$  m/s sogar nur für  $d = 5$  bis 10 m).

4. Die Uebertragbarkeit beschränkt sich demnach auf Massstäbe unter 1:50.

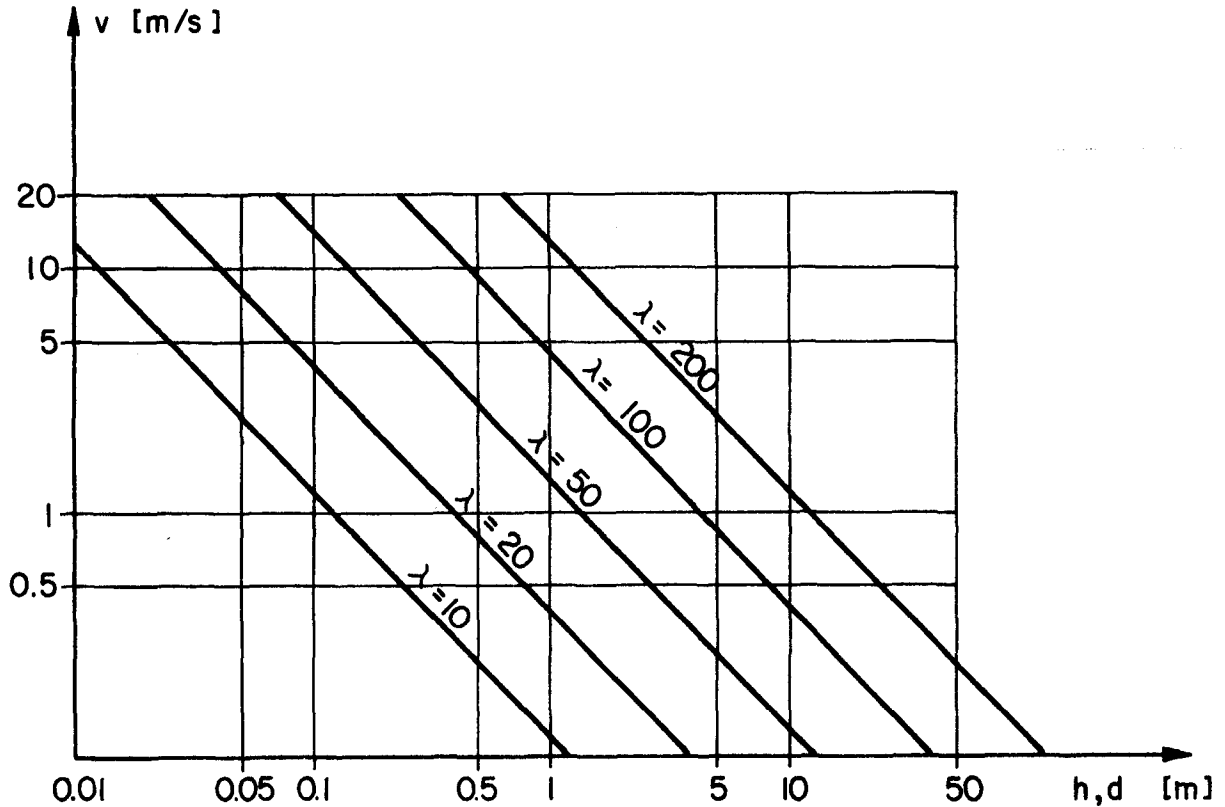


Bild 12 Gültigkeitsbereich des verallgemeinerten Froude'schen Gesetzes für  $Re = 3000$  bei verschiedenen Massstabszahlen  $\lambda$  in Abhängigkeit der Wassergeschwindigkeit und der Längen in der Natur.

Wie man aus dem Diagramm sieht, sind aber selbst im Massstab 1:50 Wassergeschwindigkeiten von über 10 m/s nötig, damit die Gültigkeit der Modellergebnisse für Geschiebekörner von 10 cm Durchmesser in der Natur gewährleistet ist.

Ganz so ungünstig ist die Uebertragbarkeit allerdings aus den folgenden Gründen doch nicht:

- Bei den Ablagerungs- und Spülvorgängen treten meistens grosse Wassergeschwindigkeiten auf (Hochwasser), die sicher über 1 m/s liegen.
- Wie gesagt reichen die Angaben zu  $Re_{krit}$ , bei welchem die volle Turbulenz gewährleistet ist, in der Literatur bis hinunter zu einem Wert von 600. Rechnet man damit, so verschieben sich alle Kurven um etwa 1,5 cm nach links, womit eine bedeutend bessere Uebertragbarkeit entsteht.
- Bei kleineren Geschwindigkeiten wird die Reynoldszahl kleiner. Damit wird auch der absolute Reibungsverlust kleiner, so dass ein Fehler darin eine nur unbedeutende Rolle spielt.

Boden und Wände der Modellablagerungsplätze waren betoniert und wiesen damit eine im Vergleich zur Natur eher zu geringe Rauigkeit auf. Die dadurch entstandenen Fehler in den Reibungsverlusten konnten aber bedenkenlos vernachlässigt werden, da der Beton von den Wasserströmungen nur in Grenzlagen erreicht wurde (Beginn der Ablagerungen, beim Pendeln auf die Seiten). Spülungen bewirkten nie eine Erosion bis auf den Beckenboden.

Zusammenfassend kann man somit festhalten, dass die Ergebnisse aus den Modellversuchen ohne weiteres bis zu Massstäben 50:1 in die Natur extrapoliert werden können. Darüber nimmt die Genauigkeit mit kleineren Geschiebekorngrößen und kleineren Wassergeschwindigkeiten stark ab.

## 2.6. Modellversuche und Praxis

Die oben kurz geschilderten, den durchgeführten Versuchen zugrunde liegenden Modellgesetze sind wissenschaftlich hergeleitet und könnten darum unesehen akzeptiert werden. Trotzdem sind neue Erkenntnisse, welche ausschliesslich auf Modellversuchen beruhen, mit Vorsicht aufzunehmen. Es ist mehr als nur wünschenswert, dass sie in der Natur überprüft werden. Bei Untersuchungen über Wildbäche ist diese Forderung allerdings besonders schwer zu erfüllen, weil die ohnehin selten eintretenden Hochwässer noch seltener beobachtet oder gar gemessen werden können. Da Geschiebeablagerungsplätze zudem meistens auf den Fall eines wirklich extremen Hochwassers angelegt werden, bilden Beobachtungen dieser Art Ausnahmefälle.

Die vorliegende Arbeit kann darum in dieser Beziehung nur unvollständig bleiben, da die meisten der Ergebnisse nicht in der Natur überprüft werden konnten. Immerhin war es aber möglich, einige praktische Beispiele zu Phänomenen zu geben, welche im Modell beobachtet worden sind. Die Beispiele betreffen nicht nur die Vorgänge rund ums Geschiebe (z.B. selbsttätige Entleerungen), sondern auch jene mit Treibholz (z.B. Geschiebetrieb unter Holzteppich). Trotzdem muss die Arbeit durch weitere Modellversuche und vor allem praktische Beobachtungen und Messungen in Zukunft noch ergänzt und gesichert werden. Gerade die letzte Forderung kann aber nicht von einer Person in kurzer Zeit erfüllt werden, dazu sind viele praktische Beobachter und Jahre, wenn nicht Jahrzehnte notwendig.

Schon zum zweiten Male!  
Wie das Becken schwillt!  
Wie sich jede Schale  
Voll mit Wasser füllt!

### 3. Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz (Ueberblick)

=====

#### 3.1. Die Teile eines Ablagerungsplatzes

Im Prinzip handelt es sich bei jedem Geschiebeablagerungsplatz um eine Bachstrecke, welche im Längenprofil eine Reduktion des Gefälles aufweist (vor allem im Vergleich zur oberliegenden Strecke) und im Querprofil eine Erweiterung zeigt. Es gibt demnach auch natürliche Geschiebeablagerungsplätze in Bächen und Wildbächen (sog. Umlagerungsstrecken). Gemäss Bild 13 unterscheidet man in einem künstlichen Ablagerungsplatz die folgenden Teile:

- Einlaufbauwerk (kann fehlen)
- Kolkschutz (kann fehlen)
- eigentlicher Ablagerungsplatz
- Umfassungsdämme
- Zufahrt für die Leerungsarbeiten (kann fehlen)
- Auslaufbauwerk (Rückhaltesperre)
- Kolkschutz
- Gegensperre (Vorsperre)

#### 3.2. Das Wasser im Geschiebeablagerungsplatz

Das Wasser strömt oder schießt aus dem relativ steilen Bachbett in den flacheren Ablagerungsplatz, wo es sich zusätzlich ausbreiten kann. Beide Phänomene vermindern seine Schleppkraft. Anschliessend durchfliesst das Wasser je nach Gefälle und Geschiebebelastung das Becken in mehr oder weniger direktem Lauf, mäandrierend oder auch verzweigt. In Abhängigkeit von der Konstruktion des Auslaufbauwerkes tritt bei kleinerer oder grösserer Wassermenge im Ablagerungsplatz ein Stau ein, der im Extremfall bis zum Einlauf zurückreichen kann. Durch diesen Stau sinkt die Wassergeschwindigkeit extrem, beziehungsweise kann Null werden oder in den seitlichen Wasserwalzen sogar nach rückwärts gerichtet sein. Durch die verengende Wirkung des Auslaufes (Schlitz, Dolen) vergrössert sich die Wassergeschwindigkeit beim Verlassen des Geschiebeablagerungsplatzes wieder bedeutend.

Das Wasser ist das Transportmedium von Geschiebe und Treibholz. Die Ablagerungsvorgänge der beiden erwähnten Feststoffarten ergeben sich u.a. aus dem Verhalten des Wassers im Ablagerungsplatz.

#### 3.3. Das Geschiebe im Ablagerungsplatz

Bei der Durchsicht der wenigen Literatur zu den Vorgängen bei der Geschiebeablagerung in Wildbächen fällt auf, dass keiner der Autoren die Gründe dafür vollständig aufführt, w a r u m sich das Geschiebe ablagert. Vielleicht ist es

darum nicht verwunderlich, dass man nicht selten auf die nur zu einem Teil richtige Annahme stösst, das Geschiebe lagere sich ab, weil es durch die Rückhaltesperre behindert werde. In einem richtig bzw. optimal konstruierten Ablagerungsplatz ist dies jedoch nur eine von vier Ursachen der Geschiebeablagung, wie im folgenden kurz gezeigt werden soll.

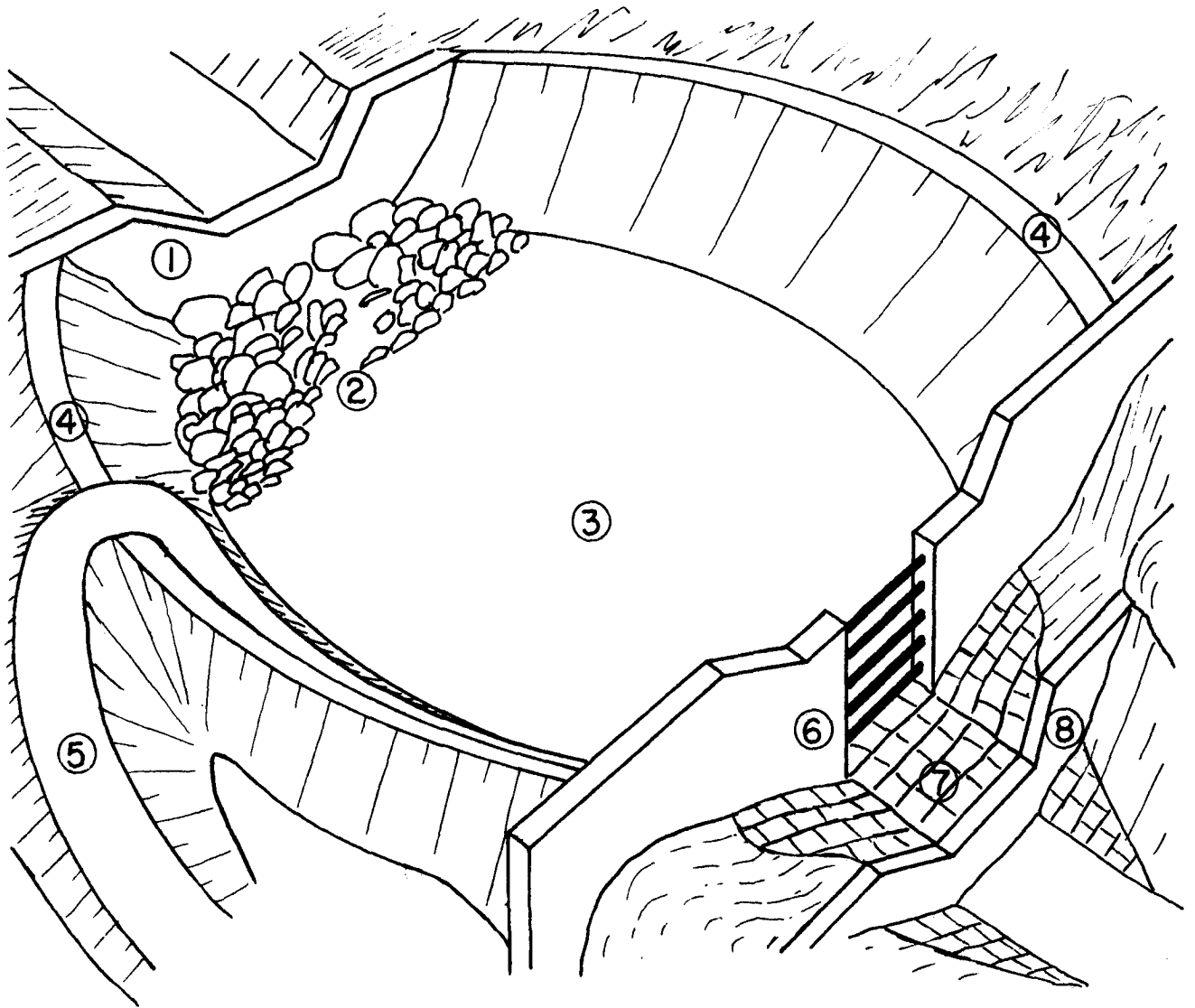


Bild 13 Geschiebeablagerungsplatz mit seinen Teilen: 1 = Einlaufbauwerk, 2 = Kolksicherung, 3 = eigentlicher Ablagerungsplatz, 4 = Umfassungsdämme, 5 = Zufahrtsstrasse (Leerung), 6 = Rückhaltebauwerk, 7 = Kolksicherung, 8 = Gegensperre.

In Abhängigkeit von seiner Schleppkraft vermag das fliessende Wasser mehr oder weniger Geschiebe zu transportieren. Abgelagert wird das Geschiebe teilweise oder vollständig dann, wenn diese Schleppkraft und damit die Transportkapazität des Wassers zurückgeht. Im Ablagerungsplatz können dafür, neben der direkten Rückhaltewirkung der Sperre, drei Ursachen bestehen.

Die vier Gründe für die Geschiebeablagung in einem Ablagerungsplatz sind im Bild 14 schematisch aufgezeigt:

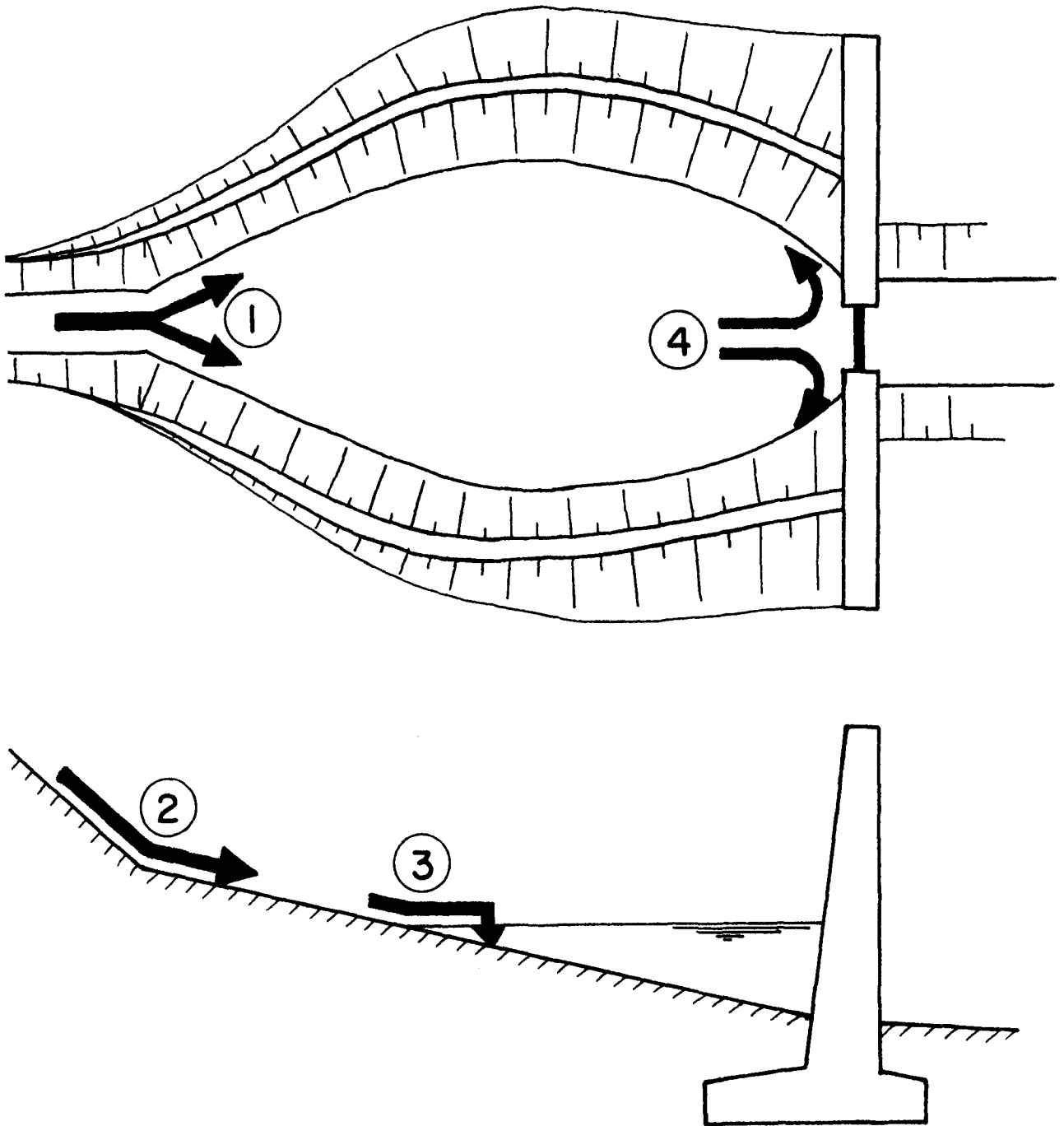


Bild 14 Schematische Darstellung der vier Gründe für die Geschiebeablagerung:  
1 = Gerinneerweiterung, 2 = Gefälleknick, 3 = Wasserstau, 4 = direkte  
Behinderung durch die Sperre.

1. Erweiterung des Fliessquerschnittes beim Einlauf in den Ablagerungsplatz:  
Die Abflusstiefe des Wassers sinkt (keine Abhängigkeit vom Rückhaltebauwerk).
2. Reduktion des Fliessgefälles: Die Wassergeschwindigkeit sinkt (ebenfalls keine Abhängigkeit vom Rückhaltebauwerk).
3. Früher oder später tritt ein Wasserstau im Becken ein. Wenn das Wasser in die Stauwurzel eintritt, vermindert sich seine Geschwindigkeit drastisch oder kann Null werden (indirekte Wirkung des Rückhaltebauwerkes).

4. Falls der Geschiebetransport bis zur Sperre gelangt, wird er dort je nach Konstruktion direkt behindert (direkte Wirkung des Rückhaltebauwerkes).

Wie man sieht, ist das Rückhaltebauwerk für zwei Gründe der Geschiebeablagerung überhaupt nicht zuständig und für einen dritten nur indirekt und meistens nur bei grösseren Wassermengen.

Aus den obigen Darlegungen erkennt man bereits, dass die Spülung eines vor allem auf den Geschieberückhalt ausgelegten Ablagerungsplatzes nicht problemlos ist. Im Prinzip muss dabei die Schleppkraft des Wassers nun wieder genügen, um das Geschiebe abzutransportieren. Dies ist praktisch nur dann möglich, wenn entweder ein grösserer oder mit weniger Geschiebe belasteter Abfluss auftritt, oder wenn der Wasserstau im Ablagerungsplatz zurückgeht. Ist beides nicht möglich oder unerwünscht, so muss der Geschiebeablagerungsplatz maschinell geleert werden. Wenn bei kleineren Abflüssen ein Teil der Ablagerungen ausgespült wird, spricht man von selbsttätiger Entleerung, durch welche für die wegfallenden Baggerungen, Abtransporte und Deponien des Geschiebes erhebliche Kosten eingespart werden können.

#### 3.4. Das Treibholz im Ablagerungsplatz

Praktisch jedes Hochwasser bringt neben Wasser und Geschiebe auch Treibholz in oft grösseren Mengen mit sich. Im Gegensatz zum Geschiebe ist das Treibholz zwar leichter (im Normalfall schwimmt es), dafür aber sehr oft sperriger. Es lagert sich darum in zwei Fällen ab:

- Bei Verklemmung (Verklauserung) an engen Stellen (kleine Durchflussöffnungen an Sperren)
- Bei geringen Wassertiefen

In einem Geschiebeablagerungsplatz hat vor allem der erste Grund unangenehme Folgen und kann das Treibholz zur Ursache der vielleicht grössten Probleme in der Wildbachverbauung machen.

Bei Verkläuserungen der Rückhaltesperre treten unkontrollierbare Rückstauverhältnisse auf und eine spätere Spülung wird in den meisten Fällen ausgeschlossen. Von den drei Elementen im Ablagerungsplatz ist darum das Treibholz das unangenehmste und am schwierigsten unter Kontrolle zu bringende.

#### 3.5. Parameter zur Steuerung von Ablagerungen und Spülungen

Bei der Projektierung eines Geschiebeablagerungsplatzes kann vor allem mit zwei Parametern Einfluss genommen werden auf die Vorgänge der Ablagerungen und Spülungen, nämlich mit der

- Ausgestaltung des eigentlichen Ablagerungsplatzes hinsichtlich
  - Grösse und
  - Form
- Konstruktion der Rückhaltesperre hinsichtlich
  - Art der Oeffnung
  - Höhe der Ueberfallsektion.





Bild 15 Der in seiner Anlage typische Geschiebeablagerungsplatz des Oltschibaches bei Brienz.

Walle! walle  
Manche Strecke,  
Daß zum Zwecke  
Wasser fließe,  
Und mit reichem, vollem Schwalle  
Zu dem Bade sich ergieße!

#### 4. Die Ablagerungsformen =====

##### 4.1. Uebersicht

Die Ablagerungsvorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz entsprechen in kleinerem Rahmen den geomorphologischen Abläufen bei der Bildung eines Schwemmkegels. Darum kann auf die zu diesem Thema vorhandene Literatur zurückgegriffen werden, auch wenn sie nicht das Anwendungsbeispiel des Ablagerungsplatzes betrifft.

Der Autor unterscheidet in dieser Arbeit vier verschiedene Situationen, bei welchen sich ein Ablagerungskörper bilden kann:

1. Ohne Wasserstau - mit Einlaufabsturz
2. - ohne Einlaufabsturz
3. Mit Wasserstau - mit Einlaufabsturz
4. - ohne Einlaufabsturz

Dieses in der Arbeit zentrale Grundlagenkapitel bringt zuerst einige Angaben aus der Literatur zum geomorphologischen Begriff des Schwemmkegels. In den folgenden, durch eigene Modellversuche belegten Abschnitten geht es um die drei Phasen der freien und der behinderten Schwemmkegelbildung. Den Schluss bildet die Behandlung der beiden Fälle ohne Einlaufabsturz.

##### 4.2. Der geomorphologische Begriff des Schwemmkegels

Aehnlich wie es Fischer (1976) tut, soll an dieser Stelle der Schwemmkegel klar gegen den Schutt- oder Sturzkegel abgegrenzt werden, bei dessen Entstehung vor allem die Schwerkraft wirksam ist. Im Gegensatz dazu wird das Material zur Bildung eines Schwemmkegels vom Wasser herantransportiert. Wie es Schumm (1977) später getan hat, unterscheidet Fischer zusätzlich zwischen dem Schwemmkegel (wet fan) und dem Murkegel (dry or mudflow fan). Er definiert dabei, dass der Schwemmkegel durch einen kontinuierlichen Vorgang gebildet wird (formed by perennial stream flow), der Murkegel hingegen durch schubweise Ablagerungen (formed by ephemeral stream flow). Die drei Kegelarten kann man stichwortartig wie folgt charakterisieren:

- Schwemmkegel: Material gerundet, Korngrössensortierung vorhanden (oben grob, unten fein), Längsprofil konkav, Oberfläche recht ruhig und ausgeglichen.
- Murkegel: Material sehr inhomogen und nur z.T. gerundet, Korngrössensortierung kaum vorhanden, Längsprofil oft konvex, Oberfläche streifenartig und unruhig.
- Schuttkegel: (Sturzkegel) Material nicht gerundet, Korngrössensortierung vorhanden (oben fein, unten grob), Längsprofil konkav, Oberfläche übers Ganze gesehen sehr ausgeglichen.

Bekanntlich findet der Geschiebetransport in Muren im Gegensatz zu den Bächen und Flüssen nur teilweise rollend statt. Vielmehr werden die einzelnen Körner geschoben bzw. schwimmen im Murbrei. Eine Sortierung erfolgt darum normalerweise nicht. Durch Ausfliessen des Wassers kann die Transportkraft des Murbreies erlahmen, so dass eine Ablagerung stattfindet, bevor die Mure den unteren Rand des Kegels erreicht hat. Dadurch entstehen wulst- oder zungenartige Ablagerungen, welche mit ihren relativ grossen Mächtigkeiten an der Spitze dem Murkegel ein konvexes Längsprofil geben können. Trotzdem kann da und dort - vor allem im Bereich des Kegelfusses - eine fluviatile Schichtung wie beim Schwemmkegel eintreten, wenn das aus der zum Stillstand gekommenen Mure ausfliessende Wasser Material mitreisst und wenig später wieder ablagert. Dann kommt es zur Schwemmkegelsortierung, indem das grobe Material zuerst (oben), das feine später (unten) abgesetzt wird.

Im Gegensatz dazu wirkt bei der Bildung des Schuttkegels vor allem die Schwerkraft. Die Einzelsteine fallen und springen aus der Höhe auf den Kegel. Dank ihrer grösseren kinetischen Energie gelangen bei diesem Vorgang die groben Steine meistens weiter nach unten gegen den Kegelfuss. Bei gleichem, konkavem, allerdings viel steilerem Längsprofil kommt es darum zu einer umgekehrten Sortierung (oben feines, unten grobes Material), wie beim Schwemmkegel.

Wie später gezeigt werden soll, durchläuft eine Geschiebeablagierung im Normalfall zuerst eine Phase der Sturzkegelbildung (nicht in reiner Art, weil immer Wasser bei den Vorgängen vorhanden ist, aber doch vergleichbar) und später solche der Mur- und Schwemmkegelbildung. Weil erstens die Ablagerungsprozesse meistens der Schwemmkegelsortierung am ähnlichsten sind, und da zweitens wirkliche Muren in den Modellversuchen praktisch kaum auftraten, wird im folgenden in dieser Arbeit bei den Füllvorgängen in einem Ablagerungsplatz von der Schwemmkegelbildung gesprochen.

Zum Abschluss dieser Uebersicht seien noch einige allgemeine Angaben über die Bildung von Schwemmkegeln unter natürlichen Voraussetzungen gemacht. Die Grösse der Schwemmkegel ist nach unten kaum begrenzt. Gerade bei uns in den Alpen kennt man Schwemmkegel mit Ausdehnungen von wenigen Aren, ja solche von modellhafter Erscheinung. Einen der grössten Schwemmkegel, die man kennt, beschreiben u.a. Schumm (1977) und Zollinger (1980). Es handelt sich um den nepalesisch-indischen Fluss Sapt Kosi, welcher im tibetanischen Hochland entspringt, den Himalaya in Nepal durchquert und in der indischen Gangesebene vor seiner Mündung in diesen Strom einen über 130 km langen und etwa 120 km breiten Schwemmkegel bildete und noch bildet. Immer wieder grosse Ueberschwemmungen anrichtend, pendelte der Fluss mit einem Einzugsgebiet von 60'000 km<sup>2</sup> in den vergangenen 250 Jahren entlang seinem Kegelsaum ca. 125 km von Ost nach West, womit die Kegelbildung noch voll im Gange ist!

Grosse Schwemmkegel entstehen unterhalb grosser Einzugsgebiete, und sie nehmen mit der Erodierbarkeit der Gesteine im Einzugsgebiet zu. Die Aussage von Bull (1964), wonach bei grösseren Steilheiten im Einzugsgebiet steilere Schwemmkegel entstehen, dürfte nur bedingt richtig sein. Als Beispiel dazu sei nochmals der Sapt Kosi River erwähnt, dessen Schwemmkegelgefälle von oft weniger als 0,4% bei einem extrem steilen Einzugsgebiet (darin liegen u.a. der Mount Everest mit 8848 m, und Makalu, die Mündung in den Ganges, auf etwa 30 m ü.M.) dieser Regel widerspricht. Im weiteren erwähnen Schumm und Bull zwei sicher richtige Beobachtungen, wonach das Längsgefälle eines Schwemmkegels bei grösserem Einzugsgebiet kleiner wird, und dass grössere Kegel kleinere Längsgefälle haben als die weniger ausgedehnten.

### 4.3. Freie Schwemmkegelbildung

Zur freien - im Gegensatz zur behinderten - Schwemmkegelbildung sind zwei Bemerkungen zu machen. Erstens handelt es sich in Wirklichkeit nicht ganz um eine freie Entwicklung des Schwemmkegels, da im Geschiebeablagerungsplatz eine Begrenzung nach hinten - wie in der Natur immer - vorhanden ist. Der Schwemmkegel kann sich somit nur in drei Richtungen wirklich frei entwickeln. Zweitens müsste man als Folge aus dem soeben Gesagten eigentlich von Schwemmkegelsektoren sprechen. Vollständige Kegel können sich weder in der Natur noch im Ablagerungsplatz bilden. Trotzdem wird weiterhin der übliche Begriff des Schwemmkegels verwendet.

Wie man aus den nächsten Abschnitten ersehen wird, handelt es sich bei diesen halben Kegeln nicht um effektive Hälften von Schwemmkegeln, wie sie sich völlig frei entwickeln würden. Der Grund dafür ist die rückwärtige Störung, d.h. der Materialtransport entlang der Rückwand quer zur eigentlichen Fließrichtung.

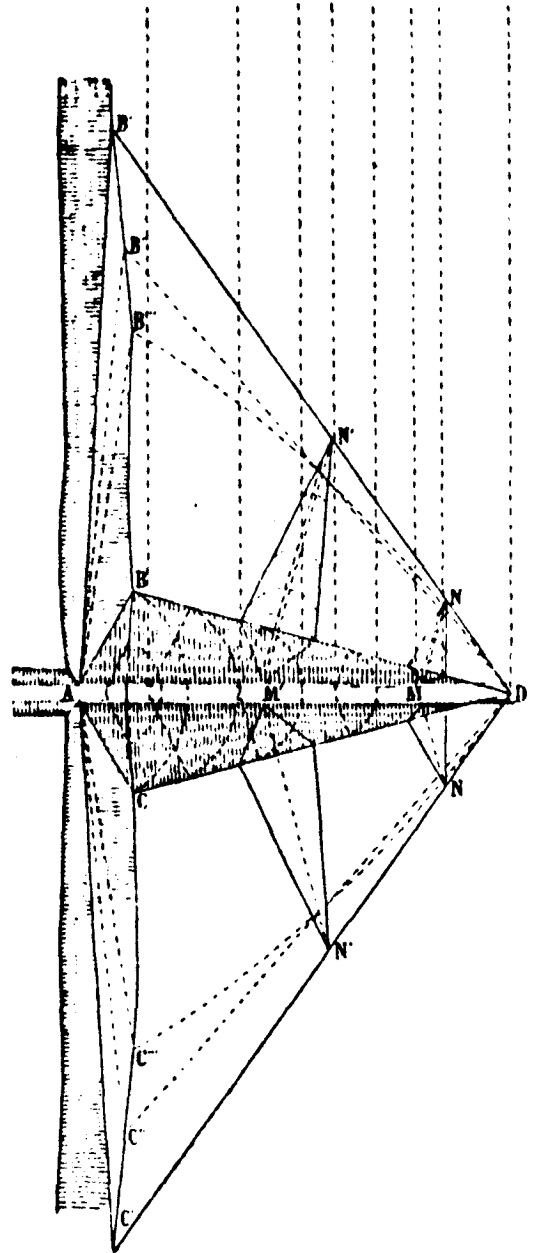
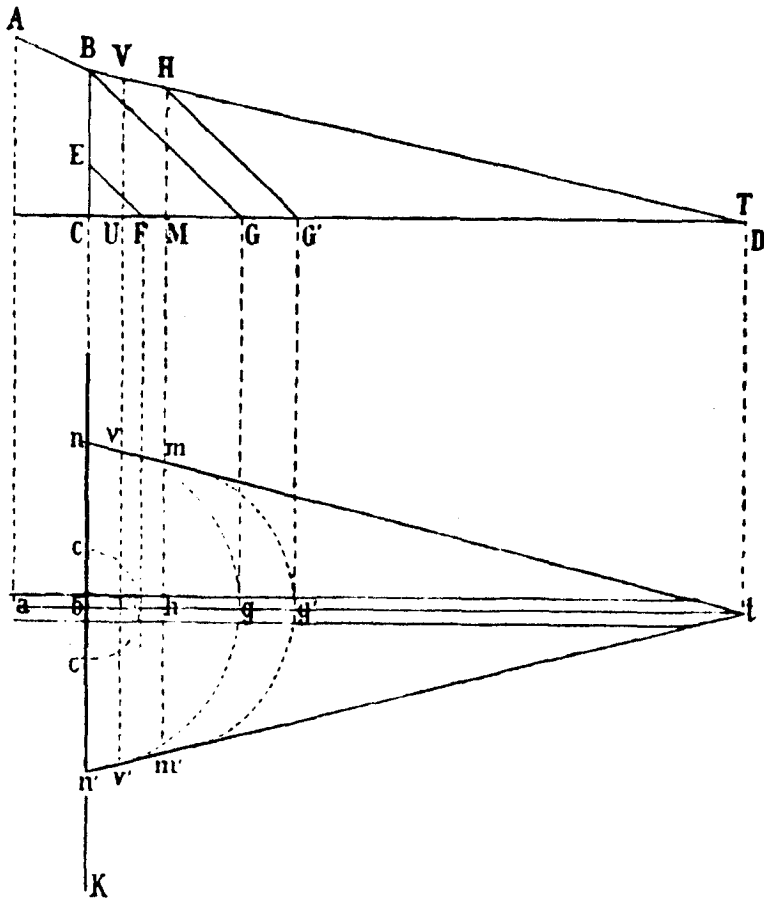
Zum Schluss soll nicht unerwähnt bleiben, dass es Versuche gibt, Geschiebeablagerungsplätze so zu konzipieren, dass eine wirklich freie Entwicklung des Schwemmkegels möglich ist. Weber (1967) schlägt ein entsprechendes Becken vor, bei dem er das Zulaufgerinne als pilotierte Künette bis hinein führt, so dass sich die Ablagerungen nicht nur nach vorne, sondern unter der Künette auch nach hinten ausbilden können. Dieser Vorschlag ist interessant, bautechnisch jedoch aufwendig und vor allem im Hinblick auf eine Spülung oder maschinelle Entleerung ungünstig.

#### 4.3.1. Veraltete Vorstellungen

Als kleine historische Reminiszenz sei im folgenden kurz dargelegt, wie sich Wang (1901) die Bildung von Schwemmkegeln vorgestellt hat. Ohne bestimmte Literaturangaben verweist er bei seinen Ausführungen auf das "Verdienst der neueren französischen Literatur, die Art und Weise der Bildung der Schuttkegel (gemeint sind Schwemmkegel) mit den Gesetzen der Geschiebebewegung in den richtigen Zusammenhang gebracht und erklärt zu haben." Die Bilder 16 und 17 sind zwei Originalabbildungen aus dem von Wang zitierten Buch über die Grundlagen der Wildbachverbauung und dienen der Veranschaulichung der folgenden Erklärungen über die Schwemmkegelbildung.

Die Verbindung der Punkte A-B stellt das Wildbachgerinne dar, B-C den Absturz ins Haupttal (Einlaufabsturz in den Ablagerungsplatz), C-D die Sohle des Tales bzw. Ablagerungsplatzes. Zuerst bildet sich eine Art Sturzkegel C-E-F, der sich bis zur Grösse C-B-G ausdehnt. Diese Vorstellungen sind richtig, im Gegensatz zu den folgenden: Nach der Erreichung der Höhe des Einlaufgerinnes soll der Kegel nun auf der zukünftigen Verlandungslinie B-T (Wang: Ausgleichsprofil) nach vorne wachsen und gleichzeitig immer schmaler werden. Dies zeigt der untere Teil des Bildes 16 (Grundriss). Nach Erreichen des Punktes T sind die ersten beiden Phasen der Kegelbildung abgeschlossen.

Die dritte und letzte Phase soll sich dann wie folgt abspielen: Den entstandenen Kegel nennt Wang zutreffender Pyramide, auf deren Kamm A-D (siehe Grundrissdarstellung in Bild 17) nun der Wildbach fließt und weiter auflandet. Die Folgen davon sind Ausbrüche nach links und rechts, welche die kleineren Pyramiden M-N-N, M'-N'-N' usw. entstehen lassen und deren Entwicklungsgesetze die gleichen sind wie jene der zuerst gebildeten, grossen Pyramide A-B-C-D.



Originalabbildungen von F. Wang (1901):

Bild 16 (links) - Schwemmkegelbildung im Längsschnitt und im Grundriss

Bild 17 (rechts) - Dritte Phase der damaligen Vorstellungen über die Schwemmkegelbildung.

So reiht sich von unten nach oben (von D nach A) eine Pyramide an die andere, bis das ganze Gebilde im Grundriss die Form A-B'-C'-D erreicht hat. Nach den Erklärungen Wangs würden die Punkte D-N-N'-C' bei horizontaler Talebene auf einer Geraden liegen. In der Natur tun sie das nicht, da die Talebene in der Regel nach dem Hang hin ansteigt. Weiter zieht Wang daraus den unlogischen und nicht näher begründeten Schluss, dass all diese pyramidenartigen Ablagerungen zusammen eine "scheinbar kegelförmige Ablagerung" ergeben, "auf welcher die Wässer allerorts das gleiche Gefälle, das Ausgleichsgefälle, antreffen."

Die dargelegten alten Vorstellungen über die Schwemmkegelbildung überraschen vor allem deshalb, weil man annehmen könnte, dass früher mangels Theorien und Rechenmethoden und -Möglichkeiten viel mehr mit Naturbeobachtungen gearbeitet

worden wäre. Mit anderen Worten müsste man solche pyramidenförmigen Ablagerungen, wie sie Bild 17 zeigt, in der Natur finden. Pyramidenförmige Geschiebeablagerungen gibt es unter natürlichen Voraussetzungen jedoch nicht. Es muss daher angenommen werden, dass die von Wang aus der französischen Literatur übernommenen Vorstellungen auf rein theoretischen Überlegungen beruhen.

#### 4.3.2. Neueste Erkenntnisse

Bereits 16 Jahre nach Wang hat Stiny (1917) mit eigenen Versuchen eine andere Theorie der Schwemmkegelbildung aufgestellt, die den heutigen Erkenntnissen zugrunde gelegt werden kann (Schumm, 1977; Chang, 1982 u.a.). Leider hat ausge-rechnet Hampel (1968, 1972 u.a.), der als einziger Modellversuche zu den Vorgängen in einem Ablagerungsplatz gemacht hat, diese neueren Theorien nicht berücksichtigt. So bleibt bei seinen Ausführungen z.B. unklar, wie weit er sich in die Bildungsphase 2 eines Schwemmkegels bewegt hat, oder ob gar nur die Phase 1 untersucht worden ist. Auch andere Angaben zu seinen Modellversuchen bleiben unvollständig oder mindestens unklar, so dass sie leider kaum nachvollziehbar sind. Damit sind zu den Ergebnissen der Versuche mit zahlenmässig detaillierten Angaben und Diagrammen einige Fragezeichen zu machen. Es ist schade, dass darum Hampels Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit nur sehr bedingt verwertet werden konnten.

##### 4.3.2.1. Übersicht

Aehnlich wie es Stiny (1917) bereits getan hat, soll in dieser Arbeit die Bildung eines Schwemmkegels in drei Phasen aufgeteilt werden. Vorausgesetzt wird, dass beim Einlauf ein mehr oder weniger ausgeprägter Absturz vorhanden ist, und dass das Gefälle des Zulaufgerinnes grösser, jenes im Ablagerungsplatz hingegen kleiner ist als das natürliche Verlandungsgefälle des herantransportierten Geschiebes. Die drei Bildungsphasen können wie folgt kurz charakterisiert werden:

- Phase 1: Das Geschiebe stürzt beim Einlauf auf den Beckenboden und bleibt praktisch sofort liegen. Es entsteht eine Mischung zwischen Schutt- (Sturz-) und Schwemmkegel, der bis zur Höhe des Einlaufgerinnes wächst (Bild 18).
- Phase 2: Der in Phase 1 gebildete Kegel verflacht sich bis zur Erreichung des Verlandungsgefälles des Geschiebes. Je nach Geschiebenachlieferung entsteht eine Mischform zwischen Schwemm- und Murkegel.
- Phase 3: Nach Erreichung des Verlandungsgefälles wachsen die Ablagerungen nicht nur auf dem Kegel, sondern auch zurück ins Zulaufgerinne hinein. Die Ausbildung eines Schwemm-Murkegels dauert an.

Bei einem gut funktionierenden und optimal angelegten Ablagerungsplatz spielt die Phase 2 die zentrale Rolle. Die Phase 1 ist normalerweise relativ schnell beendet, und die abgelagerten Kubaturen sind wegen des grossen Gefälles des Kegels meistens nicht sehr gross. Phase 3 ist nicht mehr interessant bzw. unter Umständen gefährlich, da mit Ausbrüchen im Oberlauf zu rechnen ist. Die im Ablagerungsplatz bei Phase 3 gewonnenen Kubaturen können aber - im Gegensatz zu jenen im Zulaufgerinne - noch bedeutend sein. Da die Ablagerungsvorgänge bei der letzten Phase die gleichen sind wie bei Phase 2, wird im folgenden das Schwergewicht auf die Schwemmkegelbildung in der zweiten Phase gelegt.

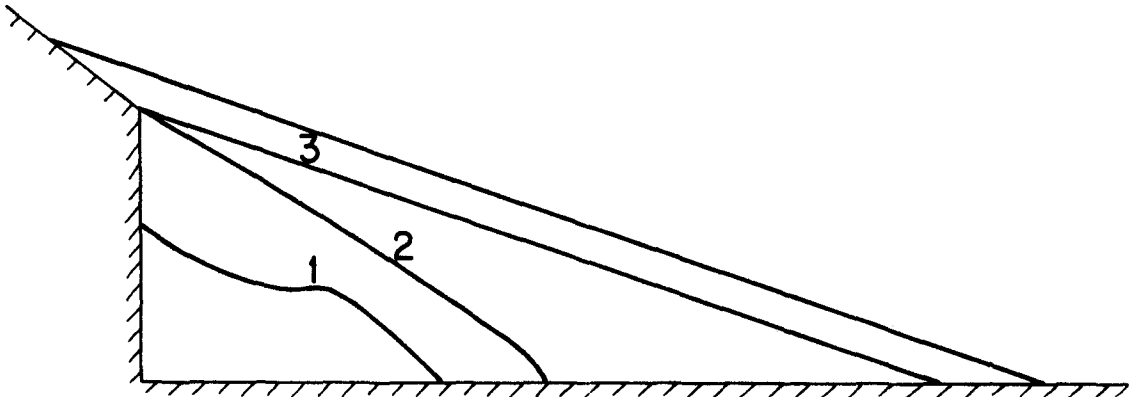


Bild 18 Schematische Darstellung der Bildungsphasen 1 - 3 eines Schwemmkegels im Längensprofil.

#### 4.3.2.2. Schwemmkegelbildung Phase 1

##### Der Bildungsvorgang

Zusammen mit dem Wasser stürzt das Geschiebe in einer Wurfparabel auf den Beckenboden. Aus einer zuerst weit verstreuten Ablagerung - die Steine springen nach dem Aufprall z.T. noch weiter, vor allem nach vorne, aber auch auf die Seiten und nach hinten - beginnt sich mit der Zeit ein Kegel zu bilden, dessen Spitze jedoch durch den Kolk des herunterfallenden Wasser-Geschiebe-Gemisches kraterartig gestört ist. Da die Wurfparabel entfernt von der Rückwand des Ablagerungsplatzes den Boden berührt, kann sich der Kegel zuerst in allen Richtungen ungestört ausdehnen, wobei eine asymmetrische Form entsteht, weil die meisten Geschiebekörner, bedingt durch die Bewegungsenergie, die Tendenz haben, sich nach vorne hin abzulagern. Je höher der Kegel wächst, desto weiter wandert sein Krater zurück zum Einlauf des Gerinnes. Gleichzeitig wird dieser Kolk auch immer weniger ausgeprägt und nur mehr zu einer kleinen horizontalen Ebene, wenn die Kegelhöhe die Höhe des Absturzes erreicht hat.

##### Detailbeobachtungen

Der Kegel baut sich zeitlich in verschiedenen Stufen auf, welche immer wieder die gleiche Folge zeigen:

1. Ablagerungen rund um den Kolk, die sich immer höher aufbauen, so dass nach aussen immer steilere Gefälle entstehen.
2. Die Abhänge des Kegels sind übersteil geworden und rutschen in verschiedenen, murartigen Zungen nach aussen ab. Diese Rutsche erfolgen in alle Richtungen und erreichen immer den Kegelfuss, bzw. überfahren ihn.
3. Durch diese Materialverlagerungen verflacht sich der Kegel (zu Beginn meistens als Ganzes, später eher in einzelnen Sektoren), und seine Hänge werden wieder so standfest, dass sich erneute Ablagerungen am Kolkrand aufbauen können.

Das Wachstum in Schüben ist sehr typisch (allerdings nicht nur für Phase 1, wie sich noch zeigen wird) und zeigte sich bei allen Versuchen. Eine "Ablagerung aus dem dünnen Wasserfilm, der den ganzen Kegel gleichmässig überzieht", wie Hampel (1968) beschreibt, konnte nie beobachtet werden, auch nicht in Phase 2. Ein solcher Vorgang dürfte nur bei kleinen Wassermengen und sehr feinem Material auftreten.

Auch wenn während eines Versuches keine Gefällsmessungen gemacht worden waren, so schien es doch, als würde das Gefälle des Schwemmkegels mit wachsender Grösse immer kleiner. Tatsächlich näherte es sich gegen Ende der Phase sehr stark dem Verlandungsgefälle, wie die Vergleiche mit den Endstadien aus Phase 2 zeigen werden.

Zum murartigen Vorstossen einzelner Zungen und Streifen ist noch folgendes zu ergänzen: Oft fanden bei diesen Murgängen nicht nur Materialverlagerungen, sondern gleichzeitig bis zu etwa 2 cm tiefe Erosionen statt, indem sich vom Kraterrand des Kegels bis beinahe zu seinem Fuss kleine Canyons bildeten. Sie wurden aber jeweils vom nachströmenden Geschiebe in sehr kurzer Zeit wieder aufgefüllt und im unteren Teil des Kegels mit neuen Ablagerungen auf- oder auch überfüllt.

Wie erwähnt, weisen die Ablagerungen in der Phase 1 Elemente des Schwemm-, Sturz- und Murkegels auf. Je nach dem, welche Vorgänge überwiegen, findet eine zeitweise ausgeprägte Sortierung des Materials statt (grobes oben, feines unten; aber auch umgekehrt), oder es gibt sie vorübergehend gar nicht. Ueber den gesamten Bildungsprozess gesehen kann man festhalten, dass

- zuerst - wenn auch nicht sehr ausgeprägt - eine Sortierung wie beim Sturzkegel stattfindet (grobes Material vorne und unten, feineres oben und hinten),
- später dann - ähnlich dem Murkegel - keine Sortierung, wenn auch eine gewisse Tendenz zur Art des Schwemmkegels (grobes Material oben, feines unten) erkennbar ist.



Bild 19 Typischer Sturzkegel bei Curtinatsch (Lagalb, Berninapass): grobes Material unten, feines oben abgelagert.



Im Prinzip bauen sich die Kegel symmetrisch auf. Im Verlauf ihrer Bildung gibt es aber immer wieder z.T. recht ausgeprägte asymmetrische Stadien, die immer kurz vor grossen Veränderungen (Murgänge und Rutschungen auf nur eine Seite) auftreten. Bei grossen Wasser- und Geschiebemengen kommen Asymmetrien häufiger vor.

Die Versuche wurden jeweils abgebrochen, wenn die Verlandungen die Höhe des Einlaufgerinnes erreicht hatten. Diesen Zeitpunkt genau auszumachen, war allerdings nicht immer einfach, wie man sich aus der Beschreibung der drei Bildungsstufen vorstellen kann. Einerseits hätte der Kegel in diesem Zeitpunkt einigermaßen symmetrisch sein sollen, andererseits war das Stadium kurz vor oder kurz nach grossen Veränderungen ein Extremfall bei der Bildung, der nicht als typisches Endstadium angesehen werden durfte. Subjektive Entscheide über den Abbruch eines Versuches waren darum notwendig. Bei den Vergleichen mit den Endstadien der Phase 2 wird diese Tatsache zu berücksichtigen sein.

#### Photogrammetrische Auswertungen

Im folgenden werden aus Platzgründen jeweils nur einzelne Beispiele angeführt und nicht alle Versuche, welche das gleiche Ergebnis zeitigten. Es ist nicht immer einfach, die gedruckten Höhenlinienpläne miteinander zu vergleichen, da sie aus Kostengründen in der Arbeit nicht wie für die praktische Auswertung auf Transparentpapier gedruckt werden konnten.

In Bild 20 sind die Endstadien der Versuche 101 und 103 dargestellt. Die Randbedingungen bei der Bildung waren die gleichen, ausser dass bei 103 pro Zeiteinheit nur halb so viel Geschiebe beschickt wurde wie bei 101. Das Ergebnis zeigt, dass bei kleineren Geschiebekonzentrationen flachere Kegel entstehen.

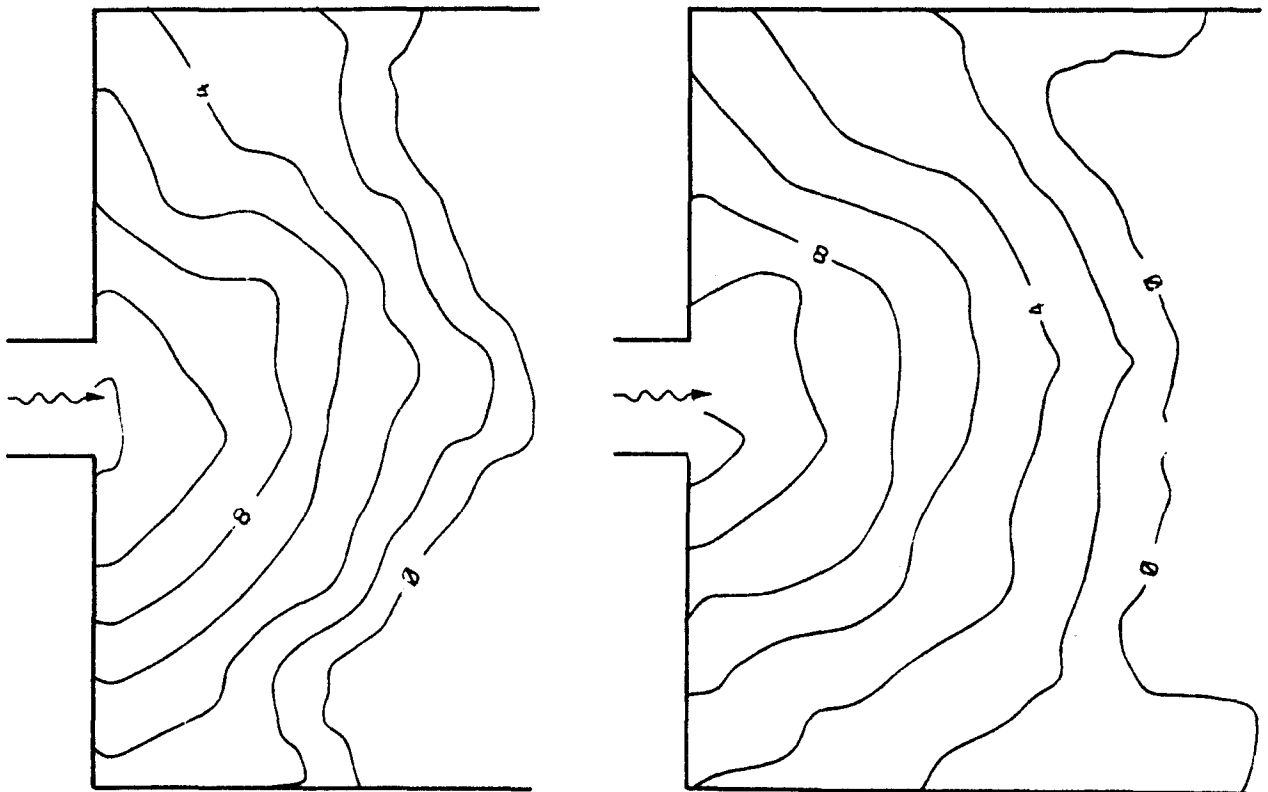


Bild 20 Endstadien der Versuche 101 und 103 (Bildungsphase 1, Absturzhöhe = 10 cm,  $I = 10\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,1$  l/s (101), und  $0,05$  l/s (103); kein Wasserstau).

Es muss noch darauf aufmerksam gemacht werden, dass beide Versuche nicht ganz ungestört sind, da die Kegel links und rechts die Umgrenzung des Ablagerungsplatzes erreichen. Bedingt durch die längere Versuchszeit bildeten sich bei Versuch 103 bereits ausgeprägte seitliche Sekundärkegel, auf welche bei der behinderten Kegelbildung eingegangen wird. Es dürfen hier nur die zentralen Teile der beiden Kegel miteinander verglichen werden.

Bild 21 zeigt die Versuche 117 und 119, deren Unterschied der gleiche sein sollte wie beim vorherigen Beispiel. Die Entstehungsbedingungen waren die selben, ausser dass das Gefälle des Zulaufgerinnes statt 10% nun 18% war. Beim Vergleich fällt auf, dass nun umgekehrt eher 117 flacher ist als 119, und dass das steilere Zulaufgefälle im einen Fall einen steileren, im anderen einen flacheren Kegel erzeugte. Das Ergebnis ist nicht eindeutig, bzw. es belegt, dass man sich bei steilerem Zulauf immer mehr den wilden, unkontrollierbaren Ablagerungen des Sturzkegels nähert, die sehr wechselhaft ausfallen können.

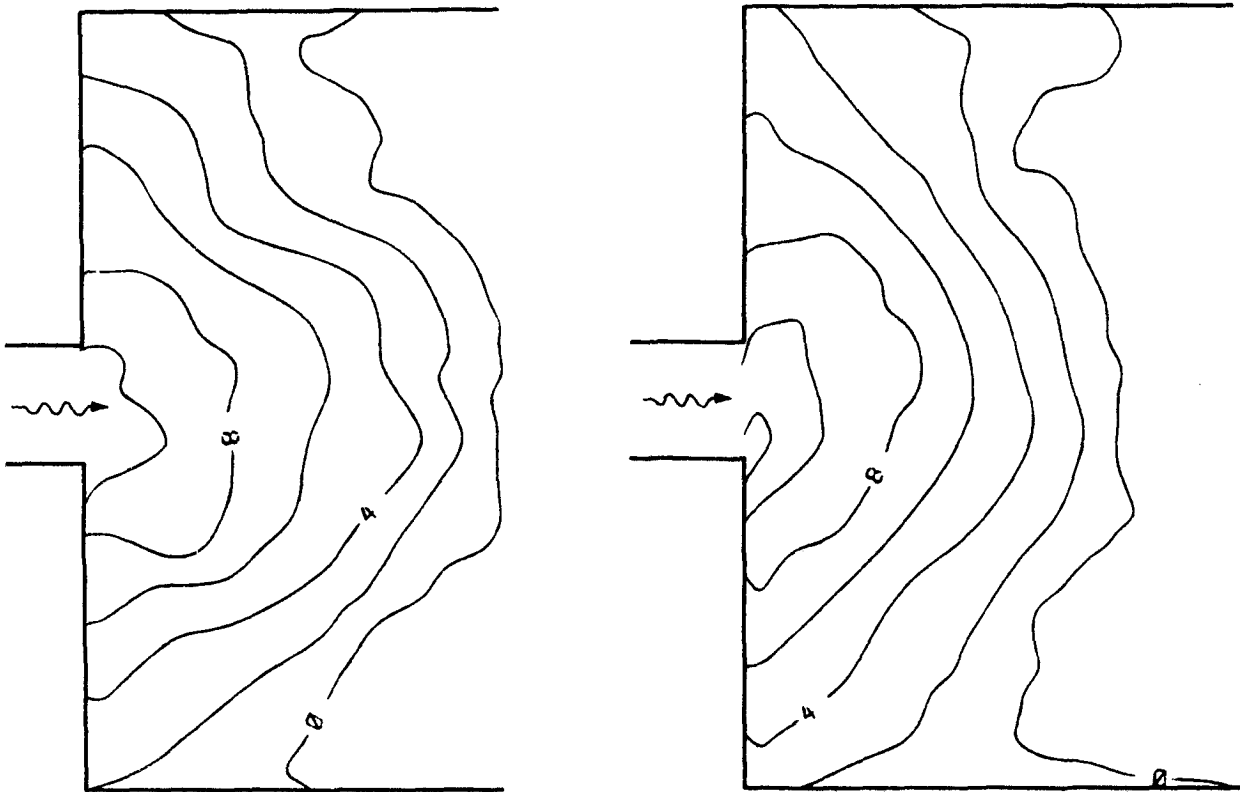


Bild 21 Endstadien der Versuche 117 und 119 (Bildungsphase 1, Absturzhöhe = 10 cm,  $I = 18\%$ ,  $Q = 0,65 \text{ l/s}$ ,  $G = 0,1 \text{ l/s}$  für Versuch 117 und  $0,05 \text{ l/s}$  für Versuch 119, kein Wasserstau).

#### 4.3.2.3. Schwemmkegelbildung Phase 2

Wie bereits zusammenfassend bemerkt, handelt es sich bei der Phase 2 um die Weiterentwicklung der Phase 1 bis zur Erreichung des Verlandungsgefälles. Da sich der Bildungsprozess im Prinzip wiederum in Schüben vollzieht, war die Bestimmung des Versuchsendes wiederum schwierig. Im Zweifelsfalle wurde eher

zu lange abgewartet, so dass man noch in die Phase 3 kam, was aber auf das Gefälle des Schwemmkegels keinen Einfluss hat, da sich dieses in der letzten Phase nicht mehr ändern sollte.

### Der Bildungsvorgang

.....

Die Ablagerungen vollziehen sich im grossen ganzen so, wie es Schumm (1977) beschreibt, bzw. wie er die Versuche von Weaver zitiert. Zusätzliche Beobachtungen während der eigenen Versuche erlaubten eine leicht veränderte Darstellung der beiden in den Grundansätzen von Schumm übernommenen Bilder 22 und 23. Anhand dieser beiden Abbildungen lässt sich der Bildungsvorgang am besten beschreiben.

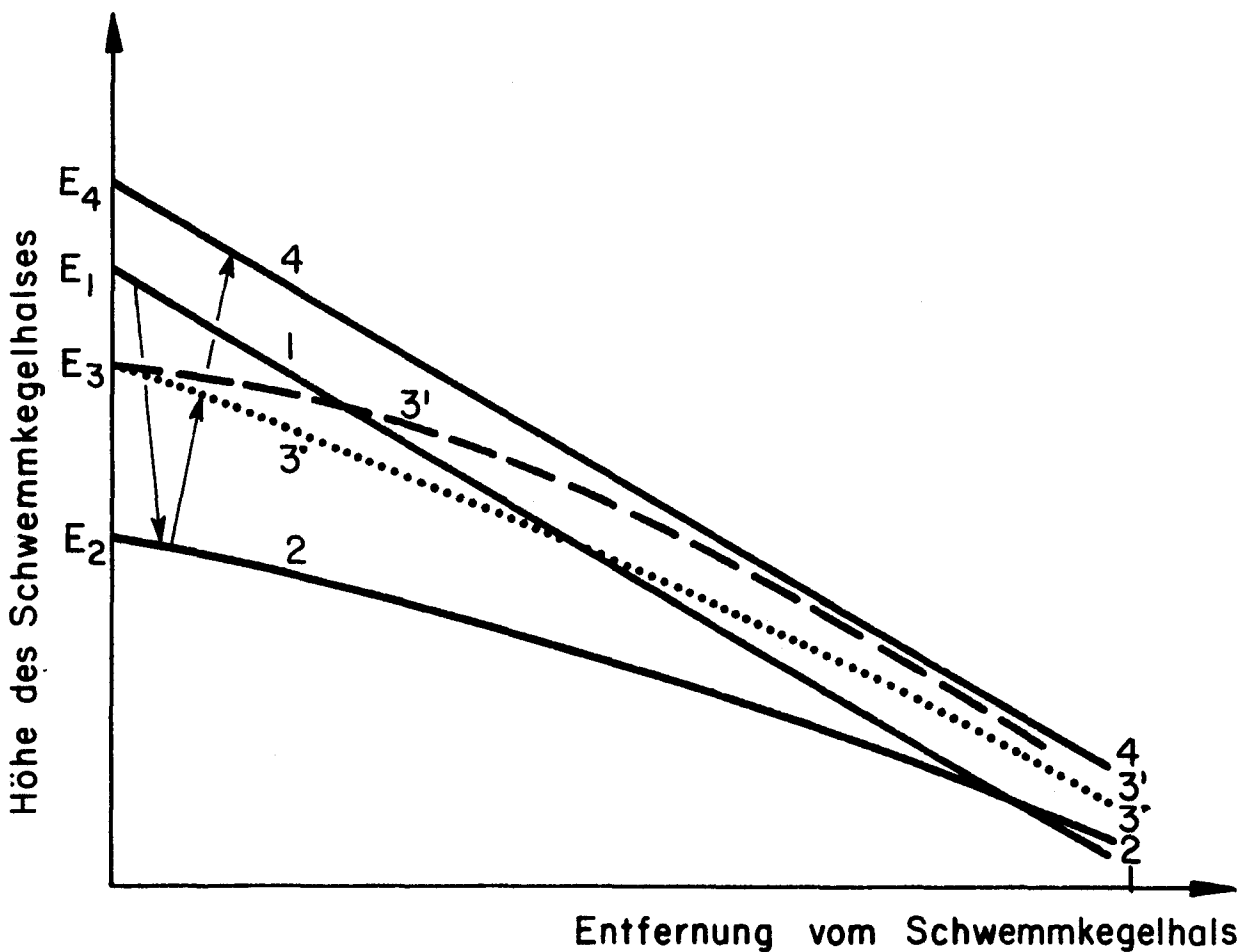


Bild 22 Schematische Darstellung der Bildungsstufen in der Schwemmkegelbildungsphase 2 (Längenprofil).

Aehnlich wie bei der Bildungsphase 1 können streifen- und sektorweise immer wieder vier Bildungsstufen unterschieden werden:

1. Der Kegel hat eine übersteile Form angenommen, und oft traten bereits Ablagerungen bis zurück ins Gerinne auf (1 in Bild 22).
2. Als Folge davon findet plötzlich ein grundbruchartiger Rutsch statt, der das Material vom Kegelhals bis über seinen Fuss hinaus nach unten befördert. Die starke Erosion am Kegelhals führt meistens zu einem

erneuten Absturz, wie er in Phase 1 bestand. Das Längsgefälle des Kegels nimmt eine konvexe Form an (2 in Bild 22).

3. Anschliessend findet die nächste Auflandung statt, wobei man zwei Arten unterscheiden kann:

- Die Ablagerungen vollziehen sich mehr oder weniger gleichmässig von oben bis unten, wobei zuerst oben mehr Material deponiert wird, wenig später hingegen unten (3' in den Bildern 22 und 23).
- Die Ablagerungen beginnen unten und setzen sich nach aufwärts fort. Dies geschieht, wenn vor allem grobes Material nach unten gelangt und dort wulstartig, wie bei einem Murgang, deponiert wird, so dass sich das nachkommende Geschiebe daran staut. So wandert dieser Wulst langsam kegelaufwärts bis zu seinem Hals. Dieses Phänomen hat Schumm (Weaver) nicht festgestellt; bei den vorliegenden Untersuchungen war es hingegen häufiger als die gleichmässige Ablagerung (3').

4. Nach Abschluss der Ablagerungen auf dem Kegelmantel erreicht der Kegelhals wieder die Höhe des Zulaufgerinnes ( $E_1$  in Bild 22), unten schliesst sich jedoch ein geringeres Gefälle an als in der ersten Stufe, und der Prozess kann wieder von vorne beginnen. (In Bild 22 ist als vierte Stufe (4) das Ende des gleichen Prozesses in der Schwemmkegelbildungsphase 3 eingezeichnet.)

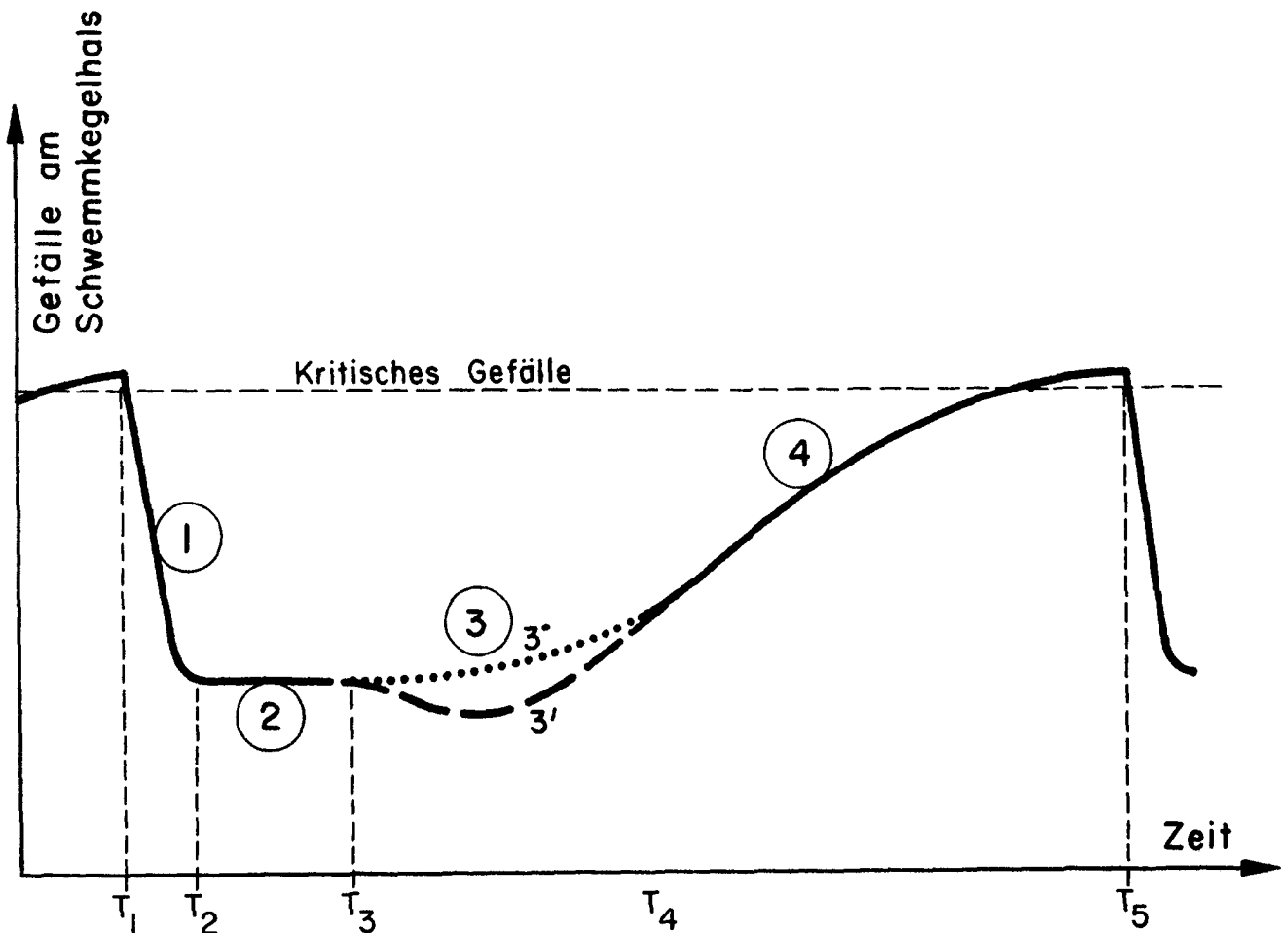


Bild 23 Die schubweise Bildungsphase 2 des Schwemmkegels in Abhängigkeit des Gefälles am Kegelhals (teilweise nach Schumm, 1977).

Wie in der Phase 1 ist also ein schubweises, murgangartiges Wachstum in Streifen und Sektoren typisch. Wie aus dem Bild 23 ersichtlich ist, entstehen vor allem im oberen Teil des Kegels dabei wieder die beschriebenen, canyonartigen Erosionen.

Die Aufteilung des Wasser-Geschiebe-Stromes in verschiedene Arme geschah bei der Bildungsphase 1 praktisch nie, bei der Phase 2 relativ selten, und wenn, dann nur im unteren Teil des Schwemmkegels. Auch wenn dazu keine exakten Untersuchungen gemacht wurden, lässt sich sagen, dass eine zunehmende Tendenz zur Aufteilung des Stromes in verschiedene Arme bei grösser werdendem Kegel nicht vorhanden war. In diesem Fall jedoch pendelte der Strom im unteren Kegelteil bei gleichbleibendem Zuführungserinne im oberen Teil stärker, so dass mit den Ablagerungen eine mit grösserem Kegel erweiterte Fläche bestrichen werden konnte.

### Sortierung des Geschiebes

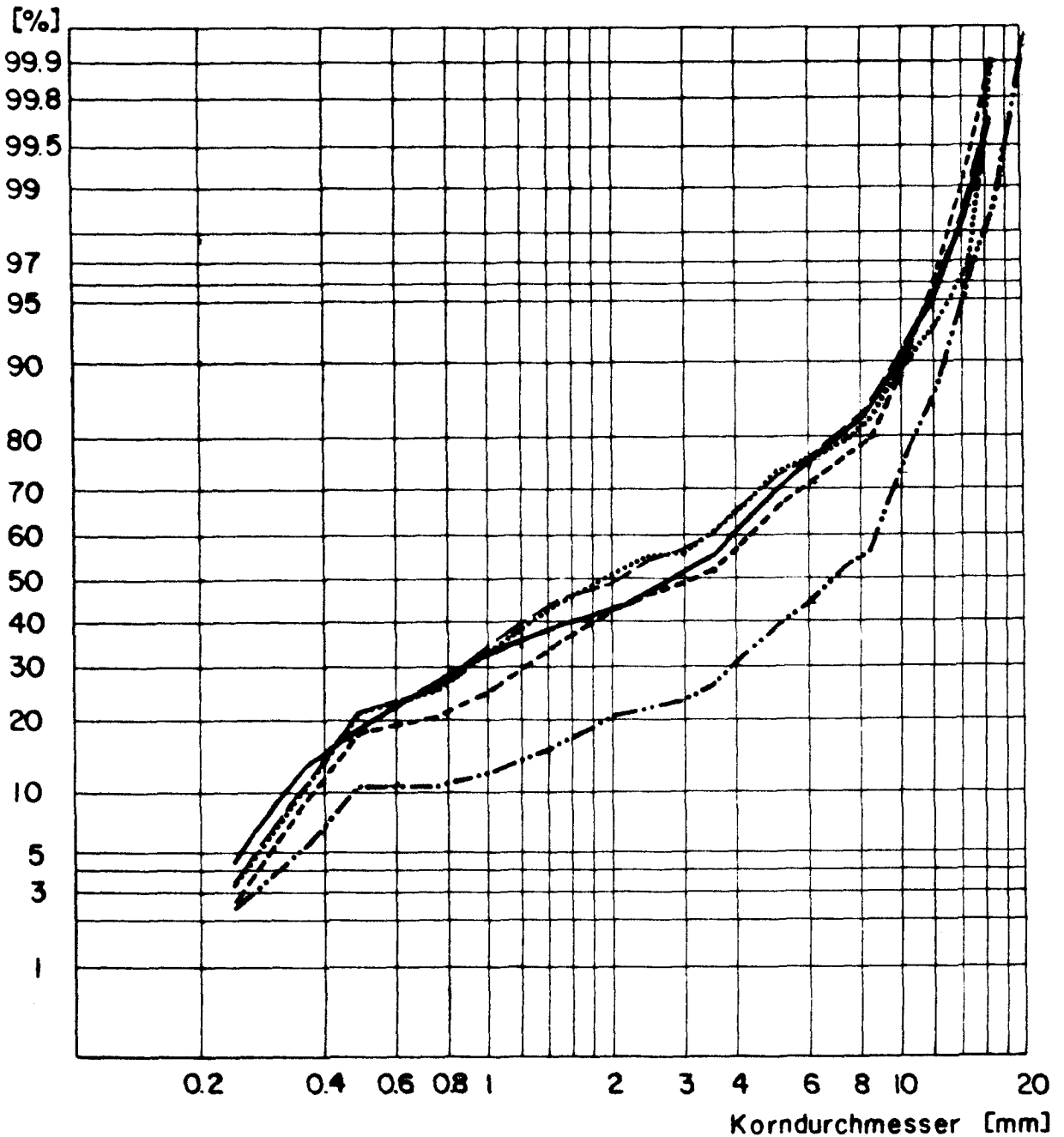
Allgemein ist zu sagen, dass nie eine ausgeprägte Sortierung des Materials festzustellen war, und zwar auch bei den langgezogenen Formen des Ablagerungsplatzes und bei den länger dauernden Versuchen mit Ganglinien nicht. Diese Beobachtung lässt darauf schliessen, dass es sich - bedingt durch die schubweise Bildung der Kegel - um murgangähnliche Ablagerungen handelte, was für die Verhältnisse in einem Geschiebeablageungsplatz realistisch ist, da er sich vor allem bei extremen Ereignissen füllen sollte.

Lokale Ausnahmen waren aber rein optisch immer wieder zu sehen. Ein Beispiel dafür liefert Bild 24. Es handelt sich dabei zwar um einen Versuch mit Ganglinie und seitlich behinderter Ausdehnung des Schwemmkegels, doch lassen sich die Verhältnisse vor allem in der Symmetriemitte gut mit jenen der Phase 2 bei freier Kegelbildung vergleichen. Aus einer Tiefe von 1 bis 10 cm wurden vier Proben genommen und analysiert: Eine an der Schwemmkegelspitze (Mitte hinten), eine rechts davon hinten im Becken und zwei am Fuss des Kegels (Mitte vorne und rechts vorne). Wie man aus dem Bild 24 erkennt, entmischte sich das Geschiebe im Vergleich zur beschickten Sieblinie nur an einem Ort, nämlich vorne in der Mitte am Fuss des Schwemmkegels: Die ganz feinen Partikel sind zwar auch vorhanden, doch fehlen die feinen und mittleren Durchmesser eher, wogegen die grossen dominieren. Dies erwartet man an einem Schwemmkegel nicht. Es gibt dafür zwei Erklärungen:

1. Auch in der Phase 2 wird das Material bei extremen Schüben ähnlich wie auf dem Sturzkegel transportiert, d.h. es wird eher geschleudert und geworfen, als dass es fliesst. Die grössten Distanzen überwinden dabei die groben Körner.
2. In der letzten Stufe vor einem murartigen Schub aus der Kegelhalsgegend findet durch die starke Aufhöhung dieser Stelle eine Verflachung im anschliessenden Oberlauf statt, wo als Folge davon vor allem grobes Material liegen bleibt. Dieses wird dann mit dem anschliessenden Naschub, dessen Anfangsenergie zu Beginn am grössten ist, gleich am Anfang über den ganzen Kegel bis weit nach vorne transportiert und kommt dort konzentriert zur Ablagerung.

Eine dritte Erklärung ist theoretisch auch möglich. Ihre Folgen müssten aber regelmässiger sein als in den Versuchen feststellbar. Und zwar handelt es sich dabei um das bei der Bildung der Murkegel erwähnte Ausfliessen der zum Stillstand gekommenen Muren. Dabei fliesst das Wasser aus der Ablagerung und reisst

das feinere Material mit sich, wodurch das gröbere konzentriert zurückbleibt.



### Versuch 276

Proben :

- ..... Mitte hinten
- rechts hinten
- · - · - · - Mitte vorne
- rechts vorne
- Beschickung

Bild 24 Beispiel zur Entmischung des Geschiebes bei den Ablagerungen (Versuch 276).

Obschon über den gesamten Kegel gesehen keine ausgeprägte Sortierung zu beobachten ist, so können solche lokal doch immer wieder entstehen, je nach dem, welche Bildungsprozesse und Veränderungen an der entsprechenden Stelle zuletzt stattgefunden haben. So bleibt an den seitlichen Begrenzungen von Murgängen sehr oft relativ viel grobes Material liegen, wogegen in langsam versiegenden Rinnen oder an Stellen, wo das Wasser leichter versickert (grobes Material als Unterlage), am Ende vor allem noch feines Material abgelagert wird. So gibt es lokal recht grosse Unterschiede, und der gesamte Kegel macht optisch oberflächlich einen inhomogenen Eindruck.

#### Photogrammetrische Auswertungen

Verschiedene Versuche mit geänderten Geschiebekonzentrationen brachten keine eindeutigen Unterschiede. Immerhin besteht eine - allerdings überraschend geringe - Tendenz zu langgezogenen Kegeln (d.h. kleinere Gefälle), wenn das Wasser mit weniger Geschiebe belastet ist. Ein Vergleich der Versuche 155 und 159 in Bild 25 soll dies zeigen.

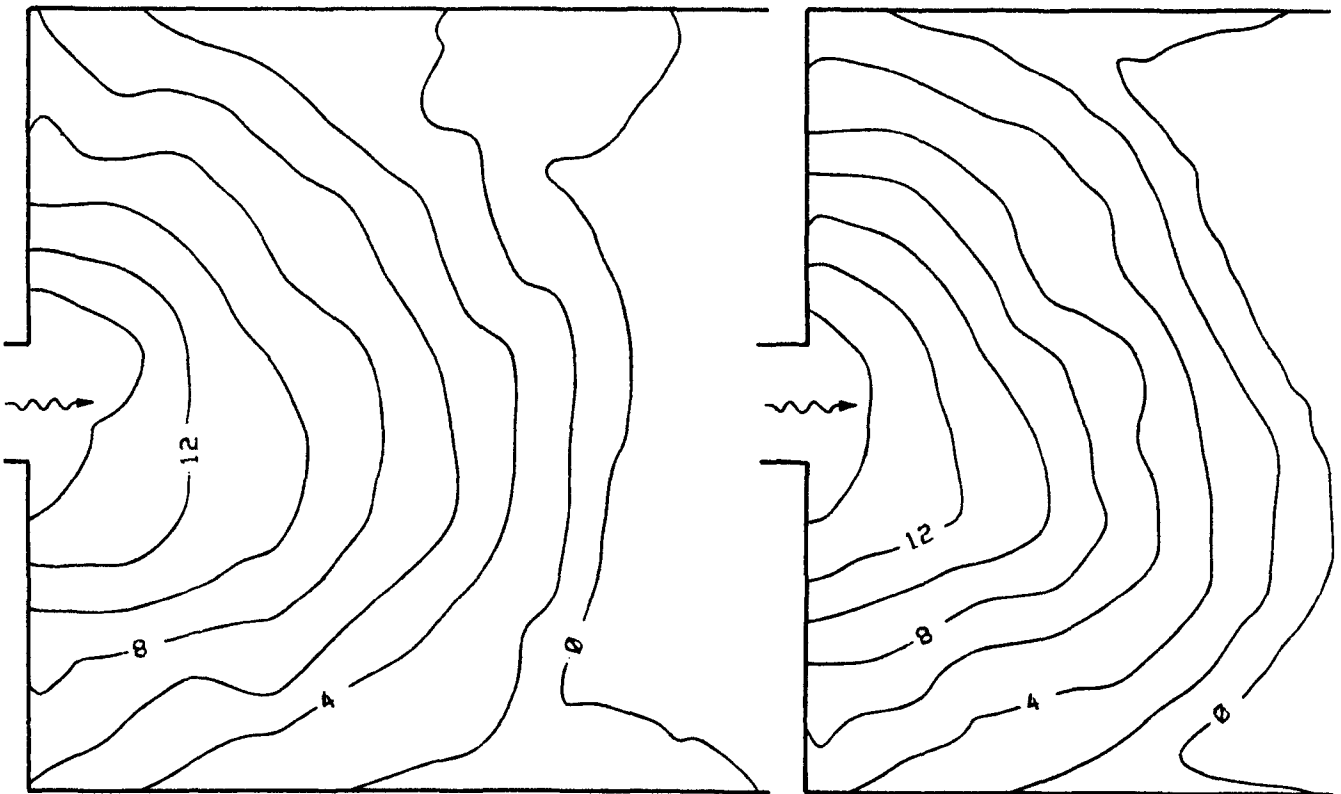


Bild 25 Endstadien der Versuche 155 und 159: Tendenz zu langgezogenen Schwemmkegeln bei mehr Wasser und weniger Geschiebe (Bildungsphase 2,  $A = 10$  cm,  $I = 29\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,05$  l/s bei Versuch 155 und  $0,22$  l/s bei Versuch 159; kein Wasserstau).

Die Gefällsänderung des Zulaufgerinnes brachte bei 17 miteinander vergleichbaren Versuchen keine eindeutigen Unterschiede in den Ablagerungen.

Wenn auch nicht sehr ausgeprägt, so weisen doch sämtliche Schwemmkegel nach der Phase 2 ein leicht konvexes Längsgefälle auf (Versuch 155 in Bild 25 und

Bild 26). Im extremen Fall ist das Längsgefälle geradlinig, nie aber konkav. Dies lässt zwei Schlüsse zu:

1. Selbst nach Phase 2 hat man es noch nicht mit eigentlichen Schwemm-, sondern immer noch eher mit Murkegeln zu tun.
2. Eine Auflandung zurück ins Zulaufgerinne (Phase 3) kann bereits bei noch konvexem Längsgefälle des Schwemmkegels erfolgen.

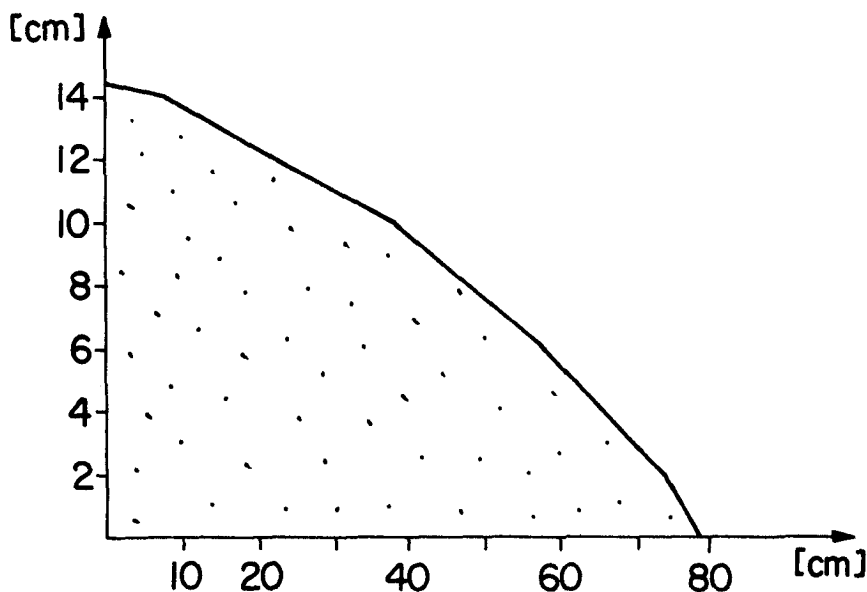


Bild 26 Längsschnitt durch den Schwemmkegel nach Versuch 155 (Bild 25 links): Der Kegel hat eine leicht konvexe Form.

Der Vergleich der Endstadien aus den beiden Phasen 1 und 2 bringt eine aus der Literatur unbekannte Ueberraschung, indem sich die Phasen nämlich kaum voneinander unterscheiden, wie Bild 27 zeigt.

Beim Vergleich muss man berücksichtigen, dass beim Versuch 129 bereits eine Auflandung ins Gerinne zurück stattgefunden hat, was bei 117 natürlich nicht der Fall sein darf. Man kann darum nur die vorderen Kegelteile miteinander vergleichen. Sie sind, grob abstrahiert, identisch. Verschiedene andere Vergleiche zeigen, dass das Kegelgefälle nach Phase 2 im grossen ganzen vielleicht etwas geringer ausfällt als nach Phase 1. Die Unterschiede sind aber nicht relevant.

Es gibt aber auch das Gegenbeispiel, womit einmal mehr auf die Reproduzierbarkeit der Versuche verwiesen werden muss: Bild 28 bringt den Vergleich zwischen den Versuchen 101 (Phase 1) und 165 (Phase 2). Das Ergebnis fällt wie ursprünglich erwartet aus: Das Kegelgefälle nach Phase 1 ist eindeutig grösser als jenes nach der Phase 2. Leider ist dieses Ergebnis aber nicht typisch, so dass die beiden Phasen wider Erwarten nur anhand der Kegelgefälle nur sehr schwer voneinander zu unterscheiden sind.



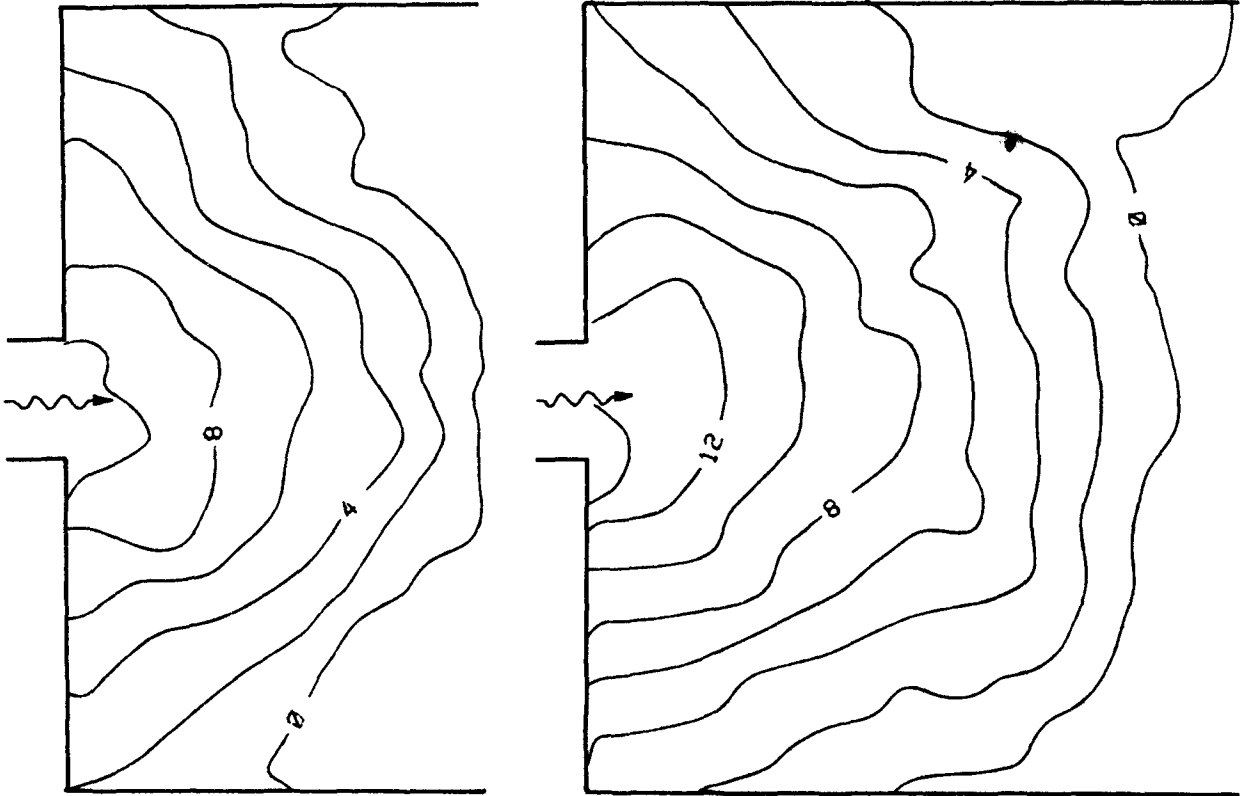


Bild 27 Vergleich der Versuche 117 und 129: Die Phasen 1 und 2 unterscheiden sich in den Gefällsverhältnissen kaum, wenn man die vorderen Teile der beiden Schwemmkegel vergleicht. ( $A = 10 \text{ cm}$ ,  $I = 18\%$ ,  $Q = 0,65 \text{ l/s}$ ,  $G = 0,1 \text{ l/s}$ , kein Wasserstau)

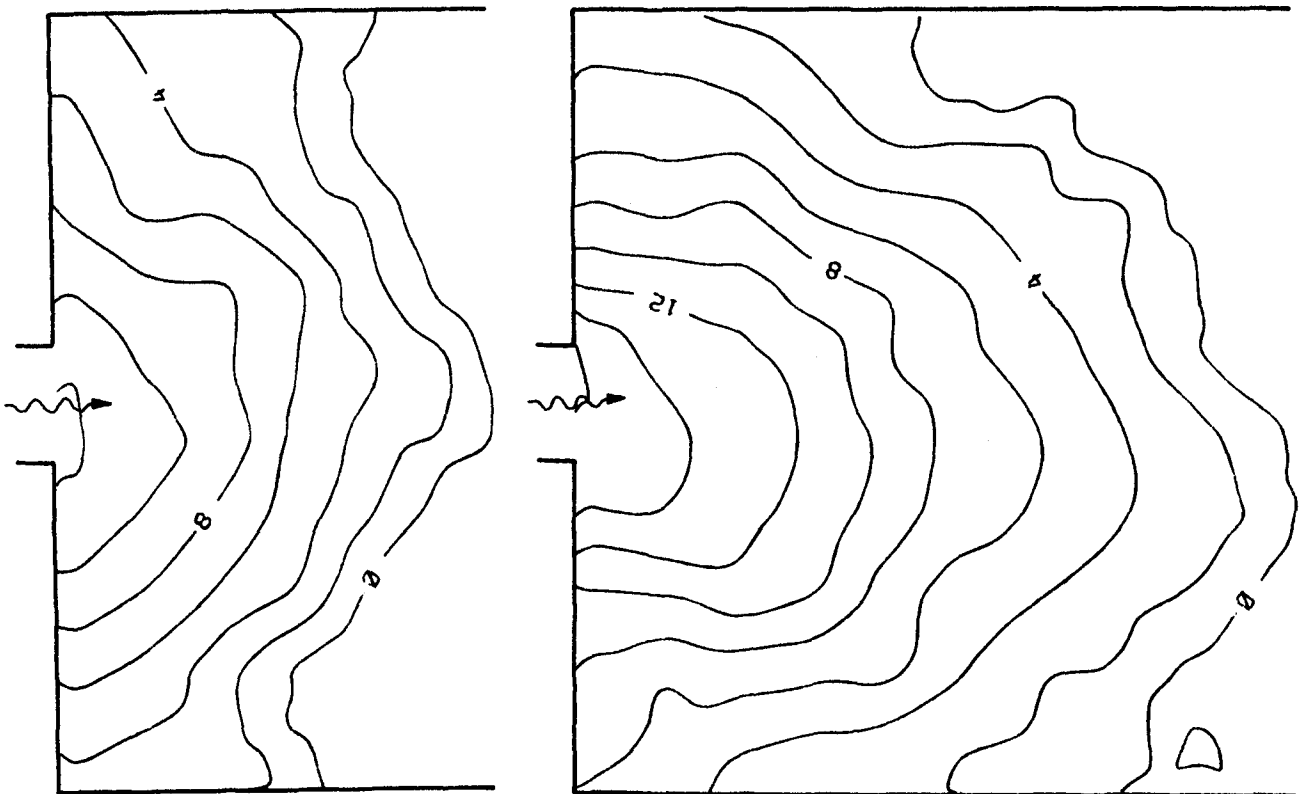


Bild 28 Vergleich der Versuche 101 und 165: Grösseres Kegelgefälle nach der Phase 1 (101) als nach der Phase 2 (165) als nicht typische Erscheinung ( $A = 10 \text{ cm}$ ,  $I = 10\%$ ,  $Q = 0,65 \text{ l/s}$ ,  $G = 0,1 \text{ l/s}$ , kein Wasserstau).

Es gibt nun aber noch ein letztes, bis jetzt nicht berücksichtigtes Kriterium bei der Beurteilung der Kegel. Und zwar geht es um ihre Grundrissformen. Bekanntlich handelt es sich um Halbkegel, womit im Grundriss ein Halbkreis zu erwarten ist. Schon Stiny (1917) erkannte aber, dass dem nicht so ist, wobei er allerdings keinen Unterschied zwischen den Phasen 1 und 2 machte. Er schreibt: "So entstehen parabolische bis schaufelähnliche Grundrissformen, bei denen sich die Länge der Rückenlinie zu jener der Längserstreckung etwa wie 1:0,6 bis 1:0,75 verhält." Die eigenen Versuche zeigten, dass das Verhältnis nach der Schwemmkegelbildungsphase 2 zwischen 1:0,6 und 1:0,9 schwanken kann. Zwei Beispiele dazu sind in den Bildern 28 (Versuch 165, Verhältnis etwa 1:0,9) und 29 (Versuch 127, Verhältnis etwa 1:0,7) zu sehen.

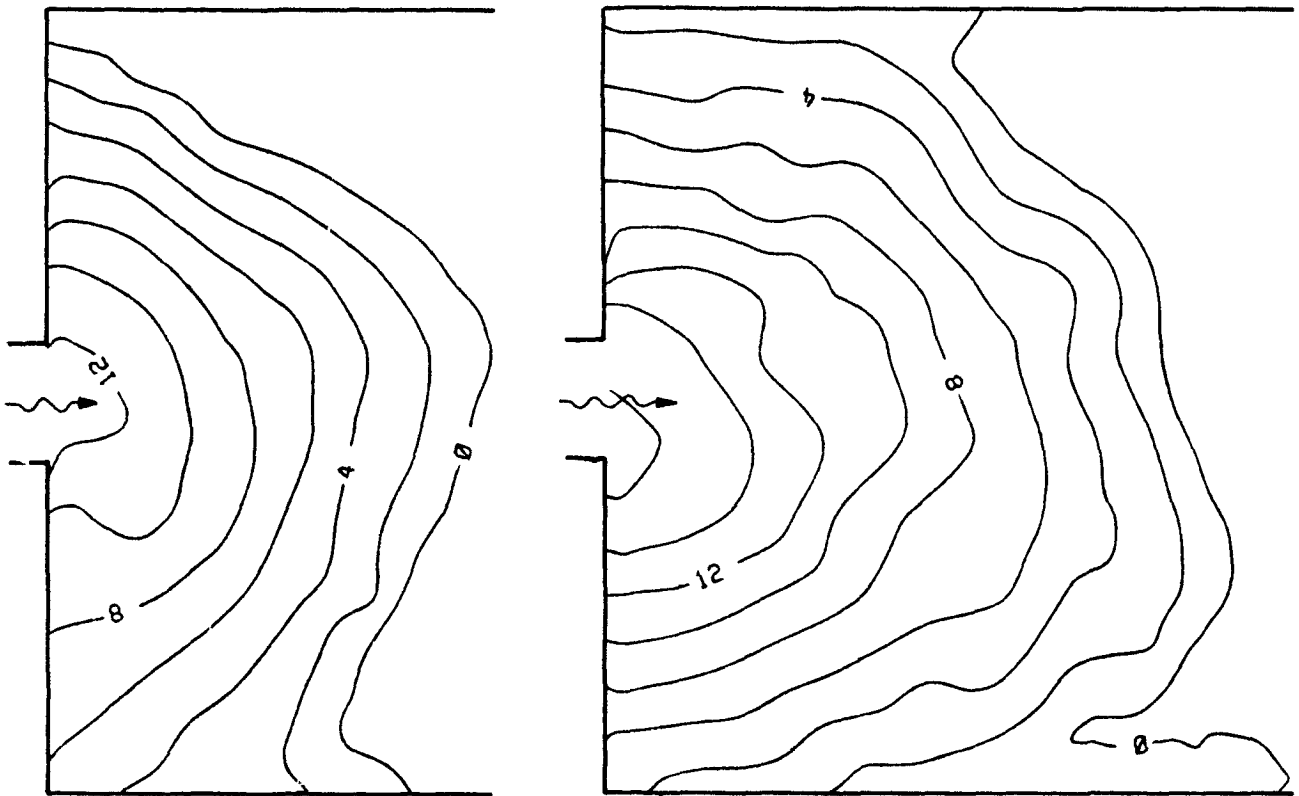


Bild 29 Vergleich der Grundrissformen der Schwemmkegel nach der Phase 1 (Versuch 113) und nach der Phase 2 (Versuch 127). (A = 10 cm, I = 18%, Q = 0,65 l/s, G = 0,22 l/s, kein Wasserstau)

Anders verhält es sich nun bei den Grundrissformen nach der Bildungsphase 1. Hier kommt man zur Erkenntnis (Bilder 20, 21, 25, 27), dass die Grundrissformen recht schöne Halbkreise annehmen, ja, in Einzelfällen (Versuch 119 in Bild 21) sogar nur die Form eines Kreissegmentes aufweisen. Bild 29 zeigt nochmals einen Vergleich: Die Versuche 113 und 127 bildeten die Phasen 1 und 2 bei gleichen Randbedingungen nach. Abgesehen von Asymmetrien in beiden Versuchen sind die Ablagerungskegel vorne mehr oder weniger gleich, und man erkennt sehr schön die unterschiedlichen Grundrissformen.

Die Ablagerungsformen nach den Bildungsphasen 1 und 2 unterscheiden sich also weniger in ihren Gefällen als vielmehr in den Grundrissen. Nach der Phase 1 sind im Grundriss halbkreisförmige Halbkegel vorhanden, die sich dann in der Phase 2 nach vorne in die Länge ziehen, wobei die vorderen Teile der Kegel mehr oder weniger gleichbleiben (Bild 30).

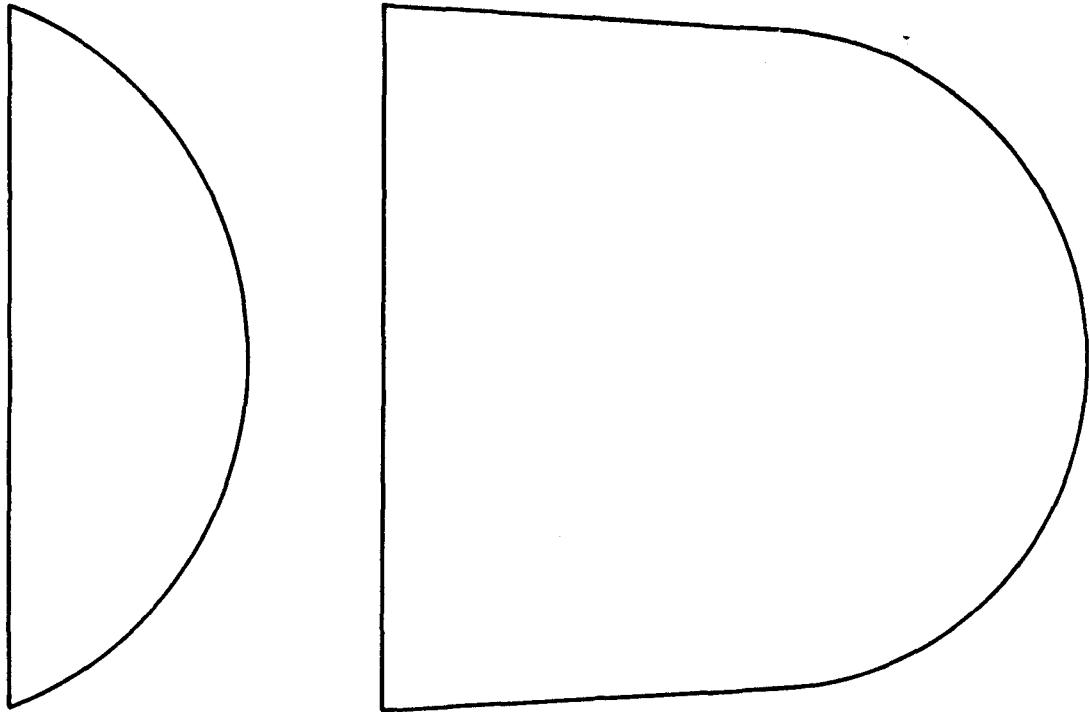


Bild 30 Schematische Darstellung der Schwemmkegelgrundrisse nach der Bildungsphase 1 (Kreissegment bis Halbkreis) und nach der Phase 2 (Halboval mit Längsachse in Fließrichtung).

#### 4.3.2.4. Schwemmkegelbildung Phase 3

Wie früher erwähnt, wurden zu dieser Bildungsphase keine Modellversuche durchgeführt, weil sie nichts Neues mehr bringt. Die Prozesse sind die gleichen wie in Phase 2. Insbesondere der Ablauf der weiteren Ablagerungen - die nun auch im Zulaufgerinne stattfinden - ist aus dem Bild 22 zu ersehen.

Im Prinzip wird die ganze Kegeloberfläche in der Phase 3 durch weitere Geschiebestöße gleichmässig erhöht, was allerdings bedingt, dass der Kegel nie so gross wird, dass die Murschübe nicht mehr bis zu seinem Fuss gelangen. Dieser Fall kann aber für den Geschiebeablagungsplatz praktisch ausgeschlossen werden. Es ist zu vermuten, dass die Grundrissform des Kegels jener nach Phase 2 nicht ganz gleich bleibt, sondern sich noch weiter in die Länge zieht, was bei den in allen Ablagerungsplätzen vorhandenen seitlichen Einengungen ohnehin geschieht, wie später gezeigt wird. Möglicherweise findet eine weitere Tendenz zur Sortierung des Materials - wie auf dem klassischen Schwemmkegel - statt. Nach den vorhergehenden Versuchen wird sie sich jedoch kaum sehr stark ausprägen.

#### 4.4. Behinderte Schwemmkegelbildung

##### 4.4.1. Uebersicht

In einem Geschiebeablagerungsplatz ist es praktisch nie möglich, dass sich ein Schwemmkegel frei ausbilden kann. Normalerweise verhindern dies vor allem die beschränkten Platzverhältnisse, da kaum ein Ablagerungsplatz beliebig breit oder lang gebaut werden kann. Wie erwähnt, handelt es sich auch beim horizontalen Beckenboden um eine unrealistische Annahme. Als vierte Behinderung einer freien Kegelausdehnung muss erwähnt werden, dass sich das Geschiebe bei grossen Wasserspitzen kaum je staulos ablagern kann, d.h. es entsteht im Ablagerungsplatz ein Wasserrückstau.

Diese Behinderungen haben für die Schwemmkegelbildung ganz verschiedene Folgen. Tritt gleichzeitig mehr als eine Behinderung auf, so entstehen Mischformen.

##### 4.4.2. Wasserstau

Beim Wasserstau handelt es sich zwar nicht um die wichtigste Behinderung, sie wird aber trotzdem vorangestellt, weil man später immer wieder die beiden Fälle "mit und ohne Wasserstau" unterscheiden kann.

Der Wasserstau wird im Ablagerungsplatz durch das Rückhaltebauwerk bewirkt, d.h. durch dessen Auslauföffnung(en), die das Wasser nur bis zu einer bestimmten Menge staulos abfliessen lässt. Bei grösseren Wassermengen entsteht im Ablagerungsplatz ein kleiner Stausee. Wenn das geschiebelastete Wasser in diesen See fliesst, verringert sich seine Geschwindigkeit an dieser Stauwurzel von einem Moment auf den anderen drastisch, praktisch sinkt sie oft gegen Null. Damit bleibt das Geschiebe liegen, oder es rollt unter Wasser eine bereits vorhandene Böschung hinunter. Diese unter-Wasser-Böschungen sind darum bedeutend steiler als jene der frei ausgebildeten Schwemmkegel. Sie wiesen in allen Versuchen sehr einheitliche Gefälle von 65 - 70% auf, und zwar unabhängig von allen variablen Parametern wie Geschiebekonzentration, Gefälle des Zulaufes, Wassermenge, Breite und Länge des Ablagerungsplatzes. Das Gefälle erwies sich auch als unabhängig von der Bildungsphase der Ablagerungen (Phasen 1 - 3) und war darum eine Grösse, die lediglich an die Sieblinie des verwendeten Geschiebes gebunden ist (maximaler Ruhewinkel der Ablagerungen unter Wasser).

Wie man erwarten konnte, kommt es beim Eintauchen eines Schwemmkegels in einen Wasserstau zu deltaförmigen Ablagerungen, wobei aber nur die steilen Böschungen unter Wasser mit einem Delta gemeinsam sind. Oberhalb der Stauwurzel finden die Ablagerungen wie beschrieben schwemm- und murkegelartig statt. Die für Deltas typische Zwischenzone, der Transport von Feinstmaterial in einer seichten, langsam fliessenden Wasserschicht, fehlt immer.

Es entstehen im Prinzip sehr symmetrische und ganz gleichmässige Kegel unter Wasser. Bei kleinen Absturzhöhen dauern aber die Bildungsprozesse nicht lange, bzw. mit den einzelnen Murschüben geschehen - verglichen mit dem Gesamtvolumen des Kegels - grosse Veränderungen. Als Folge davon weisen die kleinen Kegel oft starke Abweichungen von der Symmetrie auf. Bild 31 bringt dazu zwei Beispiele (Versuche 063 und 125, beide aus der Bildungsphase 1), die unter identischen Bedingungen entstanden sind, ausser dass die Absturzhöhe in Versuch 063 doppelt so hoch war wie in Versuch 125 (20 und 10 cm).

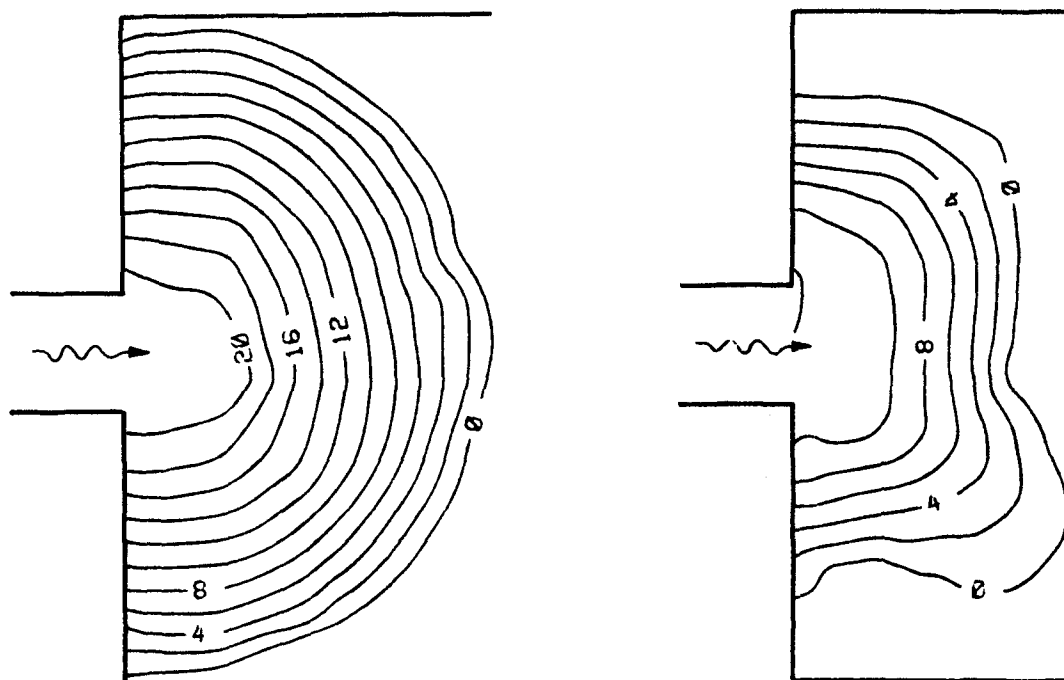


Bild 31 Vergleich der Versuche 063 und 125: Kleine Kegel weisen oft grosse Abweichungen von der Symmetrie auf. ( $A = 20$  cm bei 063 und 10 cm bei 125,  $I = 18\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,22$  l/s, voller Wasserstau)

Wenn sich die Ablagerungen nicht unter vollem Stau bilden, so erkennt man dies deutlich am resultierenden Höhenkurvenbild: Entlang der Stauwurzel tritt ein Gefälleknick auf. Bild 32 zeigt dazu ein Beispiel aus der Bildungsphase 1. Die Ablagerung wurde zusätzlich seitlich behindert, was aber auf den Gefälleknick keinen Einfluss hat.

Vergleiche der Phasen 1 und 2 bringen wieder ähnliche Ergebnisse wie bei den Ablagerungen ohne Wasserstau: Nach der Phase 1 haben die Kegel annähernd halbkreisförmige Grundrisse, die sich dann bei der Phase 2 in die Länge ziehen. Zwei vergleichbare Beispiele zeigt Bild 33. Dieses Verlängern des Kegels leuchtet unter den gegebenen Umständen besonders ein: Nach dem Abschluss der Phase 2 beginnen die Ablagerungen bekanntlich ins Zulaufgerinne hineinzuwachsen. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn sie unten gestützt werden, was wiederum bedingt, dass der Kegelhals plattformartig aus dem Wasser ragt. Dazu muss er zwingend etwas in die Länge wachsen. Vorher kann die Phase 3 nicht anschliessen, d.h. die Phase 2 ist noch nicht beendet.

Aus den photogrammetrischen Auswertungen lässt sich noch ein letzter Schluss ziehen: Das Gefälle des Schwemmkegels über Wasser ist etwas flacher als bei der Ausbildung ohne unterliegenden Wasserstau. Bei freier seitlicher Ausdehnung der Ablagerung ist diese Erscheinung nicht ausgeprägt, dies im Gegensatz zu den schmalen Ablagerungsplätzen, wie dies Bild 34 veranschaulichen soll.

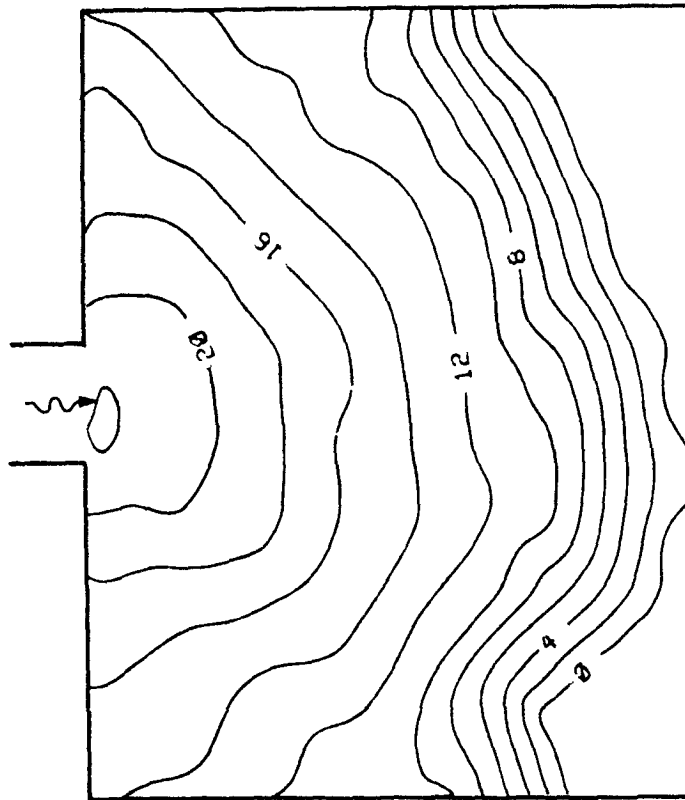


Bild 32 Bei Versuch 083 ist der Gefälleknick infolge Wasserstaus (10 cm) auf dem Schwemmkegel sehr schön zu erkennen (Phase 1,  $A = 20$  cm,  $I = 10\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,1$  l/s, Wasserstauhöhe = 10 cm). Siehe dazu auch dreidimensionale Darstellung auf Seite 249.

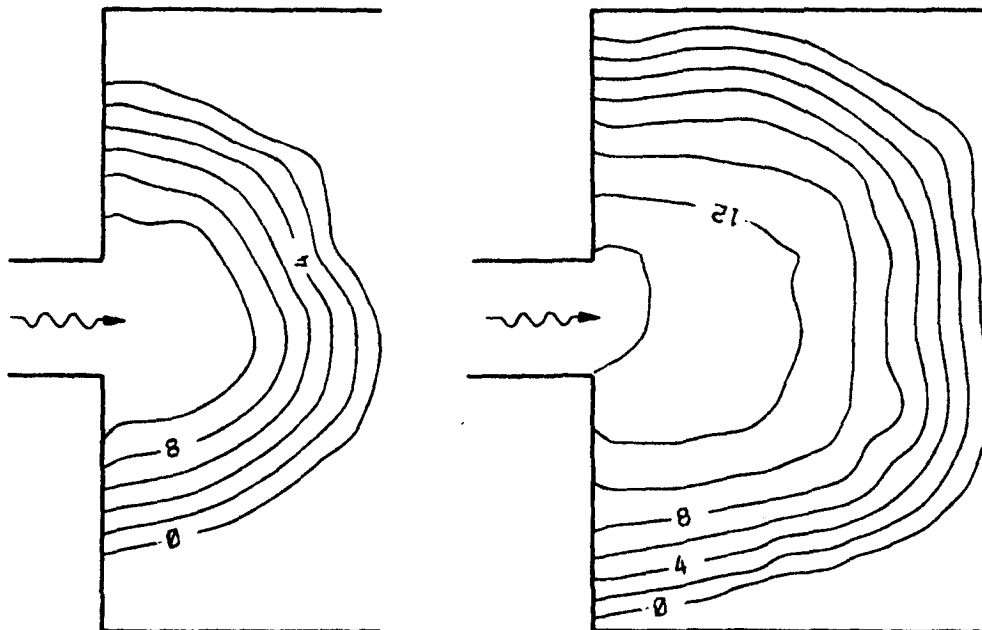


Bild 33 Vergleich der Endstadien der Versuche 105 und 171. Der Schwemmkegel beginnt sich nach Phase 1 in die Länge zu ziehen: Phase 1 (Versuch 105) und Phase 2 (Versuch 171). ( $A = 10$  cm,  $I = 10\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,1$  l/s, Höhe des Wasserstaus = 10 cm) Siehe auch Bilder Seite 250.

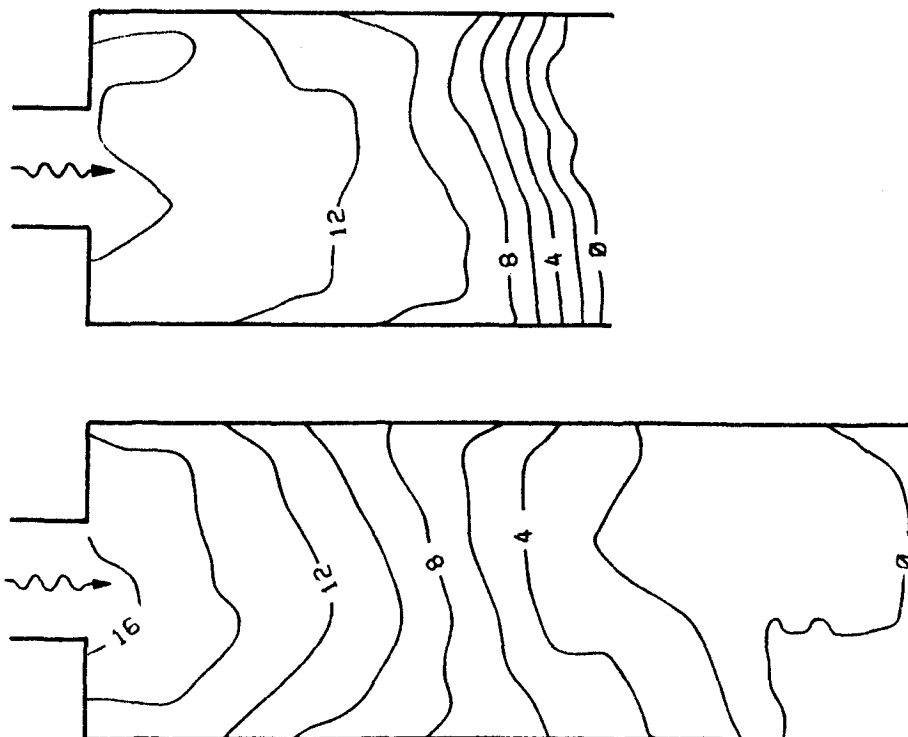


Bild 34 Die Versuche 173 (oben) und 177 (unten) zeigen, dass das Schwemmkegelgefälle oberhalb eines Wasserstaus flacher ist als wenn unten kein Stau anschliesst. Diese Beobachtung gilt allerdings vor allem für schmale Ablagerungsplätze. (Phase 2,  $A = 10$  cm,  $I = 10\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,1$  l/s; Wasserstau = 10 cm bei Versuch 173, nicht vorhanden bei Versuch 177)

Zum Schluss seien noch einige Ergebnisse festgehalten, welche Chang (1982) - allerdings mit bedeutend flacheren, deltaähnlicheren Ablagerungen - in Modellversuchen erhalten hat. Chang hält fest, dass sich der Wasserstrom unter konstanten Bedingungen auf einem Delta immer in verschiedene Arme aufteilt. Dies ist auf dem Schwemmkegel nicht der Fall. Das folgende Ergebnis dürfte - mindestens für die flacheren Teile, wenn Verzweigungen stattfinden - aber auch für die Schwemmkegel richtig sein: In der Summe haben die Einzelarme (bei kleineren Wassergeschwindigkeiten und kleinerem Geschiebetrieb) einen ähnlich grossen Energiegradienten wie der unverzweigte Strom. Geschiebeablagerungen auf einem Delta geschehen darum nicht primär durch eine plötzliche Reduktion des Energiegradienten, sondern vielmehr wegen des Wechsels in der Gerinnegeometrie und der damit verbundenen Verkleinerung der Wassergeschwindigkeit und des Geschiebetriebes. - Steigender Wasserstau bedeutet in seinem Bereich eine Verminderung des Energiegradienten, worauf der Wasserstrom mit einer Gerinneerweiterung oder gar mit der Bildung verschiedener Arme reagiert. Die gleiche Situation tritt bei Verminderung der Geschiebebelastung ein, wie später bei den Spülungen noch zu sehen sein wird. Das Umgekehrte geschieht z.B. bei einer Senkung des Wasserstaus. Das Gerinne wird dann schmaler und tiefer. - Diese Veränderungen illustrieren die Tendenz jedes Wasserstromes, ein Gleichgewicht zu erreichen, d.h. überall entlang seines Längsprofiles den gleichen Kraftaufwand für die Vorwärtsbewegung, den Geschiebetransport, die Erosion oder die Ablagerung zu betreiben.

#### 4.4.3. Begrenzungen längs der Fließrichtung

Rechts- und linksseitige Begrenzungen der Schwemmkegel treten praktisch in jedem Geschiebeablagerungsplatz auf. Sie haben zur Folge, dass das sich seitlich ausbreitende Geschiebe zu einem Richtungswechsel gezwungen ist. Bedingt durch die nach hinten immer vorhandene Begrenzung kann das Geschiebe nur nach vorne ausweichen. So wird es denn, statt nach den Seiten hin, deren Begrenzungen entlang nach vorne transportiert. Als Folge davon entstehen Sekundärkegel auf beiden Seiten des Ablagerungsplatzes. Es gibt immer wieder Situationen, in denen diese Sekundärkegel schneller wachsen und den Hauptkegel mit der Zeit an Länge übertreffen. Volumenmässig machen diese seitlichen Kegel allerdings nicht viel aus. In den Versuchen überschritten sie bei noch relativ ungestörtem Hauptkegel kaum die Höhe von 2 cm, so dass es schwer fällt, unter den photogrammetrischen Höhenlinienplänen ein Beispiel zu finden (Aequidistanz = 2 cm). In Bild 35 zeigt sich immerhin nach der Phase 2 des Versuchs 155 - aber vor allem auf der linken Seite - ein deutlicher Ansatz zu einem Sekundärkegel.

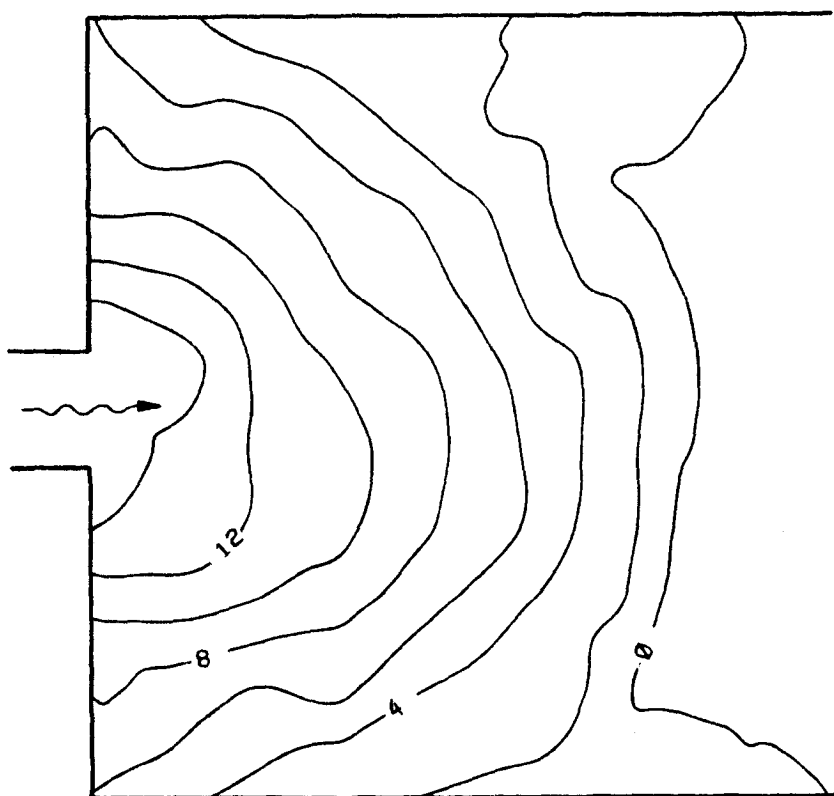


Bild 35 Vor allem auf der linken Seite gut erkennbarer Sekundärkegel bei den Ablagerungen von Versuch 155. (Phase 2,  $A = 10$  cm,  $I = 29\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,05$  l/s, kein Wasserstau) Siehe auch Seite 249.

Es ist nicht etwa so, dass die Sekundärkegel umso ausgeprägter werden, je schmaler ein Ablagerungsplatz ist. Im Gegenteil sind sie dann z.T. kaum mehr festzustellen, weil sie mit dem in die Länge gewachsenen Hauptkegel zusammenwachsen. Bei schmalen Ablagerungsplätzen tritt zudem öfter als bei breiten der Coanda-Effekt auf, als dessen Folge unsymmetrische Ablagerungen entstehen können, wie Bild 36 belegen soll.



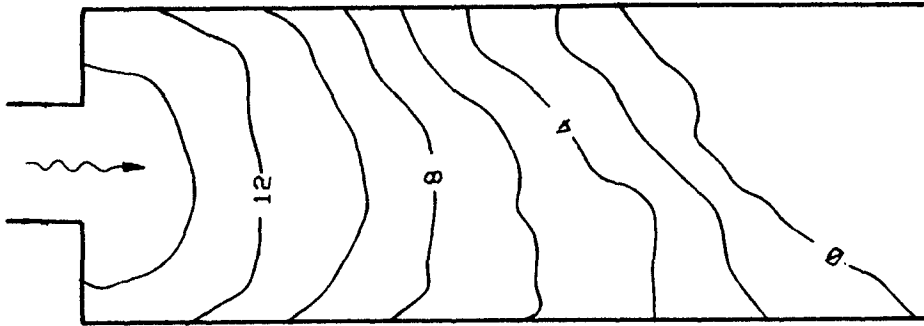


Bild 36 Die asymmetrischen Ablagerungen bei Versuch 145 (Phase 2,  $A = 10$  cm,  $I = 18\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,22$  l/s, kein Wasserstau).

So einleuchtend der eingangs erwähnte Grund für die Sekundärkegel klingt, so trifft dennoch nicht zu, dass in den Seitenkegeln alles Material abgelagert wird, das dem Hauptkegel durch die Begrenzungen fehlt. So gibt es im Extremfall sogar Beispiele, die den Eindruck erwecken, die seitlichen Begrenzungen würden keine Änderungen in den Ablagerungen hervorrufen, es werde somit nur der mittlere Teil des freien Schwemmkogels gebildet. Beim Vergleich der beiden Darstellungen in Bild 37 könnte man meinen, Versuch 153 sein ein Ausschnitt aus dem danebenstehenden Versuch 163.

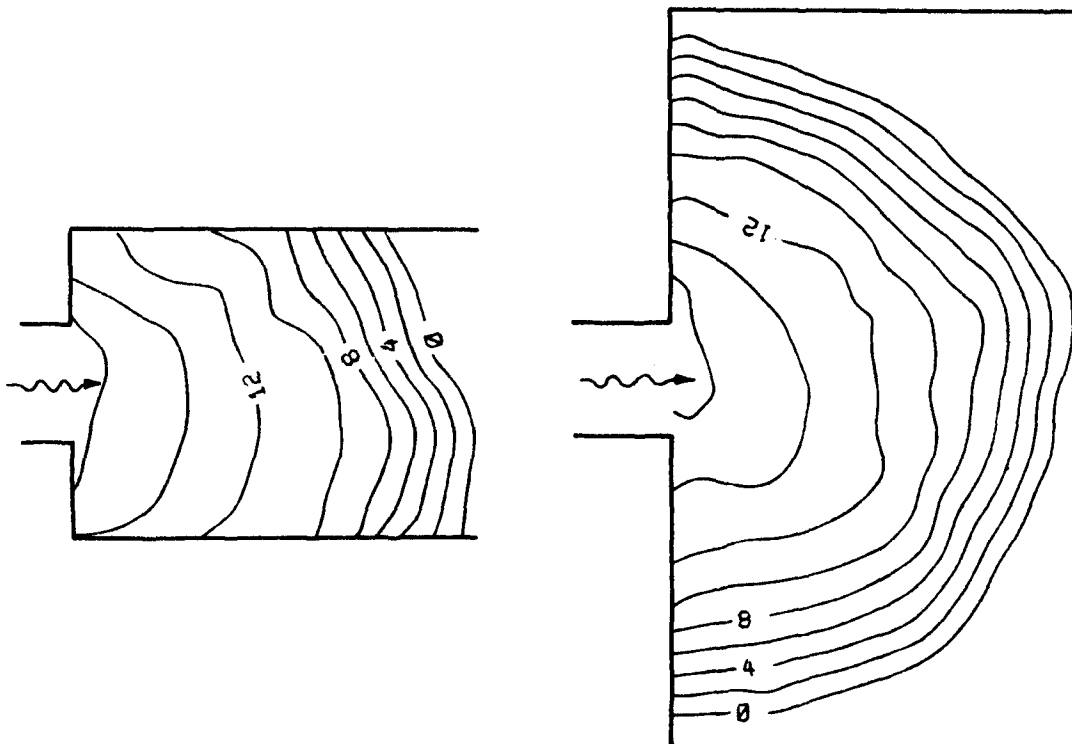


Bild 37 Vergleich der Versuche 153 und 163. Bei 153 traten keine Sekundärkegel auf, der Hauptkegel könnte ein Ausschnitt aus Versuch 163 sein. (Phase 2,  $A = 10$  cm,  $I = 29\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,22$  l/s, Wasserstau = 10 cm)

Solch extreme Beispiele lassen sich vor allem bei Ablagerungen unter Stauverhältnissen finden, da sich mangels Wasserbewegung in der Tiefe auf den Seiten praktisch erst Sekundärkegel bilden können, wenn diese Teile bis nahe an die Wasseroberfläche gewachsen sind. Ohne Wasserstau lassen sich aber zwei unterschiedliche Beobachtungen machen:

1. Bei seitlicher Begrenzung werden die Schwemmkegel mehr in die Länge gezogen (natürlich gleiche Bildungsphasen, nicht gleiche Volumina miteinander verglichen).
2. Das Längsgefälle verflacht sich im vorderen Teil nach unten immer stärker, d.h. es wechselt von der eher konvexen Form des normalen Schwemmkegels zu einer eindeutig konkaven im unteren Teil.

Im Gegensatz dazu unterscheiden sich unter Wasserstau gebildete Ablagerungen kaum voneinander, ob sie sich nun frei entwickeln konnten oder seitlich eingengt wurden.

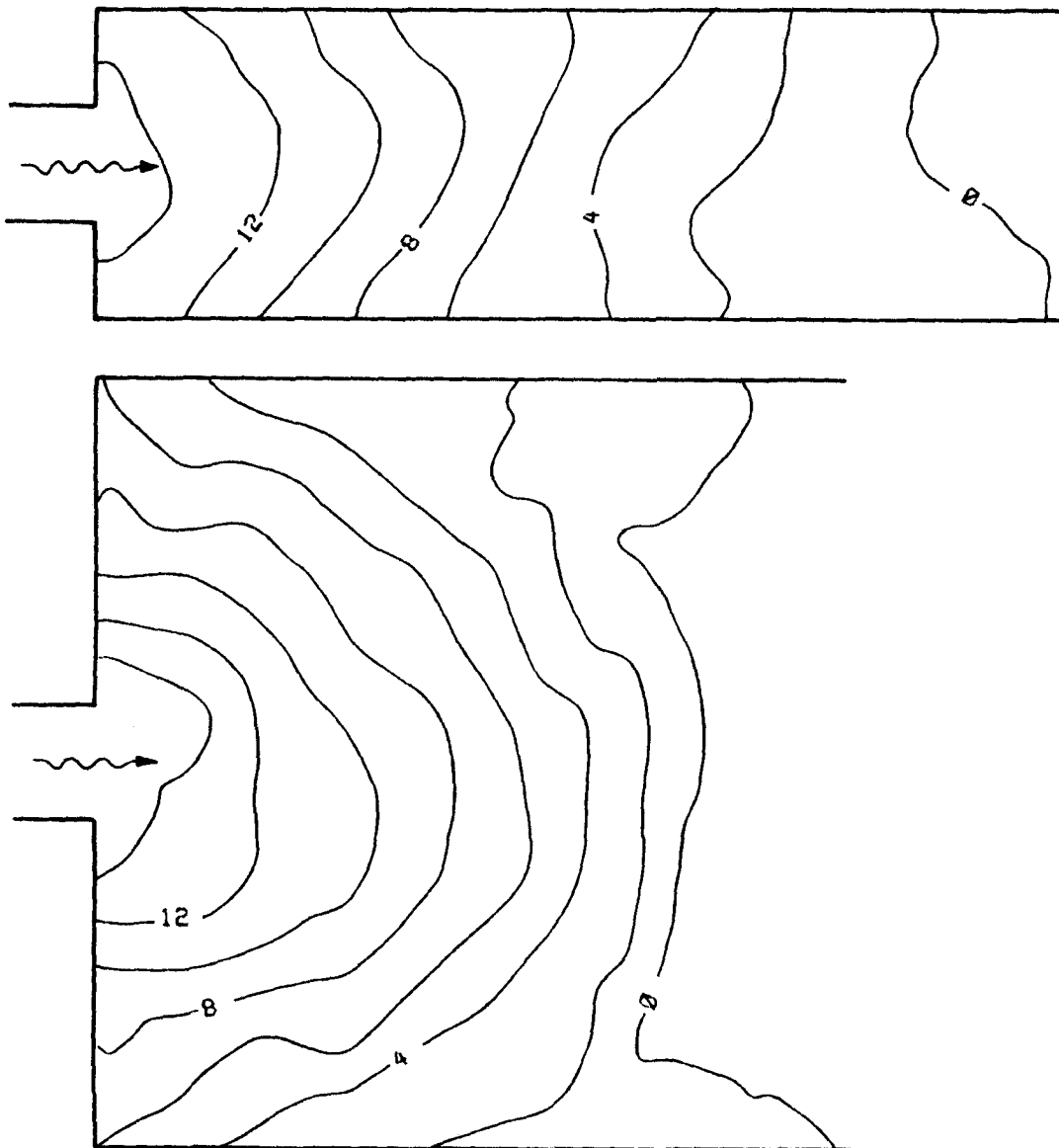


Bild 38 Der Vergleich der Versuche 147 (oben) und 155 (unten) zeigt, dass die Schwemmkegel in schmalen Ablagerungsplätzen länger ausfallen als in breiten (Phase 2,  $A = 10$  cm,  $I = 29\%$ ,  $Q = 0,65$  l/s,  $G = 0,05$  l/s, kein Wasserstau).

#### 4.4.4. Begrenzungen quer zur Fließrichtung

Bei dieser Art der Behinderung der Schwemmkegelausdehnung kann man zwei Fälle unterscheiden, nämlich die Begrenzung nach rückwärts und jene durch das Rückhaltebauwerk vorne im Ablagerungsplatz.

##### 4.4.4.1. Begrenzung nach hinten

Jeder Geschiebeablagerungsplatz ist nach hinten begrenzt, normalerweise quer zur Fließrichtung auf der Höhe des Einlaufes. Wie früher ausgeführt, würde sich ein völlig ungestörter Schwemmkegel auch nach hinten vergrößern. Bedingt durch die Wasserbewegung nach vorne geschähe dieses Wachstum aber bedeutend langsamer und in Form eines steilen Sturzkegels. Durch die hintere Begrenzung kann das entsprechende Geschiebe nicht dorthin abrollen, sondern es wird auf die Seiten transportiert. Diese Bewegung geschieht quer zur Fließrichtung entlang der hinteren Begrenzung, bis die seitlichen Umrandungen erreicht sind und das Material diesen entlang nach vorne befördert wird. Damit trägt es - wie im vorherigen Abschnitt beschrieben - zum Wachstum der Sekundärkegel bei.

Wie in 4.3. kurz erwähnt, macht Weber (1967) einen Vorschlag, wie die Geschiebeablagerungsplätze gebaut werden müssten, um eine freie Schwemmkegelausbreitung auch nach hinten zu ermöglichen. Aufwendige Bauausführung und Schwierigkeiten bei der Entleerung machen diesen Vorschlag jedoch nicht praktikabel, so dass auch weiterhin die hintere Begrenzung nie fehlen dürfte. Deshalb wurden keine Modellversuche ohne eine solche durchgeführt, und es können demnach auch keine Ablagerungsvergleiche gezeigt werden.

##### 4.4.4.2. Begrenzung durch die Rückhaltesperre

Der Einfluss der Rückhaltesperre hängt sehr stark davon ab, ob das Wasser gestaut wird oder nicht. Man muss darum diese beiden Fälle voneinander unterscheiden.

Ohne Wasserstau  
.....

Eine Begrenzung tritt in der Bildungsphase 2 nur dann ein, wenn im Längsprofil die Linie des Verlandungsgefälles noch innerhalb des Ablagerungsplatzes auf den Boden stösst. Andernfalls wirkt die Begrenzung erst in der Phase 3 und ist nicht sehr effektiv, abgesehen davon, dass das Zulaufgerinne dann als Ablagerungsvolumen benutzt wird und somit die Gefahr von Ausbrüchen oberhalb des Ablagerungsplatzes besteht.

Falls kein Wasserstau auftritt, kann man annehmen, dass das Rückhaltebauwerk über seine ganze Höhe offen ist (Schlitz- oder Balkensperre). Damit beginnt eine Spülung einzusetzen, sobald der Kegelfuss die Sperre erreicht hat, d.h. ein Teil des herantransportierten Geschiebes wird gleich wieder aus dem Ablagerungsplatz befördert. Dieser Vorgang kann rückschreitende Erosionen auf dem Kegel mit sich bringen, die nicht nur in der Mitte, sondern beim Pendeln des Gerinnes auch in den seitlichen Teilen des Schwemmkegels auftreten können. Der Kegel bekommt dadurch eine unruhige Topographie, wobei aber meistens eine mehr oder weniger ausgeprägte Erosionsrinne in der Verbindung Zulaufgerinne-Sperrenöffnung ins Auge sticht, wie sie in Bild 39 zu sehen ist.

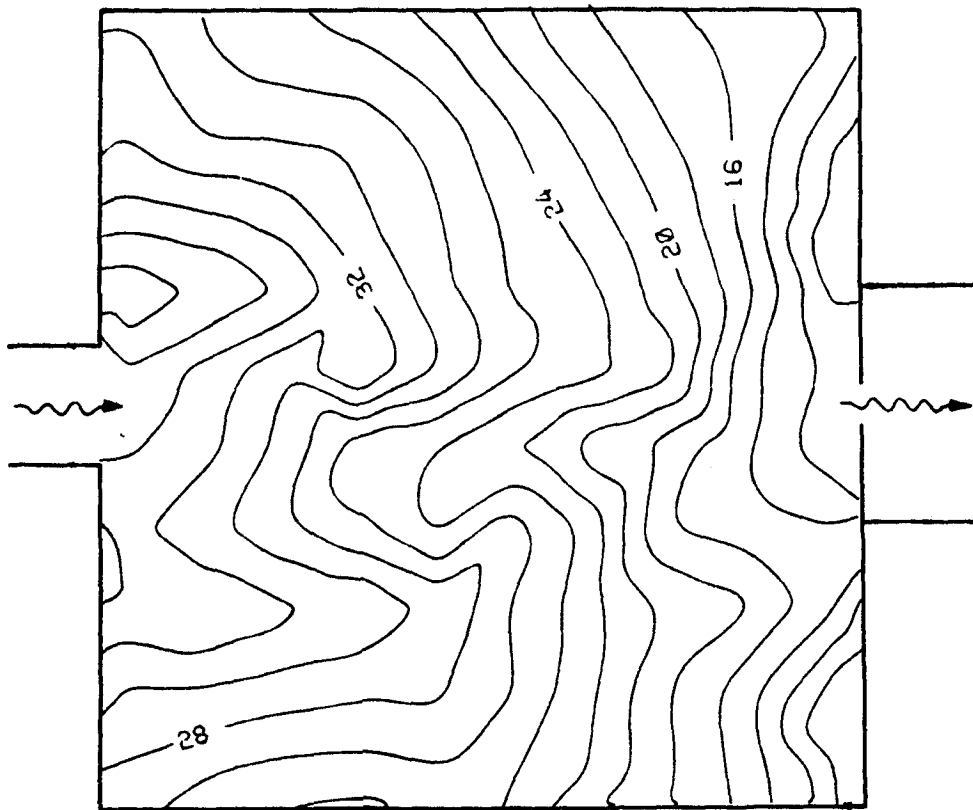


Bild 39 Ergebnis des Ganglinien-Versuches 189. Man erkennt die Erosionsrinne in der Mitte des Schwemmkegels, die entstanden ist, weil der Kegel bis zur Rückhaltesperre gewachsen ist. Der Beckenboden befindet sich bei diesem Versuch auf einer Höhe von 10 cm, das Einlaufgerinne mündet 25 cm darüber (Höhe 35 cm). Siehe auch Bild 122 Seite 250.

Mit Wasserstau  
.....

Wiederum sei angenommen, dass die Rückhaltesperre bis zum Grund geöffnet sei. Das Schwemmkegeldelta wächst mit dem vordersten Teil seines Fusses bis zur Sperrenöffnung, genauer gesagt, nur bis nahe daran. Dann wird alles herunterrollende Geschiebe abgespült. Dies geschieht aber lediglich an diesem vorderen Kegelfussteil. Auf den Seiten wächst der Kegel weiter, da der Abstand zur düsenartigen Wirkung der Sperrenöffnung dort noch zu gross ist, als dass das Geschiebe abgespült werden könnte. So bleibt der Kegel in der Mitte unverändert, wächst hingegen auf beiden Seiten immer näher an die Sperre, die damit durch Arena-artige Ablagerungen langsam umschlossen wird. Diese Ablagerungen kommen der Sperrenöffnung halbkreisförmig so lange näher, bis sich ein Gleichgewicht einstellt, d.h. bis alles zum Kegelfuss herunterrollende Material auf allen Seiten sofort durch die Sperre abgespült wird. Die Bilder 40 und 41 zeigen dieses Endstadium schematisch bei den Schächten-Versuchen (Bild 40) und als wirkliche Ablagerungen nach dem Versuch 195 (Bild 41).

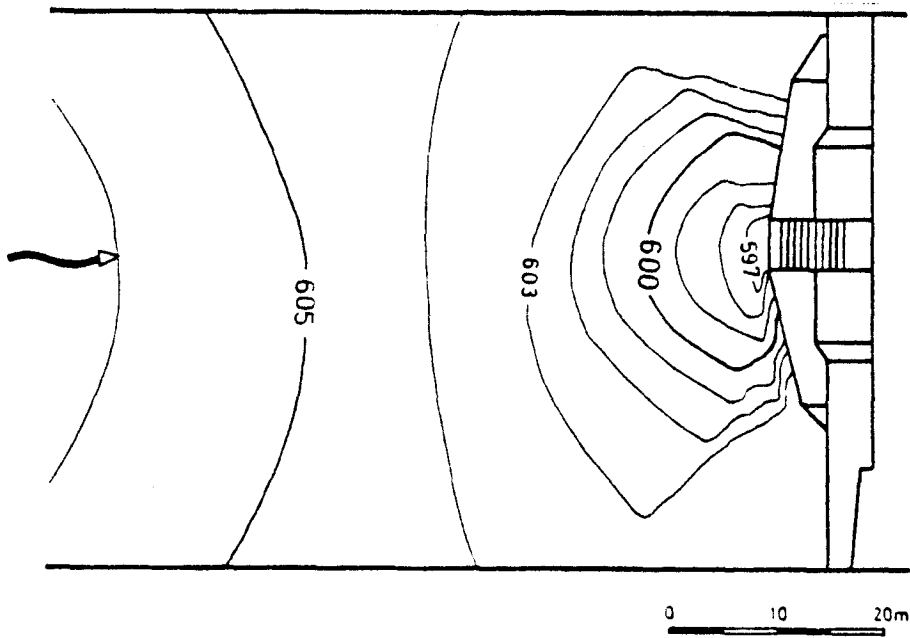


Bild 40 Schematische Darstellung der Arena-artigen Ablagerungen bei den Schächen-Versuchen. Sie entstehen bei vollem Wasserstau, wenn der Schwemmkegel die Rückhaltesperre erreicht.

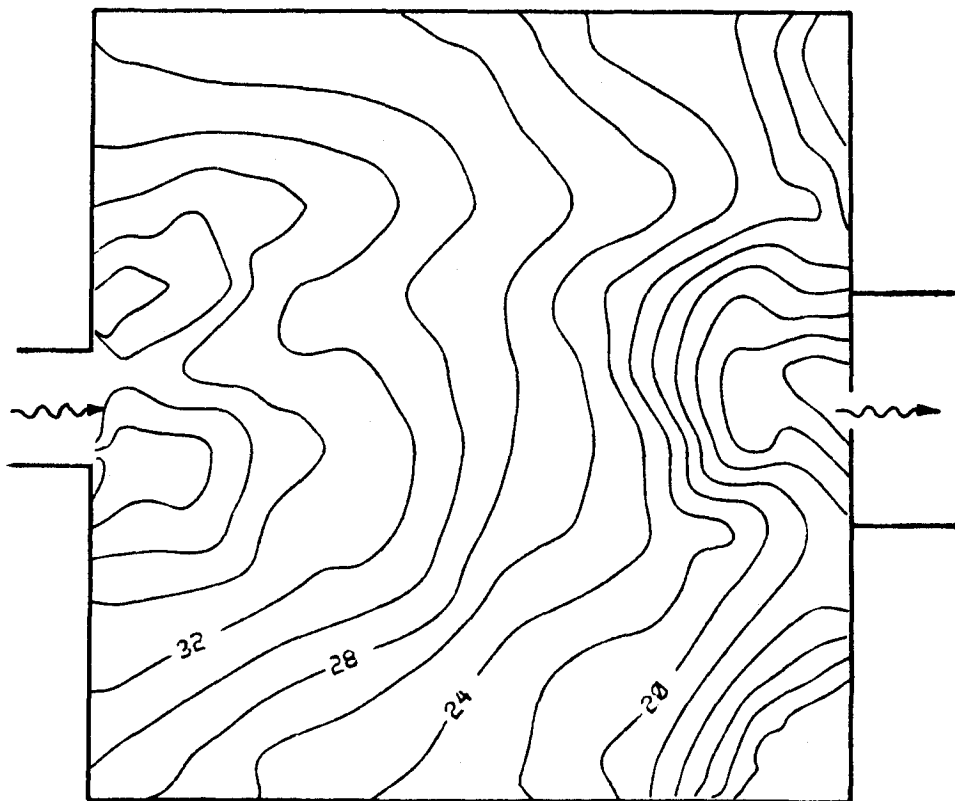


Bild 41 Arena-artige Ablagerungen nach dem Versuch 195. Der Boden des Beckens befindet sich auf einer Höhe von 10 cm, der Einlauf auf einer solchen von 35 cm. Dreidimensionale Darstellungen: Bilder 123 und 124 Seite 251.

#### 4.4.5. Topographische Behinderungen

Wie schon zu Beginn der Arbeit betont, muss man sich bewusst sein, dass die allen Versuchen zugrunde gelegte Annahme des horizontalen Beckenbodens in der Praxis kaum je auftreten wird. Hinweise aus der Literatur und die eigenen Versuche zeigen nun aber, dass sich alle Ablagerungen unabhängig vom Untergrund bilden, solange es sich nicht um wirklich extreme Abweichungen von der Horizontalen handelt. Insbesondere sind die Ergebnisse dieser Arbeit uneingeschränkt gültig für Ablagerungsplätze, bei welchen

- der Grund nicht horizontal ist und keine Ebene darstellt (er kann in alle vier Richtungen geneigt sein, sinnvollerweise aber nicht mit einem grösseren Wert als jenem des Verlandungsgefälles),
- die Umfassungsdämme nicht vertikal in den Ablagerungsplatz einfallen, oder ein kontinuierlicher Uebergang zwischen ihren Böschungen und dem Boden vorhanden ist,
- ein fliessender Uebergang zwischen den rückwärtigen und seitlichen Begrenzungen und der Rückhaltesperre existiert (im Grundriss ausge rundete Formen des Ablagerungsplatzes).

Im Gegensatz dazu gilt das Gesagte nicht oder nur bedingt für Ablagerungsplätze ohne Einlaufabsturz, deltaähnliche Ablagerungen und für die Spülungen.

Als extreme topographische Störungen kann man sich Einbauten (Buhnen etc.) im Ablagerungsplatz vorstellen. Mit drei Versuchen sollen die Einflüsse solcher Hindernisse auf die Ablagerungen demonstriert werden.

Die Ablagerungskörper der Versuche 045, 049 und 051 bildeten sich unter gleichen Randbedingungen, ausser dass bei 049 und 051 die in Bild 42 eingezeichneten, quaderartigen, 12 cm hohen Einbauten vorhanden waren. Untersucht wurde die Phase I. Versuch 049 zeigt einen typischen Schwemmkegel, wenn er bei der Bildung links und rechts eingeeengt und vorne durch die Rückhaltesperre an der Ausdehnung gehindert wird, so dass sich - leicht nach links verschoben - eine Erosionsrinne bildete. Versuch 049 und 051 zeigen im Prinzip die gleichen Erscheinungsformen, wobei sich allerdings im Versuch 049 eine etwas einseitige, asymmetrische Ablagerung bildete (Coanda-Effekt). Beim Vergleich erkennt man deutlich, dass die am Ende des Versuches völlig überdeckten Einbauten auf die Ablagerungsform keinen Einfluss haben. Die Störung durch die noch aus dem Schwemmkegel ragenden Quader (vorne im Versuch 051) ist praktisch vernachlässigbar klein: Einerseits ist auf der rechten Seite in der Mitte eine minime Veränderung wie bei der Bildung der Sekundärkegel (Ablagerung entlang der Wand) zu erkennen. Andererseits ist die Höhenlinie von 6 cm im Fliessschatten des Quaders etwas mehr bergseitig ausgebaucht, als sie es ohne den Einbau möglicherweise wäre.

Zusammenfassend kann man somit festhalten, dass topographische Unregelmässigkeiten und auch Hindernisse von den Ablagerungen mehr oder weniger störungsfrei um- oder überflossen werden.

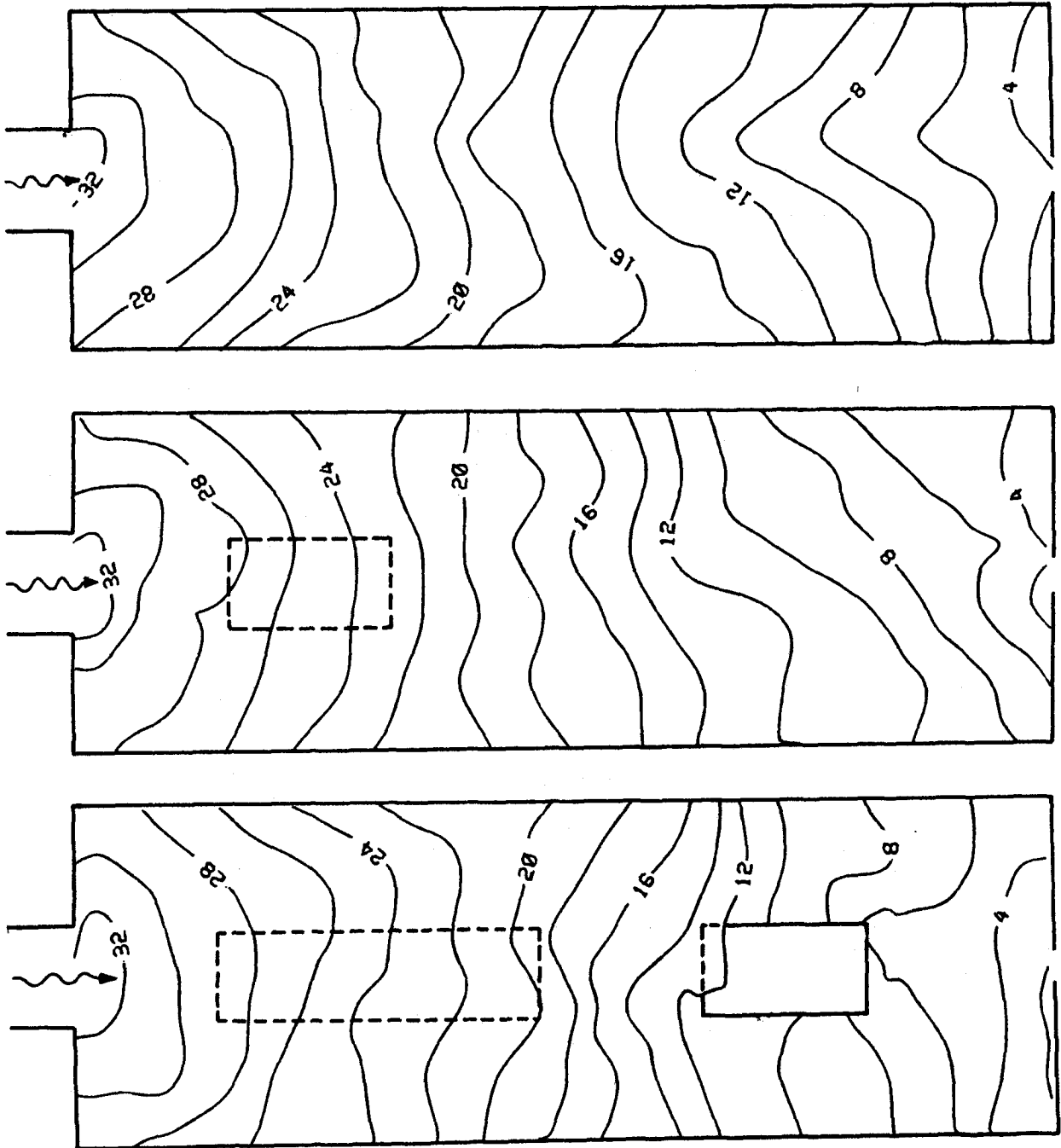


Bild 42 Vergleiche von Ablagerungen: Ohne Störung (Versuch 045, oben); mit am Ende vollständig eingedeckten Einbauten (Versuch 049, Mitte); mit zum Teil eingedeckten Einbauten (Versuch 051, unten). Die Formen der Ablagerungen unterscheiden sich nicht.

#### 4.4.6. Mischformen

Bei den praktischen Vorgängen in einem Geschiebeablageungsplatz bilden sich die dargelegten Ablagerungsformen in reiner Form beinahe nie. Vielmehr entstehen immer Mischformen. In den Bildern der photogrammetrischen Auswertungen sind verschiedene solcher Kombinationen zu sehen ( gleichzeitige Einengung auf allen vier Seiten, Wasserstau und seitliche Begrenzungen usw.). Zusätzlich gibt es weitere Gründe, weshalb man unter natürlichen Bedingungen den reinen, ungestört ausgebildeten Ablagerungsformen praktisch nie begegnet:

1. Konstante Abflussbedingungen, die Voraussetzung für die Bildung reiner Formen sind, gibt es in der Natur so gut wie nie, oder höchstens über kürzeste Zeit.
2. Eine Abflusswelle dauert kaum je genau so lange, dass sich eine Ablagerungsform voll ausbilden kann. Meistens genügt die Zeit nicht, oder sie ist zu lang.
3. Normalerweise ist das Ende einer Hochwasserganglinie nicht mehr stark geschiebelastet, so dass auf die Ablagerungsphase immer gleich eine Spülphase folgt, welche die Ablagerung z.T. abträgt und verändert.



Bild 43 Ablagerungsmischform des Schächen-Versuches S 37. Ein ausführlicher Kommentar dazu findet sich im Text.

Die Entstehung einer solchen unfertigen Mischform soll anhand des Schächen-Versuches S 37 kurz erläutert werden. Das Ergebnis des Ablagerungsvorganges ist in Bild 43 sichtbar. Man erkennt vier verschiedene Verlandungskörper, bzw. deren vorderste Zungen. Das Wasser floss von links nach rechts. Am rechten Bildrand sieht man die Schlitzsperre, in deren Oeffnung eine Tauchwand eingebaut ist (Durchflussöffnung am Grund). Während des Versuches mit konstanter Wassermenge entstand zuerst der in der Mitte hinter dem Schlitz in Arenaform abgeschlossene Schwemmkegel. Darüber hinweg schob sich in einer späteren Phase der asymmetrische, hinten sichtbare Schwemmkegel. Er stiess vor allem dem linken Ufer entlang und in der Mitte nach vorne. Zuletzt zog die Strömung nach rechts und transportierte entlang dem rechten Ufer Material bis zum Sperrkörper. Die dabei entstandene kanalartige Ausformung des Bettes bildete sich durch unsorgfältiges Absenken des Wasserstaus am Ende des Versuches. Der vierte Ablagerungskörper entstand links des Schlitzes. Dort drehte sich die meiste Zeit eine langsame Wasserwalze, so dass sich das feinste Material dünenartig absetzen konnte. Das Pendeln der Strömung aus der Mitte nach links und später wieder nach rechts dürfte aus einer Kombination von Coanda-Effekt und Störung durch die eigenen Ablagerungen entstanden sein.



#### 4.5. Ablagerungen ohne Einlaufabsturz

##### 4.5.1. Einleitung

Es muss in diesem Zusammenhang nochmals auf die Definition des Absturzes hingewiesen werden. Der Einlaufabsturz muss nicht aus einem vertikalen Ueberfall bestehen. Es genügt eine Vergrößerung des Längsgefälles im Vergleich zum Zulaufgerinne bis auf einen Wert, der grösser ist als das Verlandungsgefälle des Geschiebes.

Im weiteren sei bereits zu Beginn dieses Abschnittes betont, dass es sich um einen in der Praxis normalerweise nicht interessanten Fall handelt, da die Ablagerungen schon ganz zu Beginn sofort ins Zulaufgerinne hinaufwachsen, was nicht der Sinn des unterliegenden Ablagerungsplatzes ist. Die folgenden Ausführungen beruhen auf den Versuchen 289 - 300.

##### 4.5.2. Ohne Wasserstau

Bei fehlendem Einlaufabsturz mündet das Zulaufgerinne in den Versuchen direkt auf den horizontalen Boden des Ablagerungsplatzes. Dort entsteht damit der Gefälleknicke, und das Geschiebe bleibt zu Beginn liegen. Es bildet sich ein Haufen, der vom nachkommenden Geschiebe nur wenig um- und erst wieder überflossen werden kann, wenn die rückwärtigen Ablagerungen ins Zulaufgerinne die gleiche Höhe des Haufens erreicht haben. In dieser ersten Phase findet deshalb der ungewöhnliche Fall der Verlandung von unten nach oben statt, wie er beispielsweise im Versuch S 23 festgestellt wurde. Diese Situation kann anhalten, wenn gleichzeitig mit den Ablagerungen im Becken ein Wasserstau entsteht und dieser langsam wächst. Damit vergrössern sich die Ablagerungen ausschliesslich nach rückwärts ins Gerinne.

Ohne Wasserstau hingegen dehnen sich die Ablagerungen gleichzeitig nach vorne und nach hinten aus, da sich sofort nach der oben beschriebenen kurzen ersten Phase über eine kürzere Strecke das Verlandungsgefälle eingestellt hat. Damit ist die Phase 3 der Schwemmkegelbildung erreicht (siehe 4.3.2.1. bzw. 4.3.2.4.). Der weitere Aufbau des Schwemmkegels erfolgt nun unter gleichzeitigen Ablagerungen im Gerinne, wie früher beschrieben; der Grundriss ist ein nach vorn gezogenes Halboval wie bei der Bildung mit Einlaufabsturz, der in dieser Phase bekanntlich voll eingedeckt ist.

##### 4.5.3. Mit Wasserstau

Beim vorhandenen horizontalen Beckenboden reicht der Wasserstau bis ins Zulaufgerinne hinein. Ist dies nicht der Fall, so herrschen Verhältnisse wie bei den Ablagerungen unter Wasserstau bei vorhandenem Einlaufabsturz. Die Stauwurzel - und damit verbunden ein Wassersprung - befindet sich nun also nicht im Becken, sondern bereits oberhalb im Zulaufgerinne. Dort beginnen die Ablagerungen und pflanzen sich nach unten fort. Es tritt damit eine neue, bis jetzt noch nicht beobachtete Situation ein, indem nicht nur der Wasser-Geschiebe-Strom, sondern auch die Ablagerungen bereits kanalisiert ins Becken vorstossen. Als Folge davon entsteht kein eigentlicher Schwemmkegel mehr, sondern ein langgestrecktes

Delta. Dieses wächst in einer Breite von nur etwa 30 - 40 cm praktisch ausschliesslich in die Länge, ohne dass - wie beim Schwemmkegel üblich - auf den Seiten grössere Geschiebemengen abgelagert werden. Unter den Versuchsbedingungen (Wasserstauhöhe ca. 13 cm) erreichte dieses zungenartige Delta eine Länge von ca. 70 cm, ohne dass es sich - auch im hinteren Teil nicht - bedeutend über den Wasserspiegel erhoben hätte. Der Geschiebetransport findet in einer dünnen Schicht zwischen Wasseroberfläche und breitem Deltakamm statt. Der Grund für diese andersartige Ablagerungsform dürfte durch das kanalisierte, bereits beruhigte Einfließen von Wasser und Geschiebe an der Wasseroberfläche ins Becken gegeben sein.

Hat das Delta seine maximale Länge erreicht, so beginnt der Wasserstrom vom Deltakamm nach links und rechts zu pendeln, und gleichzeitig findet eine Auf-landung über die Wasseroberfläche statt. Erst jetzt tritt also eine Verbreiterung des schmalen Deltas ein, welches zusammen mit der Erhöhung langsam zum Schwemmkegel umgearbeitet wird. Bedingung dazu ist allerdings ein relativ ausgeprägter Gefälleknick. Ist dieser nicht vorhanden, so bleibt es bei der Bildung des flachen Deltas. Bei allzu starkem Gefälleknick, d.h. sobald sich das Wasser im Ablagerungsplatz und nicht mehr im Zulaufgerinne beruhigt (Wassersprung), entsteht kein Delta, sondern direkt ein Schwemmkegel. Um quantitative Angaben über die Abgrenzungen der Randbedingungen zwischen diesen drei Fällen machen zu können, wären weitere Versuche nötig gewesen. Sie wurden nicht durchgeführt, da der geschilderte Fall in der Wildbachverbauung eher selten und daher nicht sehr interessant ist.

Die Bildung eines solchen langgestreckten Deltas wurde von Markwalder und Chervet bei den Modellversuchen zum Emmekiesfang (1981) ebenfalls beschrieben. Dieser Ablagerungsplatz weist zwar beim Einlauf einen Absturz auf, der aber im Rückstau des Vorfluters (Aare) immer vollständig überströmt ist. Wegen der in Wildbächen kaum vorkommenden minimalen Gefälle findet auch kein Fließwechsel statt. So sind denn die Verhältnisse mit den oben beschriebenen vergleichbar und zeigen, dass die Modellversuche in diesem Fall Ergebnisse bringen, die in der Natur vorkommen und darum übertragbar sind.

Man kann also bei den Ablagerungen ohne Einlaufabsturz unter Stauverhältnissen zwei Bildungsphasen unterscheiden:

1. Ein langgezogenes Delta wächst praktisch überall unter Wasser bis weit in den Ablagerungsplatz hinein.
2. Die Wasserströmung beginnt hin und her zu pendeln und lagert Geschiebe auf dem Delta ab, so dass dieses nicht mehr in der Länge, sondern in der Höhe zunimmt, um schliesslich wie ein Schwemmkegel weiter zu wachsen. Es findet eine Art Phase 2 der Schwemmkegelbildung statt, wobei sich jedoch das Gefälle - im Gegensatz zur bekannten Phase 2 - aus der Horizontalen gegen das Verlandungsgefälle hin ausbildet.

In Anbetracht des Ortes der Ablagerungen handelt es sich bei der obigen zweiten Phase um die von früher bekannte Phase 3, da sich die Ablagerungen, nebst ihren Vergrösserungen auf dem Kegel, dauernd ins Zulaufgerinne zurück ausbreiten.

Unter Staubedingungen wächst ein Schwemmkegel bedeutend langsamer gegen die Rückhaltesperre als ohne Wasserstau, da er - stark vereinfacht gesagt -, vom Volumen der sich vorne bildenden Arena abgesehen, das gesamte Stauvolumen des Wassers ausfüllen muss, bevor er die Sperre erreicht. Ohne Wasserstau ist der Kegelfuss wegen des kleineren Kegelvolumens schneller bei der Sperre angelangt.

Diese logischen Konsequenzen gelten nicht, falls kein Absturz beim Einlauf vorhanden ist: Das schmale Delta benötigt weniger Volumen als wenn es sich über die ganze Breite ausdehnen müsste. Es erreicht somit ebenfalls relativ schnell die Sperrenöffnung. Sehr schön ist dies beim Vergleich der beiden Bilder 44 und 45 zu sehen. Die beiden Versuche 289/290 und 291/292 wurden unter gleichen Bedingungen durchgeführt, ausser dass die Rückhaltesperre beim ersten Versuch einen Stau bewirkte. Die Abflussganglinien des Geschiebes zeigen nun, dass der Geschiebetrieb unterhalb der Sperre trotz des Staus in beiden Versuchen zur gleichen Zeit begann. Dies war nur möglich, weil in 289/290 ein schmales Delta relativ schnell gegen die Sperre wuchs. Im Gegensatz zum Schwemmkegel des Versuches 291/292 musste sich das Delta später aber noch verbreitern, so dass in der Summe nach dem Versuch 10% weniger Geschiebe aus dem Ablagerungsplatz befördert worden ist (289/290: 99 l, 291/292: 109 l).

#### 4.6. Zusammenfassung

Die Füllvorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz vollziehen sich im Prinzip wie bei der Bildung eines Schwemmkegels, wobei aber auch Elemente des Sturz- und des Murkegels vorhanden sind. Bei einem Einlaufabsturz spielen sich die Ablagerungen in drei Phasen ab. In der ersten erfolgt die Auflandung bis auf die Höhe des Zulaufgerinnes, in der zweiten eine Verflachung des Kegelgefälles bis zum Verlandungsgefälle des Geschiebes, in der dritten wachsen die Ablagerungen bei gleichem Gefälle nach aufwärts ins Zulaufgerinne. Der Unterschied zwischen den Ablagerungen nach den Phasen 1 und 2 liegt weniger im anderen Gefälle als im Grundriss des Kegels. Er ist nach Phase 1 halbkreisförmig, nach Phase 2 hingegen leicht parabolisch. Kleinere Geschiebekonzentrationen ergeben flachere Kegel. Eine Sortierung des Geschiebes geschieht in keiner Phase ausgeprägt, auch wenn eine solche zeitweise oder lokal immer wieder in der Art der Schwemmkegel (grobes Material oben, feines unten) oder auch der Sturzkegel (grobes Material unten, feines oben) feststellbar ist. Alle Kegel haben im Längsprofil eine leicht konvexe Erscheinung im Sinne der Murkegel.

Die freie Ausdehnung der Ablagerungen kann auf verschiedene Weise behindert sein. Bei Wasserstau im Becken entstehen deltaähnliche Ablagerungen mit steilen Böschungen unter Wasser. Durch die seitlichen Begrenzungen gibt es nicht bedeutsame Sekundärkegel entlang den Wänden und mehr in die Länge gezogene Kegelformen, deren Längsprofil vorne gegen den Kegelfuss konkav ist. Das Rückhaltebauwerk verursacht als Behinderung Spülungen und, falls ein Wasserstau vorhanden ist, vorne eine Arena-artige Ausbildung des Schwemmkegels. Unregelmässigkeiten in der Topographie (inkl. Einbauten im Ablagerungsplatz) beeinflussen die Schwemmkegelbildung praktisch nicht.

Weist das Becken keinen Absturz beim Einlauf auf, so lagert sich das Geschiebe bereits bei Beginn zu einem Teil im Zulaufgerinne ab. Ist zusätzlich noch ein Wasserstau vorhanden, so bildet sich zuerst ein schmales, langgestrecktes Delta, welches sich erst bei einer bestimmten Länge verbreitert und schliesslich aus dem Wasser wächst, um Dimensionen wie ein Schwemmkegel anzunehmen. In der Wildbachverbauung ist dieser Fall selten und darum praktisch nicht von Bedeutung.

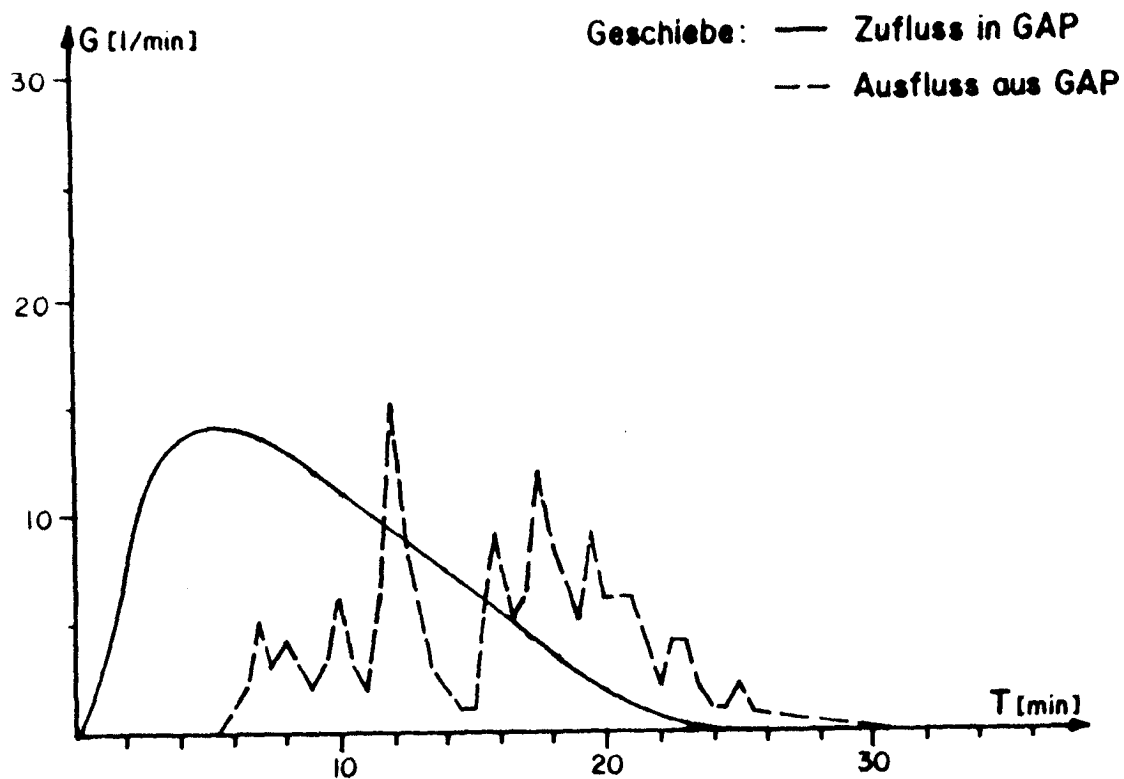
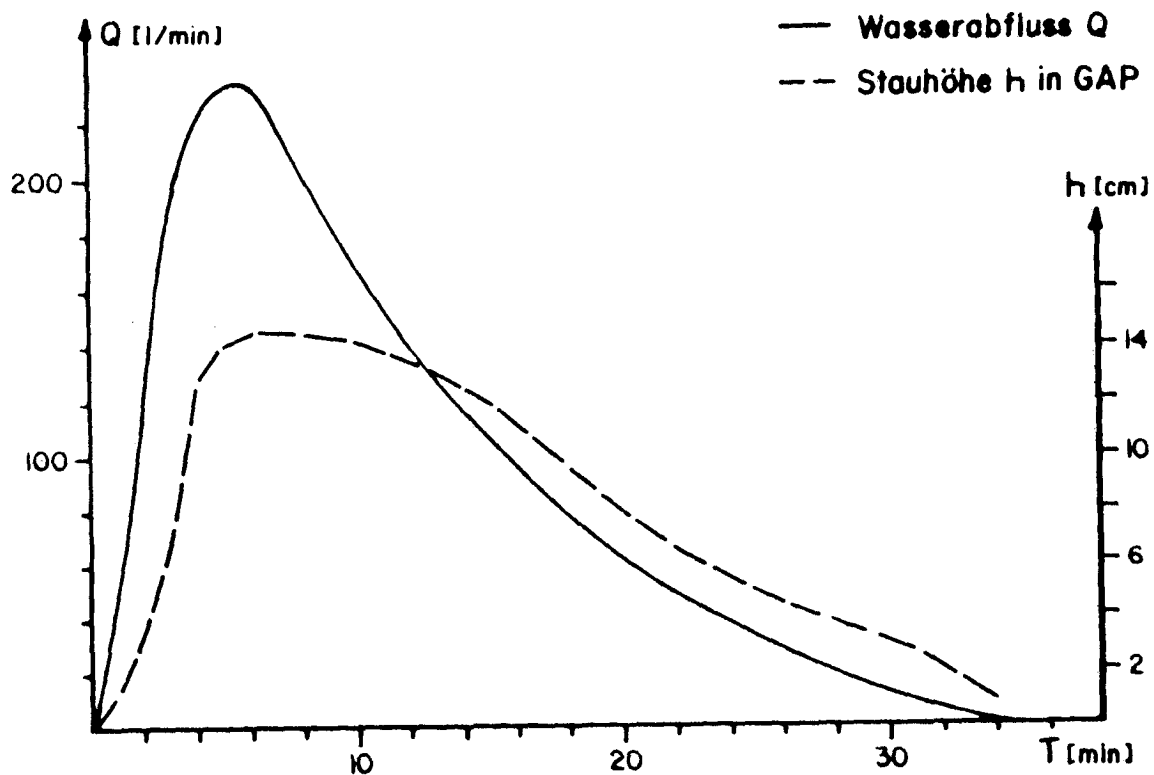


Bild 44 Versuch 289/290 ohne Einlaufabsturz (Länge des Beckens  $L = 100$  cm, Breite  $B = 100$  cm, Zulaufgerinne  $I = 18$  %,  $G_{sp} = 100$  l).

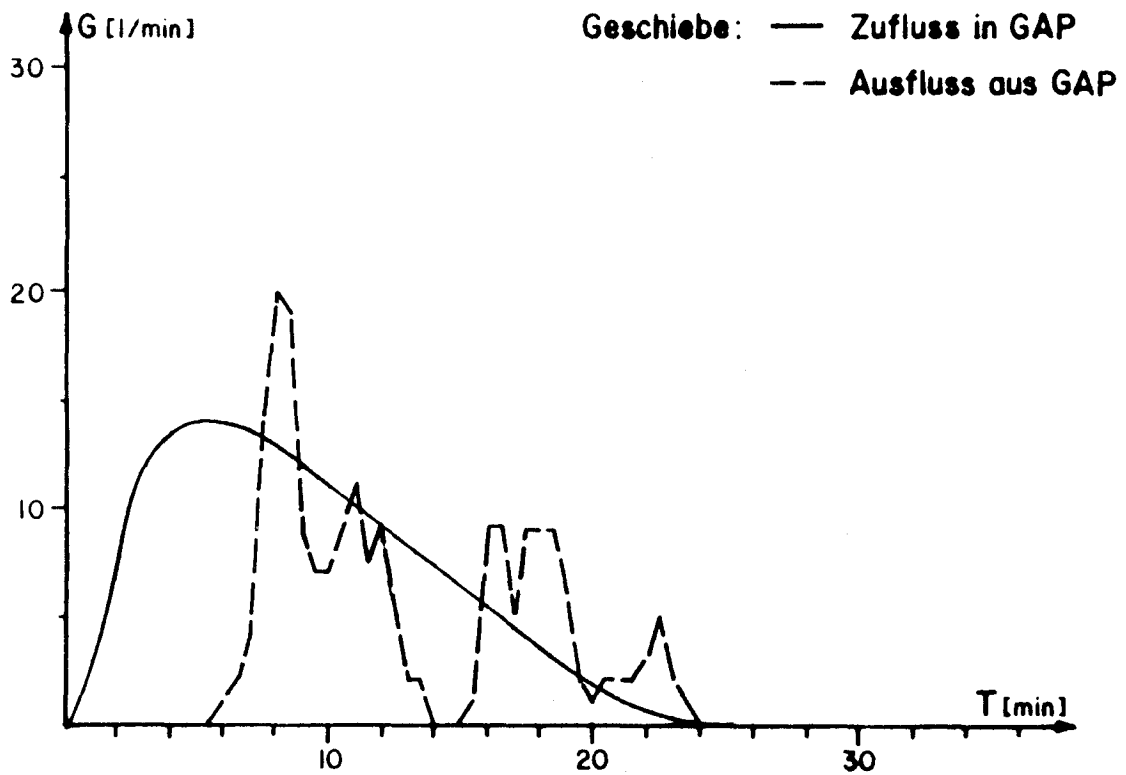
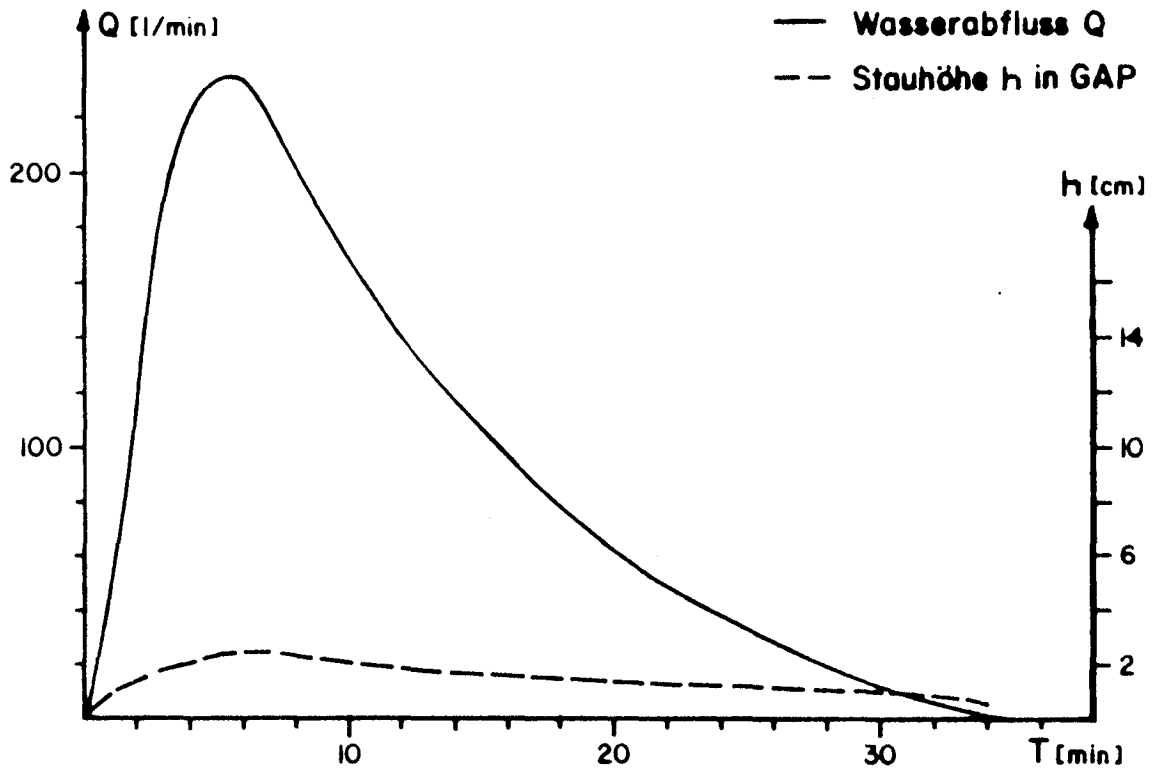


Bild 45 Versuch 291/292 ohne Einlaufabsturz, abgesehen vom Wasserstau identisch mit Versuch 289/290 (Bild 44) ( $L = 100$  cm,  $B = 100$  cm,  $I = 18$  %,  $G_{sp} = 109$  l).

Stehel stehel  
Denn wir haben  
Deiner Gaben  
Vollgemessen! -

## 5. Die Spülformen =====

### 5.1. Uebersicht

Das folgende Kapitel bringt einen Ueberblick über die in einem Geschiebeablagerungsplatz möglichen Spülformen. Wie zu Beginn betont, handelt es sich hierbei um einen wichtigen, aber nicht um den zentralen Teil der Arbeit. Die Spülformen wurden darum nicht so intensiv studiert wie die Ablagerungsformen. Zusammen mit den Angaben aus der Literatur ermöglichten die eigenen Versuche jedoch einen zur Erfüllung des Zieles dieser Arbeit genügenden Ueberblick.

Nachfolgend sind drei Arten von Spülungen unterschieden:

- Spülungen unter Wasserstau
- Spülungen ohne Wasserstau
- Spülungen bei sinkendem Wasserstau

Nach einer kurzen Darstellung der möglichen Ursachen für die Spülungen werden diese drei Arten der Spülvorgänge anhand eigener Versuche, praktischer Beobachtungen und Literaturangaben beschrieben.

### 5.2. Die Ursachen für die Spülungen

Unter unbeeinflussten Verhältnissen gibt es sechs verschiedene Gründe, welche zu Spülungen in einem Geschiebeablagerungsplatz führen können. Je nach den Umständen können dabei im einen Extremfall ganze Teile des Ablagerungsvolumens abtransportiert werden, im anderen Extremfall jedoch nur lokale Verlagerungen auftreten. Die sechs Spülursachen sind die folgenden:

#### 1. Beschränkte Grösse des Ablagerungsplatzes .....

Es wurde bereits bei der behinderten Schwemmkegelausbildung darauf hingewiesen, dass es zu Spülungen kommt, wenn der Schwemmkegelfuss die Rückhaltesperre erreicht hat. Sehr oft finden im oberen Teil des Ablagerungsplatzes weiterhin Auflandungen statt, während das bis zum Kegelfuss gebrachte Geschiebe ausgespült wird, ohne dass eine rückschreitende Erosion auftritt. Sie kann später einsetzen, falls das Becken von hinten weiter aufgefüllt wird.

#### 2. Sinkender Wasserstau .....

Wie Chang (1982) sehr klar zeigt, bewirkt die Absenkung des Wasserspiegels vorne in einem Becken eine Erhöhung des Energiegradienten. Darauf reagiert das Gerinne durch Verminderung seiner Breite und durch Eintiefung, d.h. es beginnt eine rückwärtsschreitende Erosion, welche einen schmalen Canyon in den Ablagerungskörper frisst.

3. Vergrößerter Wasserabfluss

.....

Die Erhöhung der Wassermenge (bei gleichbleibender Geschiebemenge) bewirkt eine überschüssige Transportkapazität. Als Folge davon nimmt das Wasser zusätzliches Geschiebe auf, was nur durch Erosion der Ablagerungen geschehen kann.

4. Verkleinerte Geschiebemenge

.....

Nimmt die Transportrate des Geschiebes ab (Erschöpfung von Geschiebereden, Verklausungen im Oberlauf), so entsteht eine vergrösserte Transportkapazität des Wassers mit den unter 3. geschilderten Folgen.

5. Verkleinerte Geschiebekorndurchmesser

.....

Aus ähnlichen Gründen wie unter 4. aufgeführt ist es möglich, dass sich die Sieblinie des transportierten Geschiebes zu Gunsten der kleineren Korndurchmesser verändert. Dadurch ist die gleiche Wassermenge imstande, eine grössere Geschiebemenge zu transportieren. Wird sie ihm nicht zur Verfügung gestellt, treten wiederum Erosionen, d.h. Spülungen auf.

6. Zufälligkeiten im Ablagerungsplatz

.....

Ohne sicht- oder messbare Ursache können im Ablagerungsplatz kleine Veränderungen stattfinden, die zu meist kleineren und lokalen Spülungen führen. Drei Beispiele seien erwähnt: Einsturz eines meistens beinahe senkrechten Erosionsufers, Vereinigung von zwei Strömungsarmen zu einem einzigen, Beschädigung der momentan stabilen Topographie beim schlenkernden Abschwimmen eines grösseren Treibholzes.

Mit den Methoden der Wildbachverbauung können unter Umständen die Ursachen 3 bis 5 beeinflusst werden. Die Zufälligkeiten sind nicht steuerbar, womit noch die Ursachen 1 und 2 verbleiben. Der Wasserstau lässt sich mit der Art des Rückhaltebauwerkes beeinflussen, solange dieses nicht durch Treibholz verstopft wird. Durch die Lösung solcher Verklausungen nach dem Hochwasser kann man spätere Spülungen stark fördern oder überhaupt erst ermöglichen. Von der wohl wirkungsvollsten Massnahme für die Ermöglichung von Spülungen, nämlich der Dimensionierung des Ablagerungsplatzes, wird später die Rede sein.

Zum Schluss sei eine letzte, allerdings künstliche Ursache oder Förderungsmassnahme von Spülungen erwähnt. Bei jedem Gleichgewicht eines Gerinnes, also auch nach Abschluss einer Ablagerung, bildet sich durch Ausschwemmung des feinen Geschiebes oberflächlich die Deckschicht. Sie ist eine sehr stabile Pflasterung und kann nur mit relativ grossen Wassermengen wieder zerstört werden. Durch künstliches Entfernen dieser Deckschicht kann auch ohne die sonst notwendige grosse Wassermenge eine Spülung in Gang gebracht werden.

5.3. Spülungen bei sinkendem Wasserstau

Diese wirkungsvollste der drei aufgeführten Spülungsarten tritt auf, wenn

- der Wasserabfluss zurückgeht, d.h. beim Abklingen einer Hochwasserwelle (natürliche Ursache),
- die während des Hochwassers an der Oeffnung des Rückhaltebauwerkes

gebildeten Treibholzverklausungen entfernt worden sind (künstliche Ursache).

Im zweiten Fall muss nicht zwingend ein - lange nach dem Hochwasser möglicherweise nicht mehr vorhandener - Wasserstau zurückgehen, sondern es reicht, wenn durch die Massnahmen dem Wasser die Möglichkeit gegeben wird, auf einem tieferen Niveau aus dem Ablagerungsplatz zu fliessen.

Beim nun einsetzenden Spülvorgang sollen zwei Phasen unterschieden werden, wie dies Zeller (1973) gemacht hat:

Phase 1: Es findet eine vorne beginnende, rückschreitende Tiefenerosion statt, wobei sich ein Canyon-artiges Gerinne mit annähernd senkrechten Begrenzungen bildet. Bei vorne gegebenem Sohlenfixpunkt (untere Begrenzung der Sperrenöffnung) dauert der Vorgang so lange an, bis entweder hinten auch ein Fixpunkt erreicht ist (Einlaufsperr), oder bis das Verlandungsgefälle des Geschiebes erreicht ist.

Phase 2: Bei verhinderter Tiefenerosion setzt die Seitenerosion ein, womit sich das Gerinne auszuweiten beginnt, d.h. es verzweigt sich, pendelt hin und her und bildet schliesslich Mäander, welche sich vorerst laufend verändern und erst später stabil werden.

Im Bild 46 (Zeller 1973) werden diese beiden Phasen nebst der Ausgangslage in Längs- und Querprofilen sowie im Grundriss anschaulich gezeigt.

Zu Beginn der Phase 1 ist das Gefälle des Gerinnes sehr gross und wird später mit fortschreitender Spülung kleiner. Wegen des hohen Energiegradienten ist dabei der Erosionsvorgang extrem stark, so dass die Geschiebekonzentrationen im ausfliessenden Wasser sehr hoch werden können. Zeller (1973) führt Werte von bis über 30% an. Die Modellversuche zeigten, dass diese Grössen noch weit höhere Werte annehmen können, obschon in den Untersuchungen

- im Vergleich zu den Wassermengen sehr grobkörniges Geschiebe verwendet worden ist,
- die Phase 1 der Spülung in der beschriebenen extremen Art gar nicht durchgeführt wurde.

Die nachfolgend angegebenen Werte stammen denn auch nicht aus dem ersten Teil der Spülphase 1, sondern sind Grössen, welche im Verlauf von normalen Spülungen gemessen worden sind. Der volumetrische Prozentsatz des Geschiebes zur Wassermenge betrug im Versuch 209/210 in der Minute 22 44%, im Versuch 255/256 42% in der Minute 27 (Hochwasserspitze: Minute 5). Im Versuch 209/210 handelt es sich auch absolut um einen hohen Wert (in diesem Versuch um die Spitze), im Versuch 255/256 hingegen weder absolut noch relativ. Weitere Werte liegen zwischen 30 und 40% (z.B. Versuche 233/234, 241/242, 249/250). Die Abflussganglinien sind im Anhang 10.4 zu finden.

Je feiner das Material der Verlandungen, desto intensiver erfolgt die Erosion, sowohl in der Phase 1 wie auch 2. Die Spülung nimmt bis zum Ende der Phase 2 ab, und es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, indem alles in den Ablagerungsplatz gebrachte Geschiebe unten wieder abtransportiert wird. Die Vorgänge in der Phase 1 können durch die hohen Geschiebekonzentrationen murgangartige Formen annehmen, so dass auch grössere Blöcke schwimmend (obschon weit aus dem Wasser ragend) und auf der bewegten, hochkonzentrierten Geschiebeschicht



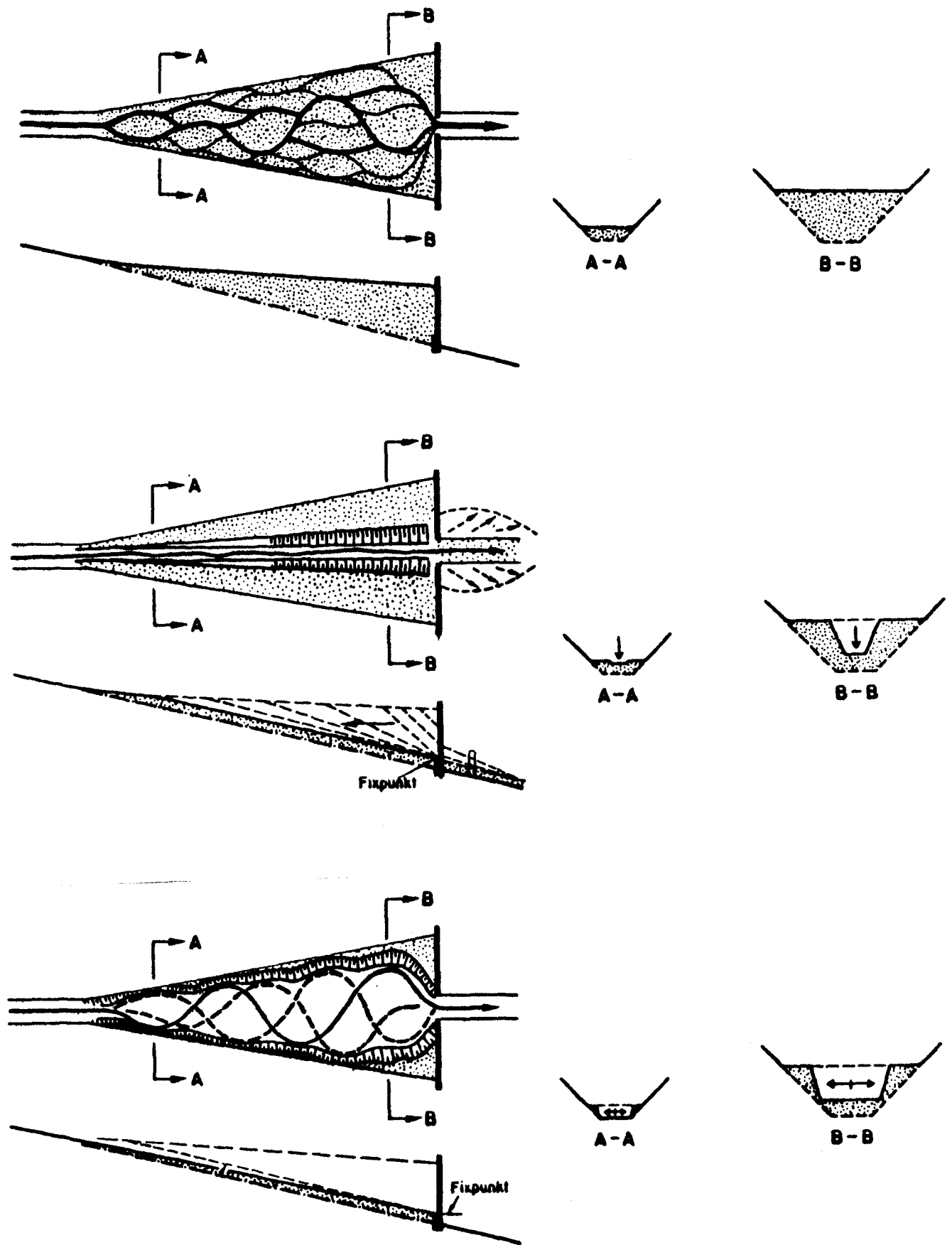


Bild 46 Die zwei Spülphasen in einem anfänglich gefüllten Ablagerungsplatz in einer Darstellung von Zeller (1973): Auf die Phase der Tiefenerosion folgt jene der Seitenerosion.

gleitend durchs Gerinne und aus dem Becken geschleppt werden. Zeller (1973) spricht in seinen Untersuchungen von Blöcken mit weit über  $50 \text{ m}^3$  Inhalt, die bei einer Wasserführung von  $20 - 30 \text{ m}^3/\text{s}$  "langsam talwärts geschleppt wurden, als handle es sich um Schiffe."

Die Gefälleabnahme und damit die Eintiefung des Gerinnes muss nach der Phase 1 noch nicht abgeschlossen sein. Sie kann in beschränktem Rahmen noch während des ersten Teiles der Phase 2 auftreten. Wie erwähnt, entstehen in der Phase 1 sehr steile, meistens praktisch senkrechte Ufer. Sie werden in der Phase 2 unten vom Wasser angenagt und stürzen dann in Paketen und Schollen ins Gerinne, wo sie zerfallen und in kürzester Zeit abtransportiert werden, da sie lokale Hindernisse darstellen, an welchen die Erosion besonders stark angreift.

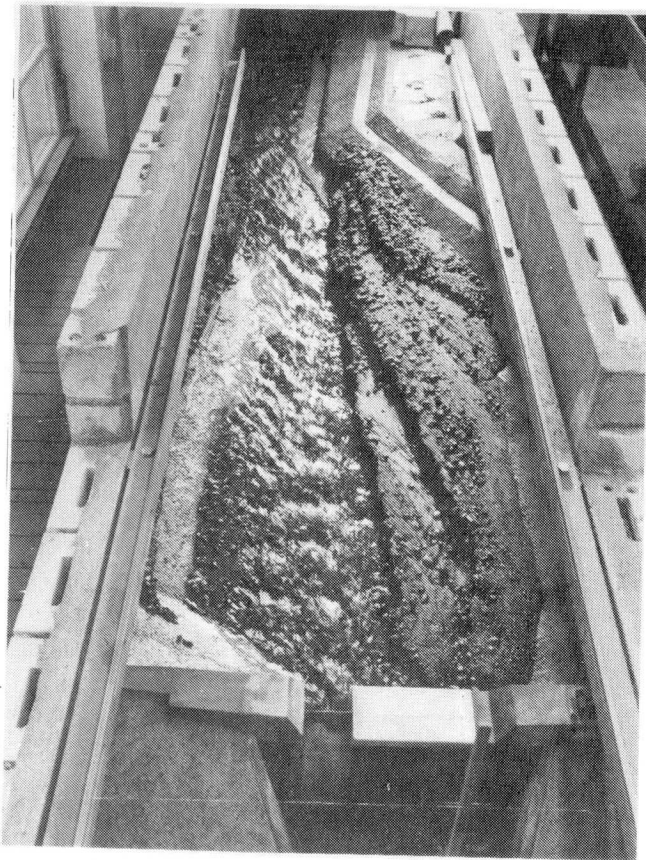


Bild 47 Endstadium des Versuchs S 38. Das Wasser hat sich in drei Terrassenartigen Stufen in die Ablagerungen erodiert.

Das in Bild 46 schematisch dargestellte Beispiel stellt einen in der Natur selten auftretenden Idealfall dar, da durch die Spülung praktisch der ganze

Ablagerungskörper abgetragen wird. Dies ist nur dann möglich, wenn über eine genügend lange Zeit eine genügend grosse Spülwassermenge vorhanden ist. Diese beiden Bedingungen sind in Wildbächen kaum je erfüllt. Vielmehr geht die Wassermenge im Verlauf der Spülung langsam zurück. Wenn gleichzeitig der Wasserstrom - bedingt durch eine nicht allzu rasche und/oder nicht sehr grosse Absenkung des Wasserspiegels - in einem eher breiten Ablagerungsplatz von einer Seite auf die andere wandert, dann entstehen die auch in der Natur immer wieder sichtbaren, typischen Spülformen, nämlich eine Art von Flussterrassen. Die Bilder 47 und 48 zeigen dazu je ein Beispiel aus den Modellversuchen und aus der Natur.



Bild 48 Spülformen im Geschiebeablagerungsplatz des Strobler Weissenbaches bei Bad Ischl in Oesterreich. Die Terrassenformen sind typisch.

Zwei weitere Spezialfälle sollen noch erwähnt werden. Zum einen ist es möglich, dass mit der Dauer der Spülung und dem Rückgang der Wasserabflussmenge das feine Material ausgespült wird, so dass ein steileres Endgefälle resultiert als es das ursprüngliche Bachgefälle gewesen ist. Dies ist ein Extremfall der Deckschichtbildung. Zum anderen gilt die oben gemachte Bemerkung, dass eine Spülung bei feinerem Geschiebematerial effektvoller wird, nur so lange, als es sich nicht um extrem feines, d.h. bindiges Material (Tone, Lehme) handelt. In diesem Fall beschränkt sich die Spülung praktisch auf die Phase 1, d.h. es findet keine Seitenerosion statt, da die - ebenfalls senkrechten - Ufer durch die Bindigkeit des Materials so standfest sind, dass sie der Erosionskraft des Wassers widerstehen können. Die alle zwei Jahre durchgeführte Spülung des Ausgleichsbeckens Mattsand (Mattertal, VS) ist dazu ein Paradebeispiel (Bild 49).

Zum Schluss sei erwähnt, dass sich die beiden beschriebenen Phasen durch verschiedene Umstände mischen, überlagern und umkehren können. Ursachen dazu können Veränderungen im Abfluss sein (Wasser und Geschiebe), aber auch Zufälligkeiten im Ablagerungsplatz (lokale Verkläuerungen durch Treibholz oder/und

grössere Geschiebeblöcke). Unter solchen Umständen und bei allgemein grobem Geschiebe in kleinen Ablagerungsbecken bilden sich am Ende der Phase 2 auch selten ausgeprägte Mäanderformen aus.



Bild 49 Spülung im Ausgleichsbecken Mattsand (Mattertal, VS). Die Ablagerungen bestehen aus Feinstmaterial, das sehr bindig ist und sich darum schlecht spülen lässt, wie man auf dem Bild erkennt. Rechts das Auslaufbauwerk, dahinter eine auf natürliche Art entstandene Spülrinne (Senken des Staus). Man könnte meinen, sie wäre von einem Trax ausgestossen worden! Im linken Gerinne versiegte das Wasser und damit der Erosionsvorgang.

#### 5.4. Spülungen bei Wasserstau

Der Effekt von Spülungen bei unverändertem Wasserstau ist vor allem bekannt von Spülversuchen in teilverlandeten Speicherbecken und Reservoirien. Meistens spricht man von trichterförmigen Ausspülungen rund um die Auslassöffnung. Eine solche Form entsteht allerdings nur, wenn sie sich in allen Richtungen ungestört bilden kann. Befindet sich die Oeffnung jedoch wie sehr oft an der Staumauer bzw. wie im Geschiebeablagerungsplatz an der Rückhaltesperre, so kann sich der Effekt der Spülung nur in zwei Richtungen bemerkbar machen, und es entsteht lediglich eine Halbtrichterform. Damit kommt die Auswirkung einer solchen Spülung der Arena-förmigen Ausbildung der Ablagerungen gleich, wie sie bei den Ablagerungsformen unter 4.4.4.2. beschrieben worden sind (Bilder 40 und 41).

Volumenmässig vermögen die Spülungen bei Wasserstau wegen ihrer beschränkten Reichweite rund um die Auslassöffnung nur wenig Material abzutransportieren. Abgesehen von den Arena-förmigen Ausspülungen bleiben die restlichen Ablagerungen völlig unberührt. Allerdings bleibt diese Art der Spülung in Ablagerungs-

plätzen als Endstadium ohnehin nicht realistisch, denn entweder kommt es gar nicht zu solchen Spülungen, weil die Sperrenöffnungen bis unten verstopft sind, oder dann folgt - wenn die Sperren wirklich offen bleiben - sofort anschliessend, mit dem Abklingen der Hochwasserwelle, die unter 5.3. beschriebene Spülung bei sinkendem Wasserstau.

Trotzdem hat die Spülung unter Wasserstau auch in den Ablagerungsplätzen eine gewisse Bedeutung. Sie kann nämlich auftreten, wenn das Becken gefüllt ist. Das Ergebnis der obigen Ausführungen zeigt, dass in diesem Fall höchstens so viel Material ausgespült wird, wie oben in den Ablagerungsplatz geführt wird. Im Gegensatz zur anschliessenden Spülung bei sinkendem Stau sind bei Vollstau im Unterlauf darum keine extremen Geschiebespitzen zu erwarten.

### 5.5. Spülungen ohne Wasserstau

Als Ursachen für solche Spülungen kommen die unter 5.2. erwähnten letzten vier in Frage, nämlich

- grösserer Wasserabfluss,
- kleinere Geschiebemenge,
- kleinere Geschiebekorndurchmesser,
- Zufälligkeiten im Ablagerungsplatz.

Die letzte Ursache bewirkt normalerweise nur sehr kleine Spülungen oder sogar nur Umlagerungen im Becken. Auch die dritte der obigen Ursachen hat nur selten grössere Folgen. Am effektivsten wirkt sich ein vergrösserter Wasserabfluss vor allem dann aus, wenn die transportierte Geschiebemenge nicht gleichzeitig entsprechend zunimmt. Im Gegensatz zur Spülung bei sinkendem Stau tritt nun keine rückschreitende, sondern eine vorwärtsschreitende Tiefenerosion ein. Sie beginnt also hinten im Ablagerungsplatz und stösst gegen die Rückhaltesperre vor. Da das Wasser sich auf seinem Weg durchs Becken immer mehr mit Geschiebe sättigt, kann es soweit kommen, dass seine Transportkapazität überschritten wird. An diesen Stellen finden als Folge davon Zungen- und Wulst-artige Ablagerungen statt, die dann der weiteren geradlinigen Fortsetzung des Gerinnes zum Hindernis werden. Es kommt zu Verwerfungen, wenn das Wasser seinen eigenen neuen Ablagerungen ausweichen muss. Dies ist der Grund, weshalb das Gerinne bei dieser vorwärtsschreitenden Erosion mindestens in einer ersten Phase keinen so geradlinigen Verlauf annimmt wie bei der rückwärtsschreitenden.

Das Wasser erodiert so lange in die Tiefe, bis ein neuer Gleichgewichtszustand entsteht, der von Wassermenge und Geschiebe (Menge und Zusammensetzung) abhängig ist. Unterhalb des Einlaufbauwerkes kann ein Kolk entstehen. Ist keines vorhanden und das Zulaufgerinne nicht verbaut, so beginnt auch darin die Tiefenerosion.

Wie beim sinkenden Wasserstau kann auf die Phase der vorwärtsschreitenden Tiefenerosion eine solche der Seitenerosion folgen, wobei sich das Gerinne wieder ausweitet. Es muss aber betont werden, dass beide Phasen im Normalfall bedeutend weniger effektiv sind als bei sinkendem Stau. Zudem sind relativ grosse, praktisch geschiebelose Wassermengen nötig, um grössere Spülungen ohne Wasserstau zu verursachen. Diese Bedingung ist aber im klassischen Wildbach nur selten erfüllt (siehe auch selbsttätige Entleerungen).

## 5.6. Allgemeines zu den Spülungen

### 5.6.1. Spülungen aus überdimensionierten Ablagerungsplätzen

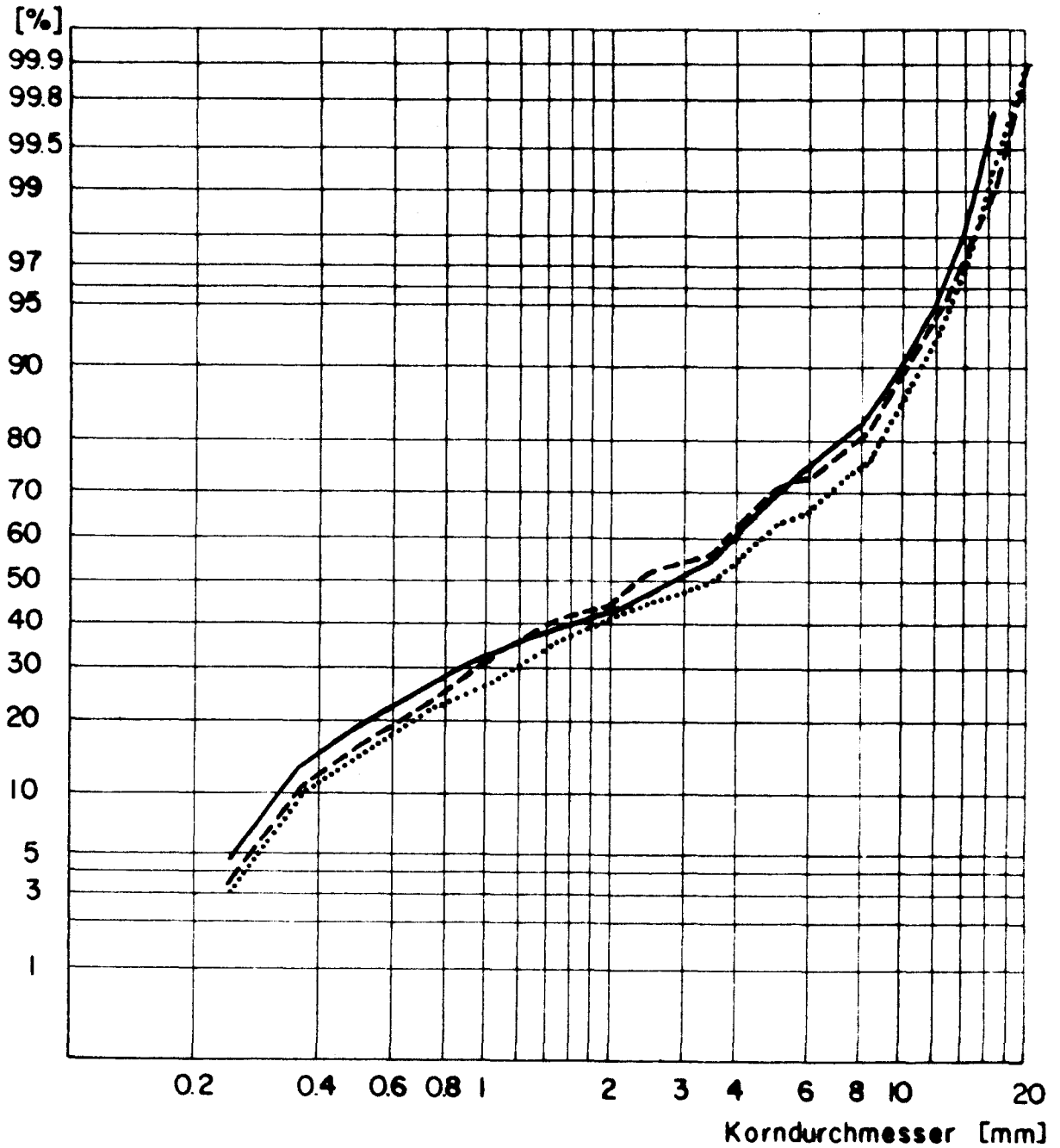
Von Spülungen spricht man üblicherweise nur dann, wenn das Geschiebe aus dem Ablagerungsplatz transportiert wird. Dies ist aber selbst unter den oben beschriebenen Verhältnissen erst dann der Fall, wenn die Ablagerungen die Rückhaltesperre erreicht haben. Befindet sich hingegen der Schwemmkegelfuss noch in einem gewissen Abstand von der Sperrenöffnung, dann bildet sich unter Spülbedingungen zuerst ein Vorkegel mit dem gespülten Material. Es herrschen Ablagerungsbedingungen wie bei fehlendem Einlaufabsturz, d.h. es bilden sich zuerst vorgeschobene, wulstartige Haufen, welche nach einer kurzen Phase der rückschreitenden Ablagerungen überflossen werden, womit die Phase 3 der Schwemmkegelbildung erreicht ist. Der Vorkegel wächst auf diese Art langsam gegen die Sperre. Die eigentlichen Spülungen beginnen beim Erreichen der Sperrenöffnung.

### 5.6.2. Selektive Spülung des Materials

Im Prinzip ist zu vermuten, dass das Geschiebe bei veränderlichem Wasserabfluss sortiert gespült, somit bei grösseren Wassermengen das grobe Material, bei kleineren hingegen nur das feinere Material abtransportiert wird. Geschiebeanalysen des gespülten Geschiebes zeigten nun aber, dass eine Sortierung im grossen ganzen nicht stattfindet. Bild 50 bringt dazu zwei Beispiele.

Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Teile der gesamten Spülmenge, welche nach Versuchsende vor der Probeentnahme zuerst gemischt worden ist. In der Gesamtheit ist das Geschiebe nicht entmischt worden, lokal und zeitweise war das jedoch nicht immer der Fall: Je nach den Verhältnissen während einer Spülung wurden über kurze Zeiten episodisch eher die gröberen oder dann wieder die feineren Korndurchmesser ausgespült. Interessanterweise hoben sich diese Unregelmässigkeiten in der Gesamtheit aber praktisch auf. Wie später bei den Möglichkeiten des Rückhaltebauwerkes (Sortierung, Dosierung) noch beschrieben wird, scheint der Grund dazu der folgende zu sein: Wenn sich im Gerinne die grössten Körner ablagern, verlegen sie den nachkommenden zweitgrössten den Durchfluss, worauf sich diese dahinter auch ablagern und damit wiederum ein Hindernis für die nächst kleineren Geschiebekörner bilden. Als Folge dieses Vorganges werden nur vereinzelt Kleinstkörner über eine solche natürliche Sperre geschwemmt, wobei es sich praktisch nur um die Schwebstoffe handelt, welche in den Modellversuchen nicht quantitativ erfasst werden konnten.

Vereinfacht ausgedrückt kann man darum sagen: Entweder findet eine Spülung statt, dann werden praktisch alle Korngrössen transportiert, oder es findet keine Spülung statt. Selektive Spülungen fördern vernachlässigbare Kubaturen. Auf diese Art können die negativen Ergebnisse der Modellversuche begründet werden. Trotzdem ist dazu ein Fragezeichen zu machen, weil dermassen extreme Beobachtungen aus der Natur nicht bekannt sind, auch wenn heute die Möglichkeit der Sortierung des Geschiebes durch Sperren nicht mehr vorbehaltlos akzeptiert wird (siehe 7.2.). Die oben erwähnten Hindernisse durch grobe Korndurchmesser können sicher bis zu einem gewissen Grad von den feineren Körnern um- und überflossen werden, womit die in der Natur doch auftretende Sortierung von Fall zu Fall begründet werden kann. Warum geschieht dies aber im Modellversuch nicht?



- ..... Versuch 314
- - - - - Versuch 320
- Beschickung

Bild 50 Zwei Beispiele zum nicht vorhandenen Sortiereffekt bei den Spülungen

Möglicherweise liegt der Grund in der Gesamtbetrachtung des gemischten Spülmaterials. Dann ist aber immerhin bemerkenswert, dass die - auch im Modell beobachteten - selektiven Spülungen im Vergleich zum Gesamtvolumen vernachlässigt werden können, da sie die Sieblinie nicht veränderten.



Mit der gleichen Ueberlegung lässt sich begründen, dass auch die Bildung der Deckschicht die Kornverteilungskurve des gespülten Materials kaum beeinflusst, obschon dabei ganz unbestritten das feine Material ausgewaschen wird. Betrachtet man einerseits die Fläche eines Gerinnes und andererseits die Volumina zwischen den Geschiebekörnern und vergleicht sie mit der gesamten Spülmenge des Geschiebes, so kommt man leicht zur Einsicht, dass die Deckschichtbildung die Kornverteilungskurve der Gesamtspülmenge kaum beeinflusst.

### 5.6.3. Berechnung der Spülungen

In der Literatur gibt es verschiedene Versuche, Spülvorgänge rechnerisch zu erfassen. So gibt Hampel (1974) auf Grund von theoretischen Ueberlegungen und Modellversuchen Formeln zur Berechnung der Erosionstiefe und auch der spülbaren Geschiebemenge an. Bei den nicht sehr durchsichtigen Herleitungen muss für die Verhältnisse eines Wildbaches (grosse Gefälle und Geschiebemengen) die Geschiebetriebformel von Meyer-Peter erhalten, was zumindest sehr fraglich ist. Immerhin sagt der Autor, dass seine Ergebnisse "noch nicht die gewünschte Zuverlässigkeit aufweisen". Die erwähnten Formeln sind aus diesem Grund nicht aufgeführt.

Einen bedeutend zuverlässigeren Eindruck machen die Untersuchungen von Willi (1965), die auf Modellversuchen über die Sohlenerosion bei grossen Gefällen beruhen. Willi behandelte den zweidimensionalen Fall der Tiefenerosion und kann damit für die Ablagerungsplätze nicht direkt angewendet werden, da es sich bei diesen Spülungen - abgesehen von der ersten Phase - um eindeutig dreidimensionale Vorgänge handelt. Nach dem Wissen des Autors wurden die Untersuchungen von Willi in Hinblick auf die dritte Dimension aber noch nicht weitergeführt.

Für fünf spezielle Fälle (fünf Schlitzsperrn; geradliniger Staauraum) entwickelten Li et al. (1979) ein mathematisches Modell sowohl für die Ablagerungen als auch für die Spülungen. Das Modell kann jedoch nicht allgemein, bzw. für einen anders gelagerten, konkreten Fall angewandt werden.

Es wird auch in Zukunft nicht einfach sein, Spülvorgänge in Formeln zu fassen, da es sich um recht komplexe Vorgänge handelt. Selbst im einfachsten Fall, nämlich bei konstantem Wasserabfluss, hat man es mit einem ungleichförmigen Abfluss bei nicht stationärem Geschiebetrieb zu tun. Für die Geschiebeablagerungsplätze dürfte man darum in nächster Zukunft weiterhin auf Schätzungen, praktische Erfahrungen und Modellversuche angewiesen sein.

### 5.7. Zusammenfassung

Man kann drei Spülarten unterscheiden, nämlich solche ohne, mit und bei sinkendem Wasserstau. Die letzte ist die wirkungsvollste und gliedert sich in zwei Phasen: Zuerst findet eine rückschreitende Tiefenerosion statt, dann eine Seitenerosion. In sehr feinem Material gibt es die Phase 2 wegen der grossen Bindigkeit der Körner allerdings nicht. Die Spülung unter Druck findet als Endstadium einer Spülung im Ablagerungsplatz kaum je statt. Sie ist nicht wirksam, und es entsteht dabei - analog den Ablagerungen bei Wasserstau - um die Sperröffnung ein Arena-förmiger Halbtrichter. Für die Spülungen ohne Wasserstau sind relativ grosse, mit wenig Geschiebe belastete Wassermengen notwendig,



welche zu einer vorwärtsschreitenden Tiefenerosion führen, auf welche wieder eine Ufererosion folgen kann.

Topographisch typische Spülformen sind nahezu senkrechte Uferpartien und zum Teil mehrstufige Flussterrassen mit ebenso steilen Abbrüchen. Die Modellversuche ergaben bei den Spülungen teilweise Geschiebekonzentrationen von mehr als 40% (Volumen).

Hat der Ablagerungskegel bei Beginn einer Spülung die Rückhaltesperre noch nicht erreicht, so bildet sich zuerst eine Art Vorkegel, welcher bis zur Sperre wachsen muss, bevor die eigentliche Spülung aus dem Ablagerungsplatz beginnen kann. - Spülungen mit selektiven Auswirkungen (Sortierung des Geschiebes) konnten in den Modellversuchen in kleinen Mengen nur optisch beobachtet werden. Quantitativ waren sie nicht nachzuweisen. - Mit den heute zur Verfügung stehenden Methoden können Spülungen aus Geschiebeablagerungsplätzen rechnerisch noch nicht zuverlässig erfasst werden.



Immer neue Güsse  
Bringt er schnell herein,  
Ach! und hundert Flüsse  
Stürzen auf mich ein.

## 6. Selbsttätige Entleerungen

### 6.1. Einführung in das Problem

Auch wenn die Hauptaufgabe eines Geschiebeablagerungsplatzes darin besteht, das von einem Wildbach im Ueberfluss herangebrachte Geschiebe aufzunehmen, so ist das Problem nach der Ablagerung des Geschiebes noch nicht gelöst, bzw. es entsteht ein neues. Soll der Ablagerungsplatz seine Funktion weiter erfüllen, so muss er geleert werden. Theoretisch gibt es dazu zwei Möglichkeiten:

1. Maschinelle Entleerung durch den Einsatz von Bagger, Trax und Lastwagen.
2. Selbsttätige Entleerung durch die Ausnützung der Schleppekraft des Wildbaches bei nicht extremen Hochwassern.

Sehr oft kann das Material aus einem Ablagerungsplatz nicht ohne vorherige Aufbereitung (Sieben, Brechen) direkt im Baugewerbe verwendet werden. Oertliche Verhältnisse, allzu inhomogene Zusammensetzung des Materials, starke Verunreinigung durch Holzeinschlüsse und andere Umstände schliessen eine Verwertung aus wirtschaftlichen Ueberlegungen hin und wieder von vorneherein aus. Eher selten interessiert sich eine Baufirma für das Geschiebe und kann dann mit der maschinellen Entleerung des Ablagerungsplatzes beauftragt werden. Meistens weist eine solche Entleerung ein klar negatives Nutzen-Kosten-Verhältnis auf, weil die maschinelle Entleerung mehr kostet, als die spätere Verwertung des Geschiebes einbringt, oder weil man gar noch eine Deponie für das Material finden muss.

In solchen Fällen wird die selbsttätige Entleerung interessant. Sie kann allerdings nur unter gewissen Voraussetzungen befriedigend funktionieren, wie dieses Kapitel zeigen wird. Zudem sind in jedem Fall zwei Bedingungen zu erfüllen:

1. Das an den Ablagerungsplatz anschliessende Unterlaufgerinne muss die ihm zugeführte Geschiebemenge bis in den Vorfluter weiterleiten können, ohne dass im Gerinne Auflandungen entstehen.
2. Die Schleppekraft des Vorfluters muss genügen, um das Material ohne Rückstau in ihm oder ins Zulaufgerinne abzutransportieren.

In der Praxis gibt es aber auch Umstände, bei welchen die beiden obigen Bedingungen erfüllt wären und trotzdem eine selbsttätige Entleerung nicht erwünscht ist (erhöhtes Sicherheitsbedürfnis im Unterlauf, untenliegender Stausee u.a.). In diesen Fällen stellt sich allerdings dann meist die Frage nicht, wer für die Kosten einer maschinellen Entleerung aufzukommen hat.

Wie in der Einleitung angetönt, unterscheidet der Autor zwei Arten von Geschiebeablagerungsplätzen, je nachdem, ob der natürliche Transport des Geschiebes darin definitiv ein Ende nimmt (endgültige Ablagerung) oder nur zeitweise unterbrochen ist:

#### 1. Geschiebeablagerungsplätze mit endgültiger Ablagerung

Es gibt keine selbsttätigen Entleerungen. Die Becken müssen bei Bedarf

maschinell entleert werden, oder sie verlanden mit der Zeit endgültig und verlieren damit ihre Ablagerungsfunktion.

## 2. Geschiebeablagerungsplätze mit zeitweisen Ablagerungen

Episodisch finden selbsttätige Entleerungen statt, welche Teile der Ablagerungen ausspülen. Sie müssen unter Umständen von maschinellen Entleerungen unterstützt werden. Diese Ablagerungsplätze sollen ihre Funktion für immer beibehalten.

Der erste Typ der Ablagerungsplätze ist in seiner Anlage relativ problemlos, da im Rückhaltebauwerk lediglich kleine Entwässerungsdolen vorgesehen werden müssen. Der Bau von einfachen Vollwandsperren, Schwergewichtsmauern oder auch Dämmen drängt sich auf. Im Gegensatz dazu bedingen selbsttätige Entleerungen in Statik und Bau aufwendigere und raffiniertere Sperrenbauten der offenen Bauweise als Rückhaltebauwerke.

Bei den selbsttätigen Entleerungen handelt es sich im Prinzip um Spülvorgänge, wie sie im vorangegangenen Kapitel besprochen worden sind. Da es nun aber um mehr als nur eine Morphologie der Spülformen geht, sind im folgenden ergänzende und erweiterte Ausführungen notwendig. Insbesondere interessieren die Voraussetzungen zu den selbsttätigen Entleerungen und ihre Optimierung.

### 6.2. Untersuchungen und praktische Abklärungen

#### 6.2.1. Modellversuche

Jedem Ablagerungsversuch folgte ein Spülversuch, und zwar wurde dabei die geschiebelose Wassermenge von der Hälfte bis auf den vollen Abfluss gesteigert, mit welchem die vorhergehende Ablagerung stattgefunden hatte. Damit kam es zu Situationen, welche für eine Spülung dermassen günstig sind (grosser geschiebeloser Abfluss), dass sie in der Natur kaum je auftreten werden. Umso mehr überraschte das Ergebnis dieser Spülversuche, indem es häufig geschah, dass der Spüleffekt trotz der dauernd gesteigerten, geschiebelosen Wassermenge sehr gering war, ja, zum Teil wurde kaum feststellbar Material ausgespült. Der Grund zu diesem für die selbsttätige Entleerung enttäuschenden Ergebnis lag sicher darin, dass sich nach den Ablagerungen eine Deckschicht gebildet hatte, welche durch kleinere Wassermengen, selbst wenn sie geschiebelos waren, nicht zerstört werden konnte. Diese kleinen Abflüsse schwemmen im Gegenteil auch noch das letzte feinere Material aus der Deckschicht und verfestigten sie damit zusätzlich. Schliesslich war nicht einmal die geschiebelose Wassermenge, die zu den Ablagerungen geführt hatte, in der Lage, die Deckschicht aufzureissen und damit eine Spülung in Gang zu setzen. Zwei weitere Phänomene wirkten ebenfalls einer Spülung entgegen:

- Wegen des relativ groben Geschiebes versickerte meistens ein Teil der Abflüsse in den Ablagerungskörper. Prozentual machte dies bei den kleinen Wassermengen mehr aus als bei den grossen, womit die effektiv für eine Spülung zur Verfügung stehende Menge nochmals reduziert wurde.
- Bei den kleinen Abflüssen trat im Vergleich zu den grossen vermehrt der verzweigte Gerinnecharakter auf, womit sich die erosiven Kräfte zu Ungunsten einer Spülung verteilten.

Einerseits aufgrund der obigen Modellerfahrungen und andererseits aus der praktischen Erkenntnis, dass die wirkungsvollen Spülungen sehr oft beim Abklingen einer Hochwasserwelle auftreten, kam der Entschluss, auch für die selbsttätige Entleerung vor allem Modellversuche mit einer der Natur nachgebildeten Abflussganglinie beizuziehen. Dies hatte zur Folge, dass in jedem Versuch vor allem in der ersten Phase bedeutende Materialmengen abgelagert wurden. Der Uebergang zur selbsttätigen Spülung erfolgte im Verlauf der Versuche fliessend, konnte jedoch mit der Geschiebewaage genau verfolgt werden.

Im Hinblick auf die selbsttätige Entleerung kamen bei den Versuchen mit Ganglinien vor allem drei Arten zum Zuge:

- Variation der Geschiebekonzentration,
- Veränderung der Länge des Ablagerungsplatzes (zu grosses, angemessenes und zu kleines Volumen),
- Mehrfache Wiederholung der Hochwasserwelle bei jeweils unveränderten Ablagerungen des vorhergehenden Versuches.

Die Ergebnisse werden zusammen mit jenen aus praktischen Erfahrungen unter 6.3. dargestellt. Zwei Beobachtungen seien vorweggenommen, die nicht ganz so kurz präsentiert werden können. Es handelt sich um den kombinierten Vorgang der Ablagerung und Spülung bei einer Hochwasserganglinie und um die sehr sprunghafte Ganglinie des abtransportierten Geschiebes.

#### Ablagerung und Spülung mit fliessendem Uebergang

Einerseits bedingt durch die dauernd zunehmende Wassermenge und andererseits durch den nicht gleich zu Beginn vorhandenen Stau im Becken, konnte sich der Geschiebetrieb schon am Anfang bis weit nach vorne gegen die Sperre hin entwickeln. Später wanderten die Ablagerungen zurück und fanden schliesslich etwa 40 cm nach dem Einlaufabsturz konzentriert statt, indem das Geschiebe aus dem Kolk unterhalb des Absturzes vor allem nach vorne geworfen wurde und sich dort Buckel-artig auftürmte. Dieser Kolkwall ist regelmässig bis viele cm über den Wasserstau hinausgewachsen. Die Bilder 51 und 52 belegen, dass der geschilderte Vorgang auch in der Natur auftritt.

Der Kolkwall bildete für die Strömung ein Hindernis, so dass sie sich jeweils aufteilte und nach links und rechts ergoss. Zuerst fand in diesen Seitenästen praktisch kein Geschiebetrieb statt. Er nahm aber mit der Höhe des Walles dauernd zu, bis schliesslich alles Geschiebe nach links und rechts floss. Damit entstanden auch dort Ablagerungen, welche mit steigender Höhe dem nach unten übersteilen, mittleren Wall zur Konkurrenz wurden, bis dann in der Mitte der Durchbruch erfolgte. Dabei ergoss sich das Geschiebe murgangartig nach unten, und es entstand eine extreme Geschiebespitze unterhalb des Ablagerungsplatzes. Sehr oft bedeutete diese Spitze überhaupt den ersten Teil des Spülvorganges, d.h. den Beginn der selbsttätigen Entleerung.

Anschliessend bildete sich immer ein geradliniges, Canyon-artiges Gerinne mit zuerst sehr starker Tiefenerosion, die mit der Zeit abklang. Wie bei den Spülformen beschrieben, weitete sich nachher das Gerinne aus, und das Wasser begann sich zu verzweigen und zu mäandrieren. Erfolgte der Durchbruch in der Mitte relativ früh, so war es möglich, dass sich anschliessend noch ein zweiter Kolkwall mit erneutem Durchbruch bildete.



Bild 51 Kolkwall bis über die Wasseroberfläche im Chlausenbach bei Lauerz. Bleibt der Ablagerungsplatz wie in diesem Fall immer eingestaut, so präsentiert sich diese besondere Ablagerungsform als Insel.



Bild 52 Kolkwall unterhalb des Einlaufes in den Ablagerungsplatz des Vilterser Baches bei Vilters. Er ist das Gegenstück zum oberhalb anschliessenden, jetzt wieder aufgefüllten Kolk des Einlaufwasserstrahles.

Hatte die selbsttätige Entleerung einmal begonnen, so konnte dauernd beobachtet werden, wie sich die Spül- und Ablagerungsvorgänge ablösten oder oft auch gleichzeitig stattfanden. Gegen das Ende der Hochwasserganglinie überwogen quantitativ die Spülungen meistens trotz zurückgehenden Abflusses.

#### Sprunghaftigkeit der Geschiebeabflussganglinien

Beim Betrachten der Ganglinien des gespülten Geschiebes fällt auf, dass sie praktisch ausnahmslos sehr sprunghaft sind. Innerhalb kürzester Zeit folgen sich relative Maxima und Minima, ein kontinuierlicher Geschiebetrieb ist nur ganz selten und über kürzere Zeit feststellbar. Da diesbezügliche Messungen aus der Natur nicht existieren, ist diese Erkenntnis neu und interessant. Aus dem gleichen Grund ist dazu aber auch ein Fragezeichen zu machen.

Wie kommt es zu solcher Wechselhaftigkeit, und findet sie nur in den Modellversuchen statt? Von der Versuchsdurchführung her lag folgender Verdacht auf der Hand: Da für die Untersuchungen keine automatischen Steuergeräte zur Verfügung standen, wäre es zu aufwendig gewesen, die in den Ablagerungsplatz zufließenden Wasser- und Geschiebemengen von Hand kontinuierlich einzugeben, wie dies die Eingabeganglinien auf den Diagrammen darstellen. Vielmehr geschahen die Veränderungen jede Minute in Stufen, die etwa 20 - 30 Sekunden dauerten, so dass die effektiv durchgeführte Ganglinie eher treppenartig aussah, wobei aber die einzelnen Stufen recht schmal und schräg miteinander verbunden waren.

Diese stufenartigen Ganglinien hätten nun der Grund für zackige Abflusslinien sein können, da der Zufluss jeweils in relativ kurzer Zeit von einem Wert zum anderen wechselte. Zur Untersuchung dieses Verdachtes wurde ein Versuch (317/318) wiederholt, wobei die Ganglinien stufenlos eingegeben wurden (319/320). Die beiden Bilder 53 und 54 zeigen die Ganglinien der erwähnten Versuche zum optischen Vergleich.

Man erkennt, dass der oben geäußerte Verdacht unbegründet ist. Im gegebenen Vergleich ist die durch stufenlose Ganglinien erzeugte Geschiebeabflusslinie sogar noch unruhiger ausgefallen (5 Spitzen mit 10 Wendepunkten) als jene, der gestufte Ganglinien zugrunde liegen (3 Spitzen mit 5 Wendepunkten). Die sonst ebenfalls recht verschiedenartigen Ganglinien rechtfertigen einmal mehr einen Hinweis auf die Reproduzierbarkeit der Versuche.

Nach den optisch-qualitativen Beobachtungen während der Versuche kann man sagen, dass dieser stark schwankende Geschiebetrieb von einzelnen Geschiebestößen herrührt, die beim Zusammenbrechen von Uebersteilheiten im Längsgefälle und bei der oben erwähnten Kolkwallbildung entstehen. Einbrechende Ufer führen nur selten zu extremen Geschiebespitzen, weil dabei normalerweise nicht sehr viel Material ins Gerinne gelangt. Eine weitere Ursache dieser stossweisen Spülungen sind stochastisch bedingte Zufälligkeiten bei den Vorgängen im Ablagerungsplatz.

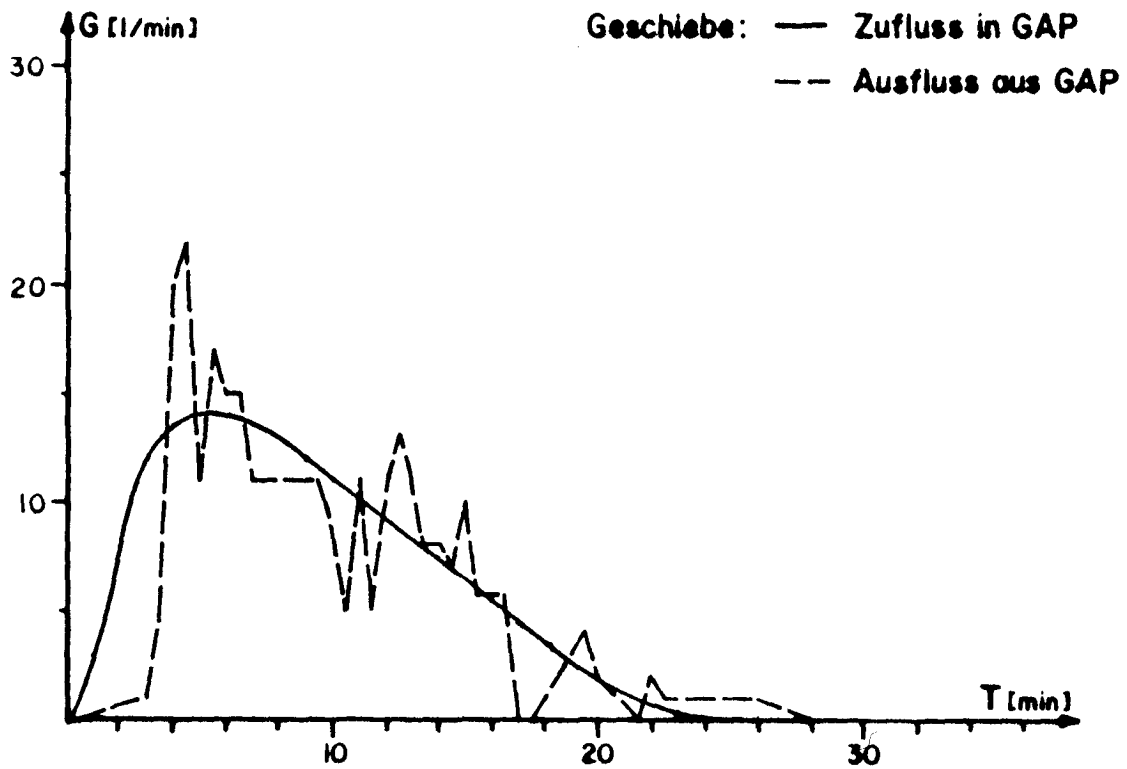
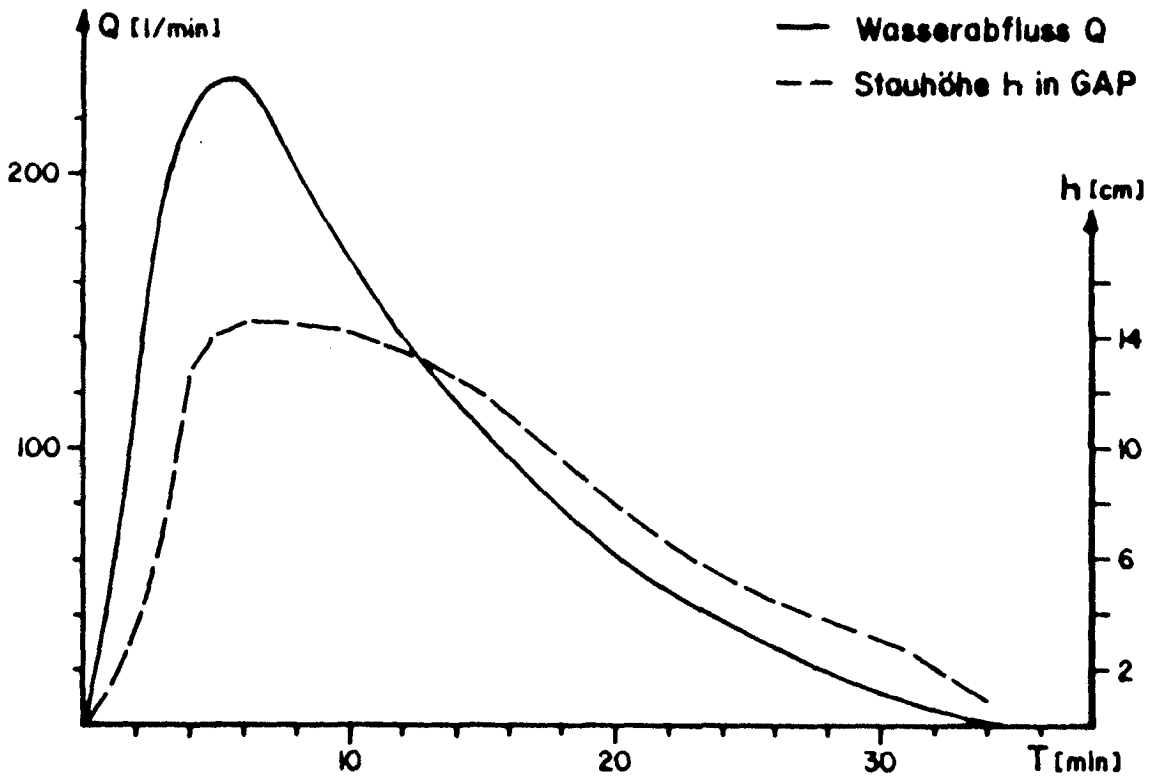


Bild 53 Versuch 317/318 (Becken: Birnenform mit Stiel nach unten;  $L = 150$  cm,  $B = 100$  cm,  $A = 25$  cm,  $I = 18\%$ , gespülte Geschiebemenge = 38 l).



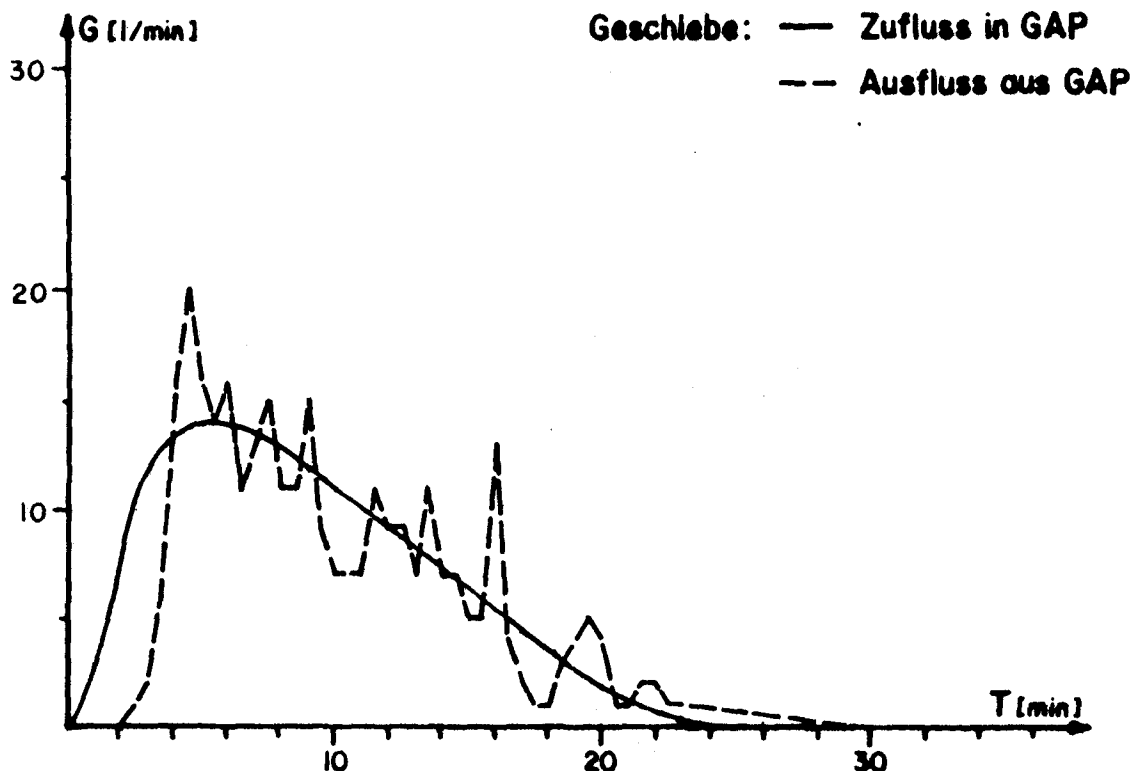
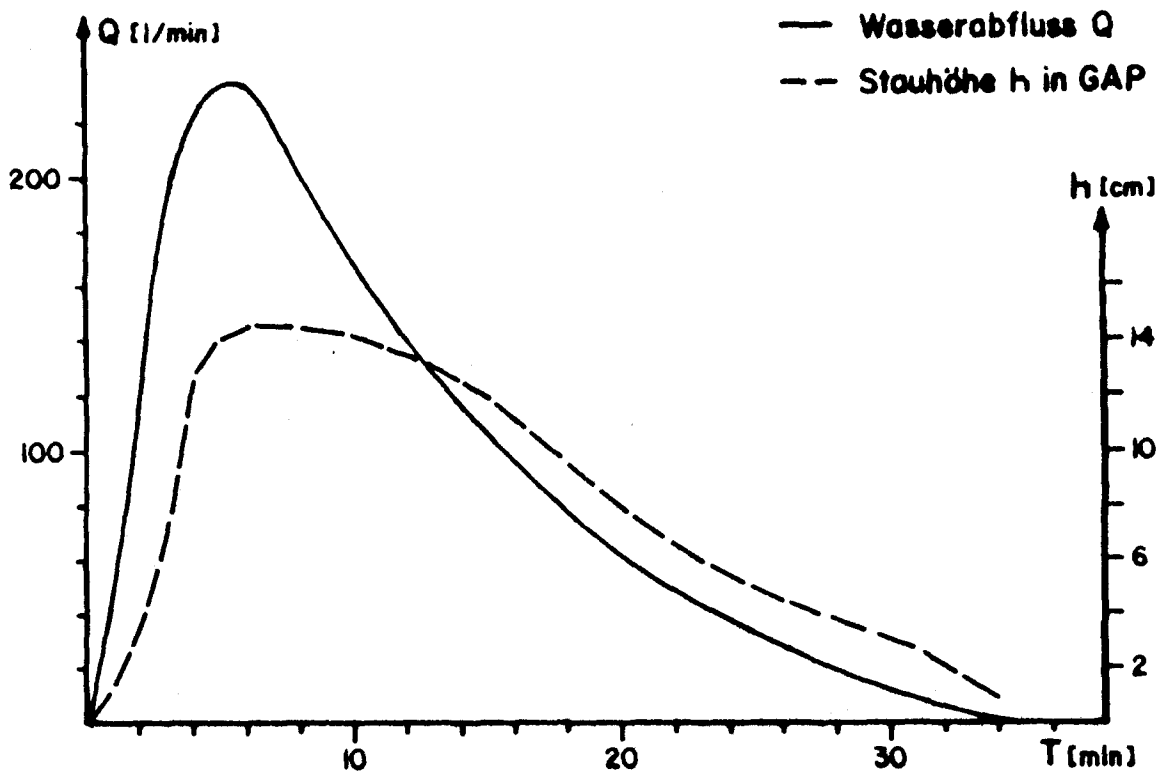


Bild 54 Versuch 319/320. Der Versuch ist identisch zu 317/318, mit der Ausnahme, dass die Zuflussganglinien von Wasser und Geschiebe stufenlos eingegeben worden sind (nicht ersichtlich aus den Kurven). (Becken: Birnenform mit Stiel nach unten,  $L = 150$  cm,  $B = 100$  cm,  $A = 25$  cm,  $I = 18\%$ , gespülte Geschiebemenge = 48 l)

### 6.2.2. Praktische Erfahrungen

Die Auswertung der praktischen Erfahrungen mit selbsttätigen Entleerungen stammen vor allem aus Gesprächen mit Ingenieuren, die in der Wildbachverbauung tätig sind. Daneben standen einige Projektbesichtigungs- und Exkursionsberichte zur Verfügung, in welchen gebaute Objekte besprochen werden. Der Grossteil der Unterlagen und Quellen stammt aus Oesterreich. Es scheint, dass die Schweizer in Hinblick auf die selbsttätige Entleerung von Ablagerungsbekken weniger experimentier- und risikofreudig sind!

Die Ergebnisse sind mit jenen aus den Modellversuchen unter 6.3. zusammengestellt. Als Einleitung dazu sei ein praktisches Beispiel in den Bildern 55 bis 57 gezeigt, welches demonstrieren soll, dass eine selbsttätige Entleerung in der Natur funktionieren kann.



Bild 55 Geschiebeablagerungsplatz Spielbergbach (Gemeinde Fieberbrunn im Bezirk Kitzbühel, Oesterreich) nach der Fertigstellung 1972. Sperrhöhe: 3,2 m. (Foto E. Hanausek, Innsbruck)

### 6.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden zur übersichtlicheren Darstellung in sechs thematisch geordneten Abschnitten präsentiert: Ablauf einer selbsttätigen Entleerung, Wasser- und Geschiebezufuss, Stauverhältnisse im Becken, Ablagerungsplatz, Rückhalte-sperre, Allgemeines. Es ist jeweils angegeben, ob es sich um praktische Erfahrungen (PE) oder um Resultate der Modellversuche (MV) handelt.

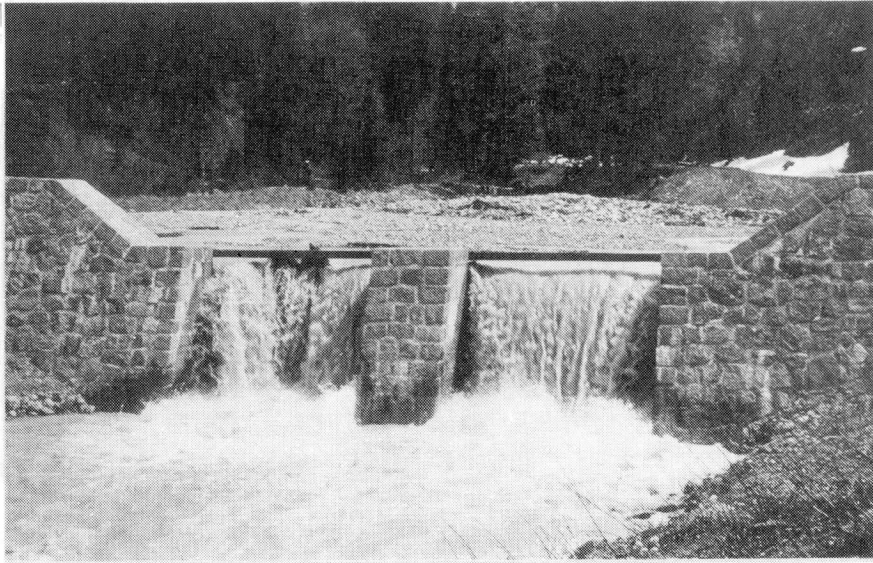


Bild 56 Gefüllter Ablagerungsplatz im Spielbergbach nach dem Hochwasser im Juni 1975 ( $20'000 \text{ m}^3$ , entsprach bei einem Einzugsgebiet von  $6,9 \text{ km}^2$  einem 20- bis 30-jährlichen Ereignis). (Foto E. Hanausek)

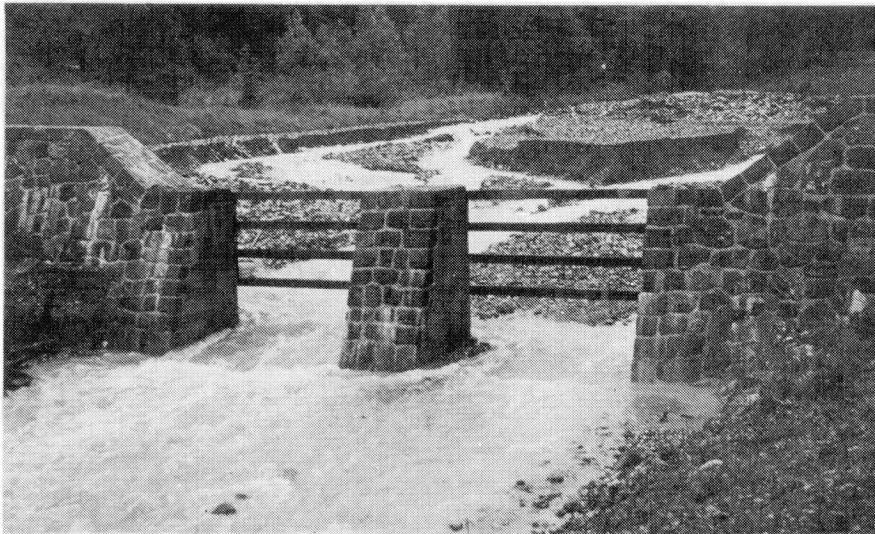


Bild 57 Nach der Lösung der Verklausungen an der Balkensperre entleerten Mittelwässer den Ablagerungsplatz Spielbergbach innerhalb von vier Wochen zu etwa  $2/3$ . (Foto E. Hanausek)

### 6.3.1. Ablauf einer selbsttätigen Entleerung

Allgemein beginnt die Abflussganglinie des Geschiebes aus dem Becken mit einer kleineren Vorspitze (MV). Ihr folgt wenig später mit der Hauptspitze das Maximum des Geschiebetriebes, worauf die Kurve zuerst rascher und später immer langsamer gegen Null zurückgeht (MV). Diesen Verlauf sieht man sehr deutlich bei den Versuchen 207/208 und 211/212 (Anhang 10.4. Seiten 225 und 226). Zwischen der Vor- und der Hauptspitze kann der Geschiebetrieb auf Null zurückfallen, wenn es sich um eine Hochwasserwelle handelt, die in einen zum Teil gefüllten Ablagerungsplatz gelangt. Dabei handelt es sich allerdings um einen speziell gelagerten Fall: Mit dem ersten Wasserstoss gelangt eine Spülwelle durch die Sperre (Vorspitze), darauf baut sich der Stau im Becken auf (kein Geschiebetrieb durch die Sperre), und erst viel später beginnt die eigentliche Spülung.

Alle Geschiebeabflussganglinien weisen innerhalb kürzester Zeit sehr starke Schwankungen auf (MV). Alle Spitzen dauern jeweils nur sehr kurz, sie können aber bedeutend höhere Werte als die des Zuflusses annehmen (in den Modellversuchen bis über das Doppelte). Sieht man von diesen Schwankungen und der meistens vorhandenen Vorspitze ab, so erkennt man in den Abflussganglinien des Geschiebes schematisch eine typische Hochwasserganglinie (schneller Anstieg zum Maximum, relativ rasches, dann immer langsames Abklingen der Werte).

Nach dem Abschluss der Phase der Tiefenerosion pendelt der Wasserstrom über die ganze Breite des Ablagerungsplatzes, zum Teil bilden sich mäanderartige Formen, welche aber relativ rasch wechseln und auch einen verzweigten Charakter annehmen können (MV). Schilcher (1973) berichtet von einem 500 m langen und 100 m breiten Ablagerungsplatz, in welchem das Wasser auf die gleiche Art die ganze Breite bestrich. Andere praktische Beispiele belegen diese Beobachtung, wobei man aber festhalten muss, dass es sich dabei um den günstigsten Fall einer selbsttätigen Entleerung handelt. Die Feststellung von Kronfellner-Kraus (1972) lässt sich damit widerlegen, dass nach der "Bildung eines V-förmigen Grabens" (Tiefenerosion) "erfahrungsgemäss das übrige im Stauraum abgelagerte Geschiebe unausräumbar bleibt." Dies kann, muss aber nicht so sein.

Je mehr sich der Wasserstrom nach der Tiefenerosion verzweigt und mäandriert, desto schlechter ist die Wirkung der Spülung (MV).

### 6.3.2. Wasser- und Geschiebezufuss

Für eine effektvolle selbsttätige Entleerung sind möglichst grosse und möglichst geschiefbefreie Abflüsse notwendig (Schmelz-, Mittelwasser). Falls sie gross genug sind, spülen allerdings kleinere Abflüsse relativ mehr Geschiebe aus als grössere (Huber, 1981). Eine Spülung fällt zudem umso wirkungsvoller aus, je später sie eintritt, d.h. bei grösseren Ablagerungen (Huber, 1981, MV). Viel Kleingeschiebe begünstigt eine Spülung, im Gegensatz zu Ablagerungen aus grösseren Murgängen (PE, Leys und Riccabona, 1970). Je grösser der Geschiebeanteil (Konzentration im Wasser) bei den Ablagerungen war, desto besser funktioniert später eine selbsttätige Entleerung (Hampel, 1974). Der Grund dafür dürften die unter solchen Umständen entstandenen, eher hingeworfenen und nicht dicht gepackten Ablagerungen sein. In ähnlicher Richtung geht die Feststellung von Willi (1965), wonach sehr unterschiedliches, inhomogenes Material eine Spülung begünstigt. Dazu muss allerdings, wie früher angetönt, ergänzt werden,

dass sehr feines, bindiges Material auf der einen Seite, und sehr grobes (Blöcke) auf der anderen die selbsttätige Entleerung behindern (PE).

Die folgenden Feststellungen resultieren aus den eigenen Modellversuchen. Der Vergleich der Versuche 211/212 mit 277/278 und 209/210 mit 279/280 (Anhang 10.4., Seiten 226, 240, 226, 241) zeigt, dass die selbsttätige Entleerung bei gleicher Geschiebekonzentration und gleicher Geschiebefracht, wenn sie über längere Zeit gebracht wird, wirkungsvoller ausfällt. Die Unterschiede in den abgespülten Volumina machen immerhin 21% und 27% aus.

In den Versuchen 207/208, 281/282 und 283/284 wurde die Ganglinie des Geschiebes beibehalten und jene des Wassers um 50% und 75% reduziert. Das Ergebnis überrascht nicht: Der Spüleffekt wurde um 52% und 73% verkleinert. Die einzige Überraschung besteht darin, dass die Reduktion praktisch parallel zu jener des Abflusses verläuft. Möglicherweise ist dies jedoch ein Zufall. Zum Vergleich muss vielleicht noch ergänzt werden, dass die Stauverhältnisse in den drei Versuchen wegen des geänderten Abflusses nicht identisch waren. Die Sperrenöffnung war in den Versuchen die gleiche. Die Diagramme finden sich in Anhang 10.4., Seiten 225, 241 und 242.

Im Versuch 285/286 wurde bei halbem Abfluss auch die Geschiebebeschickung halbiert. Letzteres geschah im Versuch 281/282 nicht. Trotzdem fand in 285/286 keine Spülung statt. Der Grund dazu lag einfach darin, dass die Geschiebefracht (um 50% reduziert) nun zu klein war, als dass die Ablagerungen bis zur Rückhaltesperre hätten vorstossen können. Man kann damit lediglich den trivialen Schluss ziehen, dass eine selbsttätige Entleerung in einem zu grossen Ablagerungsplatz nicht stattfinden kann. Die entsprechenden Kurven finden sich auf den Seiten 242 und 241 im Anhang 10.4.

Im Prinzip das gleiche Ergebnis bringen die Vergleiche der Versuche 207/208 mit 271/272 und 211/212 mit 273/274 (Seiten 225, 239, 226, 239). Bei unveränderter Abflussganglinie wurde jene des Geschiebes um 50% reduziert, mit dem Effekt, dass die Spülung um 68% und 40% zurückging. Dieses Ergebnis ist von der grössten Transportkapazität des Abflusses her gesehen nicht logisch und nur dadurch zu erklären, dass die Geschiebefracht nicht ausreichte, um das Becken so stark zu füllen, dass eine Spülung sehr wirkungsvoll gewesen wäre.

### 6.3.3. Stauverhältnisse im Ablagerungsplatz

Bei Stau findet im Prinzip keine wirkungsvolle Spülung statt. Da aber in der Natur der Ablagerungsvorgang fliessend vom Spülvorgang abgelöst wird - oder mindestens werden kann -, spielen die Stauverhältnisse doch eine wichtige Rolle. Ganz generell steigt der Effekt einer Spülung, wenn bei der vorausgehenden Ablagerung ein Stau vorhanden war. Je mehr der Wasserspiegel für die Spülung gesenkt wird, desto wirkungsvoller ist sie.

Die selbsttätige Entleerung beginnt umso später, je länger der Wasserstau dauert. Ein Vergleich der Versuche 271/272 und 273/274 zeigt dies deutlich (Seite 239).

Ein ganz anderes Ergebnis bringen die Vergleiche der Versuche 205 - 212 (Seiten 225 - 226): Je kürzer die Zeit des Wasserstaues im Ablagerungsplatz ist, desto extremer fällt die Hauptspitze der Abflussganglinie des Geschiebes aus.

Dieses Ergebnis wird durch die Versuche mit dem 150 cm langen Becken bestätigt (243 - 248, Seiten 234 - 235). Die Versuche bei einer Beckenlänge von 50 cm können nicht unbedingt zum Vergleich beigezogen werden, weil dort spezielle Verhältnisse vorliegen (zu kurzer Ablagerungsplatz, siehe 7.4.2.2.). Immerhin beweisen sie aber nicht das Gegenteil. Sie gestatten keine schlüssige Aussage (Versuche 225 - 232, Anhang 10.4., Seiten 230 - 231). Das Ergebnis der Versuche mit den längeren Becken ist recht interessant und widerlegt die in der Praxis oft geäußerte Befürchtung, dass beim Absinken eines Staus extreme Geschiebespitzen entstehen können. Spitzen entstehen dabei sicher, aber sie sind grösser, wenn die Spülung ohne oder bei kleinerem Stau beginnt. Erklärt werden kann das Phänomen durch eine Art Pufferwirkung des Staus, indem er relativ langsam abklingt und während des Sinkens eventuell auftretende Geschiebestöße noch bremst. Diese Wirkung fällt ohne Stau weg, womit grössere Geschiebestöße die Sperrenöffnung ungestört passieren können.

Mit dem Vergleich der Versuche 243 - 248 (Seiten 234 - 235) lässt sich zum Schluss noch eine Aussage machen, welche bei den anderen Beckenlängen nicht zutrifft: Je länger der Wasserstau dauert, desto wirkungsloser wird die anschließende selbsttätige Entleerung. Die Gültigkeit dieser Feststellung muss auf grössere Ablagerungsplätze beschränkt werden, wenn die gesamte Geschiebefracht nur einen geringen Teil des Beckenvolumens ausfüllt.

#### 6.3.4. Ablagerungsplatz

Volumen, Form und Länge der Ablagerungsplätze werden unter 7.4. und 7.5. behandelt. Es sollen darum an dieser Stelle nur drei Feststellungen gemacht werden. Die Wirkung der selbsttätigen Entleerungen steigt mit dem Längsgefälle der Ablagerungsplätze. Ebenso nimmt sie bei schmalen Becken zu (PE).

Vergleicht man die Modellversuche der drei Längen des Ablagerungsplatzes, so könnte man zum falschen Schluss kommen, dass die selbsttätige Entleerung umso wirkungsloser wird, je länger die Becken sind. Im Prinzip ist das Gegenteil der Fall, nur nahm eben bei den Versuchen mit der Länge auch das Volumen des Ablagerungsplatzes zu, wogegen die beschickte Geschiebefracht immer dieselbe war. Als Folge davon nahm nicht nur die relative, sondern sogar die absolute Wirkung des Spülvorganges mit grösserer Beckenlänge ab. Bei kleinerem Stau gleichen sich die prozentualen Unterschiede eher aus.

#### 6.3.5. Rückhaltesperre

Auch dieser Teil des Ablagerungsplatzes wird im nächsten Kapitel ausführlich behandelt, so dass einige kurze Hinweise an dieser Stelle genügen müssen. Bei der Wahl der Sperrenöffnung hat man zwei gegenläufige Anforderungen zu berücksichtigen: Einerseits sollte sie für eine wirkungsvolle selbsttätige Entleerung möglichst gross, andererseits für optimale Ablagerungen eher klein sein. Man wird im konkreten Fall nicht darum herum kommen, einen Kompromiss zu schliessen. Eine andere Lösung ist die Hintereinanderschaltung mehrerer Werke (Schilcher, 1973), was aber praktische Probleme ergeben kann. Immerhin lässt sich die Sperrenöffnung bei der oft verwendeten Balkensperre in beschränktem Rahmen variieren. Zum einen soll bei diesen Bauwerken der Balkenabstand verstellbar sein, und zum anderen empfiehlt es sich, eine Balkenkonstruktion zu wählen, bei der die Balken bei Verstopfung des Schlitzes nach unten, d.h. talseits lösbar sind.

Eine nicht zu vernachlässigende Gefahr der Ablagerungsplätze mit selbsttätiger Entleerung besteht in plötzlichen, unerwarteten Spülungen, wenn sich eine Verklauung an der Sperre gewollt oder ungewollt löst. Der dabei entstehende Geschiebeschwall kann zu Verwüstungen und Zerstörungen im Unterlauf führen (Schilcher 1970, Leys 1976 und 1980). Wegen dieser Gefahr werden die Oeffnungen aus Sicherheitsgründen in der Praxis im Zweifelsfalle eher zu klein als zu gross gebaut (PE). Oft wäre dies nicht notwendig, weil man in Wildbächen praktisch immer mit Treibholz rechnen muss, welches die Oeffnungen verklaut und damit ohnehin zu klein macht. Es wird davon später - in Kapitel 8 - die Rede sein.

Ganz allgemein haben sich bei den Oeffnungen horizontale Balken besser bewährt als vertikale Rechen (PE, Leys 1968). Die eigenen Modellversuche zeigten zudem, dass breite Oeffnungen weniger rasch verlegt werden als hohe, selbst wenn kein Treibholz im Spiel ist (siehe 7.3.). Rein theoretisch müsste man annehmen, dass sich vertikale Oeffnungen für die Spülungen besser eignen (Tiefenerosion). Praktische Beispiele zeigen jedoch immer wieder (Kronfellner-Kraus, 1972), dass sich die Balkensperren trotz ihrer horizontalen Störelemente auch selbsttätig entleeren können. Aus den Beobachtungen bei den Modellversuchen können dafür zwei Gründe angegeben werden:

1. Im Querprofil ist ein Wildbachgerinne - vor allem in verändernden Phasen (Spülungen) - praktisch nie horizontal und eben. Es können Differenzen von einigen Dezimetern und mehr auftreten. Dies sind aber Grössenordnungen, welche die üblichen Balkenstärken (20 - 30 cm) überschreiten, womit die aktive Erosionszone eines Querprofiles sehr oft die Oeffnung über und unter einem Balken gleichzeitig erfassen kann. Dadurch wird die Tiefenerosion möglich.
2. An den Sperrenöffnungen geschieht die Tiefenerosion nicht nur kontinuierlich, sondern in Form von Grundbrüchen in der nächst unteren Etage auch schubweise. Trotz horizontaler Elemente ermöglicht dies die Tiefenerosion wiederum. Die Modellversuche zeigten allerdings, dass solche Grundbrüche recht selten auftreten, solange der Druck von hinten nicht sehr gross wird, weil sich die groben Korndurchmesser zwischen den Balken extrem stabil ineinander verlegen, so dass für die Lösung nebst dem Wasser oft noch bedeutende Erschütterungen notwendig sind.

#### 6.3.6. Allgemeines

Die Anforderungen an den Unterlauf sind bereits erwähnt worden: Sowohl er als auch der Vorfluter müssen in der Lage sein, das gespülte Geschiebe abzutransportieren. Sie müssen aber auf der anderen Seite auch so gesichert sein (Pflästerung), dass keine schädliche Tiefenerosion auftritt, wenn durch Verklauungen im Ablagerungsplatz das Wasser geschiebelos durchfliesst.

Selbsttätige Entleerungen funktionieren ohne Eingriffe nur dann, wenn sehr wenig Treibholz vorhanden ist. Andernfalls kann durch Entfernen des Holzes nach dem Hochwasser eine meist nicht gleich effektvolle Spülung in Gang gebracht werden.

Mit allen vorangegangenen Ausführungen wurde klar, dass selbsttätige Entleerungen alles andere als selbstverständlich sind. Zudem sind sie nie in der Lage,



alles Geschiebe aus einem Ablagerungsplatz auszuspülen. Wenn sie 50% der Ablagerungen spülen, so ist das viel (PE). Daraus ergeben sich zwei wichtige Folgerungen:

- Auf die selbsttätige Entleerung darf nur dort gesetzt werden, wo auch eine maschinelle Leerung möglich ist (PE, Gschwendtner 1970, MV). Dazu ist eine Zufahrt für Bagger und Lastwagen notwendig.
- Ein Ablagerungsplatz mit selbsttätiger Entleerung muss gut unterhalten und überwacht werden. Kontrollen sind nicht nur regelmässig, sondern vor allem auch nach jedem kleineren und grösseren Hochwasser durchzuführen. Unterhaltsarbeiten (inkl. Lösung von Verklausungen usw.) müssen vor allem in der Zeit der Hochwasser unverzüglich erledigt werden können.

#### 6.4. Künstliche Hilfen

Primär ermöglicht man die selbsttätigen Entleerungen durch eine richtige Anlage des Ablagerungsplatzes. Sekundär können sie im konkreten Fall durch drei künstliche Hilfen unterstützt oder sogar erst ermöglicht werden. Es handelt sich um die Lösung von Verklausungen, Baggerungen und Einbauten.

##### 6.4.1. Lösung von Verklausungen

In kleinerem oder grösserem Mass verlegen sich die Entleerungsbauten praktisch bei jedem Hochwasser mit Treibholz, das daraufhin entfernt werden muss, damit die selbsttätige Entleerung zu Ende geführt oder überhaupt erst in Gang gebracht werden kann. Ueber die Aufwendungen für die Entfernung von Verklausungen an Sperren gibt es sehr unterschiedliche Angaben. Viele Wildbachverbauer sprechen von sehr umständlichen, zeitintensiven und zum Teil gefährlichen Arbeiten mit Bagger, Kettensäge und von Hand. Die Modellversuche bestätigten, dass richtig verklaustes Holz, vor allem wenn es zum Teil noch im Geschiebe eingelagert ist, sehr schwer zu lösen ist. Kronfellner-Kraus (1972) spricht dagegen davon, dass "die Aufwendungen für maschinelle Freilegungen und Räumungen von Rosten (auch von Gitterrosten) oft gegen Erwarten äusserst niedrig geblieben sind." Allgemeine Angaben sind darum schwierig. Es scheint sehr darauf anzukommen, wie stark und welche Art von Holz verklaust ist, und vor allem, ob das Treibholz zusätzlich eingelagert ist oder nicht. Weitere Angaben zu diesem Problembereich werden im Kapitel 8 gemacht.

##### 6.4.2. Baggerungen

Wie bekannt, bildet sich am Ende jedes Hochwassers durch Auswaschung des feinen Geschiebes in jedem Gerinne als Gleichgewichtszustand eine Deckschicht. Für die Abspülung des Materials im Ablagerungsplatz sind bedeutend kleinere Abflüsse notwendig als für die Erosion der Deckschicht. Da die Restwassermengen nach der Hochwasserwelle praktisch immer auf dieser Deckschicht fliessen, bleibt die Erhöhung dieses Abflusses - oft um ein Mehrfaches - in vielen Fällen ohne Spülwirkung. Mit Baggerungen im Ablagerungsplatz kann nun versucht werden,



- die Deckschicht aufzureissen, so dass bei der vorhandenen Wassermenge wieder eine Tiefenerosion möglich ist, oder aber
- das Wasser an Stellen zu lenken, wo sich keine sehr ausgeprägte Deckschicht gebildet hat.

Mit diesen Massnahmen ist es möglich, die selbsttätige Entleerung in beschränktem Rahmen wieder in Gang zu bringen. Zwei Beispiele der Schächen-Untersuchungen sollen die Ergebnisse illustrieren. Nachdem im ganzen Ablagerungsplatz kein Geschiebetrieb mehr stattfand, wurde von Hand über Distanzen von 10 - 40 m (Natur) die Deckschicht aufgerissen und entfernt. Zusätzlich wurde versucht, die Wasserströmung an günstigen Stellen in neue Erosionsrinnen zu lenken. Diese "Baggerungen" geschahen jeweils bei unverändertem Abfluss von  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  (Natur). Die anschliessende, zweieinhalbstündige Abflusswelle mit dreiviertelstündiger Spitze von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  entsprach etwa einem zweijährlichen Hochwasser. Das ausgespülte Material wurde gemessen und das ganze Verfahren mehrfach wiederholt. Zum Vergleich wurde nach einem Versuch mit etwa gleichem Endstadium ebenfalls die oben beschriebene, in Bild 58 oben rechts sichtbare, kleine Hochwasserwelle mehrfach beschickt, ohne dass jedoch zwischen den Wellen gebaggert worden ist. Die Bilder 58 und 59 zeigen die Ergebnisse in Balkendiagrammen.

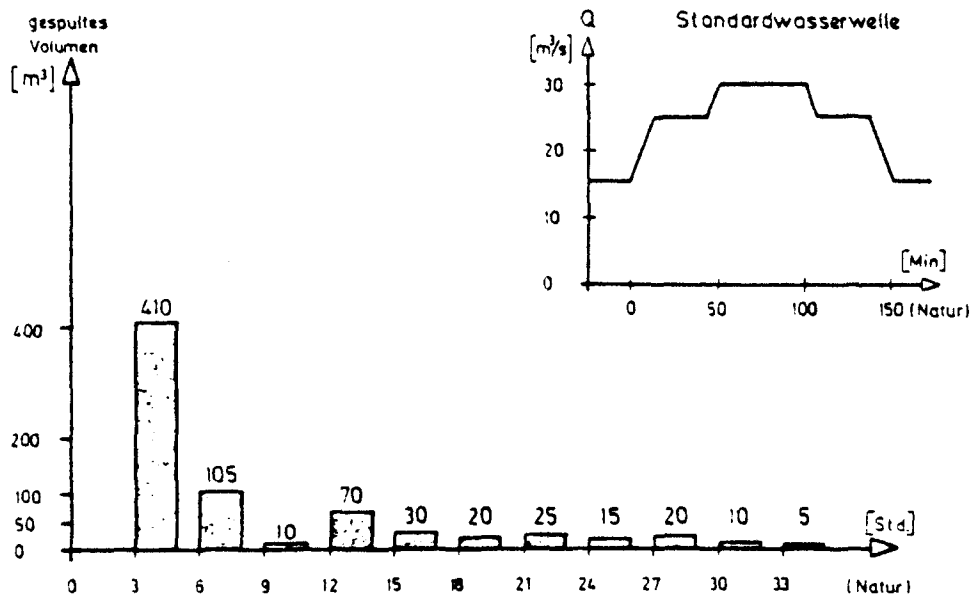


Bild 58 Durch wiederholte Standardwasserwelle (oben rechts) gespülte Geschiebemengen nach dem Versuch S 64. Die Wirkung der Spülungen wird praktisch bei jeder Wiederholung kleiner.

Man erkennt klar, wie die gespülten Mengen ohne Baggerungen immer kleiner wurden, da sich für die wiederholt beschickte Welle eine Deckschicht bildete. Als erstes Resultat bei den Baggerungen fiel auf, dass nach einer solchen Aktion (vor der Abflusswelle) meistens praktisch nichts geschah. Die folgenden Abflusswellen bewirkten dann Spülungen von wenigen  $\text{m}^3$  bis maximal  $1000 \text{ m}^3$  in einem einzigen Fall. Durchschnittlich wurden  $50 - 250 \text{ m}^3$  Material ausgespült, nachdem bei den Baggerungen zwischen  $30$  und  $150 \text{ m}^3$  bewegt worden waren. Damit erkennt man, dass sich der Aufwand unter Umständen lohnen kann, da für das weggeschwemmte

Material nicht nur die Baggerung, sondern auch der Abtransport wegfällt. Im weiteren sieht man, dass z.T. ohne zusätzliche Baggerung bei einer zweiten und dritten Welle nochmals Geschiebe abgespült worden ist. Die meisten Änderungen im Abfluss (z.T. auch seine Verringerung) bewirken grössere und kleinere Spülungen.

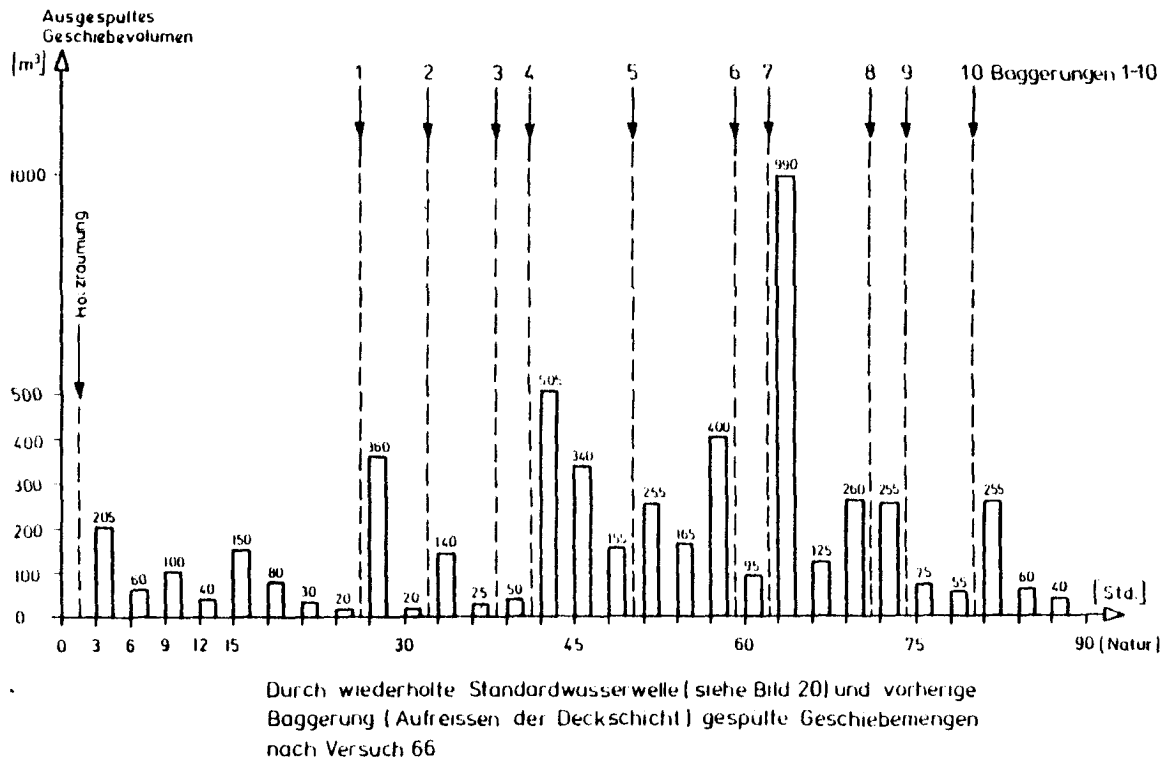


Bild 59 Wirkungen der Standardwasserwelle (siehe Bild 58) nach vorherigen Baggerungen (insbesondere Entfernung der Deckschicht) im Ablagerungsplatz des Schächens nach Versuch S 66 (entspricht etwa S 64). Die Baggerungen können ansehnliche Spülungen verursachen.

Zur Technik des Baggerns sollen noch drei Bemerkungen gemacht werden:

- Es genügt nicht, die Deckschicht lediglich zu zerstören, sondern sie muss entfernt und ausserhalb des Gerinnes deponiert werden. Die groben Steine können mit einer Art Rechen an der Baggerschaukel aus dem Gerinne gereicht werden (englisch: rock-raking).
- Durch die Errichtung von kleinen Aufschüttungen und Abweisdämmen ist es je nach Verhältnissen angebracht, das Wasser an Stellen zu leiten, wo eine Spülung wegen weniger ausgeprägter Deckschicht erfolgversprechend ist.
- Die gespülten Kubaturen in Bild 59 zeigen, dass es Baggerungen gab, die nur sehr kleine Wirkungen hatten (Nr. 3, 6, 9). Gewisse Erfahrungen und Verständnis für die Geschiebetriebprozesse und zusätzlich wahrscheinlich auch günstige Zufälligkeiten im Gerinne sind darum nötig für effektvolle Spülungen. In einem Ablagerungsplatz sollte für diese Aktionen darum nach einer Einführung möglichst immer der gleiche Baggerführer eingesetzt werden.

### 6.4.3. Einbauten

Bei nicht symmetrischen Ablagerungsplätzen und wenn die Wasserströmung dazu tendiert, stationär zu bleiben und nicht zu pendeln, empfiehlt sich unter Umständen die Anlage von Einbauten, insbesondere von Buhnen. Mit ihnen kann eine natürliche Strömungsrichtung verändert werden.

Mit dem Ablagerungsplatz im Schächen soll ein Beispiel dazu erläutert werden. Während des Spülvorganges neigte die Strömung dazu, im nach links gebogenen Becken am äusseren rechten Felsufer zu fließen. Als Folge davon blieb der Ablagerungskörper links praktisch unberührt. Durch den Einbau einer Buhne am rechten Ufer sollte dem abgeholfen werden. Diese Buhne wurde von den Ablagerungen voll überdeckt (Bild 60) und blieb es auch während des ersten Teiles einer Spülung. Hatte das Bachbett bei der Tiefenerosion dann jedoch die Höhe der Buhne erreicht, so wirkte sie als Hindernis, womit dem Wasser nur ein Umfliessen nach links übrig blieb. Dabei wurde der Verlandungskörper auf dieser Seite erodiert und die Wirkung der selbsttätigen Spülung konnte bedeutend erhöht werden.

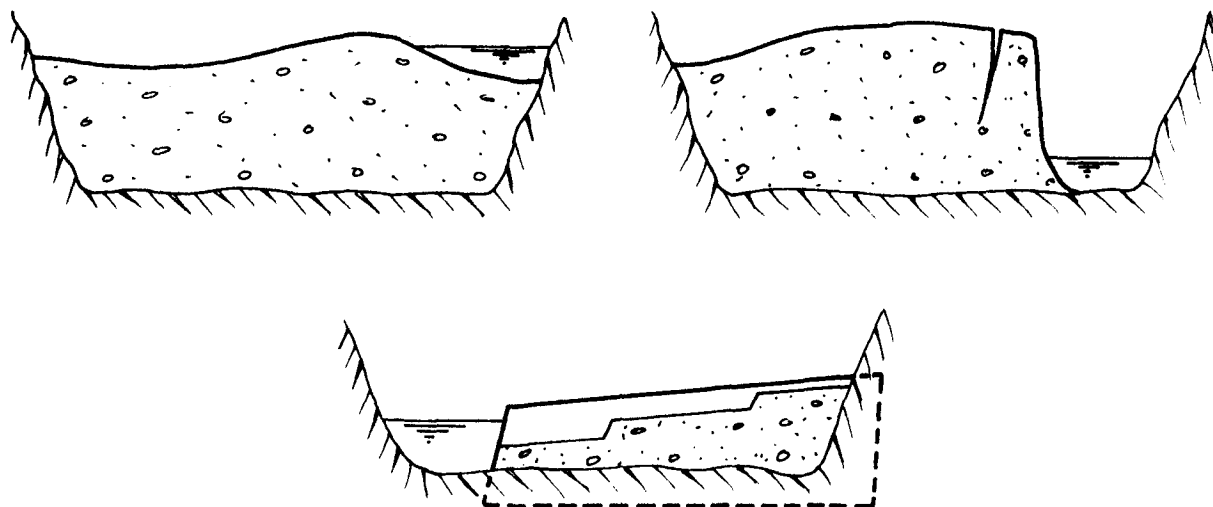


Bild 60 Schematisches Querprofil durch den Ablagerungsplatz im Schächen nach Abschluss der Ablagerungen (links), nach unbeeinflusster Spülung bei der Tendenz des Wassers, in der Linkskurve aussen rechts zu fließen (rechts), und nach selbsttätiger Entleerung bei Einbau der rechtsufrigen Buhne (unten).

Zu der Wirkung von Einbauten wurden keine weiteren Modellversuche gemacht. Trotzdem ist es denkbar, dass man mit solchen Massnahmen von Fall zu Fall nicht unbedeutende Wirkungen erzielen könnte. Sie wurden früher öfter angewandt als heute (siehe Bild 75, Seite 151). Die Ursache dafür dürften die Behinderungen bei der maschinellen Entleerung der Becken sein.

### 6.5. Zusammenfassende Voraussetzungen für erfolgreiche selbsttätige Entleerungen

Selbsttätige Entleerungen aus Geschiebeablagerungsplätzen führen zu sehr stark schwankenden Ganglinien mit kurzen, aber extremen Spitzen, die auch plötzlich

und unerwartet auftreten können. Normalerweise folgt einer Ablagerung in fließendem Übergang eine Spülung. Es ist aber auch möglich, dass sich beide während eines Hochwassers in wiederholter Folge abwechseln. Bei der Entleerung folgt der Phase der Tiefenerosion vielfach eine solche der Seitenerosion, wobei die Wasserströmung über die ganze Breite des Ablagerungsplatzes pendeln kann. Selbsttätige Entleerungen werden begünstigt durch

- grosse, geschiebefreie Abflüsse,
- viel inhomogenes Kleingeschiebe, das aber kein bindiges Material enthalten darf,
- kleine, schmale Ablagerungsplätze, deren Längsgefälle gross ist,
- einen der Spülung vorausgehenden Wasserstau (je länger dieser Stau dauert, desto kleiner fallen die späteren Geschiebespitzen aus),
- kein bzw. wenig Treibholz oder Lösung von dessen Verklausungen an der Rückhaltesperre,
- gezielte Baggerungen in den Ablagerungen (Entfernung der Deckschicht).

Im weiteren sind vier absolut zwingende Bedingungen zu erwähnen, die bei selbsttätigen Entleerungen erfüllt sein müssen:

- Das Rückhaltebauwerk muss über die gesamte Höhe offen sein, wobei ein Schlitz durch Balken unterbrochen sein darf.
- Der auf den Ablagerungsplatz folgende Unterlauf und sein Vorfluter müssen in der Lage sein, die ausgespülten Geschiebemengen schadlos weiterzutransportieren.
- Der Geschiebeablageungsplatz muss maschinell entleert werden können, da selbsttätige Entleerungen nie 100% der Ablagerungen abspülen.
- Ein guter Unterhalt aller Teile des Ablagerungsplatzes muss gewährleistet sein. Häufige Kontrollen (nicht nur nach jedem Hochwasser) sind unbedingt notwendig.

Man muss sich bewusst sein, dass man bei Geschiebeablageungsplätzen mit selbsttätiger Entleerung gewisse, unter Umständen nicht geringe Risiken eingeht. Die Bauten dürfen darum nie längere Zeit sich selbst überlassen werden. Richtig unterhalten, sind sie jedoch wirtschaftlich interessant und bewirken, dass die Vorfluter weiterhin und auf natürlichere Art mit Geschiebe gespiesen werden, als dies bei der Anlage eines Ablagerungsplatzes mit endgültigen Ablagerungen geschieht.

Ach, da kommt der Meister!  
Herr, die Not ist groß!  
Die ich rief, die Geister,  
Werd ich nun nicht los.

## 7. Die Parameter zur Steuerung der Ablagerungen und Spülungen

=====

### 7.1. Uebersicht

Ablagerungen und Spülungen sind mit drei der acht im Kapitel 3 aufgeführten Teile eines Ablagerungsplatzes bis zu einem gewissen Grad steuerbar. Es handelt sich um

- das Einlaufbauwerk,
- das Rückhaltebauwerk,
- den eigentlichen Ablagerungsplatz mit
  - Volumen (Grösse)
  - Form.

Es sei schon zu Beginn betont, dass die Vorgänge von Ablagerungen und Spülungen nicht beliebig gesteuert werden können. Vielmehr bewegen sie sich immer im Rahmen der in den Grundlagenkapiteln 3 - 6 gefundenen Erkenntnisse. Die folgenden Ausführungen sollen zeigen, mit welchen Massnahmen und unter welchen Bedingungen diese Vorgänge beeinflusst werden können. Obschon der wichtigste Teil der Ablagerungsplatz mit seinem Volumen und seiner Form ist, bietet doch das Rückhaltebauwerk die meisten veränderlichen Parameter. Das umfangreiche Schwergewicht liegt darum bei der Rückhaltesperre und ihren Möglichkeiten.

### 7.2. Das Einlaufbauwerk

Mit dem Einlaufbauwerk können die Ablagerungen und Spülungen nur in sehr beschränktem Rahmen beeinflusst werden. Es handelt sich um keinen zentralen Parameter, der sogar ganz fehlen kann. Trotzdem sind allerdings gewisse minimale bauliche Massnahmen notwendig, wie Kapitel 9 zeigen wird.

Von der Art des Einlaufbauwerkes hängt es ab, ob die späteren Ablagerungen mit oder ohne Absturz ablaufen. Falls es die topographischen Verhältnisse irgendwie erlauben, empfiehlt sich der Bau eines Absturzes als klarer Uebergang zwischen Gerinne und Ablagerungsplatz. Je höher der Absturz, desto mehr kann die gefährliche Schwemmkegelbildungsphase 3 (Ablagerungen zurück ins Zulaufgerinne) hinausgezögert oder gar verhindert werden. Andere effektvolle Steuerungsmöglichkeiten der Vorgänge im Becken durch das Einlaufbauwerk gibt es nicht.

### 7.3. Das Rückhaltebauwerk

Ueblagger (1973) stellt fest, dass der "Staubeckenauslass das konstruktive Kernstück" des Ablagerungsplatzes darstellt und dessen Wirtschaftlichkeit weitgehend von der Funktion dieses Auslasses abhängt. Diese Bemerkung trifft vor allem dann zu, wenn es sich um eine Anlage mit dem Zweck der zeitweisen Ablagerungen handelt, d.h. wenn die selbsttätige Entleerung zum Zuge kommen soll. Die Bauwerke für endgültige Ablagerungen stellen an das Rückhaltebauwerk keine interessanten

Anforderungen. Sie werden im folgenden darum nur nebenbei behandelt. Als Rückhaltesperre genügt normalerweise eine Vollsperre mit Entwässerungsdolen. Besondere Massnahmen sind allerdings bei der endgültigen Geschiebeablagerung unterhalb des Ablagerungsplatzes nötig, da das Wasser dort eine grosse Erosionskraft besitzt, weil es geschiebelos ist.

Bedeutend interessanter und anspruchsvoller liegen die Verhältnisse bei den Rückhaltesperren, durch welche zeitweise Geschiebe abtransportiert werden soll. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit den Erwartungen, die man an solche Bauwerke stellt, den möglichen Bautypen (wobei vor allem auf den umfangreichen Anhang 10.1. verwiesen sei), mit ihren Funktionen (retendieren, dosieren, sortieren), den Oeffnungselementen der Schlitze (Breite der Oeffnungen) und Balken (ihre Abstände bestimmen die Höhe der Oeffnungen) und schliesslich mit den Oeffnungen und ihren Ausflusswassermengen und ihrem Rückstau.

### 7.3.1. An Rückhaltebauwerke gestellte Erwartungen

Allgemein beeinflusst das Rückhaltebauwerk drei Dinge, nämlich den Wasserstau im Ablagerungsplatz, den Rückhalteeffekt des Geschiebes und die Verklausungen mit Treibholz. Auf das letzte wird vor allem im Kapitel 8 eingegangen. Wie weiter unten gezeigt werden soll, kann man beim Geschieberückhalt einen quantitativen Effekt (dosieren) von einem qualitativen (sortieren) unterscheiden.

Das Wichtigste, was man von den offenen Rückhaltesperren erwartet, kann man in den folgenden sechs Punkten zusammenfassen:

1. Selektive Zurückhaltung von Geschiebe und Treibholz.
2. Keine Unterbindung des normalen Geschiebetriebes bis zu kleinem Hochwasser.
3. Wirkung als eigentliche Stausperre nur bei extremen Ereignissen.
4. Möglichkeit der selbsttätigen Entleerung bei vollem oder teilweise gefülltem Becken, und damit
5. Bereitstellung eines möglichst immer aufnahmebereiten Ablagerungsplatzes für zusätzliches Geschiebe.
6. Dauernde Gewährleistung einer guten Entwässerung der Ablagerungen, so dass keine sumpftartigen Teiche entstehen können, die die maschinelle Entleerung behindern.

Praktische Erfahrungen zeigten, dass der Bau von offenen Rückhaltesperren teurer zu stehen kommt als jener der geschlossenen Vollwandsperren, welche jedoch den obigen Forderungskatalog praktisch ausnahmslos nicht erfüllen können.

### 7.3.2. Die Sperrentypen

Beim Literaturstudium fielen die zahlreichen, oft inkonsequent oder gar falsch verwendeten Bezeichnungen für die Wildbachsperren auf. Da in der Literatur noch keine vollständige Zusammenstellung der Bautypen in der Wildbachverbauung mit ihren Definitionen existiert, wurde dies in möglichst umfassender Art im Anhang 10.1. getan. Für alle Sperrenbezeichnungen sei darum auf diesen Anhang verwiesen.

Neben den Definitionen von über 90 Sperrentypen enthält der erwähnte Anhang auch vier Versuche zu systematischen Darstellungen der Sperrentypen. Aus dem Blickwinkel der Konstruktion kommen für die Geschiebeablagerungsplätze vor allem die vom Autor als Schlitz- und Gittersperren im weiteren Sinn bezeichneten Typen in Frage:

- Schlitzsperren i.w.S.:
  - Schlitzsperren
  - Balkensperren (Stäbe horizontal)
  - Rechensperren (Stäbe vertikal)
  - Leitersperren
  - Christbaumsperren
- Gittersperren i.w.S. :
  - Gittersperren
  - Netzsperren
  - Gitterkastensperren

Auf diese einzelnen Typen wird im folgenden nicht im Detail eingegangen. Vielmehr gelten die Untersuchungen ihren in Bezug auf die Ablagerungen und Spülungen massgebendsten Grössen, nämlich den Oeffnungen mit ihren Dimensionen (Breite und Höhe) und ihrer Anordnung.

Bewegliche Elemente im Sperrenbau der Wildbachverbauung haben sich wegen des grossen, schwankenden Geschiebetriebes mit extrem unterschiedlichen Korndurchmessern (Verklemmungen, Verstopfungen) nicht bewährt. Sie kommen nur in Ausnahmefällen zum Einsatz und wurden darum in dieser Arbeit nicht behandelt.

### 7.3.3. Retendieren, dosieren, sortieren

Unter den drei Begriffen versteht man die selektive Abgabe von Geschiebe (oder Wasser) in den Unterlauf:

- Retendieren : Alles Material wird zurückgehalten.
- Dosieren : Das Material wird temporär (dosiert) in den Unterlauf abgegeben, Spitzen sollen gebrochen werden.
- Sortieren : Das Grobgeschiebe wird zurückgehalten, das feinere in den Unterlauf weitergegeben.

Die drei Begriffe werden oft ausschliesslich für das Geschiebe verwendet, was nicht ganz richtig ist, da mit den Rückhaltesperren auch die Wassermenge dosiert werden kann und soll. Die Retention von Geschiebe und Wasser stellt praktisch kein grosses Problem dar. Die Dosierung ist mit nachhaltigem Effekt schon bedeutend schwieriger zu erreichen, und die Sortierung stellt das heikelste der Probleme bei den vorübergehenden Ablagerungen dar. Eine sortierte Abgabe des Geschiebes in den Unterlauf drängt sich dann auf, wenn die Transportkapazität des anschliessenden Vorfluters nicht ausreicht, um das Grösstkorn weiterzutransportieren.

Retention tritt bei Vollsperren oder allgemeiner bei Stau im Ablagerungsplatz ein. Auf diesen Fall wird nicht mehr näher eingetreten. Es werden dabei nur Schwebstoffe (je nach Länge des Beckens nicht einmal alle) ausgespült. Für die Dosierung und Sortierung sind drei Fälle zu unterscheiden:

- a) Alles Geschiebe erreicht die Sperre,

- b) Nur das feinere Kornmaterial erreicht die Sperre,
- c) Kein Geschiebe erreicht die Sperre.

Fall c) tritt im ersten Teil der hinten beginnenden Ablagerungen und bei Stau ein, solange der Ablagerungskörper noch nicht bis zur Rückhaltesperre gewachsen ist. Er ist für die Dosierung und Sortierung uninteressant, weil noch kein Geschiebe die Sperre passieren kann.

Fall a) tritt dann ein, wenn das Gefälle zwischen dem Einlauf und der Sperre angenähert stetig und gleichzeitig grösser als jenes des Verlandungsgefälles ist, und sich der Wasserstrom im Becken nur unbedeutend verzweigt. Im Fall b) schliesslich nähert sich das Gefälle im Ablagerungsplatz demjenigen des Verlandungsgefälles an. Im Bild 61 sind diese drei Fälle in Abhängigkeit vom Energiehorizont schematisch dargestellt. Dieser fällt beim Einlauf in den Ablagerungsplatz (Gefälleknick) stark und kommt im Fall c) (Variante Stau, unten im Bild) beim Rückhaltebauwerk der Wasseroberfläche sehr nahe (Geschwindigkeit sehr klein). Dies geschieht in den Fällen a) und b) nicht so extrem, da das Wasser das Becken und die Sperre praktisch staulos durchfliessen kann (oben im Bild). Bei b) fällt der Energiehorizont stärker als bei a), bzw. er nähert sich - bedingt durch die Verzweigungen des Gerinnes und sein kleineres Gefälle - bis zur Sperre ausgeprägter dem Wasserspiegel an.

Nach Ueblagger (1973) beobachtet man eine Dosierung, wenn der Energiehorizont nicht reduziert wird, also im Fall a). Seine nicht einleuchtende Behauptung begründet Ueblagger nicht, sondern sagt weiter, dass eine Dosierung auch noch bei teilweise reduziertem Energiehorizont (Stau) möglich ist. Beide Feststellungen müssen ergänzt werden. Tatsächlich kann eine Dosierung in zwei Fällen auftreten:

- Der Energiehorizont wird bis zur Sperre wenig bis nicht reduziert und am Schlitz der Sperre lagert sich infolge kleiner Oeffnung(en) Geschiebe ab. Die Dosierung nähert sich dabei sehr schnell dem Fall der vollständigen Retention, oder sie findet gar nicht statt, wenn die Sperrenöffnung(en) sehr gross ist (sind).
- Der Energiehorizont reduziert sich wegen des Staus bis nahe an die Wasseroberfläche und die deltaartigen Ablagerungen sind bereits bis nahe an die Sperre gewachsen. Die Dosierung erfolgt dann relativ ausgeglichen, kann aber im anderen Extremfall auch ganz unterbleiben, wenn nämlich alles Geschiebe von oben bis zur Sperre gelangt (Becken praktisch voll).

Welche Bedingungen sind nun für eine Sortierung zu erfüllen? Hampel (1974) erwähnt den nahezu staulosen Abfluss. Das ist richtig, genügt aber nicht. Für die Sortierung müssen wieder zwei Fälle unterschieden werden:

- Nicht alles Geschiebe erreicht die Sperre, d.h. das grobe lagert sich im Becken ab.
- Alles Geschiebe erreicht die Sperre, eine Sortierung ist nur mehr dort möglich.

Falls nicht alles Geschiebe die Rückhaltesperre erreicht, hat diese zum Sortiereffekt nicht mehr viel beizutragen, da er als Folge der Gefällsverminderung und der Verzweigungen des Gerinnes beim Durchfliessen des Ablagerungsplatzes auftrat. Anders sieht die Sache aus, wenn alles Geschiebe bis zur Sperre gelangt, denn



dann treten ihre Oeffnungen in Funktion. Sind sie relativ gross, dann tritt kein Sortiereffekt ein, da alles Geschiebe hindurchtransportiert wird. Haben die Oeffnungen hingegen eine ideale Grösse (siehe unten), dann kommt es zu der von vielen Autoren beschriebenen Sortierung. Sie ist allerdings in neuerer Zeit eher umstritten. Dies geschieht zu Recht, wie es die eigenen Modellversuche (nur qualitativ) belegen und verschiedene Autoren erwähnen (Kettl 1973, Hampel 1974, Kronfellner-Kraus 1973 u.a.).

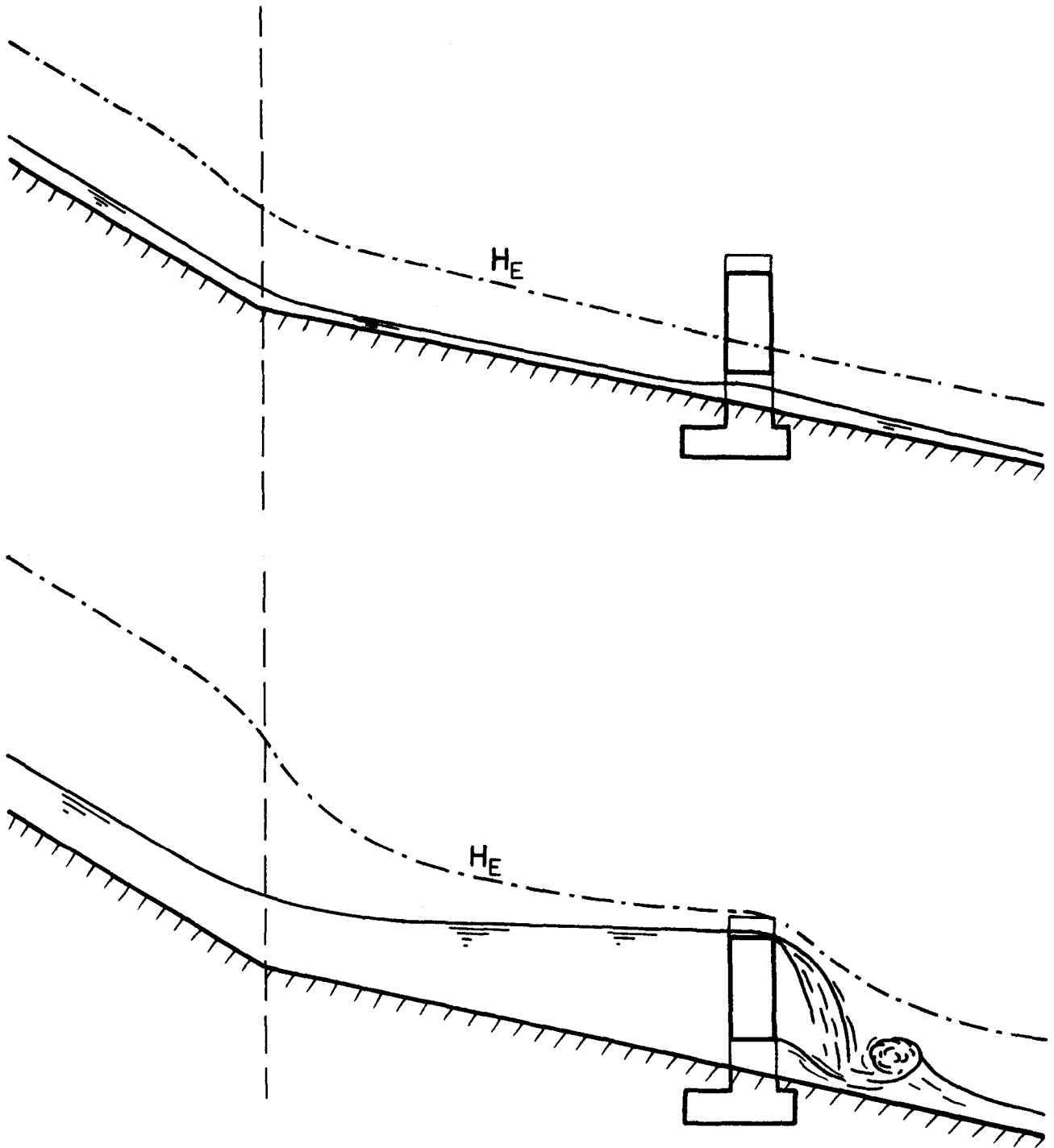


Bild 61 Der Energiehorizont im Geschiebeablagungsplatz mit und ohne Wasserstau.

Zur gewünschten Sortierung müssen die Sperrenöffnungen so klein gewählt werden, dass Korngrößen über einem bestimmten Mass nicht mehr passieren können. Was man sich allein schon durch eine theoretische Ueberlegung ausdenken kann, geschieht in der Natur: Die groben Geschiebekörner lagern sich in und hinter den Oeffnungen wirklich ab, bilden dadurch aber ein Hindernis für das nachdrängende Geschiebe. Durch die freien Räume zwischen dem Grobgeschiebe wird nur ganz kurze Zeit feines Material ausgespült, dann aber schliessen sich diese Löcher mit größerem Material, und schliesslich lagert sich alles nachkommende Geschiebe dahinter ab. Die Ablagerungen wachsen zurück ins Becken, das Gefälle erhöht sich langsam wieder, bis der Geschiebetrieb erneut über die frischen Ablagerungen bis zur Sperre dringt, worauf sich der ganze Vorgang bei der nächst höheren Oeffnung wiederholt.

Man erkennt aus dem Beschriebenen, dass eine Sortierung nur während ganz kurzer Zeit stattfinden kann, falls alles Geschiebe bis zur Sperre gelangt. Dieser bescheidene Sortiereffekt spielt sich übrigens - im Gegensatz zur Meinung von Hampel (1974) - nicht nur bei fehlendem Wasserstau ab. Bedingung ist lediglich, dass der Geschiebetrieb bis zur Sperre gelangt, was bekanntlich auch geschieht, wenn die Ablagerungen unter Stau bis nach vorne reichen.

Eine ganz andere Ansicht hat Kettl (1973), wenn er schreibt, dass eine Sortierung nur dann erfolgreich abläuft, wenn das grobe Geschiebe bereits in einer gewissen Entfernung hinter der Sperre liegen bleibt. Dies ist richtig, betrifft aber nur den zuerst behandelten Fall (nicht alles Geschiebe erreicht die Sperre), der aber in der Natur bedeutend effektvoller sein dürfte. Ein Ergebnis der Modellversuche von Hampel deutet übrigens in die gleiche Richtung. Er sagt nämlich, dass die Wirkung von "Siebsperren" entscheidend davon abhängt, ob das grösste transportierbare Geschiebekorn in der momentanen Wassermenge vorhanden ist oder nicht (Hampel 1974). Was Hampel nicht sagt, ist, dass dieses Grösstkorn bei der kleinsten Unregelmässigkeit im Abfluss abgelagert wird, was darum praktisch sicher hinten im Ablagerungsplatz (Gefälleknick) oder im ausgeweiteten Gerinne im Becken geschieht, womit das Korn die Sperre nicht erreicht und somit eine Sortierung begünstigt.

Ein weiteres Ergebnis der Hampel'schen Untersuchungen wurde im Prinzip allgemein schon bei der selbsttätigen Entleerung erwähnt und ist einleuchtend: Dosierung und Sortierung werden durch wenig mit Geschiebe belastete Abflussmengen und grosse Gefälle im Ablagerungsplatz begünstigt.

Um nochmals auf die Dosierung zurückzukommen, sei erwähnt, dass ihre Wirkung nicht nur in einem kleineren Geschiebetrieb im Unterlauf liegen kann. Vielmehr ist es möglich, dass bei Spülungen wenig bis kein Geschiebe in den Ablagerungsplatz gelangt, gleichzeitig aber viel aus diesem ausfliesst. In der Gesamtschau bestünde eine sinnvolle Geschiebedosierung darin, dass die Spitzen im Geschiebeabfluss bei der Spülung kleiner sind als jene, die bei der Hochwasserwelle ins Ablagerungsbecken gelangen, oder dass diese Werte wenigstens nur ganz kurzfristig erreicht werden.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass mit jeder Sortierung auch eine Dosierung stattfindet. Eine effektvolle Sortierung des Geschiebes (d.h. die Ablagerung von Korngrößen über einem bestimmten Durchmesser) geschieht im Ablagerungsplatz zwischen Einlauf und Rückhaltesperre, eine wirksame Dosierung hingegen vor allem beim Rückhaltebauwerk.

#### 7.3.4. Schlitze

Unter diesem Begriff wird im folgenden nicht nur der Schlitz einer Schlitzsperre verstanden, sondern jede hohe und schmale Oeffnung. Schlitze verlegen sich bei starkem Geschiebetrieb selbst dann relativ schnell, wenn kein Treibholz angeschwemmt wird. Wie unter 4.3.5. bei den selbsttätigen Entleerungen gezeigt, sind die Schlitze den durch Balken unterteilten Oeffnungen auch bei den Spülvorgängen (Tiefenerosion) nicht überlegen, weil sich der Geschiebetrieb - stark vereinfacht gesagt - in der Horizontalen und nicht in der Vertikalen abspielt.

Genügend breit angelegte Schlitze eignen sich für Rückhaltesperren trotzdem gut. Ueber die minimale Breite gibt es verschiedene Angaben: Leys (1976) spricht in der gleichen Untersuchung einmal von der Bachbreite oberhalb der Sperre und das zweite Mal vom dreifachen Durchmesser des transportierten Grösstkornes. Hampel (1974) gibt als minimale Schlitzbreite das Doppelte des Grösstkornes im Geschiebe an. Die eigenen Modellversuche brachten das Ergebnis, dass sich Schlitzbreiten bis zum anderthalbfachen Grösstkorndurchmesser der verwendeten Geschiebemischung in kürzerer oder längerer Zeit verlegen. Die Zahlen und Diagramme zu dieser Untersuchung finden sich unter 7.3.5. Als Mindestbreite kann darum der doppelte Grösstkorndurchmesser des transportierten Geschiebes angenommen werden. Diese Angabe gilt aber nur für den praktisch nicht auftretenden Fall, dass der Abfluss absolut kein Treibholz enthält. Andernfalls ist ein Zuschlag notwendig (siehe Kapitel 8).

Weitere Angaben zu den Schlitzen enthält der letzte Abschnitt unter 7.3.5., worin die schmalen hohen mit den breiten niedrigen Oeffnungen anhand von Modellversuchen verglichen werden.

#### 7.3.5. Balken und ihre Zwischenräume

Balkensperren sind bekanntlich Schlitzsperren, deren Schlitz durch horizontale Balken unterteilt werden kann. Damit ist der grosse Vorteil erwähnt: Noch nach Fertigstellung des Bauwerkes können die Balkenabstände je nach Erfordernissen verändert werden (Erfahrungen mit stattgefundenen Ablagerungen und Spülungen, Treibholz). Falls sich der ganze Schlitz als zu gross erweist, können die Balken fugenlos übereinandergelegt werden, so dass eine Vollsperre, übereinander liegende Grossdolen oder lediglich ein Grundablass entsteht. Dasselbe gilt, wenn das Geschiebe endgültig abgelagert werden soll. In diesem Zusammenhang sei die grossdolige Sperre erwähnt. Wenn man sich für diesen Typ entschliesst, empfiehlt es sich, die Dolen in der Höhe versetzt und überlappend (nicht in Etagen) anzuordnen. Die Aussichten auf eine selbsttätige Entleerung können so bedeutend vergrössert werden.

##### 7.3.5.1. Balkenabstand

Unter den Praktikern scheint man sich recht einig darüber zu sein, dass der Balkenabstand Erfahrungssache ist. Trotzdem versucht Leys (1976) mit einem quaderförmigen "Einheitsstein" nicht sehr realistisch erscheinende Berechnungen. Seine Formel ergibt bei einem würfelförmigen Grösstkorn einen Balkenabstand von der Kantenlänge des Würfels. Man kann sich leicht vorstellen, dass ein solches Korn bei einem praktischen Fliessvorgang in den meisten Fällen hängenbleiben wird.

Trotzdem macht auch Hampel (1974) ähnliche Angaben, wenn er schreibt, dass eine selbsttätige Entleerung nur bei Balkenabständen von etwas mehr als dem Durchmesser des Grösstkornes gewährleistet ist. Eine Ablagerung finde hingegen nur bei lichten Weiten von weniger als dem Grösstkorndurchmesser statt. Diese Angabe konnte mit den eigenen Modellversuchen widerlegt werden, indem sich dort zeigte, dass die Schwelle über dem Grösstkorndurchmesser liegt. Bei Balkenabständen vom 1,1fachen Durchmesser sind Ablagerungen garantiert, weil sich die Körner zwischen den Balken verlegen (siehe 7.3.5.2.)

Eine andere Angabe Hampels zum Sortiereffekt müsste noch überprüft werden. So sagt er, dass bei einem Verhältnis Gitterweite : Grösstkorn = 0,8 75% des abgelagerten Geschiebes einen Durchmesser von mehr als der Gitterweite aufweist. Geht das Verhältnis auf 0,6 zurück, so sind es noch 50% der Ablagerungen mit Geschiebedurchmessern von mehr als der Gitterweite. Sicher müsste man dazu Angaben über die Kornverteilungskurve haben. Zudem bleibt unklar, ob Hampel unter "Gitterweite" den Balkenabstand, die Schlitzbreite oder beides meint (Hampel 1968).

#### 7.3.5.2. Vergleich mit den Schlitz

Hampel (1974) schreibt, dass horizontale Oeffnungen dreimal so viel Geschiebe durchlassen wie gleich grosse vertikale Oeffnungen. Woher er diese Angabe nimmt, ist nicht ersichtlich, da er dazu keine konkreten Messungen oder andere Beobachtungen anführt. Zu einem ähnlichen Schluss kommen Li et al. (1979) aufgrund ihrer Modellversuche zu vier konkreten Schlitzöffnungen, indem sie sagen, dass schmale und hohe Oeffnungen den Geschiebetrieb mehr behindern als breite und niedrige.

Die obigen Literaturhinweise reizten den Autor, die Angaben mit Modellversuchen zu prüfen und mit konkreten Zahlen zuverlässiger als Hampel und in weniger spezieller Form als Li zu belegen. Es wurde dazu die unter 2.3.5. beschriebene Versuchsanordnung eingesetzt (Gitter am Ende des Zulaufgerinnes).

Bei identischen Versuchsbedingungen (unveränderte Parameterwerte) wurden jeweils zwei Durchgänge gemacht, einer mit den vertikalen, einer mit den horizontalen Oeffnungen. Die Ergebnisse sind zahlenmässig im Anhang 10.6., in anschaulicheren Diagrammen auf den Bildern 62 bis 65 dargestellt. Bei der Beurteilung der Resultate muss man sich vor Augen halten, dass immer die gleiche Kornverteilungskurve (Bild 5, Seite 28) mit einem Grösstkorndurchmesser  $d_{max}$  von 16 mm verwendet worden ist.

In Bild 62 wird die eingangs erwähnte Behauptung von Hampel bestätigt, dass horizontale Oeffnungen tatsächlich dreimal so viel Geschiebe durchlassen können wie die vertikalen. Allerdings gilt dies - wie aus dem Diagramm ersichtlich ist - nur für Oeffnungen, die etwas grösser sind als  $d_{max}$ , nämlich für 17 mm. Für bedeutend kleinere Oeffnungen und für solche über 21 mm sind die Effekte der horizontalen und vertikalen Oeffnungen wieder annähernd gleich, da beinahe kein bzw. alles Geschiebe durchgelassen wird. Im Diagramm ist der Wert für den Stababstand von 25 mm nicht mehr eingezeichnet, da er kaum mehr gemessen werden konnte. Bei den vertikalen Stäben wurden aber immer wieder Ablagerungen bis zur halben Höhe - d.h. 5 cm - der Gerinnetiefe festgestellt, die dann wieder abgespült wurden. Immerhin zeigt das, dass vertikale Oeffnungen bei Breiten von 25 mm (ca.  $1,5 \cdot d_{max}$ ) noch nicht ganz sicher vor reinen Geschiebeverkläuerungen

sind, wogegen die horizontalen mit einer Höhe von etwa 19 mm (ca.  $1,2 \cdot d_{\max}$ ) bereits verstopfungssicher sind.

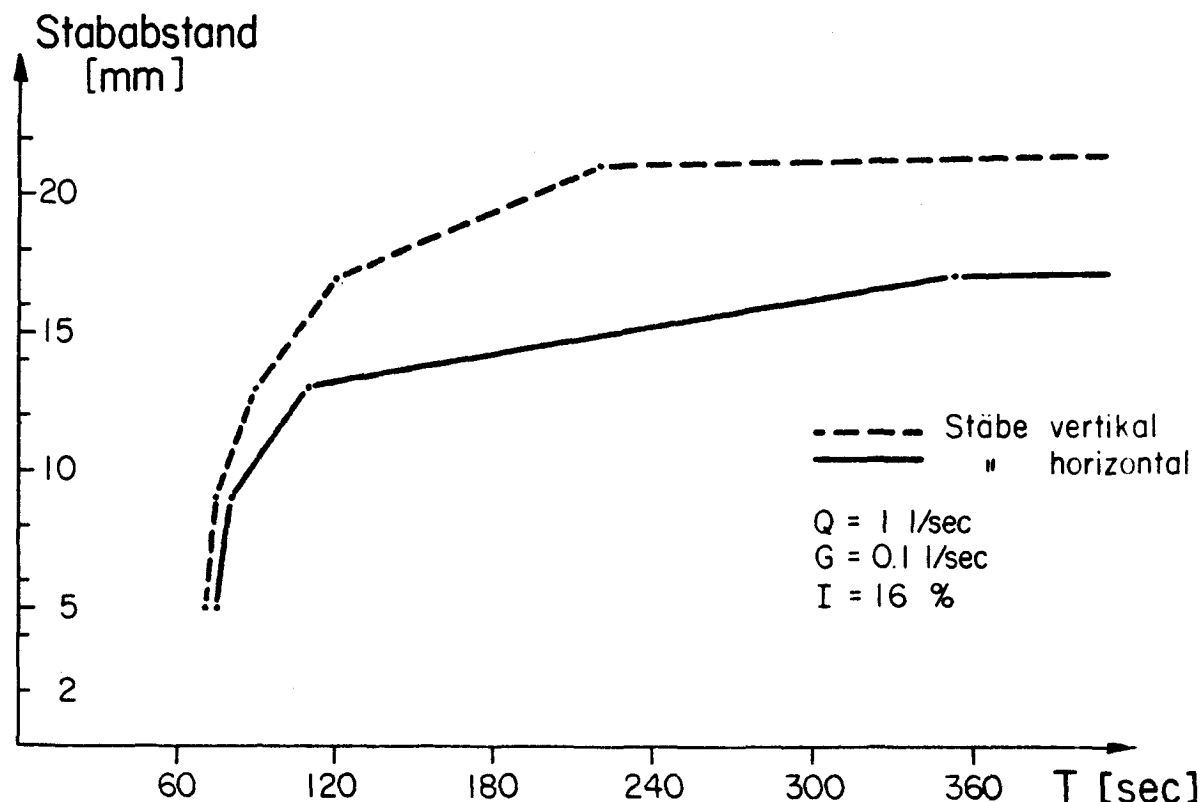


Bild 62 Verlandungszeit im 15 cm breiten Gerinne bis auf eine Höhe von 10 cm in Abhängigkeit von der Grösse der vertikalen und horizontalen Oeffnungen einer vorgeschalteten Sperre (Modellversuche).

Die Bilder 63 bis 65 belegen, dass das gefundene Ergebnis unabhängig von Abfluss, Geschiebemenge und Gefälle des Gerinnes gilt: Horizontale Oeffnungen verlegen sich bei starkem Geschiebetrieb (und ohne Treibholz) weniger rasch als die vertikalen gleicher Grösse.

Abschliessend sei zu diesen Untersuchungen darauf aufmerksam gemacht, dass entsprechende Messungen an Schlitzten und breiten Oeffnungen wahrscheinlich noch deutlicher ausfallen würden, weil dort an beiden Rändern der Oeffnungen zusätzlich Störeffekte auftreten (Krümmungs- und Einlaufverluste). So fliesst das Geschiebe nicht nur gerade auf den Schlitz zu, sondern auch von der Seite, wenn das Gerinne breiter ist als der Schlitz, was in der Natur meistens der Fall ist. Bei diesem Richtungswechsel verliert das Geschiebe an Geschwindigkeit, und am Schlitz kommt es wegen der zusätzlichen seitlichen Zuströmung zu verstärktem Gedränge. Diese Störungen fallen bei breiten Schlitzten weniger ins Gewicht und konnten in den durchgeführten Modellversuchen durch die schmalen Stäbe und die gleiche Breite von Schlitz und Gerinne weitgehend vermieden werden.

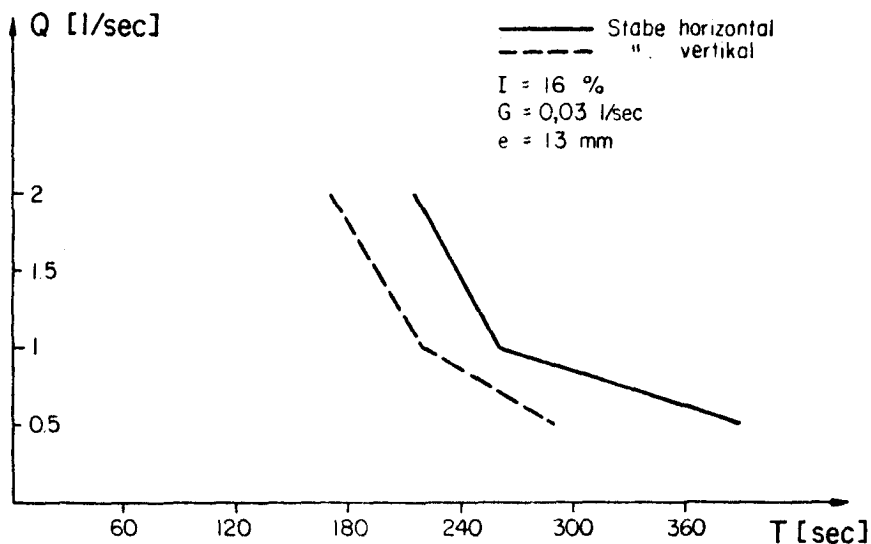


Bild 63 Verlandungszeit (siehe Bild 62) bei vertikalen und horizontalen Sperrenöffnungen in Abhängigkeit von ihrer Grösse und vom Abfluss.

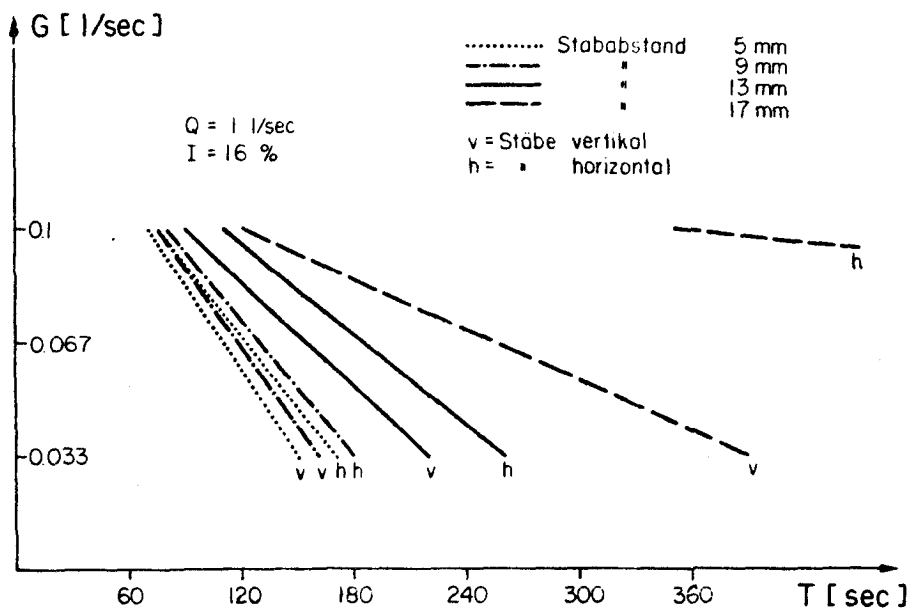


Bild 64 Verlandungszeit (siehe Bild 62) bei vertikalen und horizontalen Sperrenöffnungen in Abhängigkeit von ihrer Grösse und vom Geschiebetrieb.

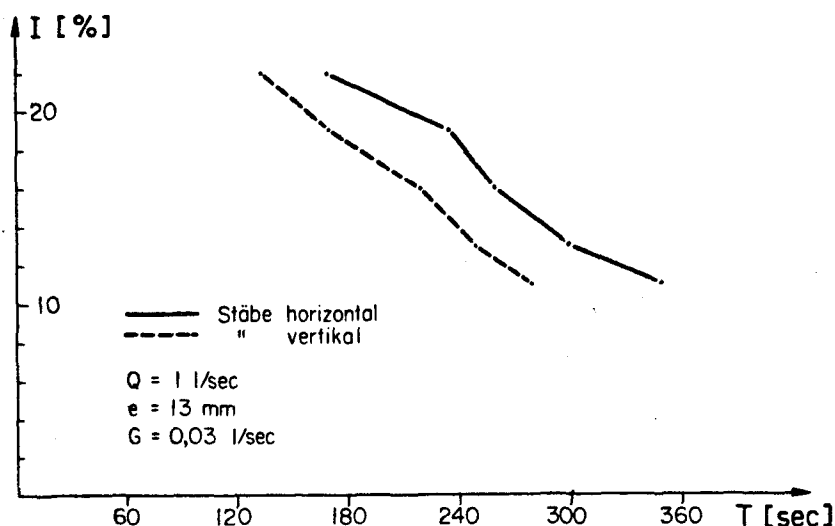


Bild 65 Verlandungszeit (siehe Bild 62) bei vertikalen und horizontalen Sperrenöffnungen in Abhängigkeit ihrer Grösse und des Gefälles im Zulaufgerinne.

### 7.3.5.3. Zur Balkenkonstruktion

Der grosse Vorteil der Balkensperre besteht vor allem darin, dass die Oeffnungen jederzeit verändert werden können. Dieser Vorteil sollte auch gewährleistet sein, wenn die Sperre verstopft ist. Im weiteren empfehlen sich Ausführungen, bei welchen auch untere Balken entfernt werden können, ohne dass man alle darüberliegenden herausnehmen muss. Darum gibt es vor allem drei konstruktiv mögliche Forderungen an die Balkenkonstruktionen:

1. Der Balkenabstand muss auf einfache Art variabel sein.
2. Jeder Balken sollte einzeln von der Luftseite her auswechselbar sein.
3. Die Balken dürfen sich auch bei Erschütterungen nicht von selbst lösen.

### 7.3.6. Zum Ausfluss und Rückstau von Sperrenöffnungen

Bei der Dimensionierung der Sperrenöffnungen steht man im Spannungsfeld zwischen zwei divergierenden Forderungen: Einerseits soll die Oeffnung für wirk-same Ablagerungen möglichst klein sein, andererseits soll sie für wirkungs-volle Spülungen möglichst gross sein. Die Kunst des Ingenieurs liegt darin, im speziellen Fall den optimalen Kompromiss zu finden.

Kronfellner-Kraus (1972) unterscheidet vier Arten von Oeffnungen:

- Niederwasseröffnung: Sie ist klein, verlandet rasch und wirkt dann nur mehr als Entwässerungsdole.
- Mittelwasseröffnung: Die Mittelwasser können ungestaut abfliessen, bei Hochwasser entsteht ein Rückstau, wodurch sich

grosse Ablagerungen bilden, die aber beim Sinken des Staus wieder selbsttätig entleert werden können.

- Hochwasseröffnung: Auch bei Hochwasser soll wenig oder kein Rückstau entstehen. Grobgeschiebe und Treibholz werden nur zurückgehalten, wenn sie bis zur Sperre gelangen, wobei sich aber anschliessend dahinter auch das feinere Material ablagert (ganz durchlässige Gittersperren).
- Uebergrosse Oeffnung: Sie erlaubt einem Hochwasser ein Ausweichen in der Breite, nachdem ein Teil der voll durchlässigen Sperre bereits verlegt ist. Dazu sind grosse Talbreiten und (Strebe-)Pfeilersperren notwendig.

Mit den Sperrenöffnungen kann der Rückstau in Abhängigkeit vom Ausfluss im Ablagerungsplatz gesteuert werden. Dies ist sehr sinnvoll, auch wenn Hampel (1968, u.a.) immer wieder die Ansicht äussert, dass in einem Geschiebeablageplatz möglichst nie ein Stau auftreten darf. Unter 7.4. wird gezeigt, dass dies theoretisch nicht sinnvoll sein kann. Aber auch viele Praktiker teilen diese Ansicht nicht. So schreibt z.B. Kettl (1973) zu den von ihm gebauten Schlitzsperren: "Anzahl und Grösse dieser Schlitze werden so gewählt, dass im Extremfall zwar ein Aufstau im Oberwasser eintritt, der freibleibende Sperrenraum jedoch immer noch zur vorübergehenden Aufnahme eines Schalles ausreicht. ... Sind die Oeffnungen zu klein, kann das Werk die hochwasserverstärkenden Eigenschaften eines überlasteten Dosierwerkes annehmen. Sind die Oeffnungen zu gross und tritt der Aufstau zu spät oder gar nicht ein, so steht die Funktion des Werkes ebenfalls in Frage."

Im Bestreben, für jede Stauhöhe im Becken den Ausfluss mehr oder weniger konstant zu belassen (Vermeidung der Ueberlastung des Unterlaufes), präsentiert Ueblagger (1973) ganz kurz einen nicht allzu klaren Vorschlag, von dem er aber selbst sagt, dass er noch nicht ausgereift sei. Selbst in seinen Modellversuchen scheint das oben erwähnte Ziel nicht erreicht worden zu sein.

Zu einem Ueberblick und zur Möglichkeit der vergleichenden Betrachtung wurden die Abflüsse von sieben üblichen Sperrenöffnungen (Bild 66) in Abhängigkeit des Wasserstaus durchgerechnet, wobei verschiedene Parameter variiert wurden (Schlitzbreite, Balkenabstand, Grösse des Grundablasses (Dole), Anzug der konischen Oeffnungen). Die Berechnungen und vor allem die Darstellung ihrer Ergebnisse in Form von Diagrammen sind im Anhang 10.3. zusammengestellt.

Die Diagramme sollen für bestimmte Wassermengen prinzipielle Vergleiche zwischen den verschiedenen Oeffnungen ermöglichen. Sie sind nicht als Dimensionierungsgrundlagen gedacht. Wenn man sich in der Praxis für eine bestimmte Oeffnung entschieden hat, wird man nicht um die hydraulische Durchrechnung des konkreten Falles herumkommen, abgesehen davon, dass man dann noch Geschiebe und Treibholz durch einen Zuschlag berücksichtigen muss.

Beim Betrachten der Diagramme fallen einige allgemeine Punkte auf:

- Im Prinzip gibt es die oben schmalen und unten weiten Oeffnungen im Gegensatz zu den weniger gebräuchlichen oben weiten und unten schmalen. Ein Mittelding sind die geraden Schlitze.



- Grob entsprechen die unten weiten konischen Schlitzze jenen Oeffnungen mit unten erweitertem Schlitz.
- Die Grunddole (Grundablass) bildet das Extrem der unten weiten Schlitzze.
- Rein hydraulisch entspricht die Balkensperre einer verschmälernten Schlitzsperre.
- Bei der Berücksichtigung des punktuellen Kriteriums der Stauhöhe in Funktion des Abflusses ( $H = f(Q)$ ) sind alle Sperren gleichwertig. Zur Wahl müssen die Staukurven unter oder über dem Wert dieses Kriteriums beigezogen werden.

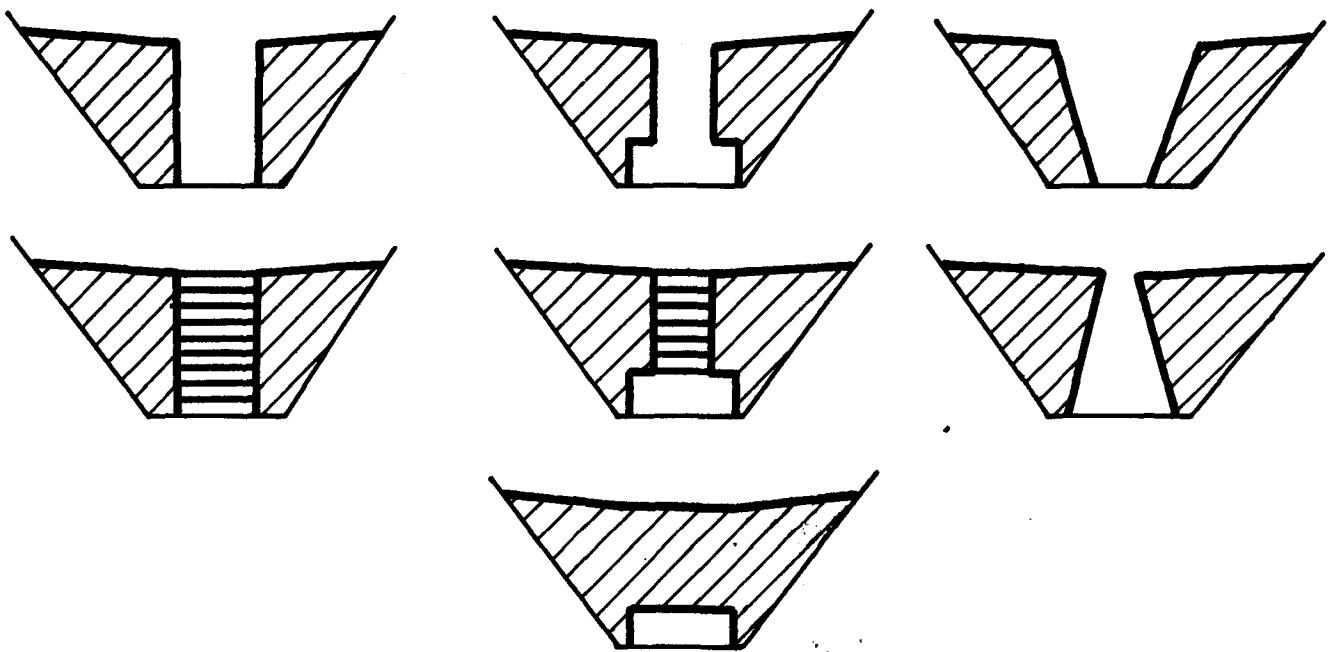


Bild 66 Die wichtigsten Durchflussöffnungen von Rückhaltesperren. Eine Berechnung der durchfließenden Wassermengen in Abhängigkeit von den Stauverhältnissen wurde im Anhang 10.3., Seiten 214 - 223 durchgeführt.

Die mit Abstand flexibelste Oeffnung besitzt man in der Balkensperre mit unten erweitertem Schlitz. Damit können durch reversible Veränderungen der Balken mit einer Ausnahme (oben weiter, konischer Schlitz) alle sieben Oeffnungen angenähert oder genau jederzeit variabel installiert werden.

Trotzdem muss nicht immer diese Oeffnung gebaut werden. Bei der Auswahl kann man nach den folgenden sieben Punkten vorgehen:

1. Bestimmung des Abflusses, oder noch besser einer Abflussganglinie.
2. Entscheid, wie hoch der maximale Stau sein darf oder soll.
3. Festlegung, wann und wie lange dieser Stau eintreten darf.
4. Bestimmung des Stauverhaltens vor oder/und nach dem grössten Stau (zuerst rascher Anstieg, dann langsamer, oder umgekehrt).

5. Prinzipieller Entscheid für eine Oeffnung aufgrund der Diagramme in Anhang 10.3., bzw. der Vorgänge bei den Ablagerungen und Spülungen.
6. Berücksichtigung der konkreten Umstände (Sicherheit, selbsttätige Entleerung, Treibholz).
7. Dimensionierung der speziellen Oeffnungen aufgrund hydraulischer Berechnungen, praktischer Erfahrungen und Punkt 6.

Wie man zu dem in Punkt 1 erwähnten Abfluss kommt, steht auf einem anderen Blatt, d.h. es wäre schön, wenn dazu nur ein Blatt notwendig wäre. Im Rahmen dieser Arbeit ist es unmöglich, auf dieses Grundproblem der Hydrologie einzugehen. Es sei dazu nur soviel gesagt, dass es sich in jedem Fall dringend empfiehlt, neben den unzähligen hydrologischen Berechnungsmethoden praktische Messungen und Schätzungen einzubeziehen, auch wenn es sich um noch so grobe und unzuverlässige Angaben handelt. Jeder Wildbach hat eine eigene Charakteristik - selbst nach einer Verbauung! - und muss entsprechend behandelt werden. In Formeln lässt er sich nur sehr, sehr bedingt erfassen.

#### 7.4. Zum Volumen eines Geschiebeablagerungsplatzes

Die Frage nach der Grösse ist bei der Planung eines Ablagerungsplatzes wohl eine der zentralsten. Leider ist sie nicht so einfach zu beantworten. Das optimale Volumen hängt nämlich nicht nur von der schwierig zu bestimmenden Geschiebefracht ab, sondern es spielen zudem weitere Faktoren eine Rolle, wie

- die Abflussganglinie,
- die Länge des Ablagerungsplatzes,
- die Art des Rückhaltebauwerkes und die damit gesteuerten Vorgänge der Ablagerung und Spülung,
- die Form und Gefälleverhältnisse im Becken,
- der Anfall von Treibholz.

Im folgenden wird versucht, etwas Licht in diesen vielschichtigen Problemkreis zu bringen, indem Möglichkeiten zur Bestimmung der Geschiebefracht aufgezeigt und das optimale Volumen unter den Gesichtspunkten von Beckenlänge, Verlandungsgefälle und Abflussganglinie diskutiert wird.

##### 7.4.1. Die zu erwartende Geschiebefracht

Es gibt fünf verschiedene Methoden, die Geschiebefracht zu schätzen. Auf das Verb "schätzen" sei grosser Wert gelegt, da die Geschiebefracht niemals zuverlässig berechnet werden kann. Es ist darum wichtig, dass man sich bewusst ist, welche Voraussetzungen und Fehler man bei diesen Schätzungen macht. Nur so kann eine am Schluss erhaltene Zahlenangabe nach bestem Wissen gewichtet und beurteilt werden. Zu Werten über Geschiebefrachten kann man über Denudationszahlen, Volumina der Wildbachschwemmkegel, stattgefundenere Ereignisse, Beurteilung des Einzugsgebietes und Formeln kommen.

#### 7.4.1.1. Denudation

Die Literatur über Abtragungsraten unserer Gebirge ist recht reichhaltig. Trotzdem ist die Berechnung von Geschiebefrachten aus solchen Zahlen sehr heikel und meistens nur bei wirklich grossen Einzugsgebieten einigermaßen sinnvoll. Die Gründe dazu sind die folgenden:

- Denudationswerte sind Durchschnittswerte über sehr grosse Gebiete. Je kleiner ein Einzugsgebiet ist, desto stärker können die wirklichen Abtragungsraten (in den Wildbächen praktisch immer nach oben) davon abweichen.
- Eine Zwischenakkumulation im Einzugsgebiet ist nur bedingt berücksichtigt. Gerade solche Geschiebenester spielen jedoch bei Extremereignissen oft die entscheidende Rolle.
- Jährlichkeiten sind bei Denudationsangaben nicht berücksichtigt.
- Ebenso ist eine Unterteilung in eigentliches Geschiebe und harmlose Schwebstoffe nicht möglich.

Zum letzten Punkt ist zu bemerken, dass es im obersten Teil eines Einzugsgebietes meistens nur sehr wenig Feinstmaterial gibt. Die Schwebstoffe entstehen vor allem weiter unten durch die Zerkleinerung des Geschiebes und können dann aber in Flüssen den zehnfachen Wert des Geschiebes ausmachen (Kronfellner-Kraus 1976). Der gleiche Autor gibt zur Denudation folgende Angaben, die in der Gröszenordnung von anderen Wissenschaftlern bestätigt werden:

- Jungschuttherde (erstmalige Erosion des Muttergesteins):
  - Urgesteine : mm-Dimension pro Jahr
  - Kalkgesteine : cm-Dimension pro Jahr
- Altschuttherde (Lockermassen):
  - Normale Verhältnisse : dm-Dimension pro Jahr
  - Bei Tiefen- und Seitenschurf : m- bis Dekameter-Dimension pro Jahr

Tiefe Hangbewegungen, Lawinenfolgen, Rutschungen, Felsstürze u.a. sind die Ursachen, dass es sich in Wildbacheinzugsgebieten sehr oft um extreme Erosionszonen handelt, wobei starke örtliche und zeitliche Diskontinuitäten entstehen. Geschiebefrachten in Wildbächen können darum über die Denudation höchstens bei grossem Einzugsgebiet sehr grob kontrolliert werden. Dazu sei zum Abschluss aus "Sedimentation Engineering" (ASCE 1975) zitiert: "Erosion factors are so variable that any statements concerning sediment yield for a geografic region must be generalized into rather wide limits."

#### 7.4.1.2. Schwemmkegel

Haiden (1935) berechnet im Beispiel des Reithauserbaches aus dem Volumen des Bachkegels von 2,1 Mio. m<sup>3</sup> und einem geschätzten Alter von 3000 Jahren eine jährliche Geschiebefracht von 700 m<sup>3</sup> (E = 0,2 km<sup>2</sup>). Weiter empfiehlt er, bei solchem Vorgehen eine Füllungszeit von 20 Jahren vorzusehen, bzw. nicht darunter zu gehen.

Die Methode leuchtet im Prinzip ein, verlangt aber mit dem Schwemmkegelvolumen

(oft bei ebenfalls abzuschätzender Talverfüllung mit Nachbarkegeln überlappend) und seinem Alter zwei Grössen, die nur in Ausnahmefällen leicht zu schätzen sind und allenfalls aus der Bachgeschichte abzuleiten wären. Im übrigen enthält die Methode die gleichen Unsicherheiten wie jene über die Denudation, ausser dass man wirkliche Angaben über den betreffenden Wildbach ohne die vom Vorfluter abtransportierten Schwebstoffe hat. Das Problem der Jährlichkeit und Diskontinuität bleibt ebenfalls offen.

#### 7.4.1.3. Stattgefundene Ereignisse

Meistens ist das auslösende Moment für eine Wildbachverbauung ein Extremereignis, womit in diesen Fällen immer mindestens Schätzungen - wenn nicht sogar Messungen (abgelagerte Massen) - der Geschiebefracht (und der Wassermengen) möglich sind. Die Dimensionierung aufgrund solcher Grundlagen ist sehr sinnvoll, vor allem wenn man noch versucht, Vergleiche mit vergangenen Ereignissen und den folgenden beiden Methoden anzustellen. Dadurch ist oft auch eine Abschätzung der Jährlichkeit des Ereignisses möglich. In vielen Fällen ist allerdings eine Angabe darüber nicht sehr vordringlich, da man bei solchen Extremereignissen ohnehin schnell in Dimensionen ist ("seit Menschengedenken" o.ä.), mit deren Grundlagen man ein sehr grosses Risiko ausschliessen kann.

Als Illustration seien die folgenden drei Beispiele von Extremereignissen in der Schweiz erwähnt. Die Jährlichkeiten liegen (z.T. wahrscheinlich weit) über 100. Beim Schächen wurde ein schwer schätzbarer Teil der Fracht während des Hochwassers bereits von der Reuss abgeführt und konnte nicht mehr voll berücksichtigt werden:

- Schächen (Uri), 31.7./1.8.1977, ca. 200'000 m<sup>3</sup> aus 100 km<sup>2</sup>, was eine spezifische Fracht von 2'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> ergibt.
- Melezza (Tessin), 7.8.1978, ca. 2'000'000 m<sup>3</sup> aus 140 km<sup>2</sup>, ergibt eine spezifische Fracht von 14'300 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>.
- Durnagel (Glarus), 24.8.1944, ca. 450'000 m<sup>3</sup> aus 19 km<sup>2</sup>, ergibt eine spezifische Fracht von 23'700 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>.

Die Angaben stammen aus dem Bericht des zivilen kantonalen Führungsstabes des Kantons Uri (1979), Martini (1981) und Streiff et al. (1969/70). Wenn man die Folgen des Schächen-Ereignisses gesehen hat, kann man sich kaum ausmalen, dass die damals vorhandene spezifische Geschiebefracht im Durnagel um mehr als das Zehnfache überschritten werden konnte. Man erkennt daraus die Relativität der Folgen solcher Ereignisse in Abhängigkeit von den lokalen Umständen (Topographie etc.) und die Unabhängigkeit von der Grösse des Einzugsgebietes.

Ereignisanalysen haben einen grossen Vorteil: Sie liefern für den betrachteten Bach realistische Angaben über die Fracht, die im Geschiebeablagerungsplatz deponiert werden soll, d.h. ohne einen grossen Teil der Schwebstoffe. Im weiteren bleibt die jahre- bis jahrzehntelange Materialakkumulation vor dem Eintreffen des Niederschlagsereignisses zu beachten, das den Abtransport verursacht. Nach der Räumung des Bachbettes bringt selbst ein noch grösserer Regen weniger bis kein Geschiebe.

#### 7.4.1.4. Beurteilung des Einzugsgebietes

Dabei geht es darum, in oft aufwendigen Feldbegehungen die Geschiebeherde im Einzugsgebiet quantitativ und qualitativ (einerseits vom Material her und andererseits von der Wahrscheinlichkeit einer Abspülung her) als Geschiebelieferanten zu beurteilen. Solche Erkundungen sind für die Erstellung jedes Gefahrenzonenplanes notwendig, sie sollten für die Planung eines Geschiebeablagerungsplatzes ebenfalls selbstverständlich sein. Diese Schätzungen im Felde (nie aufgrund von Luftbildern!) setzen neben einem guten geomorphologischen Verständnis der Gebirgsbildung und der Erosionsvorgänge im weitesten Sinne grosse praktische Erfahrung voraus. Sie liefern im Endeffekt aber die besten und zuverlässigsten Grundlagen für die Schätzung der potentiellen Geschiebefracht.

#### 7.4.1.5. Formeln

Formeln sind in ihrer Anwendung meistens einfach und ergeben ein klares Ergebnis. Darum sind sie sehr beliebt, auch wenn ihre Ergebnisse praktisch immer einer Diskussion bedürfen. Um es gleich vorwegzunehmen: Zur Schätzung der Geschiebefracht gibt es keine zuverlässige Formel. Trotzdem sind nachfolgend vier mögliche Berechnungsarten angeführt, die aber nie nur als solche und unkritisch durchgeführt werden dürfen.

##### Berechnung nach Hoffmann .....

Hoffmann (1970) stellt eine bestechend einfache Formel für die Geschiebefracht auf, die aber anscheinend weder durch Messungen im Labor noch durch solche in der Natur überprüft wurde. Jedenfalls macht der Autor der nur vierseitigen Publikation keine diesbezüglichen Angaben. Hoffmann ist zwar ein Praktiker, doch erweckt seine Formel den Eindruck, als sei sie durch theoretische Ueberlegungen entstanden.

$$(4) \quad G_{\text{tot}} = 323 \cdot c \cdot b \cdot d_m \cdot (0,1 + 4 \cdot I) \cdot z$$

- Darin bedeuten
- $G_{\text{tot}}$  = Totale Geschiebefracht eines Hochwassers in  $\text{m}^3$
  - $c$  = Faktor zwischen 1,0 (extrem erosive Verhältnisse) und 0,5 (Wildbäche im Hügelland mit gutem Bewuchs)
  - $b$  = Bachbreite in m
  - $d_m$  = Mittl. Korndurchmesser in cm
  - $I$  = Gefälle des Gerinnes in %
  - $z$  = Dauer des Hochwassers in Stunden

Die Formel ist nicht dimensionsrichtig. Wie die folgende, darf sie darum höchstens zu Vergleichszwecken beigezogen werden.

##### Berechnung nach Kronfellner-Kraus .....

Kronfellner-Kraus (1982) gibt für Bäche der gefährlichsten Kategorie (grosses Geschiebepotential, ausgedehnte Altschuttherde usw.) die folgende Formel an:

$$(5) \quad G_{\text{tot}} = K \cdot E \cdot I \quad \text{Dabei bedeuten} \quad K = 1750 / e^{0,018 \cdot E}$$

$E = \text{Einzugsgebiet in km}^2$   
 $I = \text{Bachgefälle in \%}$

K (Wert für die Erosionsrate) schwankt zwischen 500 für grosse, ausgeräumte, gut bewachsene Einzugsgebiete und 1500 für steile, kleine und mittlere Einzugsgebiete mit ausgedehnten Geschiebeherden und geringem oder anfälligem Bodenschutz. Die Gleichung basiert auf Analogieschlüssen, die aus dem Vergleich verschiedener Gebiete entstanden sind, und bietet die Möglichkeit, extreme Geschiebefrachten zu schätzen. Wie die Formel von Hoffmann entstand auch diese aus Erfahrungen in den österreichischen Alpen.

#### Berechnung nach Schoklitsch .....

Schaffernak (1950) bringt eine Formel von Schoklitsch, die allerdings im zitierten Werk dieses Autors (1926) nicht zu finden ist. Angaben über die Herleitung der Formel werden keine gemacht, so dass auch sie mit grösster Vorsicht anzuwenden ist:

$$(6) \quad G_{\text{tot}} = \alpha \cdot (Q_{\text{tot}} \cdot E)^{0,2}$$

Dabei bedeuten:  $Q_{\text{tot}} = \text{Jahreswasserfracht in m}^3$   
 $E = \text{Einzugsgebiet im km}^2$   
 $\alpha = \text{Beiwert für Wildbäche zwischen 1600 und 4500 (grosse Erosion)}$

#### Berechnung mit Hilfe des Geschiebetriebes .....

Bis vor kurzem existierte keine Geschiebetriebformel, die auch für grössere Gefälle, wie sie in Wildbächen auftreten, angewendet werden konnte. Die Formel von Meyer-Peter war auf die kleineren Gefälle der Flüsse beschränkt. Nun entwickelten Smart und Jäggi (1983) eine neue Gleichung, mit welcher die Feststofftransportrate in Gebirgsbächen bis zu 20% geschätzt werden kann. Durch den Einbezug der Daten von Meyer-Peter ist die neue Gleichung auch in den unteren Gefällebereichen gültig und sogar angepasster als die alte Formel von Meyer-Peter und Müller, so dass sie diese ablösen wird. Die Smart-Jäggi-Beziehung lautet in vereinfachter Form:

$$(7) \quad q_B = 2,5 \cdot q \cdot I^{0,6} \cdot (I - d_m/12,1 \cdot h_m)$$

Dabei bedeuten:  $q_B = \text{Feststofftransportrate in m}^3/\text{s}$   
 $q = \text{Reinwasserabfluss in m}^3/\text{s}$   
 $I = \text{Gefälle als tg des Winkels}$   
 $d_m = \text{mittlerer Korndurchmesser in m}$   
 $h_m = \text{Abflusstiefe des Gemisches in m}$

Das Verhältnis zwischen der Abflusstiefe des reinen Wassers und jener des Gemisches beträgt bei  $J = 20\%$  0,5, bei  $10\%$  0,8 und nähert sich bei  $0\%$  dem Wert 1,0. Dazwischen kann ungefähr linear interpoliert werden. Näheres dazu findet sich in der oben erwähnten Originalpublikation oder bei Jäggi (1984).

Mit dieser Formel kann der maximale Geschiebetrieb bei Gleichgewicht (keine Seiten- und Tiefenerosion) und falls die Sohle in Bewegung ist (keine Deckschicht vorhanden) geschätzt werden. Wie man sieht, benötigt man für diesen Rechengang nebst den Kennwerten des Gerinnes und Geschiebes eine konkrete Angabe über die Abflussmenge. Damit lässt sich dann die rein theoretische Geschiebefracht bestimmen. Es sei aber ausdrücklich betont, dass diese Menge ausschliesslich in Abhängigkeit von der Transportkapazität des Gerinnes geschätzt wird, falls hoher, aber normaler Geschiebetrieb herrscht. Nicht berücksichtigt sind insbesondere:

- die wirklich vorhandenen Materialmengen im oberen Gerinne und in den Geschiebeherden,
- Aenderungen von Gerinnedimensionen, Korndurchmesser des Geschiebes und Wassermenge,
- mögliche murgangartige Zuströmungen.

Wirklich transportierte Mengen machen meistens nur einen Bruchteil dieser errechneten, maximalen Transportrate aus, womit man sich mit dieser Schätzung - allerdings wieder rein theoretisch - weit auf der sicheren Seite befindet. Trotzdem ist eine solche Berechnung nur in Kombination mit anderen Ueberlegungen zur Geschiebefracht sinnvoll.

#### 7.4.1.6. Abschliessende Bemerkungen

Die Schätzung der möglichen Geschiebefracht ist sehr schwierig. Nie sollte nur eine der oben angeführten Methoden allein angewendet werden. Die zuverlässigsten Ergebnisse erhält man durch eine Beurteilung des Einzugsgebietes und seiner Geschiebeherde. Allerdings ist diese Beurteilung anspruchsvoll und aufwendig.

Die Erkenntnis ist wichtig, dass die in einen Geschiebeablagerungsplatz geförderte Geschiebefracht sehr oft von der Grösse des Einzugsgebietes und vom Wasserabfluss unabhängig ist, da die aktuellen Geschiebelieferanten eine ausschlaggebende Rolle spielen. So könnte man die Faktoren, von denen die Geschiebefracht abhängt, ihrer Wichtigkeit nach geordnet (wobei sich im konkreten Fall die Reihenfolge ändern kann) wie folgt auführen:

1. Bereits im Bachgerinne liegende Geschiebemenge.
2. Art und Grösse der aktuellen potentiellen Geschiebeherde.
3. Art der Aktivierung dieser Herde: - direkt durch den Bach  
- indirekt durch Niederschläge u.a.
4. Art des Geschiebes (Korndurchmesser).
5. Bachgefälle.
6. Möglicher Wasserabfluss in Abhängigkeit von Niederschlag, Verklausungen und Einzugsgebiet.
7. Mögliche Dauer eines Hochwassers (Niederschlag, Einzugsgebiet).
8. Art des Einzugsgebietes (Alt-Jungschutt, Topographie, Vegetation).
9. Grösse des Einzugsgebietes.

## 7.4.2. Die Optimierung des Beckenvolumens

Je nach Bauart eines Geschiebeablagerungsplatzes kommt man unter Umständen bei der Definition des Beckenvolumens in Schwierigkeiten. Im folgenden wird darunter das Volumen verstanden, welches durch den horizontalen Beckenboden, die vier senkrechten Umfassungswände sowie durch jene Ebene begrenzt wird, die durch den unteren Abschluss des Zulaufgerinnes und die Oberkante des Rückhaltebauwerkes gebildet wird. Die Betrachtungen zum Beckenvolumen geschehen unter den Gesichtspunkten des Wasserrückstaus, der Länge des Ablagerungsbeckens (und damit auch seiner Breite), des Verlandungsgefälles und des Rückhaltevermögens (trap efficiency).

### 7.4.2.1. Der Wasserrückstau im Ablagerungsbecken

Vor allem Hampel (1968) vertritt die Ansicht, dass in einem Geschiebeablagerungsplatz nie ein Rückstau auftreten darf, da er einem Verlust an nutzbarem Ablagerungsvolumen gleichkommt. Das folgende Bild 67 soll zeigen, dass diese Meinung nur sehr bedingt richtig ist.

Im Fall I lässt sich die Ansicht von Hampel vertreten, wenn nämlich das Verlandungsgefälle (A-C) grösser ist, als das Gefälle zwischen Einlaufgerinne und Sohle der Rückhaltesperre (A-B). Von diesem Stadium an wirken sich zusätzliche Geschiebemengen, neben der Erhöhung des Schwemmkegels, in einem Rückstau ins Gerinne aus (Phase 3 des Ablagerungsprozesses). Ein Stau im Becken käme dann tatsächlich einem Volumenverlust gleich, d.h. die Ablagerungen im Gerinne fänden bereits zu einem früheren Zeitpunkt statt (Fall II). Ist nun aber das Verlandungsgefälle kleiner als die Verbindung vom Zulaufgerinne zur Sohle der Rückhaltesperre, dann tritt genau das Umgekehrte ein: Es entsteht ein Volumenverlust ohne Wasserstau (Fall III), bzw. ein Volumengewinn mit Rückstau (Fall IV). Je kürzer ein Ablagerungsplatz oder je grösser sein Einlaufabsturz - dieser ist sehr erwünscht - desto eher treten die Fälle III und IV ein, womit ein Rückstau zu einer besseren Nutzung des Volumens führt.

Auch die früher erwähnten Gründe sprechen für einen Wasserstau im Becken, abgesehen davon, dass er oft bei Verklauung der Rückhaltesperre ungewollt eintritt. Ob im konkreten Beispiel ein Wasserrückstau im Ablagerungsplatz erwünscht ist oder nicht, muss von Fall zu Fall entschieden werden. Jedenfalls darf ein Stau aber nicht a priori ausgeschlossen werden.

### 7.4.2.2. Die Länge des Beckens

In den Modellversuchen 205 - 270 wurde die Länge des Ablagerungsplatzes variiert und dadurch relativ dazu auch die Breite. Dies ist der Grund, weshalb die Breite nicht gesondert behandelt wird. In den erwähnten Versuchen wurde neben der total gespülten Menge immer eine detaillierte Geschiebeabflussganglinie gemessen. Die Daten dazu finden sich im Anhang 10.4. und 10.6. und werden zu Vergleichszwecken in den Diagrammen der Bilder 68 - 71 zusammengestellt.



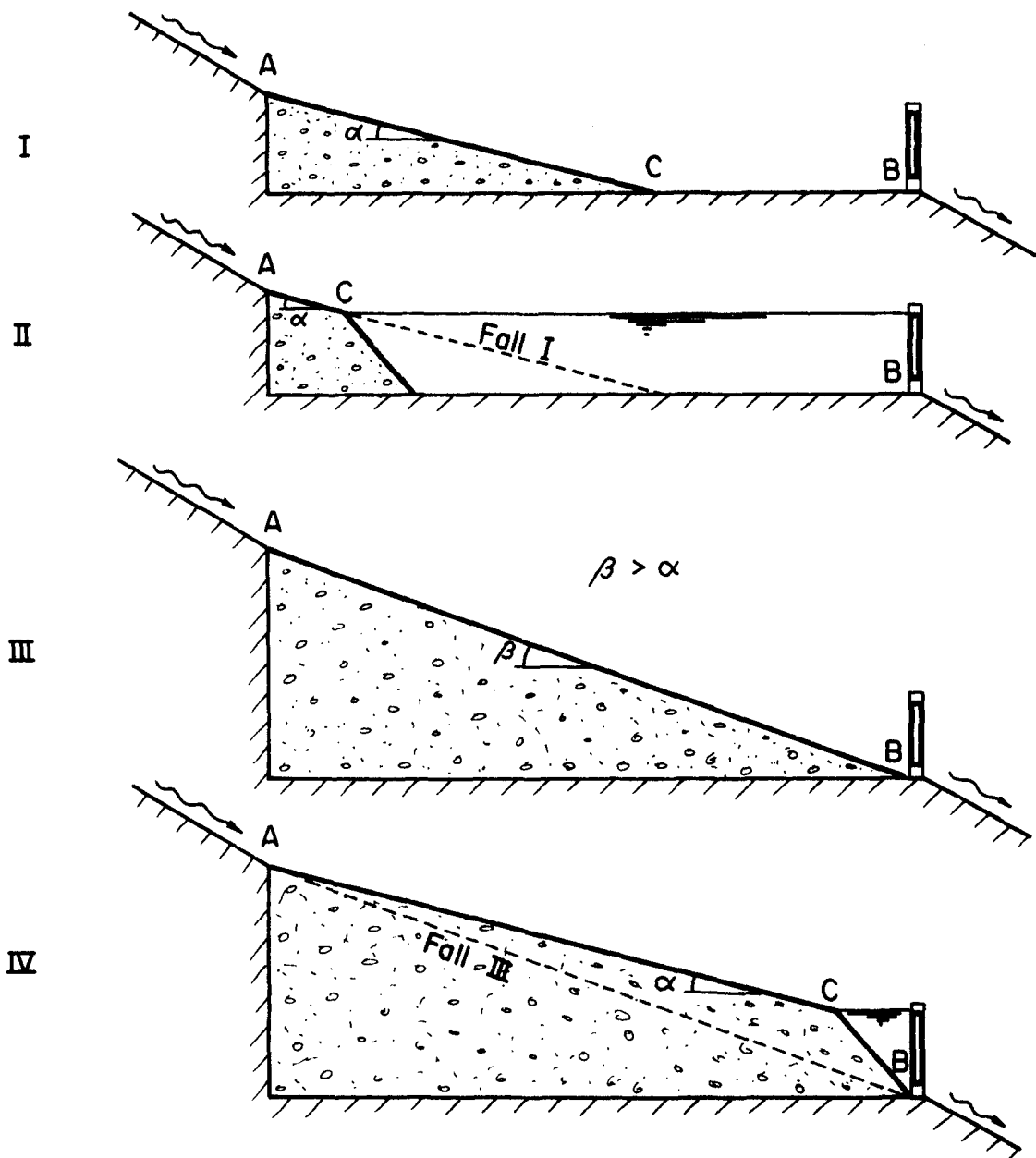


Bild 67 Die Füllung eines Geschiebeablagerungsplatzes in Abhängigkeit vom Wasserstau (Kommentar im Text).

In Bild 68 ist der Beginn des Geschiebetriebes durch die Rückhaltesperre in Abhängigkeit von der Länge des Ablagerungsplatzes und den Stauverhältnissen dargestellt (Stau 0 = praktisch kein Stau, Stau 3 = zeitlich längster Stau). Allen Versuchen (auch jenen in den Bildern 70 bis 74) lagen die bekannten Zuflussganglinien zugrunde. Die Details sind in den graphischen Darstellungen im Anhang 10.4. zu sehen. Für den Beginn des Geschiebetriebes ergibt sich kein deutliches Bild, auch wenn die erwartete Tendenz zum Ausdruck kommt: Je länger das Becken und je ausgedehnter der Stau, desto später beginnt der Geschiebetrieb. Die vollständigen Kurven sollten sicher im Nullpunkt des Koordinatensystems beginnen und dann wahrscheinlich zuerst steiler und später flacher nach rechts oben ziehen, ähnlich wie sie es für Stau 1 und 3 tun. In der Darstellung kommt dies aber ungenügend zum Ausdruck. Warum?

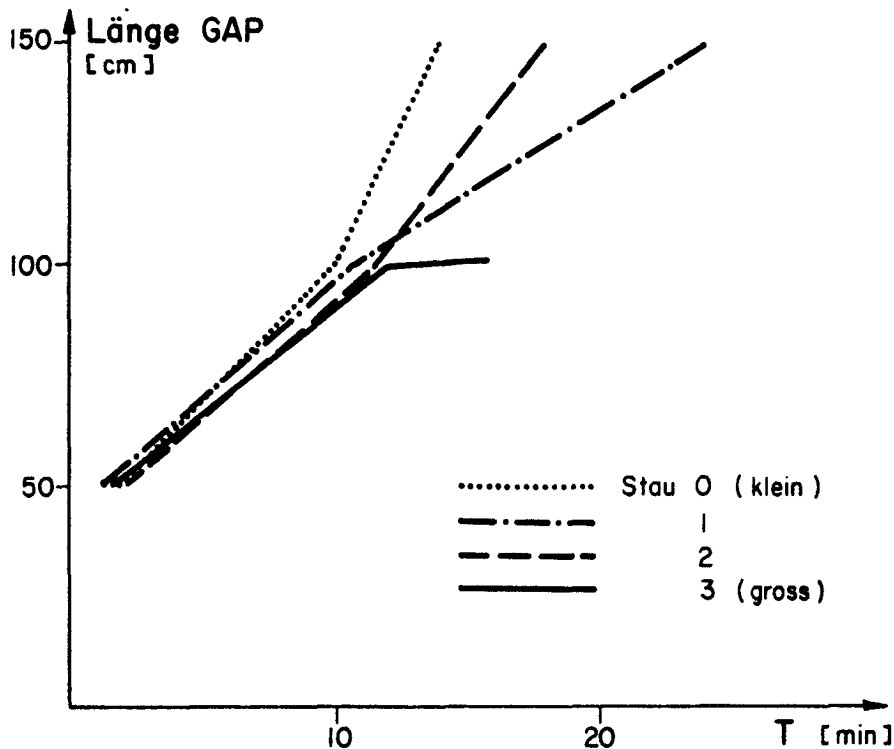


Bild 68 Beginn des Geschiebetriebes aus dem Ablagerungsplatz in Abhängigkeit der Beckenlänge (Modellversuche 205 - 270).

Dazu ist wieder einmal das Problem der Reproduzierbarkeit zu erwähnen. Zum Beispiel sollten die beiden Werte für Stau 1 und 2 bei der Beckenlänge 150 cm vertauscht sein. Ausserdem zeigte der Ablauf der Versuche mit der Beckenlänge 50 cm, dass diese Werte nur bedingt mit den anderen verglichen werden dürfen. In Relation zu den Strömungsverhältnissen ist diese Länge nämlich zu kurz: Die Wasser-Geschiebeströmung erreicht die Rückhaltesperre, bevor sie sich beruhigt hat, d.h. der Wassersprung findet im Bereich der Sperre statt, so dass der grösste Teil des Wassers und Geschiebes direkt durch die Sperrenöffnungen schießt oder sogar über die Sperre geworfen wird. Die Funktion des Bauwerkes als Stauregulator wird damit zweitrangig. Die Sperre wirkt vor allem als direktes Fließhindernis. Links und rechts der Hauptströmung bilden sich ausgeprägte Walzen, in denen sich das Feinstmaterial absetzt. Sonst aber entstehen keine grösseren Ablagerungen. Das Endstadium eines solchen Versuches ist in Bild 69 zu sehen.

Da sich praktisch keine Ablagerungen bilden konnten, setzte der Geschiebetrieb bei der Rückhaltesperre viel früher als erwartet ein. Daher liegen die Punkte im Bild 68 für die Länge 50 cm zu weit links. Man könnte sich nun vorstellen, dass sich die für eine Ablagerung ungünstigen Verhältnisse bei nicht vorhandenem Einlaufabsturz verbesserten. Der Vergleich der entsprechenden Versuche 229/230 mit 293/294 und 213/214 mit 295/296 (Anhang 10.4.) zeigt jedoch, dass bei fehlendem Stau praktisch kein Unterschied feststellbar ist, bei Stau 2 der Geschiebetrieb bei nicht vorhandenem Absturz zwar später einsetzt, der Ablagerungseffekt aber noch schlechter ausfällt. Wie bekannt, bildet sich bei fehlendem Absturz ein langgestreckter Schwemmkegel, der natürlich dazu beiträgt, dass der Geschiebetrieb trotzdem relativ rasch einsetzt und die Ablagerungen nicht

in die Breite wachsen, falls die Schwemmkegelspitze vorher den Schlitz erreicht. Aus dem gleichen Grund fallen übrigens die Ablagerungskubaturen bei der Beckenlänge von 100 cm ohne Einlaufabsturz bedeutend geringer aus als bei den entsprechenden Versuchen mit Absturz. Man vergleiche dazu die Versuche 211/212 mit 291/292 (Spülung mit Absturz = 63 l, ohne Absturz = 109 l), und 207/208 mit 289/290 (66 l und 100 l) im Anhang 10.4.



Bild 69 Endstadium des Versuches 226: Bei sehr kurzen Ablagerungsplätzen entstehen nur bescheidene Ablagerungen mit dünenartigen Pyramiden aus Feinstmaterial an den Stellen der seitlichen Wasserwalzen. (Fließrichtung im Bild von unten nach oben.)

Bild 70 zeigt die Ablagerungen am Ende der Versuche in Abhängigkeit von den Stauverhältnissen und den Beckenlängen. Wiederum streuen die Werte z.T. recht stark. Die bei Stau 1 verzweigte Kurve für die Länge 100 cm zeigt drei Werte aus einer Untersuchung zur Reproduzierbarkeit: Der erste Versuch 209/210 (Punkt rechts) wurde als Extremwert beurteilt; zwei weitere Versuche lieferten die beiden anderen Werte links davon. Am unzuverlässigsten ist für eine Aussage ohne Zweifel die Kurve für die kurze Beckenlänge von 50 cm, was man schon aus ihrer Form erkennt. Im besten Fall fällt dort nur der Wert für den Stau 3 aus dem Rahmen. In Anbetracht der Volumina der drei Becken (94 l, 188 l, 281 l) müssten die Abstände zwischen den drei Kurven sowie zwischen der Ordinate und der Kurve für 50 cm bei relativer Gleichwertigkeit gleich sein. Sie sind es nicht. Vor allem fällt die 50 cm-Kurve aus dem Rahmen und zeigt einmal mehr, dass hier besondere Verhältnisse mit dem Effekt eines verkleinerten Rückhaltevermögens vorliegen (siehe auch 7.4.2.4.). Ein Trend zu vermehrten Ablagerungen bei längerem Stau ist vor allem bei der Länge 150 cm zu erkennen, was belegt, dass lange Ablagerungsplätze für Ablagerungen günstig sind, kurze dagegen für die Spülungen auch bei länger dauerndem Stau.

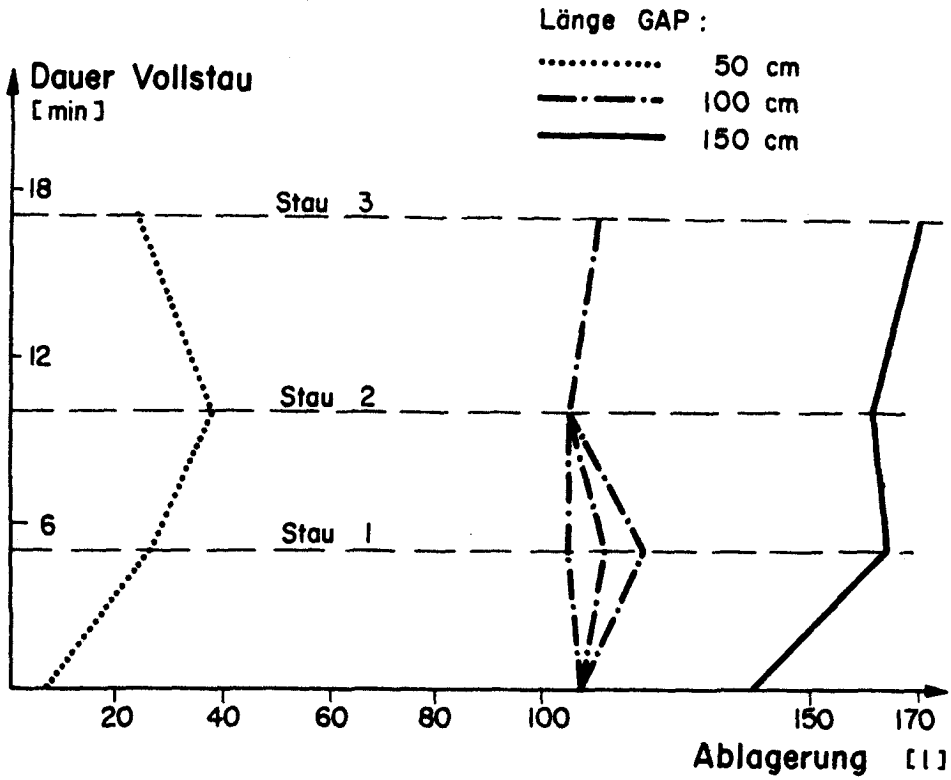


Bild 70 Die Ablagerungen in Abhängigkeit der Stauverhältnisse und Beckenlängen in den Versuchen 205 - 270.

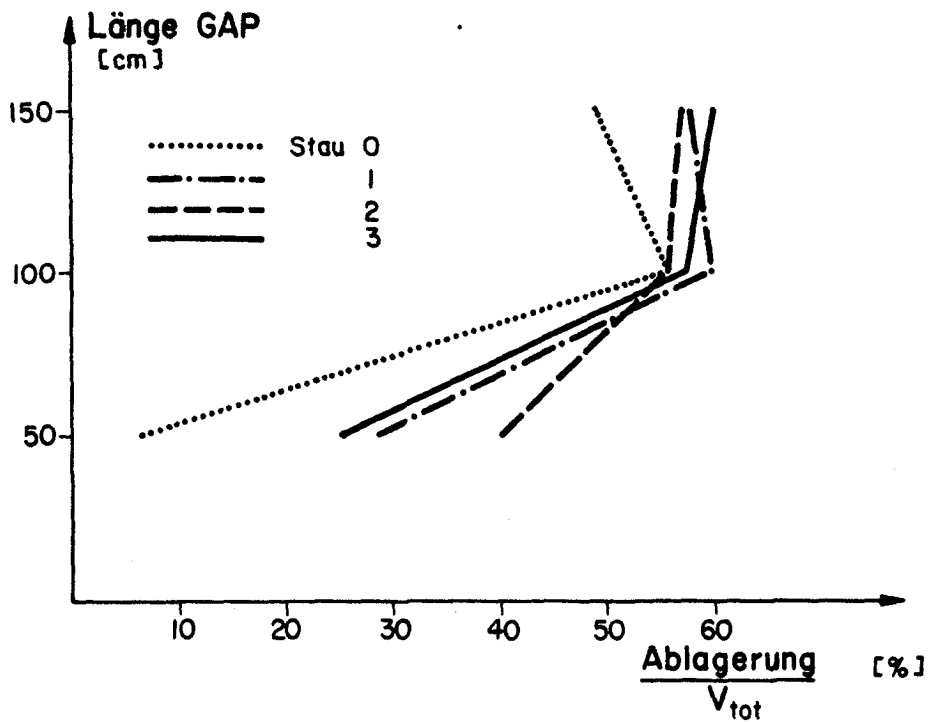


Bild 71 Die Ablagerungen in % des gesamten Beckenvolumens in Abhängigkeit von der Beckenlänge und den Stauverhältnissen.

Das dritte Diagramm zur Länge des Ablagerungsplatzes zeigt in Bild 71 nochmals, wie die kurzen Becken auch relativ zu den langen schlechter gefüllt sind, wobei diese Aussage nicht allgemein, sondern nur unter den oben beschriebenen Umständen gültig ist. Insbesondere sei noch darauf hingewiesen, dass die gleichbleibende Breite von 100 cm bei dieser Länge zu einer sehr ungünstigen Ueberbreite wird, die schon theoretisch unter dem Gesichtspunkt der Schwemmkegelbildung kaum optimal ausgenützt werden kann. Das Bild 71 liefert noch ein zusätzliches Ergebnis: Auch wenn die Tendenz nicht eindeutig ist, bzw. nur für Stau 0 und 1 zutrifft, so erkennt man doch, dass die Werte für das Verhältnis Ablagerung:Gesamtvolumen für die Länge von 100 cm ganz oder beinahe ein Optimum erreichen und für die Länge von 150 cm für Stau 0 und 1 wieder zurückgehen. Bei noch grösseren Längen hätten die Werte weiter rückläufig sein müssen: Bei einer Länge von 200 cm beträgt das Beckenvolumen z.B. 375 l, so dass die beschickte Geschiebefracht von 170 l selbst bei vollständigen Ablagerungen nur 45% ausgemacht hätte. Demnach existiert ein Optimum des Rückhaltes zwischen den Längen knapp unter 100 cm und etwas über 150 cm, wobei dieses Optimum bei längerem Stau zu grösseren, bei kürzerem Stau zu kleineren Längen des Ablagerungsplatzes hin tendiert.

Dieses Ergebnis gibt einen Fingerzeig für eine Optimierung der Beckenlänge. Es wurde aber bewusst nicht weiter verallgemeinert (Formel, dimensionslose Beziehung), da es einerseits wirklich nur für beschränkte Umstände gilt (beide Zuflussganglinien vorgegeben, rechteckige und mit senkrechten Wänden umschlossene Becken, nur eine Sieblinie des Geschiebes), und da andererseits für handfeste Aussagen eine viel grössere Anzahl von Versuchen hätte durchgeführt werden müssen.

Die Ergebnisse lassen sich daher wie folgt zusammenfassen:

- Die Länge des Ablagerungsplatzes kann für wirkungsvolle Ablagerungen zu kurz sein, wenn die Rückhaltesperre im Bereich des Wassersprunges oder wenig unterhalb von ihm liegt.
- Die Länge des Ablagerungsbeckens kann zu gross sein, wenn der Schwemmkegel die Rückhaltesperre nicht erreicht, so dass keine Spülung eintritt.

Beide Aussagen gelten für einmalige Hochwasserwellen beschränkten Ausmasses. Sie werden für wiederholte Wellen unter 7.4.2.4. ergänzt.

#### 7.4.2.3. Das Verlandungsgefälle

Zur Bestimmung des Verlandungsgefälles gibt es drei Möglichkeiten: Das Kopieren natürlicher Verhältnisse, die Berechnung nach Hampel oder die nach Smart/Jäggi.

Kopie der Natur  
.....

Diese Methode für die Bestimmung des Verlandungsgefälles kann sehr empfohlen werden, da sie die wirklichen Verhältnisse in einem Bach am besten berücksichtigt. Im bereits vorhandenen Ablagerungsplatz oder an der Stelle des zu errichtenden dürften sich in den meisten Fällen irgendwo jüngere Ablagerungen befinden, deren Verlandungsgefälle übernommen werden kann. Falls sich solche

Musterablagerungen nicht an der Stelle des Ablagerungsplatzes finden lassen, sollten sie nicht weit davon entfernt liegen. Zwischen dem Muster und dem (zukünftigen) Becken sollte das Längsgefälle des Baches unverändert bleiben (keine Aussortierung des Geschiebes) und petrografisch gleichwertiges Material vorhanden sein.

Formel von Hampel  
.....

Hampel (1974 und früher) stellte für das Verlandungsgefälle aufgrund von Modellversuchen eine Formel auf, die er in der Natur mit zum Teil befriedigendem Erfolg verifizierte. Die Formel lautet:

$$(8) \quad J = 2 \cdot G^{0,625} + (28,5 - G) \cdot d_m$$

Dabei bedeuten: J = Verlandungsgefälle in %  
G = Geschiebeanteil der Abflussmenge in %  
d<sub>m</sub> = mittlerer Korndurchmesser in m

Hampel gibt eine Gültigkeit der Formel für Geschiebeanteile zwischen 0 und 28,5% an, wobei für die Bestimmung des Verlandungsgefälles in einem Ablagerungsplatz (Situation nach einem Hochwasser) höchstens Werte von 0 bis 5% sinnvoll sind.

Wie gesagt, beruht die Formel primär auf Modellversuchen und sollte nicht ohne Kontrolle auf die natürlichen Gegebenheiten übertragen werden.

Formel von Smart/Jäggi  
.....

Die Formel (7) wurde auf der Seite 138 aufgeführt und ist in der Anwendung sehr zuverlässig. Sie hat aber den Nachteil, dass für die Bestimmung des Verlandungsgefälles mehr Größen eingegeben werden müssen als bei der Formel von Hampel. Neben dem mittleren Korndurchmesser werden Feststofftransportrate, Reinwasserabfluss und Abflusstiefe benötigt. Im konkreten Fall wird es schwierig sein, für diese Größen feste Werte anzunehmen. Durch Variation der Werte kann aber das gesuchte Verlandungsgefälle befriedigend eingegabelt werden.

7.4.2.4. Das Rückhaltevermögen der Ablagerungsplätze

In der amerikanischen Literatur wurde von Brown (1943) der Begriff der "trap efficiency" definiert und untersucht. Er versteht darunter den Anteil der Geschiebefracht, der in einem Becken zurückgehalten wird:

$$(9) \quad \text{trap efficiency (\%)} = \frac{\text{accumulation (vol)}}{\text{inflow (vol)}}$$

Mit Hilfe seiner Untersuchungen ist es Brown auch möglich, die trap efficiency in eine Formel zu fassen:

$$(10) \quad C_T = 100 \left( 1 - 1 / (1 + 0,1 \cdot C/W) \right)$$

Dabei bedeuten:  $C_T$  = trap efficiency in %  
 $C$  = Speichervolumen des Beckens in acrefeet  
 $W$  = Einzugsgebiet in Quadratmeilen

Die bestehend einfache Formel befriedigte nicht unbedingt, so dass spätere Autoren Aenderungs- und Ergänzungsvorschläge machten, die aber - so weit dem Autor bekannt - nie das Stadium einer neuen Formel erreichten. Moore et al. (1960) zitieren beispielsweise Borland, der die Aufenthaltszeit in die Formel einbauen möchte, und machen selbst den Vorschlag,  $C_T$  als Funktion von  $C/I$  ( $I$  = Inflow) darzustellen. Die Untersuchungen Browns bezogen sich (ausschliesslich?) auf Reservoirs, die immer eingestaut sind. Brune (1953) geht ebenfalls von der Brown-Relation aus, macht weitere Vorschläge und zieht auch "dry reservoirs", wie es die Geschiebeablagerungsplätze sind, mit ein. Allerdings führt er dazu praktisch keine Daten an. Dhillon et al. (1977) untersuchten in Indien zwei Wildbäche mit sehr feinem Geschiebe. Es scheint sich um eine Art Löss-Wildbäche zu handeln. Dabei kommen sie zum Schluss, dass die Ueberlegungen zur trap efficiency für grosse Reservoirs möglicherweise sinnvoll sind, dass sie aber in ihrem Fall keine brauchbaren Ergebnisse liefern.

Diese Feststellung überrascht nicht allzu sehr und dürfte auch für die alpinen Wildbäche mit grobem Geschiebe zutreffen, da die Verhältnisse hier anders gelagert sind als bei grossen Reservoirs:

- Bei den Ablagerungsplätzen handelt es sich um relativ kleine Becken.
- Ein Rückstau ist nur episodisch vorhanden.
- Die kleinen Einzugsgebiete liefern bedeutend unausgeglichene Ganglinien (Wasser und Geschiebe) als die grossen.
- Je kleiner ein Becken, desto grösser sind die Einflüsse von Randeffekten (Begrenzung der Ablagerungen, Coanda-Effekt, Walzen).

Trotzdem ist die Idee der trap efficiency nicht einfach zu verwerfen. Wahrscheinlich liesse sich für Geschiebeablagerungsplätze eine ähnliche Theorie aufbauen. Man müsste sie allerdings stärker differenzieren, indem bedeutend mehr Parameter miteinbezogen würden. Unter anderem wären mit grosser Wahrscheinlichkeit zu berücksichtigen:

- Form des Ablagerungsplatzes,
- Beziehung zwischen Abfluss und Rückstau,
- Höhenunterschied zwischen Ein- und Auslauf,
- Zuflussganglinien von Wasser und Geschiebe,
- Kornverteilungen.

Zudem hängt der Erfolg eines Ablagerungsplatzes bekanntlich nicht in erster Linie davon ab, wieviel Geschiebe darin liegen bleibt (weder in Relation zur Gesamtgeschiebefracht noch zum Beckenvolumen), sondern wie wirkungsvoll eine Geschiebespitze gebrochen und verteilt wird. Trotzdem sind im folgenden anhand von drei Diagrammen noch einige Ergebnisse zum Rückhaltevermögen der Ablagerungsplätze dargelegt.

Das Bild 70 zeigt das Rückhaltevermögen im Sinne der trap efficiency, wobei die Skala der Abszisse in Prozenten des Zuflusses ausgedrückt werden muss, d.h. 170 l (Ablagerungen) entsprechen 100%, 85 l entsprechen 50% usw. Man

erkennt, was schon früher zur Geltung kam: Das Rückhaltevermögen nimmt mit der Grösse des Ablagerungsplatzes zu. Dies überrascht bei beschränkter Geschiebefracht nicht weiter. Bild 72 bringt eine ähnliche Darstellung wie das zuvor erwähnte Bild 70. Beim Betrachten dieser Abbildung erkennt man, dass sich die Ablagerungen als Prozentzahl des möglichen Speichervolumens ( $V_{tot}$ ) für die Längen 100 cm und 150 cm nicht mehr allzu stark voneinander unterscheiden. Bild 73 zeigt dieses Ergebnis klarer. Die kurze Länge von 50 cm schneidet aus den früher dargelegten Gründen so schlecht ab. Als Ergebnis fällt auf, dass der Füllungsgrad (Ablagerung/Speichervolumen) für Geschiebefrachten, welche grösser sind als das Speichervolumen, bei längeren Ablagerungsplätzen eher besser ist als bei kürzeren, obschon diese schneller gefüllt sind. Dieses Ergebnis überrascht, wird aber im Bild 74 eindeutig belegt.

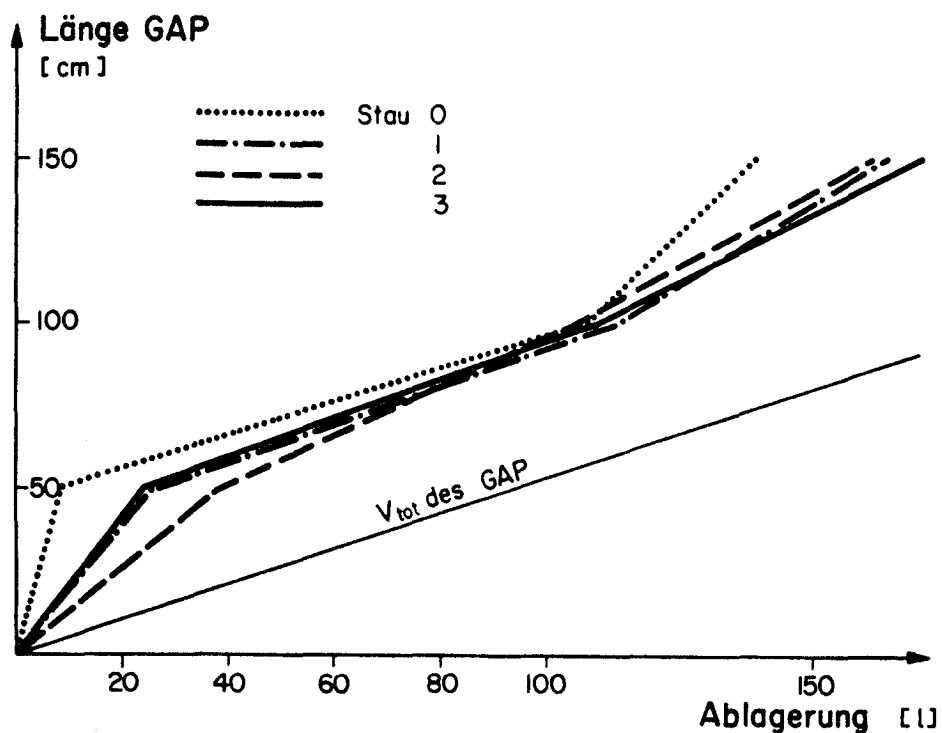


Bild 72 Gesamtablagerungen in Abhängigkeit von der Länge des Geschiebeablageplatzes (GAP) bei den Versuchen 205 - 270.

Die Diagramme im Bild 74 sind Ergebnisse aus Untersuchungen mit mehreren aufeinanderfolgenden Hochwassern, d.h. die bekannten Ganglinien von Wasser und Geschiebe wurden sechsmal hintereinander wiederholt, ohne dass das Becken dazwischen geleert wurde. Wie man sieht, wurde die optimale Füllung im kurzen Becken bereits nach dem ersten Hochwasser mehr oder weniger erreicht. Im mittleren Becken geschah dies nach zwei, im grössten sogar erst nach fünf Hochwassern. Das überraschende Ergebnis besteht nun darin, dass das grösste Becken mit Abstand den besten, das kleinste den schlechtesten Füllungsgrad aufweist (86% und 32 - 43%). Vom theoretischen Speichervolumen blieben also 14% (L = 150 cm), 32 - 47% (L = 100 cm) und sogar 57 - 68% (L = 50 cm) leer. Selbstverständlich waren alle Versuchsbedingungen (inklusive Stauverhältnisse) bei den total 18 Durchläufen identisch. Die detaillierten Zu- und Abflussganglinien dieser Versuche 213 bis 224 (L = 50 cm), 249 bis 260 (L = 100 cm) und 231 bis 242 (L = 150 cm) finden sich im Anhang 10.4.



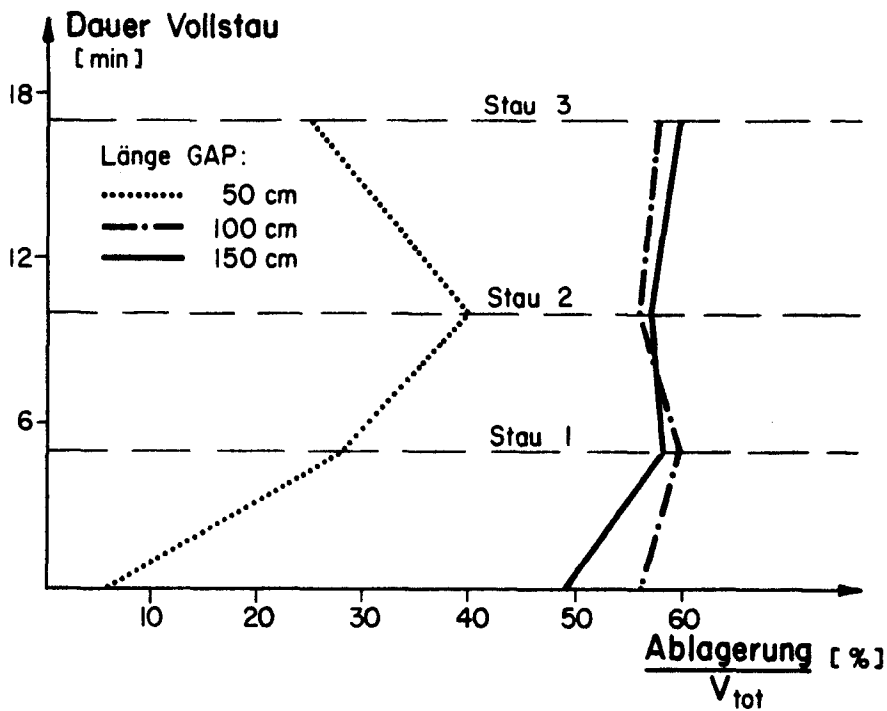


Bild 73 Die Ablagerungen in Prozenten des Beckenvolumens in Abhängigkeit vom Stau und der Länge des Geschiebeablagerungsplatzes (GAP) bei den Versuchen 205 - 270.

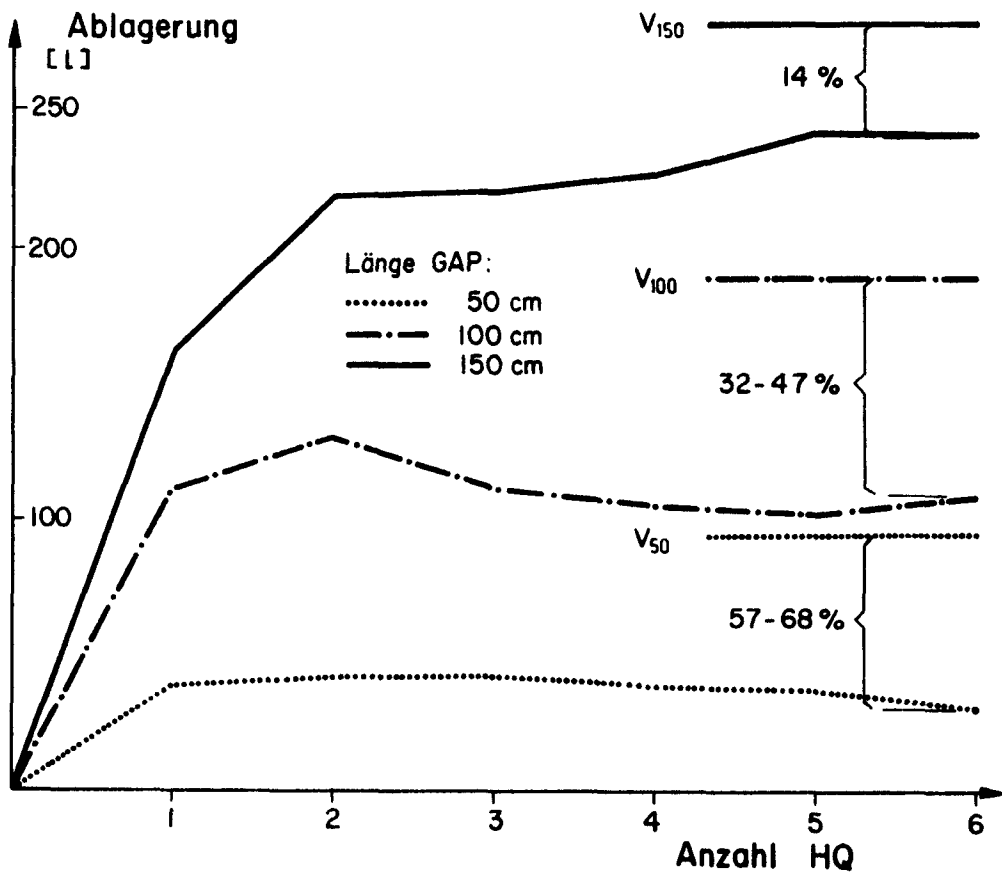


Bild 74 Die Füllung des Ablagerungsplatzes im Verlaufe von 6 Hochwasserwellen bei verschiedenen Beckenlängen. V<sub>50</sub>, V<sub>100</sub>, V<sub>150</sub> = maximale Speichervolumina für L = 50, 100, 150 cm.

Eine Verallgemeinerung des aufgezeigten Ergebnisses ist nicht ratsam, da die Hauptursache des Resultates noch nicht eindeutig ist. Es gibt zwei Möglichkeiten des Einflusses:

- Gesamtvolumen des Ablagerungsplatzes,
- Länge des Beckens.

Gegen die erste Ursache spricht die Tatsache, dass sich die Masse der drei Becken in den drei Dimensionen geometrisch unterscheiden. Das kleinste ist breiter als lang, das grösste hingegen länger als breit. Zudem wird der Einlaufabsturz relativ zur grösseren Länge immer kleiner. Für die Vergleiche von verschiedenen grossen Speichervolumina hätten geometrisch ähnliche Becken untersucht werden müssen. In der vorliegenden Arbeit ist dies nicht geschehen. So ist denn ziemlich sicher die Länge des Ablagerungsplatzes die Hauptursache für das obige Ergebnis, das damit auch eher einleuchtet: Wie bei den gestörten Ablagerungsformen gezeigt worden ist, wird im langen Becken der Mittelteil eines Schwemmkegels gebildet. Je länger nun ein Ablagerungsplatz, desto eher ist die Oberfläche dieses Kegelteiles mit einer Ebene zu vergleichen, womit auf der Seite immer kleinere Kubaturen unausgefüllt bleiben, wodurch der Füllungsgrad immer besser wird. Aus den früher erwähnten Gründen dürfen die Versuche mit der Beckenlänge von 50 cm zu den obigen Vergleichen nicht beigezogen werden.

Wie man sieht, ist die vorliegende Arbeit zum Aspekt des Rückhaltevermögens und Füllungsgrades der Ablagerungsplätze bei weitem nicht erschöpfend. Dazu müssten bedeutend mehr und anders konzipierte Versuche vorgenommen werden. Zu diesem Teilbereich der Problematik rund um die Geschiebeablagerungsplätze dürfte ein weiteres Forschungsprojekt gerechtfertigt sein.

## 7.5. Zur Form der Ablagerungsplätze

### 7.5.1. Praktische Erfahrungen

Seit man Geschiebeablagerungsplätze baut, versucht man, mit ihrer Grundrissform zu "spielen", d.h. durch die Variation der Form optimale Ablagerungen - und seit neuerer Zeit auch optimale Spülungen - zu erhalten. Weber (1967) gibt einen zusammenfassenden Ueberblick der Entwicklung dieser Formen. Bild 75 bringt eine Zusammenstellung aus diesem Aufsatz.

Die wichtigsten praktischen Erfahrungen lassen sich in vier Punkten zusammenfassen:

1. Eckige Formen bewähren sich nicht (Ecken sind nicht strömungsangepasst, es entstehen tote Winkel).
2. Extrem lange und extrem breite Formen sind ebenfalls ungünstig.
3. Man kann die Bauwerke entweder auf optimale Ablagerungen, oder aber auf gute Spüleffekte hin dimensionieren. Beide Ziele gleichzeitig zu erreichen, ist nicht einfach.
4. Zwei Formen haben sich gut bewährt:
  - langsame Aufweitung nach dem Einlauf, relativ rasche Verengung gegen die Rückhaltesperre (Birnenform, Stiel nach oben),
  - rasche Aufweitung nach dem Einlauf, langsamere Verengung gegen die Rückhaltesperre (Birnenform, Stiel nach unten).

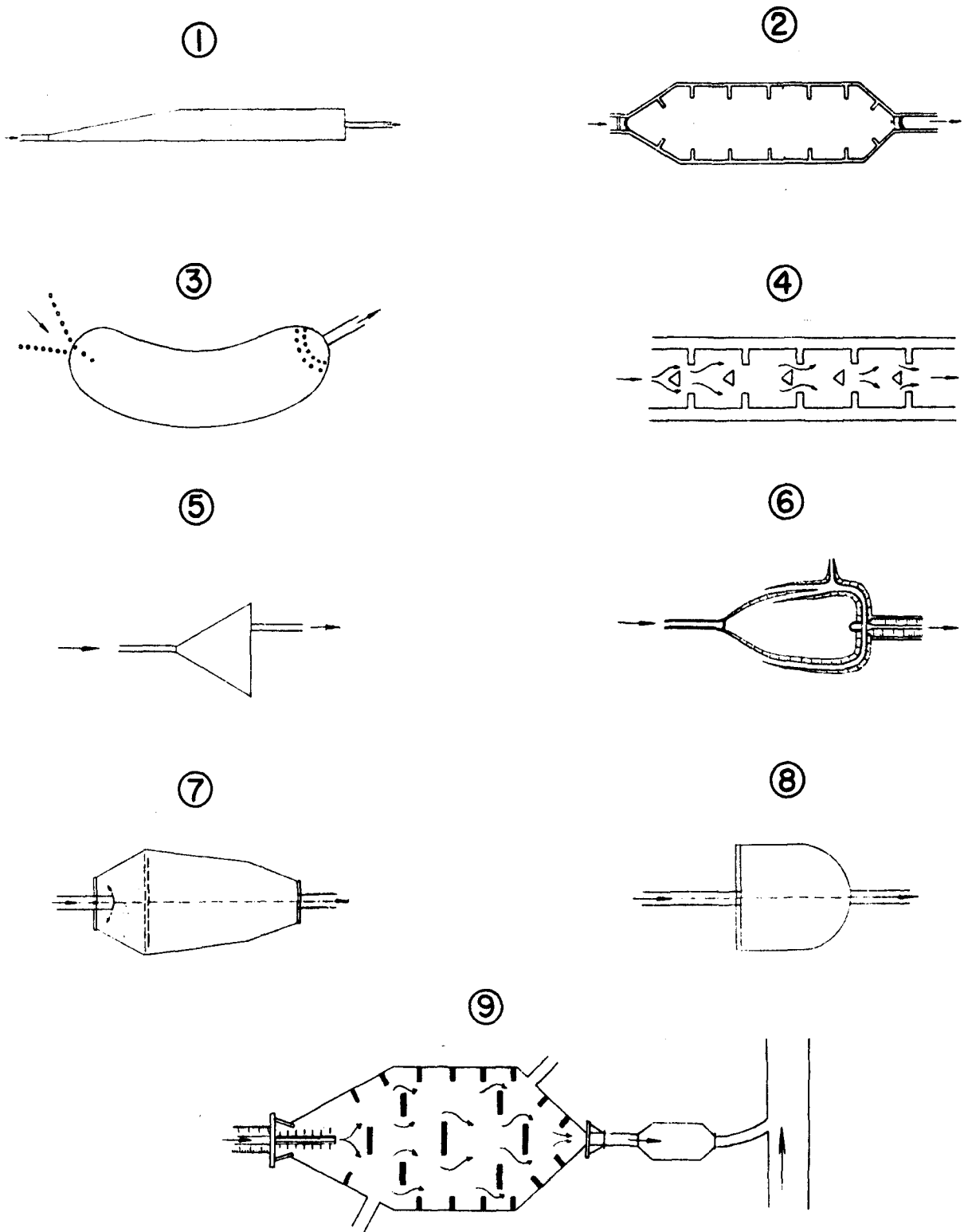


Bild 75 Alte Formen von Geschiebeablagungsplätzen nach Weber (1967):  
1 - Mittelalterliche Bauform um 1500 (Bannggebiet oder Wassermauer);  
2 - Venetz'sche Kammer um 1825; 3 - Nierenförmiger Ablagerungsplatz bei Mollis 1854; 4 - "Labyrinth" von Scipion Gras 1857; 5 - Ablagerungsplatz Schliere (Glarus) nach Legler 1868; 6 - Form nach Wey um 1907 am Oberrhein; 7 - Geschiebesortieranlage nach Weber 1935 (Trennwand soll Grobgeschiebe hinten zurückhalten); 8 - Form nach Kerschbaumer 1955; 9 - Geschiebeablagungsplatz nach Weber (um 1960) mit bis ins Becken geführter Einlaufkünette.

Heute ist man sich nicht immer einig, welche der beiden Birnenformen die günstigere ist. Mit eigenen Modellversuchen sollte darum dieser Frage nachgegangen werden.

### 7.5.2. Modellversuche von Hampel

Hampel (1968) kam aufgrund von Modellversuchen dazu, dass die günstigste Form eines Ablagerungsplatzes in einem Kreissegment mit Zentriwinkel 120 Grad besteht. Diese Form ist den schwemmkegelartigen Ablagerungen am besten angepasst. Für die Praxis vereinfacht, proklamiert Hampel ein Rechteck mit dem Seitenverhältnis 1:3 bis 1:2, wobei die kurze Seite in Fließrichtung liegt. Falls der Ablagerungsplatz ein Längsgefälle aufweist, muss hingegen die lange Seite in der Fließrichtung liegen.

Zu diesen Vorschlägen sind vor allem zwei Dinge zu bemerken. Einmal zielen die Hampel'schen Grundrissformen **ausschliesslich** auf die Ablagerungen hin. Sie sind für die selbsttätige Entleerung ungünstig, ganz besonders das quer zur Fließrichtung liegende Rechteck. Zum zweiten bilden sich die Ablagerungen unabhängig vom Längsgefälle des Beckens aus, wie das mit den eigenen Modellversuchen gezeigt werden konnte. Die optimale Form kann darum nicht einfach durch eine Drehung des Rechteckes um 90 Grad erhalten werden. Hingegen ist sie - und dies scheint Hampel nicht berücksichtigt zu haben - abhängig von der Höhe des Einlaufabsturzes und vom Längsgefälle.

Ein weiteres Argument spricht selbst bei ausschliesslicher Dimensionierung auf Ablagerungen gegen die kurzen und breiten Formen, auch wenn sie den Schwemmkegeln angepasst sind: Je weiter vom Einlauf entfernt, desto kleiner ist die Höhe des Schwemmkegels, so dass das Speichervolumen bei zunehmender Breite (und Länge) immer schlechter genutzt wird. Die auf Seite 148 zum Rückhaltevermögen gemachten Feststellungen bestätigen dies an konkreten Beispielen.

Neben der Grundrissform macht Hampel aufgrund der erwähnten Untersuchungen im weiteren einen Vorschlag für die Ausgestaltung des Beckenbodens. Dieser soll aus einer linken und einer rechten Ebene bestehen, welche gegen die Mitte geneigt sind, so dass das Wasser in der Verschneidung der beiden Ebenen (bei leerem Becken) abfließt. Die Verschneidung soll ein Längsgefälle aufweisen, was sinnvoll ist. Die Anordnung der beiden geneigten Ebenen soll das Wasser in der Mitte des Ablagerungsplatzes abfließen lassen, so dass die Umfassungsdämme nicht durch Erosion gefährdet sind. Falls man dieses Ziel konsequent anstrebt, müssen die schiefen Ebenen bis zu den Dammkronen hinaufgezogen werden, da es sonst immer eine Verschneidung zwischen Ebenen und Dämmen gibt, in welcher Erosion möglich ist. Unter diesen Bedingungen kann durch den Bau von zwei solchen Ebenen im Extremfall 50% des Beckenvolumens verlorengehen, wie man sich leicht ausrechnen kann. Es gibt noch weitere Gründe gegen den Vorschlag Hampels. Zusammen sind es die folgenden vier:

- Der Bau dieser Ebenen ist aufwendig. Sie müssten mindestens grob gepfästert sein, da sonst Erosion eintreten könnte, sobald eine Spülung den Beckenboden an einer Stelle erreicht hat.
- Vor allem bei nicht allzu schmalen Ablagerungsplätzen ist das Abhalten der Strömung von den Dämmen in den Spülphasen nicht vordringlich, da vielmehr die - der Spülung abträgliche - Tendenz des Wassers, in der Mitte des Beckens zu fließen, eher zu stark ausgebildet ist.

- An den Verschneidungen zwischen den schiefen Ebenen und den Umfassungsdämmen wären Erosionssicherungen trotzdem notwendig.
- Ein nicht unbedeutender Teil des Beckenvolumens geht bei der Ausbildung der beiden Ebenen für die Ablagerungen verloren.

Ein Längsgefälle kann darum für jeden Ablagerungsplatz empfohlen werden, wogegen eine V-förmige oder muldenartige Ausbildung der Querprofile nicht notwendig ist.

### 7.5.3. Eigene Modellversuche

Da die Frage der nur für Ablagerungen idealen Form einigermaßen geklärt ist (Anpassung des Grundrisses an die Schwemmkegelformen), und auch für die Spülungen die beste Form bekannt ist (kurzes und schmales Becken), ging es um die Erarbeitung von Hinweisen für Ablagerungsbecken, in welchen sowohl Ablagerung als auch Spülung gut funktionieren sollen. Zu diesem Zweck wurden die Formen der Erosionsränder miteinander verglichen und Versuche mit den beiden Birnenformen durchgeführt.

#### 7.5.3.1. Qualitative Auswertungen

Es bestand die Hoffnung, dass sich bei Spülungen, welche die seitlichen Begrenzungen nicht erreichten, am Ende sichtbare Erosionsränder bilden würden, die auf eine ideale Spülform hingewiesen hätten. Leider wurde diese Hoffnung durch die Versuche nicht erfüllt, da sich keine der drei extremen Formen gehäuft einstellte, nämlich

- der langgestreckte Erosionscanyon,
- die Birnenform mit Stiel nach unten,
- die Birnenform mit Stiel nach oben.

Meistens entstand eine Mischung zwischen den beiden Birnenformen, eine Art Zwetschge oder Zitrone. Die Bilder 76 bis 78 zeigen die drei oben erwähnten Erosionsumrissformen, wobei die Ränder mit weissen Wollfäden besser sichtbar gemacht worden sind.

Auf den Bildern beachte man vor allem bei beiden Birnenformen, dass die Erosionsränder ungefähr von den seitlichen Begrenzungen des Zulaufes ausgehen. Sie ziehen sich dann aber nicht in Richtung der Begrenzung der Rückhaltesperrenöffnung hin, sondern laufen zum Teil weit seitlich und mehr oder weniger senkrecht auf die Rückhaltesperre zu. Dies wiederum wäre ein Hinweis auf die Idealform als Birne mit Stiel nach oben. Aber, wie schon erwähnt, trat diese Form im Vergleich mit den anderen, über das ganze Becken gesehen, nicht gehäuft auf.

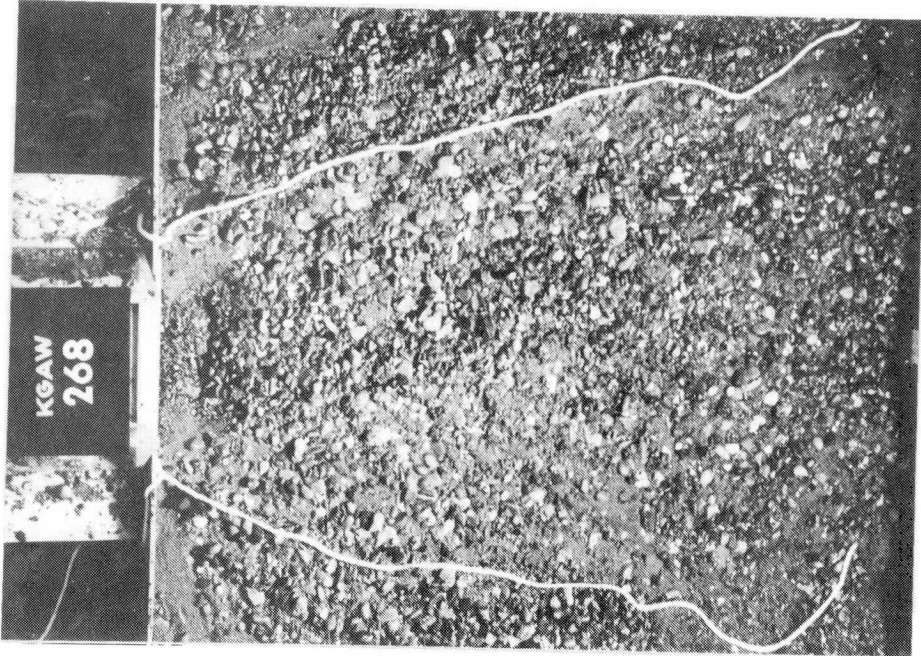


Bild 76 Am Ende des Versuchs 268 zeigten sich die Erosionsränder in den Ablagerungen (mit weissen Fäden nachgezogen) ganz grob in Birnenform mit Stiel nach oben (links im Bild, Fließrichtung von links nach rechts).

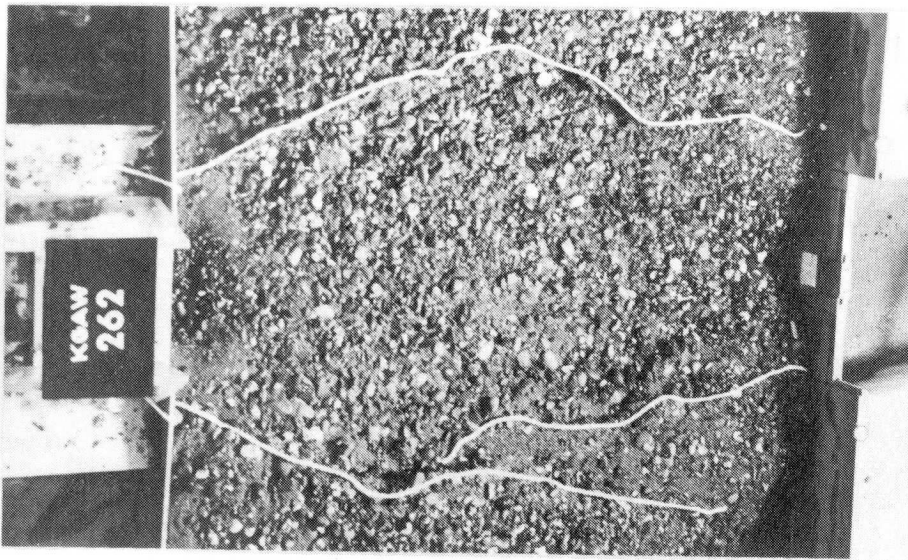


Bild 77 Am Ende des Versuchs 262 ergaben die Erosionsränder im Gegensatz zu Bild 76 die Birnenform mit Stiel nach unten (rechts im Bild).

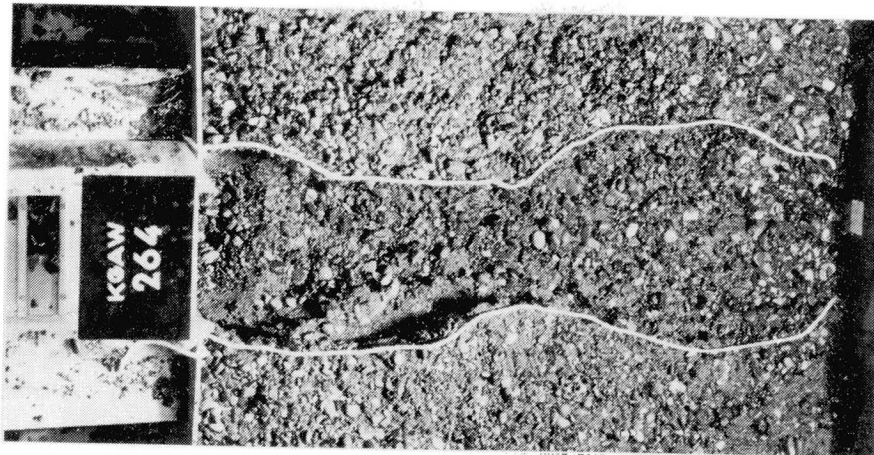


Bild 78 Nach Versuch 264 verliefen die Erosionsränder mehr oder weniger nah beieinander und parallel. Auf die Phase der Tiefenerosion war kaum eine solche der Seitenerosion erfolgt (Fließrichtung von links nach rechts).

#### 7.5.3.2. Quantitative Auswertungen

Im 150 cm langen Ablagerungsplatz wurden die beiden Birnenformen, wie in Bild 79 dargestellt, nachgebildet und bei den Versuchen die von früher bekannten beiden Ganglinien für Wasser und Geschiebe verwendet.

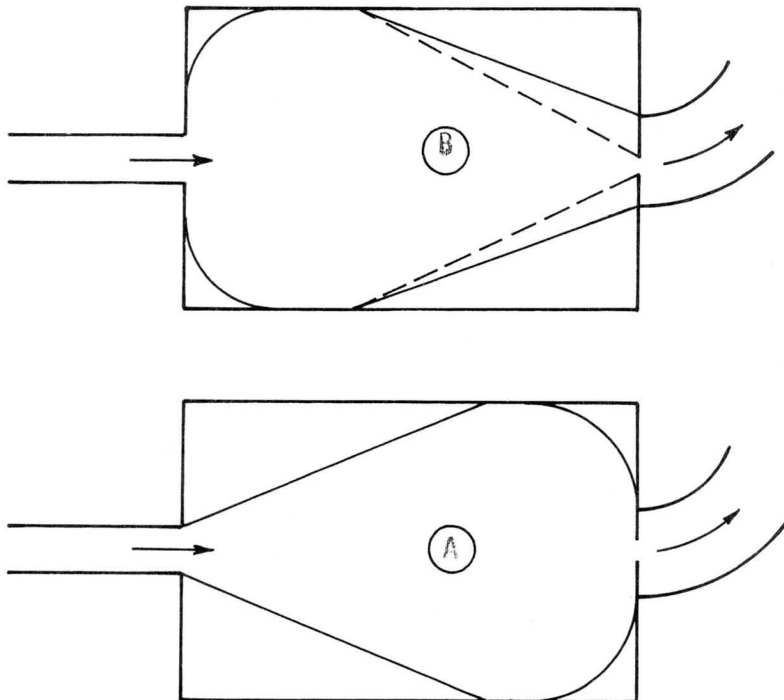


Bild 79 Die beiden in den Modellversuchen verwendeten Spezialformen: A = Birnenform mit Stiel nach oben, B = Birnenform mit Stiel nach unten. Länge der Modelle 150 cm, Breite 100 cm.

Die Versuche 301 bis 310 behandelten den Fall ohne Einlaufabsturz, die Versuche 311 bis 318 und 321/322 jenen mit Einlaufabsturz. Die Ganglinien all dieser Versuche sind im Anhang 10.4. zu finden. Drei Ergebnisse fallen auf:

1. Im Vergleich zum gleich langen rechteckigen Ablagerungsplatz ist der Spüleffekt besser. Im Unterwasser entstehen keine annähernd so grossen Geschiebetriebsspitzen, wie sie bei der Hochwasserspitze ins Becken gelangen. Eine Ausnahme bilden allerdings die Versuche 307 bis 310 (Birne mit Stiel nach oben, kein Einlaufabsturz): Es wird relativ viel Material gespült, wobei Spitzen wie im Zulauf entstehen. Das gleiche geschieht im Versuch 301/302, der aber, durch Zufälligkeiten bedingt, extrem ausgefallen ist. Immerhin erhält man durch diese drei Versuche wieder einen Hinweis, dass Ablagerungsplätze ohne Einlaufabsturz nicht vorteilhaft sind.
2. Für die Birnenform mit Stiel nach unten gilt, dass die Spülung umso besser ist, je näher die Umfassungsdämme unten an die effektive Sperrenöffnung kommen (Düsenwirkung). Mit weiten Dämmen (15 cm links und rechts der Sperrenmitte endend) wurden ohne Einlaufabsturz total 6 l, mit Absturz 14 l gespült, mit engen Dämmen (bis zur Oeffnung gezogen) hingegen 39 l und 38 l (Versuche 303 bis 306 und 315 bis 318).
3. Die Birnenform mit Stiel nach oben bewährt sich für die Spülungen eindeutig besser als jene mit Stiel nach unten. Für die entsprechenden Vergleiche fällt praktisch nur Versuch 301/302 aus dem Rahmen, doch sei dabei wieder einmal an die Reproduzierbarkeit erinnert. Man vergleiche insbesondere die Versuche 311/312 mit 321/322 (69 und 48 l gespült), 313/314 mit 315/316 (37 und 14 l), und ohne Absturz 307/308 mit 303/304 oder 305/306 (52 l und 6 und 39 l gespült).

Vor allem das dritte Ergebnis ist interessant und für die praktische Anwendung beachtenswert. Als Gründe für das positive Abschneiden der Birnenform mit Stiel nach oben im Hinblick auf die den Ablagerungen folgenden Spülungen kann man angeben:

- Die Wasserströmung wird im oberen Teil bei den mächtigeren Ablagerungen an einer Ausbreitung gehindert und kann darum effektvoller spülen.
- Die Erosionsränder verlagern sich im unteren Teil des Beckens auch bei ungesteuerter Spülung bis praktisch zur Sperre relativ weit von der Abflussöffnung auf die Seiten, wie bei den qualitativen Auswertungen gezeigt worden ist.

## 7.6. Zusammenfassung

Als Parameter zur Steuerung der Ablagerungen und Spülungen kommen das Einlaufbauwerk, die Rückhaltesperre und der Ablagerungsplatz mit seinem Volumen und seiner Form in Frage. Das Einlaufbauwerk lenkt die Reichweite der Ablagerungen (Höhe des Absturzes) im Becken und zurück ins Gerinne. Mit dem Rückhaltebauwerk werden Wasserstau und Rückhalteeffekt gesteuert. Im Gegensatz zum Reten-dieren stellen das Dosieren und Sortieren an die Rückhaltesperre differenziertere Anforderungen, die mit Balkenöffnungen und Schlitzten bedingt erfüllt



werden können. Insbesondere wird das Geschiebe normalerweise nur in sehr beschränktem Ausmass sortiert, weil sich hinter liegendebliebenem Grobgeschiebe immer auch das feinere Material ablagert. Eine effektvolle Sortierung geschieht im Gegensatz zur Dosierung nicht am Rückhaltebauwerk, sondern im Ablagerungsplatz, zwischen Ein- und Auslauf. Bei der Dosierung werden Spitzen gebrochen und umverteilt.

Der Vergleich von Schlitz- und Balkensperre ergibt, dass sich horizontale Oeffnungen bei starkem Geschiebetrieb (kein Treibholz) weniger rasch verlegen als vertikale der gleichen Grösse.

Ein Wasserrückstau im Ablagerungsplatz sollte nicht a priori ausgeschlossen werden. Falls das Verlandungsgefälle kleiner ist als die Höhendifferenz zwischen Ein- und Auslauf im Becken, ermöglicht ein Stau eine bessere Nutzung des Speichervolumens.

Die in einem Ablagerungsplatz zu erwartenden Geschiebekubaturen können mit fünf Methoden ganz grob abgeschätzt werden: Berechnungen über die Denudationsraten im Einzugsgebiet, über die alten Wildbachschwemmkegel im Tal, anhand der Kubaturen früherer Ereignisse, durch eine umfassende und kompetente Beurteilung der Geschiebeherde im Einzugsgebiet und schliesslich - nicht sehr zuverlässig - mit zwei Formeln direkt (Hoffmann und Kronfellner-Kraus) oder mit Geschiebetriebüberlegungen indirekt.

Die Länge eines Ablagerungsplatzes kann einerseits für wirkungsvolle Ablagerungen zu kurz sein (Rückhaltesperre im Bereich des Wassersprungs im Becken), oder sie kann für effektvolle Spülungen zu lang sein. Das Verlandungsgefälle der Ablagerungen lässt sich entweder von der Natur kopieren oder formelmässig schätzen (Formel von Hampel, Geschiebetriebgleichung von Smart/Jäggi).

Die für Reservoirs gefundenen Beziehungen der "trap efficiency" können auf die relativ kleinen Ablagerungsplätze nicht angewendet werden. Aehnliche Untersuchungen ergaben, dass der Füllungsgrad der längeren Becken besser ist als jener der kürzeren Becken, wenn die Geschiebefrachten grösser sind als das Speichervolumen des Ablagerungsplatzes.

Die Grundrissform eines Geschiebeablageungsplatzes kann relativ einfach optimiert werden: Für Ablagerungen = Anpassung an die Schwemmkegelform, für Spülungen = kurz und schmal. Für eine Kombination haben sich in der Praxis die eckigen und extremen Formen (lang oder breit) im Gegensatz zu den beiden "Birnenformen" (Stiel nach oben bzw. nach unten) nicht bewährt. In den Modellversuchen konnte gezeigt werden, dass sich die Birnenform mit Stiel nach oben für effektvolle selbsttätige Entleerungen am besten eignet.

Willst's am Ende  
Gar nicht lassen?  
Will dich fassen,  
Will dich halten,  
Und das alte Holz behende  
Mit dem scharfen Beile spalten.

## 8. Das Treibholz und die damit verbundenen Probleme

Es ist bekannt, dass sich viele Probleme in der Wildbachverbauung nicht stellen würden, wenn die Bäche lediglich Wasser und Geschiebe brächten. Mit praktisch jeder Hochwasserwelle wird in einem Wildbach aber auch Treibholz in oft beträchtlichen Mengen transportiert. Grössere Aeste, Wurzelstöcke oder ganze Baumstämme verlegen sich dann an engen Stellen im Gerinne und an den Sperrenöffnungen. Dadurch entstehen unkontrollierbare Rückstau, und bei plötzlichem Bruch solcher Verklausungen oft Flutwellen und Murgänge, welche unterliegende Verbauungen zerstören können. Manche Bauwerke könnten auf Wasser und Geschiebe problemlos und zuverlässig dimensioniert werden; beim Anfall von Treibholz hingegen entstehen Situationen, die im wahren Sinn des Wortes unberechenbar sind.

Es ist darum überraschend - oder vielleicht gerade der Grund dafür? - dass es zu dieser Problematik der Wildbachverbauung praktisch keine einschlägigen Fachartikel gibt. Das Treibholz wird zwar sehr oft erwähnt, meistens aber nur nebenbei behandelt. Dies ist symptomatisch und geschieht darum auch in dieser Arbeit... Trotzdem soll im folgenden etwas weiter ausgeholt werden als üblich, um den Antworten auf die vielen noch hängigen Probleme rund um das Treibholz näherzukommen, so z.B. der Frage, ob das Treibholz im Normalfall schwimmt oder nicht.

### 8.1. Das Treibholz als Material

#### 8.1.1. Materialeigenschaften

Elementar-chemisch besteht Holz aus 50% Kohlenstoff, 44% Sauerstoff und 6% Wasserstoff, oder aus 50% Cellulose, 25% Hemicellulose und 25% Lignin. Die Cellulosen nehmen Wasser auf und sind weiss, im Gegensatz zum Lignin, das kein Wasser aufnimmt und dunkel gefärbt ist. Man unterscheidet zwischen dem Splintholz und dem Kernholz. Ganz junges Holz weist kein Kernholz auf. Dieses entsteht beim Alterungsprozess, indem die innersten Zellen des Splintholzes absterben und damit zu Kernholz werden. Der Anteil des Kernholzes steigt darum während des Alterns dauernd. Die meisten Hölzer bestehen aus diesen lebenden und toten Zellen, es gibt aber auch Holzarten (z.B. Buche), die kein Kernholz aufweisen.

Die Schwimmfähigkeit hat das Holz vom Kernholz, da das Splintholz nicht bis sehr schlecht schwimmt, weil es wegen der Transportbahnen für die Flüssigkeiten sehr feucht ist. Man kann darum sagen, dass älteres Holz, von Ausnahmen abgesehen, besser schwimmt als junges Holz.

Unter Reindichte des Holzes versteht man die porenfreie Holzmenge pro Volumen. Es überrascht nun, dass die Werte dieser Reindichte über alle Holzarten recht wenig streuen, nämlich zwischen 1,47 und 1,55 g/cm<sup>3</sup>. Als Durchschnitt kann mit 1,52 g/cm<sup>3</sup> gerechnet werden. Das heisst mit anderen Worten, dass

das porenfreie Grundmaterial jedes Holzes, ob es sich nun um Balsa oder um Mahagoni handelt, nicht schwimmt. Man kann dies recht schön zeigen durch Kochen des Holzes während ein bis zwei Tagen, oder durch Evakuieren im Exsiccator (im Unterdruck sinkt das Holz sofort ab).

Die gemachten und noch folgenden Angaben stammen aus Kollmann (1951) und von Kucera (1982). Im Gegensatz zur Reindichte liegen die Werte der Raumdichte (früher: spezifisches Gewicht) des Holzes unter  $1 \text{ g/cm}^3$ . Wieder etwas überraschend für den Nicht-Fachmann ist die Tatsache, dass die Raumdichte von den Wurzeln über den Stamm bis zu den Aesten dauernd zunimmt. Das Holz der Aeste weist die grösste Festigkeit und den höchsten Fasergehalt auf, wogegen jenes der Wurzeln die grössten Gefässe enthält. Als Folge davon bestehen die Aeste aus dem schwersten, die Wurzeln aus dem leichtesten Holz eines Baumes. Die Wurzelstöcke sind darum in der Wildbachverbauung nicht wegen ihres grossen Gewichtes besonders gefürchtet - sie bestehen im Gegenteil aus dem leichtesten Holz -, sondern sie bleiben überall hängen und bilden Verklausungen wegen ihrer in alle Richtungen ausladenden Formen.

Unter der Feuchtigkeit des Holzes versteht man:

$$(11) \quad U (\%) = \frac{G_u - G_0}{G_0} \cdot 100$$

Dabei bedeuten: U Feuchtigkeit in %  
G<sub>u</sub> Feuchtgewicht  
G<sub>0</sub> Trockengewicht

Die Feuchtigkeit kann bis zu 400% betragen und ist im toten, trockeneren Kernholz kleiner (60 - 70%) als im lebenden Splintholz (normalerweise bis 200%). Wenn das Holz austrocknet, beginnt es bei Feuchtigkeiten unter 30% zu schrumpfen, bzw. zu quellen, falls es wieder feuchter wird. Wie aus den obigen Zahlen zu ersehen ist, weist der lebende Baum eine so tiefe Feuchtigkeit praktisch nie auf. Bei 30% ist alles Wasser im Holz gebunden. Schrumpfen und Quellen weisen in der Dimensionsänderung etwa die gleichen Werte auf, wobei eine Hysterese besteht. Im Durchschnitt liegen die Grössen längs bei 0,1 - 0,2%, radial bei 1 - 2% und tangential bei 2 - 4%. Die Unterschiede in den drei Richtungen sind also recht gross:

$$\text{längs} : \text{radial} : \text{tangential} = 1 : 10 : 20.$$

Für die Rissbildung bei der Austrocknung ist der Unterschied des Schrumpfens in einem Verhältnis von 1 : 2 zwischen radialer und tangentialer Längenänderung verantwortlich. An der Luft trocknet das Holz bis zu seinem sogenannten lufttrockenen Wert aus. Dieser liegt in den Bergen bei einer Feuchtigkeit von ca. 16%, im Mittelland bei ca. 18% und wird bei geschnittenem Holz nach etwa einem halben Jahr erreicht, bei einem unverletzten Baumstamm hingegen erst nach einigen Jahren. In dieser Zeit beginnt die Zerstörung des Holzes durch vier Prozesse: Rissbildung, Vermorschung, Tätigkeiten von Pilzen und Insekten. Sie können die Austrocknung begünstigen oder verzögern.

Zur Frage, wie lange Holz im Wasser schwimmt, d.h. wie lange es dauert, bis sich ein Holzstück gesättigt hat und dann absinkt, gibt es nach Kucera (1983) keine Untersuchungen. Es spielt dabei eine Rolle, zu welcher Jahreszeit ein Holzstück abgebrochen oder geschlagen wird (seine Feuchtigkeit kann zwischen dem Maximum im Frühling und dem Minimum im Winter um 10 - 20% schwanken), woher es stammt und wie alt es ist. Der Autor hat in einer kleinen, nicht intensiv durchgeführten Untersuchung frische Nadelholzstücke (Scheite) ins Wasser

gelegt. Sie schwammen nach einem Jahr immer noch an der Oberfläche. Daneben wurden zwei aus einer Baggerung in einem Ablagerungsplatz stammende Holzstücke eingelegt. Obschon sie vom Bagger aus ca. 5 m Tiefe heraufgeholt worden waren, schwammen sie nach einer Trocknungszeit von drei Tagen (Liegen an der Luft) bereits wieder. Ob sie allerdings vorher nicht mehr schwimmfähig oder in den Geschiebeablagerungen eingepackt gewesen waren, konnte nicht festgestellt werden. Eines der Hölzer wurde schwimmend eingelegt, das andere in etwa 40 cm Wassertiefe festgehalten. Beide Hölzer schwammen noch nach einer Versuchsdauer von anderthalb Jahren. Es muss dazu vielleicht ergänzt werden, dass sich an den Hölzern trotz wiederholten Wasserwechsels mit der Zeit eine ansehnliche Algenschicht bildete, welche möglicherweise das Eindringen des Wassers ins Holz verzögerte.

Einige Zusatzinformation erhält man aus den Erfahrungen mit der früheren Holztrift (Schwab 1983, Koller 1954). Bei diesem Verfahren des Holztransportes in den Gewässern kannte man die sogenannten "Senklinge", die Hölzer, die abgesunken sind. Nach dem Triften wurden die Senklinge aus dem Bachbett gehoben, am Ufer getrocknet und bei der nächsten Trift wieder ins Wasser geworfen. Angaben über den Prozentsatz der Senklinge im Vergleich zur gesamten Triftholzmenge konnten keine gefunden werden. Immerhin macht Schwab aber folgende Angaben:

- Fichtenholz sinkt praktisch nie.
- Kiefern- und Lärchenholz sinkt mit der Zeit möglicherweise.
- Tannenholz sinkt im Vollaft nach 2 - 4 Wochen, in trockenerem Zustand nach mehreren Wochen, wenn es im Wasser liegt.
- Buchenholz schwimmt nur selten, im besten Fall schwebt es im Wasser.

Senklinge entstehen in vier Phasen:

1. Schwimmphase; Fasern beginnen sich zu sättigen.
2. Einseitige Sättigung des Holzstückes, so dass es auf einer Seite eintaucht, auf der anderen aus dem Wasser ragt.
3. Schwebphase: Holzstück schwebt unter Wasser.
4. Sinkphase (spezifisches Gewicht über  $1 \text{ g/cm}^3$ ).

Im Einklang mit den Beobachtungen des Autors sagt Schwab (1983), dass das über eine gewisse Strecke transportierte und später eingeschotterte Treibholz später kaum mehr schwimmfähig wird. Die Ursache dürfte die durch Feinstmaterial und Schlamm verdichtete Oberfläche sein.

#### 8.1.2. Herkunft

Man kann vier Treibholzerde unterscheiden:

- Altholz  
.....

Das Holz lag vor dem Abtransport schon einige Zeit im Bachbett. Es kann eingeschottert sein, ev. auch unter Wasser, so dass seine Raumdichte über  $1 \text{ g/cm}^3$  werden kann. Oft ist es morsch und darum sehr brüchig.

- Rutschungen  
.....

Während des Hochwassers entstehen Rutschungen und Waldabbrüche, womit auch ganze Bäume ins Gerinne gelangen. Im Gegensatz zu den mit Lawinen eingetragenen Stämmen kommen die Bäume unzerkleinert und relativ langsam in den Bach. Sie sind damit sperriger, fallen aber oft mit der Krone voran ins Gerinne, so dass sie vom Hochwasser relativ leicht entastet und in Fließrichtung gerichtet abtransportiert werden können.

- Lawinen  
.....

Fließlawinen bringen viele Stämme und Äste, weniger Strünke; Staublawinen hingegen bringen oft bereits zerkleinerte Baumstücke und kaum Strünke in den Bach. Allgemein liegt das meistens stark beschädigte Holz kreuz und quer, vermischt mit Schnee und Dreck im Gerinne, so dass es nur schlecht abtransportiert werden kann.

- Holzlager  
.....

Aus energetischen Gründen wurden die Sägereien früher oft an die Bäche gebaut, wo sie z.T. heute noch stehen. Ihre Holzlager liegen nicht selten aus Platzgründen nicht nur neben, sondern über dem Bachlauf. Sie sind damit bei Hochwasser unter Umständen ideale Treibholzlieferanten.

Obschon eine Verallgemeinerung nicht unbedingt zulässig ist, kann man doch sagen, dass das Treibholz aus dem Altholz im Durchschnitt nicht sehr gefährlich ist, die Rutschungen - falls nicht im Extremfall ganze Waldparzellen in kurzer Zeit in den Bach abfahren - vom Bach auch noch einigermaßen verarbeitet werden können, wogegen das Lawinenholz sehr oft zu Verklausungen führt, hinter denen sich Wasser und Geschiebe stauen und bei Bruch zu murartigen Flutwellen werden können. Auf der anderen Seite sind aber auch Wildbäche bekannt, in denen dermaßen viel Altholz liegt, dass das beschriebene Phänomen auch damit eintreten kann. Aber, wie gesagt: Eine Verallgemeinerung ist sehr schwierig. Einmal mehr muss auch in dieser Beziehung jeder Wildbach gesondert beurteilt werden.

### 8.1.3. Menge

Angaben über die zu erwartenden Treibholzmengen sind in allgemeiner Art nicht möglich und sinnvoll. Praktische Beispiele zeigen, dass die Grössenordnungen, ähnlich wie bei den Geschiebefrachten, sehr stark schwanken. Wieder seien der Schächen und die Melezza erwähnt:

- Der Schächen brachte 1977 auf 100 km<sup>2</sup> 500 - 1000 m<sup>3</sup> Holz, d.h. 5 - 10 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>;
- Die Melezza hingegen brachte auf 140 km<sup>2</sup> 1978 nicht weniger als 25'000 m<sup>3</sup> Holz, d.h. 180 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>.

Bei der Melezza handelt es sich unbestritten um einen Extremfall, vor allem wenn man das grosse Einzugsgebiet berücksichtigt. Für kleinere Einzugsgebiete

dürften hingegen solche spezifischen Mengen bei Extremereignissen trotzdem realistisch sein.

Angaben über zu erwartende Mengen sind schwierig und nur durch eine Beurteilung des Einzugsgebietes möglich. Dabei müssen vor allem die Ufer des Wildbaches, rutschgefährdete Hänge und Lawinenzonen berücksichtigt werden. Ob eine Angabe über die Holzmenge überhaupt sehr viel bringt, muss man sich von Fall zu Fall überlegen. Sehr oft ist das Unangenehme am Treibholz ja bekanntlich nicht seine Menge, sondern die verursachten Verklausungen mit ihren Folgen. Dafür ist die Menge aber praktisch unbedeutend, da im konkreten Fall ein Stamm oder wenige Äste eine Katastrophe auslösen können.

#### 8.1.4. Größenverteilung und Sperrigkeit des Treibholzes

Das Ausgangsmaterial des Treibholzes besteht praktisch immer aus ganzen Bäumen. Diese werden z.T. bereits beim Transport ins Gerinne zerkleinert (Lawinenholz), spätestens aber im Wildbach selbst bei grosser Wasserführung in kürzester Zeit entastet und zerbrochen. Ähnlich wie die Geschiebekörner werden die Holzstücke während des Wassertransportes weiter zerkleinert. Als Treibholz findet man somit:

- Baumstrünke und Wurzelstöcke
- Baumstämme bzw. Teile davon
- Äste
- Zweige
- Feinstmaterial (Laub, Nadeln)
- Besonderes (Bretter, Sticker, Pfähle, Balken usw.)

Für wirkungsvolle Verklausungen genügen Baumstämme nicht. Es sind dazu auch grössere Äste und Zweige nötig. Diese können auch allein Verstopfungen verursachen. Kronfellner-Kraus (1970) schreibt dazu: "Auch kleine Äste haben den Balkenabstand unterteilt und Geschiebe aufgehalten." Zu einer effektvollen Verdichtung der Verklausungen gehört das Feinstmaterial. Die unangenehmsten Treibhölzer sind unbestritten die Wurzelstöcke. Wegen ihrer dreidimensionalen Ausdehnung schwimmen sie nur bei grösseren Wassertiefen, sonst werden sie gerollt und geschoben. Ohne viele andere Zugaben führt ihre Ablagerung beinahe immer zu unangenehmsten Verklausungen.

Die Sperrigkeit des Treibholzes hängt vor allem von seinem Alter und der Holzart ab. Am unangenehmsten sind die Wurzelstöcke.

## 8.2. Transport

### 8.2.1. Zum Zeitpunkt

Für eine durchdachte Planung der Massnahmen gegen das Treibholz im Geschiebeablagerungsplatz ist es nicht unbedeutend, zu wissen, in welchem Zeitpunkt der Hochwasserwelle mit Holz zu rechnen ist. Kommt das Treibholz bereits mit

der ansteigenden Wassermenge (dann ist die Verklauungsgefahr am grössten), kommt es mit der Spitze der Welle (dann bildet sich unter Umständen ein Holzteppich bei Wasserstau im Becken), oder kommt es sogar erst beim Zurückgehen der Hochwasserspitze und richtet dadurch aller Wahrscheinlichkeit nach den kleinsten Schaden an, indem es lediglich den letzten Teil der Spülung behindert?

In Abhängigkeit von den vier aufgeführten, verschiedenartigen Treibholzherden und nach Zeller (1983) kann zum Zeitpunkt des Treibholzanfalles in einem Ablagerungsplatz folgendes gesagt werden:

- Vor der Hochwasserspitze ist nur mit wenig Holz zu rechnen, weil einerseits die Kraft des Wassers nicht ausreicht, das Altholz aus dem Bachbett zu lösen, und weil dieses andererseits normalerweise in nicht extremen Mengen vorhanden ist. Die Sache kann anders aussehen, wenn sehr viel bereits stark zerkleinertes Staublawinenholz im Gerinne liegt.
- Bedingt durch Uferabbrüche und Bruch von Verklauungen wird das meiste Holz zusammen mit der Hochwasserspitze und kurz nachher den Ablagerungsplatz erreichen.
- Der ungünstigste Fall tritt ein, falls sich durch Bruch einer extremen Verklauung o.ä. eine Wellenfront bilden kann. Durch die grossen Kräfte eines solchen Ereignisses wird alles Holz aus dem Gerinne geräumt und auch sämtliche kleineren Verklauungen werden abgespült (Zwischendeponien zerstört). Eine solche Front ist allerdings kaum je voraussehbar.
- Jede Hochwasser- und damit auch jede Holzwellen kann sich jedoch in Puffer- und Speicherstrecken wieder verflachen, so dass sie nicht so konzentriert im Ablagerungsplatz ankommt, wie sie kurz nach der Entstehung war. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Dämpfung ist umso grösser, je weiter oben sich die Welle bildet.

#### 8.2.2. Zur Art des Transportes

Selbst unter praktisch tätigen Wildbachverbauern wird immer wieder diskutiert, ob das Treibholz wirklich immer schwimmt, oder ob es nicht oft unter Wasser oder sogar zusammen mit dem Geschiebe transportiert wird. Nach Gesprächen mit verschiedenen Fachleuten und Praktikern (auch mit Erfahrung in der Holztrift) und nach eigenen Beobachtungen in der Natur kann zusammenfassend festgehalten werden, dass das Treibholz meistens schwimmend transportiert wird. In nicht allzu turbulenten Bachstrecken oder in einem Rückstau schwimmt es zum grössten Teil an der Oberfläche auf.

Für diese Erkenntnis sprechen die folgenden Beobachtungen und Tatsachen:

- In stark erosionsgefährdeten Einzugsgebieten von Wildbächen gibt es üblicherweise vor allem leichtes Nadelholz und wenig kaum schwimmfähiges Laubholz.
- Wie unter den Materialeigenschaften gezeigt, muss ein Holzstück einige Wochen ganz im Wasser liegen, bis es nicht mehr schwimmt. Diese Voraussetzungen sind selbst bei Altholz praktisch nie, bei Lawinen- und Rutschungsholz in keinem Fall gegeben.

- Das spezifische Gewicht des Wassers in einem Wildbach bei Hochwasser ist wegen der Schwebstoffe und Feinpartikel des Geschiebes bis an die Oberfläche über  $1 \text{ g/cm}^3$ , es kann bei sehr hohen Geschiebekonzentrationen und bis zum murartigen Abfluss sogar bedeutend darüber liegen. Damit wird das Holz relativ noch leichter, womit sein Schwimmvermögen steigt.
- In ungestörten Geschiebeablagerungen von Wildbächen findet man nur ganz selten Holzeinschlüsse, was bedeutet, dass das Treibholz mit dem Wasser oberflächlich abtransportiert worden ist.
- In dauernd eingestauten Ablagerungsplätzen findet man Holzeinschlüsse nur mehr oder weniger in der Mitte, bzw. im Bereich der turbulenten Strömung, nie aber auf den Seiten, in den Zonen der ruhigen Wasserwalzen oder in Bereichen, wo die Strömung praktisch ganz fehlt (Ecken, tote Winkel).

Gegen das oberflächliche Schwimmen des Treibholzes sprechen zwei immer wieder gemachte Beobachtungen:

- Beim Betrachten eines Hochwasserabflusses fällt auf, dass nur wenig Holz an der Oberfläche schwimmt. Trotzdem wird aber sehr viel Holz im Unterlauf oder in einem Ablagerungsplatz angeschwemmt.
- Man findet hin und wieder eingeschotterte Holzstücke, oft sogar richtige Nester von Holz in den Geschiebeablagerungen.

Zum ersten Punkt ist zu sagen, dass die entsprechenden Beobachter meistens durch zwei Tatsachen getäuscht werden. Einmal ist der Hochwasserabfluss in jedem Wildbach sehr stark braun und dreckig gefärbt. Zudem ist er sehr unruhig. Dadurch sind selbst bei guter Beobachtung Holzstücke nur sehr schwer zu erkennen. Zum zweiten ist es gar nicht möglich, dass ein Holzstück auch nur über kürzere Zeit an der Oberfläche schwimmt, weil der Abfluss sehr unruhig und turbulent ist, so dass die Hölzer immer wieder in die Tiefe gezogen werden.

Die im zweiten Einwand erwähnten Holzkonzentrationen in den Ablagerungen existieren tatsächlich da und dort. Gerade die Tatsache, dass es sich aber beinahe immer um mehrere Hölzer handelt, sollte den Beobachter nachdenklich stimmen. Der Grund für solche eingeschotterten Holzkonzentrationen liegt denn auch immer bei den lokalen Strömungsverhältnissen. Während der Bildung der Holzablagerungen war an den betreffenden Stellen eine lokal bedingte, nach unten gerichtete Strömung vorhanden, oder es bildete sich aus gerinnetopographischen Gründen eine Verklausung, die auch nachkommendes Holz aufhielt.

Das Treibholz wird mehr oder weniger schwimmend transportiert, und zwar umso dauernder in Fließrichtung gerichtet, je länger ein Holzstück ist. Kürzere Hölzer werden oft, längere weniger oft gedreht, auch wenn sie im allgemeinen längs und nicht quer zur Fließrichtung schwimmen. Nach Uferrutschen stürzen oft ganze Bäume ins Gerinne. Sie schwimmen, je nach Fallrichtung, mit dem Strunk oder dem Wipfel voran bachabwärts, falls die Wassermenge genügend gross ist. Dabei werden sie relativ rasch entastet und auch zerbrochen. Oft genügen wenige Meter, bis ein Baum geschält, entastet und in 1 - 5 m lange Stücke zerbrochen ist.



Die beschriebene Drehbewegung der Hölzer während des Schwimmens kann nicht nur in der "horizontalen" Ebene, sondern auch in einer vertikalen geschehen. Dabei ragen die Holzstücke kurze Zeit senkrecht aus dem Wasser. Diese Bewegung findet sogar bei ganzen Bäumen statt, wie verschiedene Beobachter bestätigen. Praktisch nie geschieht es, dass ein Baum in dieser senkrechten Position gezwungenermassen sehr rasch eingeschottert wird und verbleibt, wie dies auf dem Bild 80 zu sehen ist. Beim Betrachten dieser Abbildung kann man sich leicht vorstellen, welche enormen Kräfte nötig sind, um einen Baum mit Strunk nach oben in diese Position zu bringen. Es überrascht darum nicht, dass die meisten Bäume nach kürzester Fliesszeit in leichter transportable Stücke zerlegt werden.



Bild 80 Die Valatscha (Münstertal) nach dem Extremereignis vom 20./21.6.77. Die in der Bildmitte sichtbare Rottanne wurde von den Kräften des Wildbaches in diese ungewöhnliche Lage gebracht. Sie ist mit dem Wipfel nach unten eingeschottert und ragt mit dem Strunk nach oben beinahe vertikal etwa 15 m aus dem Erosionsgraben.  
(Foto: J. Zeller, Birmensdorf)

Wegen der in alle Richtungen ausladenden Form der Wurzelstöcke schwimmen diese nur bei grösseren Wassertiefen. Sonst werden sie meistens rollend fortbewegt und stossen dabei natürlich immer wieder an. Sie wirken dadurch oft schlimmer als Gesteinsblöcke von ähnlicher Grösse, da sie mit ihren Armen (Hebelwirkung)

anderes Material loslösen und Ufer beschädigen können. Wie alles transportierte Material werden auch die Wurzelstöcke mit der Zeit abgeschliffen und können am Ende praktisch alle Arme verlieren.

Sobald ein Holzstück an flachen oder engen Stellen anstösst, beginnt es sich zu drehen, bis es entweder wieder frei schwimmt oder an einer zweiten Stelle anstösst und dadurch liegenbleibt. Andere Stücke kommen nach und verfangen sich auch. Dadurch entstehen eine Art freie Verklausungen, die sich gesamthaft bei kleinen Zufälligkeiten (Wasserspiegeländerung, Geschiebetrieb, weiteres nachstossendes Treibholz) stoss- und schubweise weiterbewegen können. Dabei bleiben sie zusammen oder fallen wieder auseinander.

Je stärker und schiessender die Wasserströmung, desto leichter geschieht der Transport des Treibholzes. Bei ausgeprägten Wasserkräften wird auch nicht schwimmfähiges Material (Senklinge) befördert. Bei sehr steilem und wechselhaftem Gefälle geschieht es nicht selten, dass Holzstücke überstellt und in einer vertikalen Ebene gedreht werden.

Prinzipiell wird Holz relativ zum Transportmedium leichter, wenn dieses viele Schwebstoffe enthält. Damit wird es problemloser transportiert. Diesem Effekt kann aber die Anlagerung von Feinstsand auf der Holzoberfläche entgegenwirken. Dabei wird das Holzstück schwerer und sinkt schneller. Bei extrem hohem spezifischen Gewicht des Transportmediums (Mure) spielt das spezifische Gewicht der einzelnen Bestandteile keine grosse Rolle mehr: Das Holz schwimmt normalerweise nicht, sondern wird im Murbrei wie die kleineren und grösseren Steine und Felsbrocken geschoben, rollend und schwimmend befördert.

### 8.3. Ablagerungen

#### 8.3.1. Zu den Modellversuchen

Obschon die meisten der im folgenden dargelegten Ergebnisse auf Naturbeobachtungen beruhen, wurden im Zusammenhang mit dem Transport und den Ablagerungen des Treibholzes im Ablagerungsplatz 52 qualitative Modellversuche durchgeführt. Sie zeigten mit Ausnahmen, dass man im Vergleich zur Natur realistische Resultate erhalten kann (Bild 81).

Im Gegensatz zu anderen Modellversuchen (z.B. Li et al. 1979) wurden keine völlig geradlinigen, glatten Hölzer (Zahnstocher, Zündhölzer usw.), sondern natürliche kleine und kleinste Aestchen verwendet. Selbst bei diesem viel rauheren und unregelmässigeren Material schien die Rauigkeit an der unteren Grenze zu sein, die eine Nachbildung der natürlichen Vorgänge erlaubte. Zwei weitere Punkte sollen die Grenzen der gemachten Modellversuche aufzeigen:

1. Die feinsten Teile des natürlichen Treibholzes konnten nicht nachgebildet werden (kleine Aeste, Blätter, Nadeln). Für die prinzipiellen Vorgänge mit Treibholz spielen sie eine untergeordnete Rolle. In der Natur können sie jedoch in viel kürzerer Zeit Verklausungen als Barrieren wirksam machen, weil ihre Anschwemmung auch die kleineren Löcher verstopft, so dass Undurchlässigkeit und damit Geschiebeablagerung (oder mindestens zusätzliche Holzablagerungen) entstehen.

2. Je kleiner die Holzstücke sind, desto grösser ist ihre relative Steifigkeit. Die Modellhölzer waren im Vergleich zur Natur darum zu wenig elastisch. Beim Transport dürfte dieser Modellfehler vernachlässigbar sein. Bei der Bildung von Verklausungen dürfte er eher ins Gewicht fallen, da sich die Hölzer in der Natur einander besser anpassen und sich gegenseitig verkeilen, so dass haltbarere Verklausungen entstehen.

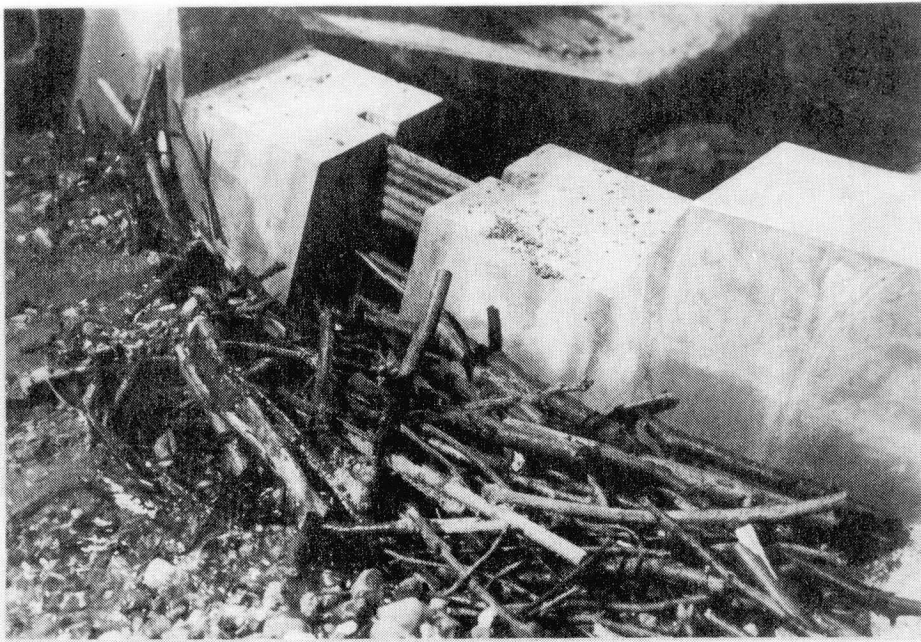


Bild 81 Sehr realistisch erscheinende Verklausung bei den Schächten-Ver-suchen.

Aufgrund von Naturbeobachtungen kann man annehmen, dass es relativ selten vorkommt, dass in und an den Sperrenöffnungen Hölzer durch den Wasser- und Geschiebedruck mit der Folge des Bruchs einer Verklausung geknickt werden. Dieser Vorgang musste darum im Modell nicht berücksichtigt werden.

Da nur die Vorgänge im Geschiebeablagerungsplatz untersucht werden sollten, musste auch der Zerkleinerungs- und Entastungsprozess im Gerinne nicht im Modell nachgebildet werden. Vielmehr wurden Holzstücke verwendet, wie man sie in den besichtigten Ablagerungsplätzen angetroffen hatte. Es zeigte sich dabei, dass man selten Baumstämme von einer Länge über etwa 4 m findet. Interessant ist dazu der Hinweis, dass in der Holztrift die Länge von 4 m eine oberste Grenze für die getrifteten Hölzer war. Es scheint sich dabei um einen Erfahrungswert zu handeln, der von der Natur für lange Treibhölzer bestätigt wird. Darunter gibt es Äste bis etwa Fingerdicke. Feineres Material scheint im Normalfall ganz zerkleinert und abgeschwemmt zu werden. In barrierenartigen

Verklausungen, hinter denen sich Geschiebe abgelagert hat, findet man allerdings dieses feinste Treibholz oft.

### 8.3.2. Ablagerungen mit Verklausungen

Bei Geschiebeablagerungen entstehen Verklausungen nicht ausschliesslich, aber vor allem an der Oeffnung der Rückhaltesperre. Wie beschrieben, kommen die mehr oder weniger geraden, astlosen Holzstücke parallel mit den Strömungslinien geschwommen, so dass sie bei unverlegter Oeffnung die Rückhaltesperre im Prinzip passieren können. Die Probleme beginnen meistens erst dann, wenn ein Holz durch ein anderes, durch Wirbelbildung oder eine Welle kurz vor der Oeffnung etwas von seinem Kurs abgebracht wird. Dann braucht es wenig, um mit dem vorderen Teil an der Sperre anzustossen, worauf sich das Holz sofort querlegt und die Oeffnung auf der Höhe des Wasserspiegels verschliesst. Nachfolgende Hölzer legen sich parallel zum ersten, weil sie dieses nur in Ausnahmefällen über- oder unterschwimmen können. Durch Turbulenz und Wellen ist es möglich, dass einzelne Stücke immer wieder auf oder unter diesen ersten Teil der Verklausung geschwemmt werden, wo sie jedoch, infolge zu grosser Reibung, praktisch immer an den quer liegenden Hölzern hängenbleiben. Durch den Anfall verschiedenster Holzgrössen kommt es mit der Zeit zu einer immer dichteren Holzbarriere. Als Folge davon steigt der Wasserstau, bis das nachfolgende Treibholz wieder zur Sperre gelangt und dort die Verklausung nach oben vergrössert. Möglicherweise gelangte in der Zwischenzeit der Schwemmkegel bis nahe an die Verklausung, so dass diese in die Ablagerungen einzuwachsen beginnt und sie dadurch auf unangenehm stabilisierende Art armiert. Solche aus Holz und Geschiebe kombinierte Verklausungen liessen sich selbst im Modell nur mit viel Aufwand wieder lösen. Bei ihrer Bildung ist eine anschliessende selbsttätige Spülung absolut ausgeschlossen.

Ab und zu entstehen kleinere Verklausungen auch im Ablagerungsplatz, z.B. wenn sich ein grösseres Holzstück zwischen den steilen Erosionsufern bei Tiefenerosion verkeilt, weil es irgendwo hängenbleibt. Als Folge davon bildet sich eine Art natürliche Holzsperrre mitten im Becken.

### 8.3.3. Ablagerungen ohne Verklausungen

Man kann zwei Fälle unterscheiden, nämlich die Situation ohne Wasserstau und jene mit Stau. Ist im Ablagerungsplatz kein Wasserstau vorhanden, so wird ein Holzstück so lange transportiert, als die Wassertiefe über seine ganze Länge etwa seinem Durchmesser entspricht. Ist dies nicht mehr der Fall, oder verkleinert ein einzelner Stein an einer Stelle die Wassertiefe, so bleibt das Holzstück hängen und beginnt sich zu drehen, bis es entweder an einer zweiten Stelle anstösst oder sich von der ersten löst. Wird ein Holz an zwei Stellen gleichzeitig behindert, so bleibt es meistens liegen und wird nur wieder freigespült, wenn die Wassermenge zunimmt oder wenn es durch anderes bewegtes Holz oder Geschiebe sehr stark angestossen wird. Nicht selten lagern sich hinter solchen zur Ruhe gekommenen Hölzern andere ab, und später werden alle miteinander in einem Schub ein Stück weitertransportiert. Das ganze, ungeordnete Floss kann dabei zum Teil bestehenbleiben oder ganz auseinanderfallen. Wie bei den Verklausungen beschrieben, können auch kleinere natürliche Holzsperrren entstehen, hinter denen sich Geschiebe abgelagert.

Seltener werden abgelagerte Holzstücke einzeln oder in Nestern vom nachkommenden Geschiebe überfahren und eingeschottert. Sehr oft handelt es sich dabei aber um grössere Wassermengen, die das Holzstück nur dann nicht wegspülen, wenn es ungünstig verkeilt oder verklaust ist.

Bei zurückgehendem Abfluss lagern sich die Hölzer oft an den Ufern ab. Sie können aber unter Umständen bei Ufereinbrüchen wieder ins Gerinne stürzen und bis zur Rückhaltesperre geschleppt werden. Von diesem Fall abgesehen, sind die Holzablagerungen ohne Verklausungen im Becken harmlos und sogar erwünscht, weil damit weniger Holz bis zur Sperre gelangt.

Der zweite Fall tritt bei Rückstau im Ablagerungsplatz ein. Abgesehen von einer wahrscheinlichen Verklausung an der Sperrenöffnung schwimmt das Treibholz nun an der Wasseroberfläche. Bei viel Holz entsteht eine Art Holzteppich vor allem rund um die Oeffnung der Rückhaltesperre, da die Wasserströmung dorthin zieht. In den Schächen-Versuchen wurde beobachtet, dass der Geschiebetrieb diesen Holzteppich hin und wieder unterfuhr, so dass es als Folge davon zur Spülungen unter dem Holz hindurch kam. Der Autor äusserte sich damals (Zollinger 1981) etwas skeptisch über diese Beobachtung. Sie wurde aber in der Zwischenzeit von Zeller (1982) aus praktischen Erfahrungen heraus bestätigt.

Beim Rückgang des Wasserstaus hat der Holzteppich die Tendenz, sich nahe der Oeffnung der Rückhaltesperre stark zu verdichten, kann sich aber auch praktisch unverändert auf den Geschiebeablagerungen absetzen. Selten wird er später vom nachkommenden Geschiebe überfahren und damit teilweise eingeschottert.

Diese Holzteppiche sind nicht gefährlich, unter Umständen sogar erwünscht. Anders wird die Sache hingegen, wenn von hinten durch das nachströmende Holz und/oder Geschiebe Druck auf den Teppich ausgeübt wird. Im erzeugten Schub können sich die Hölzer aufstellen, und es entstehen Verklausungen und Uberschiebungen zum Teil mitten im freien Wasser. Es ist aber auch möglich, dass eine Holzlawine über die Abflusssektion der Rückhaltesperre in den Unterlauf gelangt. Die Folgen können äusserst schwerwiegend sein.

#### 8.3.4. Folgen der Holzablagerungen

Im Gegensatz zu den Holzablagerungen im Becken bei fehlendem Stau und zu jenen bei der Bildung eines Holzteppichs haben vor allem die Verklausungen des Rückhaltebauwerkes grössere Folgen:

1. Es entsteht ein (im Vergleich zu den Umständen ohne Treibholz grösserer) Wasserstau mit der Folge, dass je nach Höhe dieses Staus und seiner Zeitdauer alles Geschiebe im Ablagerungsplatz liegenbleibt.
2. Eine bei abflachender Hochwasserwelle einsetzende selbsttätige Entleerung wird im leicht möglichen Extremfall vollständig unterbunden.
3. Zum Spülen ist nach dem Hochwasser eine unter Umständen sehr mühsame Beseitigung der Verklausung der Sperrenöffnung notwendig.

Bild 82 zeigt den Vergleich der Versuche S 67/68 und S 71/72. Im zweiten Versuch wurde Treibholz beschickt, im ersten nicht. Man erkennt die beiden

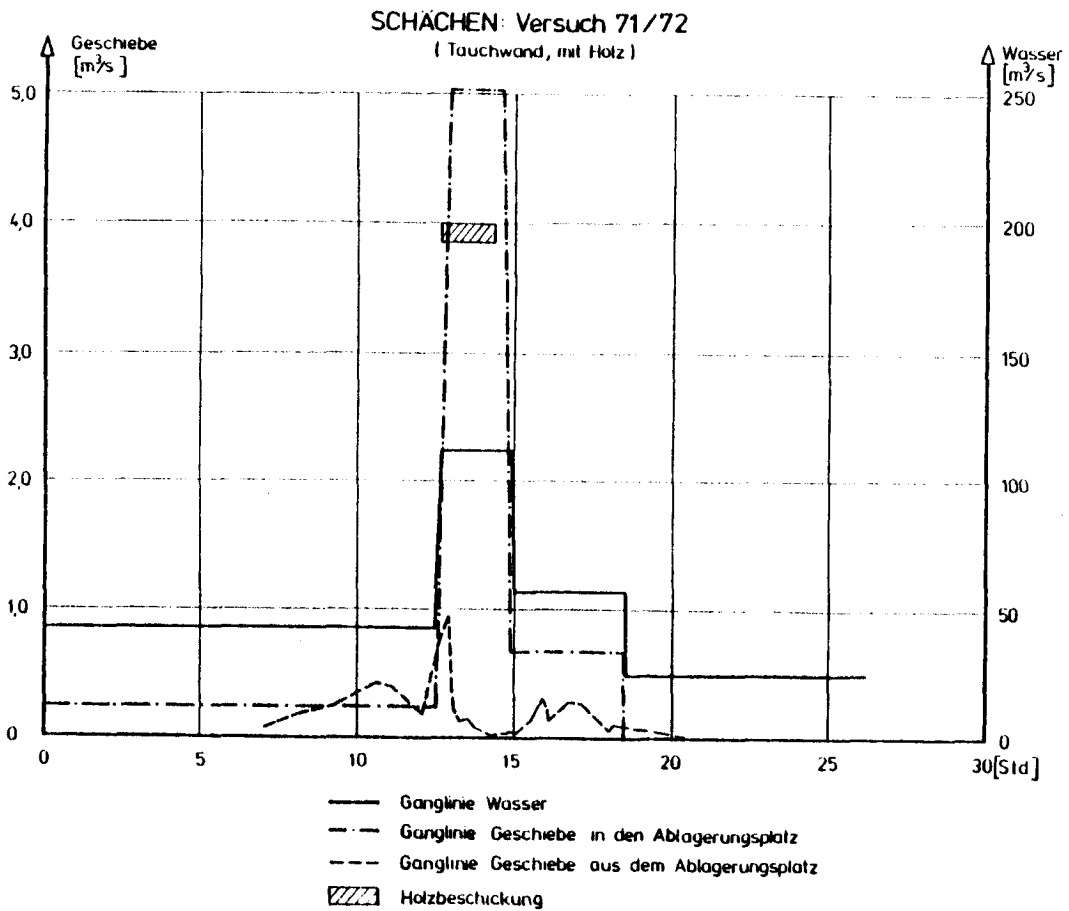
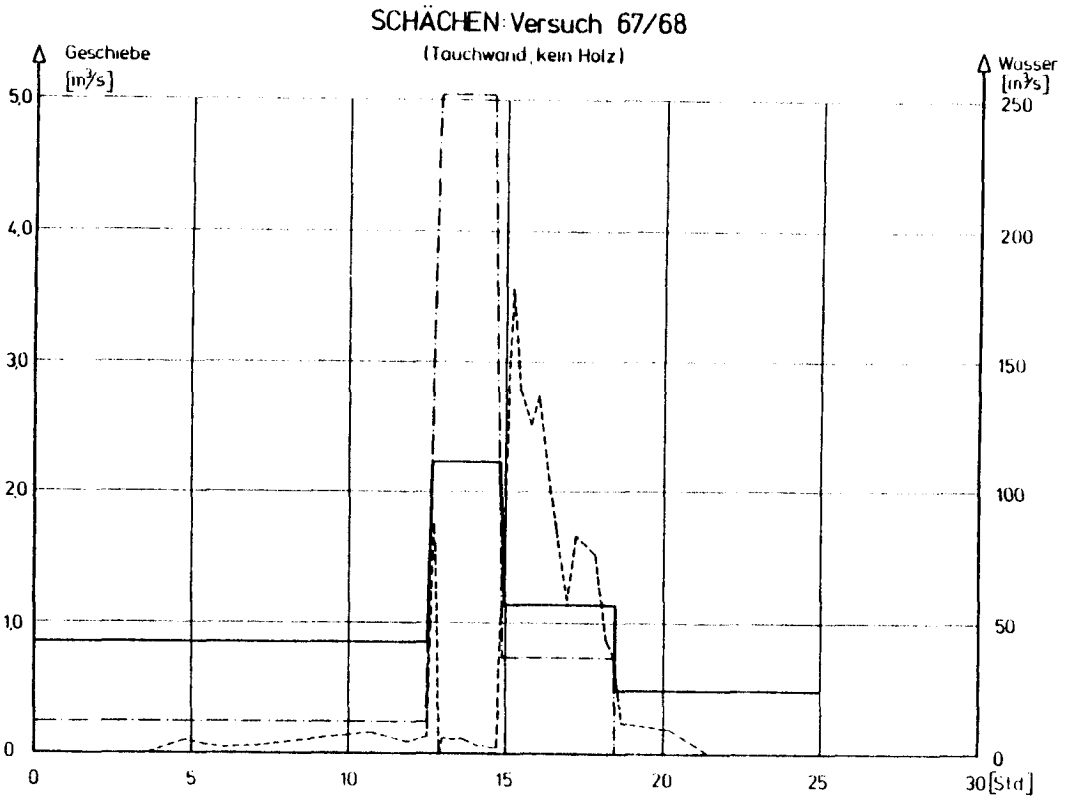


Bild 82 Ganglinien der Versuche S 67/68 (ohne Treibholz) und S 71/72 (mit Treibholz).

Geschiebespitzen beim Anschwellen der Hochwasserwelle (grosser Abfluss bei noch nicht vorhandenem Stau) und nach ihrem Rückgang (ungehinderter Spüleffekt) im Versuch S 67/68 beim Fehlen von Treibholz. Die zweite Spitze fehlt in S 71/72 vollständig, die erste ist stark gedämpft, und eine wirkungsvolle Spülung kann nach der Hochwasserwelle nicht mehr stattfinden, weil die Sperre mit Holz verlegt ist. Ebenfalls erkennt man, wie der Geschiebetrieb in beiden Versuchen während der Hochwasserwelle (Vollstau) praktisch auf Null zurückgeht.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Ablagerungen des Treibholzes jene des Geschiebes fördern und die Spülungen behindern. Die Wahrscheinlichkeit, dass völlig geschiefreier Abfluss in den Unterlauf gelangt, ist relativ gross (Erosionen im Gerinne).

#### 8.4. Gegenmassnahmen

##### 8.4.1. Grundsätzliches

Als Leitidee sollte man ein Ziel vor Augen haben: Die Trennung von Holz und Geschiebe. Könnte man dies erreichen, so wäre das Treibholz-Problem praktisch gelöst. Eine Trennung ist durch die Ausnützung der Schwimmfähigkeit des Holzes im Gegensatz zum Geschiebe möglich. Bis heute ging man weniger von dieser Idee als lediglich vom Ziel aus, das Treibholz ohne Rücksicht auf das immer auch vorhandene Geschiebe zurückzuhalten. Eine Lösung des Problems ist auf diese Art allerdings nicht möglich, wie sich immer wieder gezeigt hat.

Eine allzu tiefe Untersuchung der Gegenmassnahmen zum Treibholz war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Es bleibt bei der Darstellung bisheriger Versuche in der Praxis und von wenigen prinzipiellen neuen Ideen.

##### 8.4.2. Massnahmen im Gerinne oberhalb des Ablagerungsplatzes

Die Idee besteht darin, das Treibholz gar nicht in den Ablagerungsplatz treten zu lassen, sondern oberhalb abzufangen. Man errichtet dazu Rechen-, Gitter- und Netzsperrn. Sie alle halten zwar das Treibholz wirkungsvoll zurück, erfüllen jedoch das Ziel seiner Trennung vom Geschiebe nicht. Das Geschiebe lagert sich nämlich ebenfalls hinter diesen Sperrn ab, bis sie hinterfüllt sind oder vom Treibholz befreit werden. Der untenliegende Geschiebeablageungsplatz wird bis dahin überflüssig. Zudem könnte das gleiche Ziel auch im Ablagerungsplatz erreicht werden - normalerweise mit bedeutend weniger Umtrieben -, weil dort eine Zufahrt für die einfachere Beseitigung der Verklausungen vorhanden ist.

Eine Ausnahme mit Vorbehalten bildet die Netzsperre, welche nicht bis ins Gerinne hinunterreicht, sondern horizontal in einer gewissen Höhe darüber endet (UK Sperre). Unter den folgenden vier Bedingungen ist in diesem Fall eine wirkungsvolle Trennung von Geschiebe und Treibholz möglich:

1. Der Wasserspiegel muss die Sperre (UK) erreichen bzw. überschreiten.

2. Bevor der Wasserspiegel die Sperre erreicht hat, darf kein bis wenig Treibholz angeschwemmt werden.
3. Die Wasserschicht, in welcher der hauptsächliche Geschiebetrieb stattfindet, darf die Sperre nicht erreichen, da sonst die Verlegung und Verstopfung der Oeffnung unter der Sperre sehr wahrscheinlich wird, worauf auch das Geschiebe zurückgehalten wird.
4. Das Treibholz verfängt sich im Netz über der UK Sperre und staut auf dem Wasserspiegel zurück. Dieser sollte darum erst unter UK Sperre sinken, wenn der Geschiebetrieb praktisch aufgehört hat, da sonst der Holzteppich zurückfällt, die Oeffnung verlegt und damit alles Geschiebe zurückgehalten wird.

Die Netzsperre ist in der Anwendung nicht problemlos. Immerhin wäre es aber denkbar, auch im Ablagerungsplatz selbst mit dieser Grundidee zu arbeiten, da früher gezeigt wurde, dass das Unterfließen eines Holzteppichs durch das Geschiebe möglich ist.

#### 8.4.3. Massnahmen im Geschiebeablageungsplatz

Nach der Kenntnis des Autors konzentrierten sich praktisch alle bisherigen Vorschläge auf den Rückhalt des Treibholzes durch den Bau von Balkensperren und vorgeschalteten Rechen unmittelbar vor oder an der Oeffnung der Rückhaltesperre. Der Gedanke ist naheliegend und realisierbar. Nicht immer bringt er aber die ideale Lösung. Zudem gibt es noch andere Möglichkeiten.

##### 8.4.3.1. Massnahmen im Ablagerungsplatz

Es ist wenig einleuchtend, dass die Idee des Treibholzrückhaltes in der Praxis nicht vom Zulaufgerinne in den Ablagerungsplatz verlegt worden ist. Man könnte dazu einige Pfähle nebeneinander rammen. Diese kammartigen Hindernisse müssten versetzt angeordnet und nicht ununterbrochen über die ganze Breite des Beckens gerammt werden. Das Treibholz würde daran hängenbleiben. Im Gegensatz dazu würde das Geschiebe die verkleusten Hindernisse umfliessen, wie es bei der behinderten Schwemmkegelausbreitung gezeigt worden ist, wie es aber bei der analogen Lösung im Gerinne wegen der Ufer nicht möglich ist. Die einzelnen Hindernisse könnten auch aus grobmaschigen Gittern oder Netzen bestehen.

Die geschilderte Idee ist keine Ideallösung, aber besser als der Treibholzrückhalt im Gerinne des Oberlaufes. Die Trennung von Holz und Geschiebe ist nur bedingt möglich; zudem ist der Nachteil zu erwähnen, dass eine Spülung durch die entstandenen lokalen Holzsperrern später erschwert ist. Sicher könnte das Treibholz aber zu einem mehr oder weniger grossen Teil von der Hauptsperre abgehalten werden. Trotzdem dürfte diese Idee nur in Ausnahmefällen sinnvoll sein.

Einen ähnlichen Gedanken hatte übrigens bereits Wang (1902), allerdings mit einem anderen Ziel, nämlich der Sicherung des Schwemmkegels gegen Erosion. Er schlug vor, Pfahlreihen entlang den Höhenlinien des Schwemmkegels einzurammen, bis "nur noch das Haupt der Pfähle sichtbar ist". Die entsprechende Abbildung



ist im Bild 83 reproduziert.

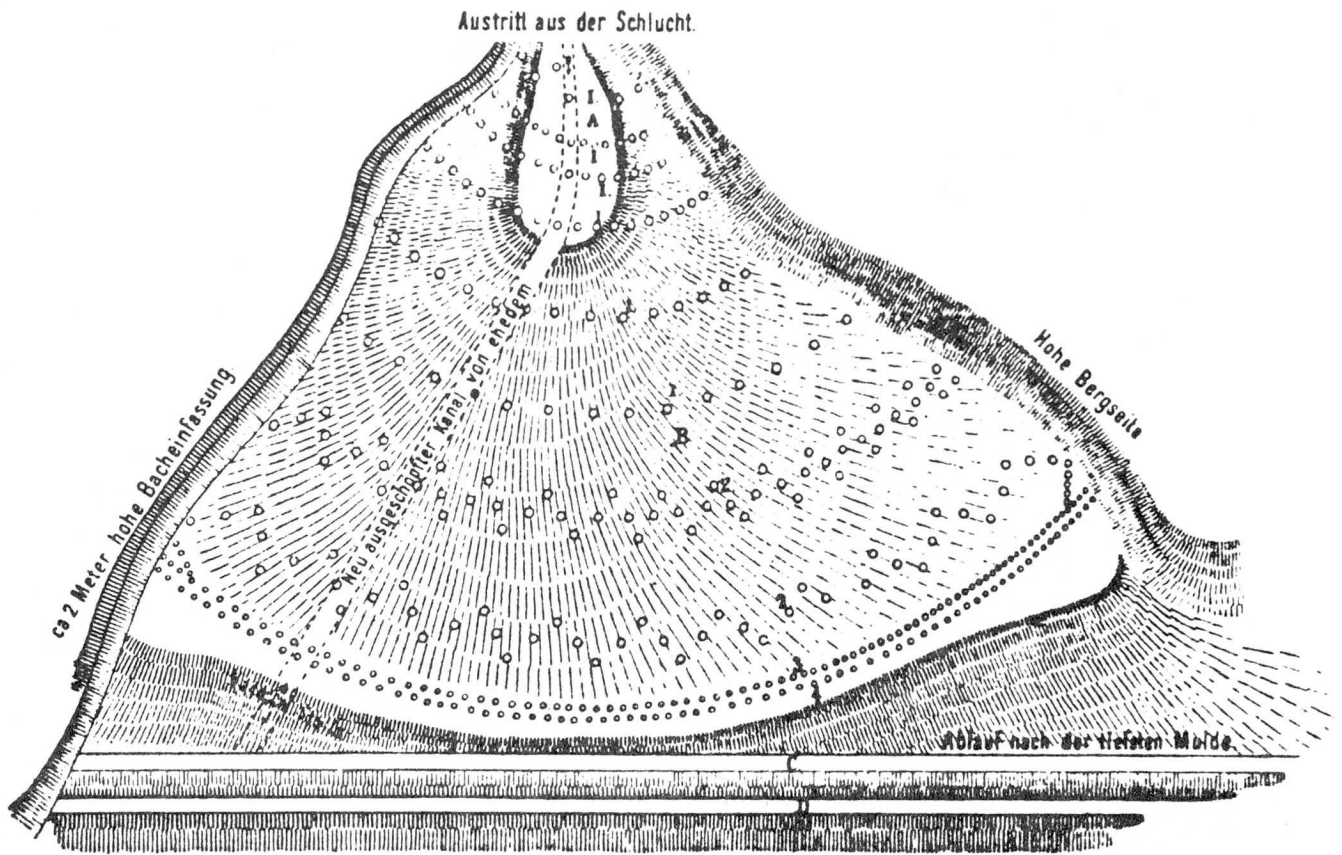


Bild 83 Originalabbildung nach F. Wang (1902): Sicherung des Schwemmkegels gegen Erosion durch Pfahlreihen. Das gleiche System könnte auch gegen Treibholzablagerungen an der Rückhaltesperre eingesetzt werden.

#### 8.4.3.2. Balkensperren

Bei reinen Balkensperren bilden sich mit grösster Sicherheit in der Sperrenöffnung sehr widerstandsfähige Holzverklausungen, weil sich die einzelnen Hölzer zwischen die Balken schieben und dort hängenbleiben. Falls sich das Treibholz allerdings erst bei steigendem oder sinkendem Stau der Sperre nähert, ist es möglich - wenn auch nicht sehr wahrscheinlich -, dass sich das Holz im oberen Teil der Balkenöffnung verfängt und einen unteren Teil offenlässt. Zudem besteht die Wahrscheinlichkeit, dass das zwischen den Balken verkeilte Holz beim Sinken des Staus nicht zurückfällt und darum eine Grundablassöffnung frei lässt. Zudem muss man bemerken, dass die Balkenöffnungen normalerweise breiter sind als die Schlitze. Sie verklauen darum weniger, weil sich die Hölzer beim Anstossen in der Horizontalen drehen und dann im Extremfall ihre ganze Länge als Durchflussbreite beanspruchen.

Nach Kronfellner-Kraus (1970) bleiben Balken- und Gitteröffnungen mit Höhen und Breiten von mindestens einem Meter unverklaust. Praktische Beobachtungen

und auch die Modellversuche bestätigen diese Angaben in keiner Art. Oeffnungen mit einer Breite von 2 m, 3 m oder noch mehr können sich ohne weiteres verklausen, wogegen eine Höhe von über 1 m meistens genügt, um Verklausungen zu verhindern.

Wie früher angetönt, muss für die hydraulisch und geschiebetechnisch berechneten Balkenöffnungen beim Anfall von Treibholz ein Zuschlag gemacht werden. Konkrete Angaben dazu sind kaum möglich, sie hängen zu sehr davon ab, wie gross die Oeffnungen sind, und wieviel und welche Art von Treibholz angeschwemmt werden kann. Zudem ist bei der Festlegung des Zuschlages Erfahrung nötig. Er kann 100% und mehr oder über 1 m betragen.

#### 8.4.3.3. Schlitzsperrn

Die im Vergleich zu den Balkensperren schmalere Schlitz neigen ausgesprochen zu Verklausungen. In einem Fall, der aber selten auftritt, sind sie den Balkensperren überlegen: Bei der Bildung eines Holzteppichs ist es möglich, dass sich die vordersten Hölzer nicht stark im Schlitz verklemmen. Als Folge davon bleibt der Teppich bei änderndem Stau - im Gegensatz zur Balkensperre - am Schlitz nicht hängen, sondern steigt und fällt auch dort mit dem Stau. Damit ist bis kurz vor Erreichen des Grundes theoretisch ein Geschiebetrieb unter dem Holzteppich durch möglich.

Für die bei Treibholzanfall notwendigen Zuschläge gilt das unter den Balkensperren Gesagte.

#### 8.4.3.4. Gittersperren

Die Gittersperren sind mit mehrfachen Balkensperren zu vergleichen, wobei aber kein Stau eintritt, es sei denn, er werde durch Treibholzablagerungen an der Sperre verursacht. Durch diesen nur durch Holz bedingten Stau kann die Sperre bei Hinterfüllung praktisch auf der ganzen Breite und Höhe verklausen, so dass eine selbsttätige Entleerung unmöglich wird. Gittersperren können darum in dieser Beziehung nicht empfohlen werden.

#### 8.4.3.5. Vorgesaltete Rechen

Als Sperrenöffnungen abdeckende Rechen wurden in der Praxis die verschiedensten Systeme ausprobiert. Die wichtigsten seien im folgenden grob skizziert. Prinzipiell kann man zwischen vertikalen und schrägen Rechen unterscheiden.

##### Vertikale Rechen und Abfangkörbe .....

Die älteste Idee, das Treibholz von der Sperrenöffnung (oder von einem Durchlass) fernzuhalten, dürfte darin bestanden haben, bachaufwärts rund um die Oeffnung mit Pfählen eine Art lichten Palisadenzaun zu errichten. Sperlich (1952) macht aufgrund von Modellversuchen für die Grundrissform solcher Pfahlreihen genaueste Angaben (eine Art Hut-Form). Später (Leys, 1965) begnügte man sich mit im Grundriss weniger ausgeklügelten Formen, indem man einfach vertikale Rechen vor die Oeffnungen stellte oder die Grossdolen mit erkerartigen

Körben versah. Immer kamen horizontale oder vertikale Stäbe zum Einsatz. Ähnliche Konstruktionen werden auch heute noch gebaut. Ein Beispiel zeigt Bild 84.

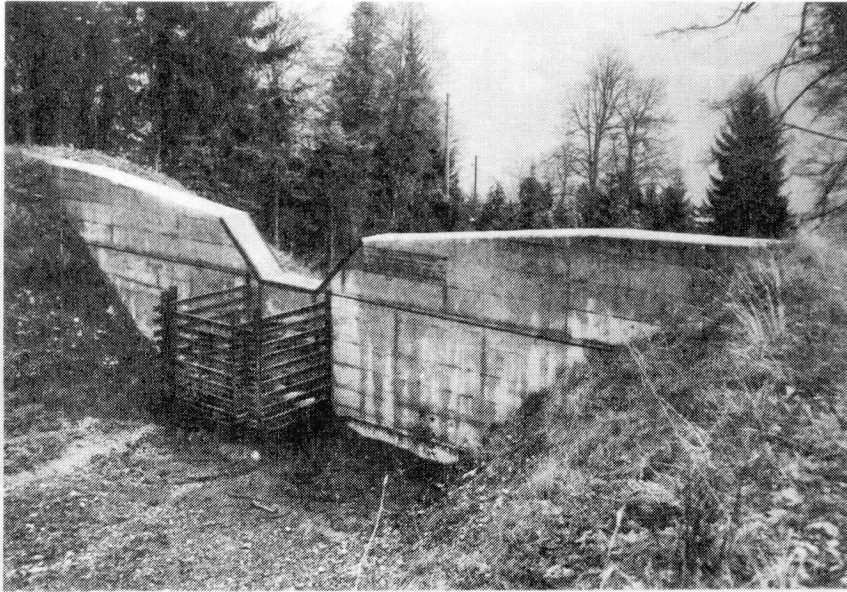


Bild 84 Geschieberückhaltesperre im Dornigräbli bei Brienz. Der vertikale Korb aus Eisenbahnschienen dient dem Rückhalt des Treibholzes.

Die vertikalen Rechen, Gitter und Abfangkörbe haben sich aus Gründen nicht bewährt, die man aus dem früher Gesagten leicht ableiten kann:

1. Im Rückstau des angeschwemmten Treibholzes wird auch fast alles Geschiebe zurückgehalten.
2. Selbsttätige Entleerungen sind ohne vorherige, sehr aufwendige Entfernung der Verklausungen auf der ganzen Höhe unmöglich.

Es sei allerdings auch nochmals erwähnt, dass Kronfellner-Kraus (1972) davon spricht, dass die Aufwendungen für die Freilegung solcher Roste und Rechen oft wider Erwarten gering sind.

#### Schräge Rechen .....

Bei den schrägen Rechen handelt es sich um eine Reihe von nebeneinander liegenden Stäben, die sich von der Ueberfallsektion des Rückhaltebauwerkes schräg auf den Grund des Ablagerungsplatzes hinunterneigen. Es dürfte dies von den heute bekannten die bewährteste Methode sein, das Treibholz zurückzuhalten und gleichzeitig zu einem gewissen Grad eine Trennung von Holz und Geschiebe zu erreichen. Ein Beispiel zeigt das Bild 85.

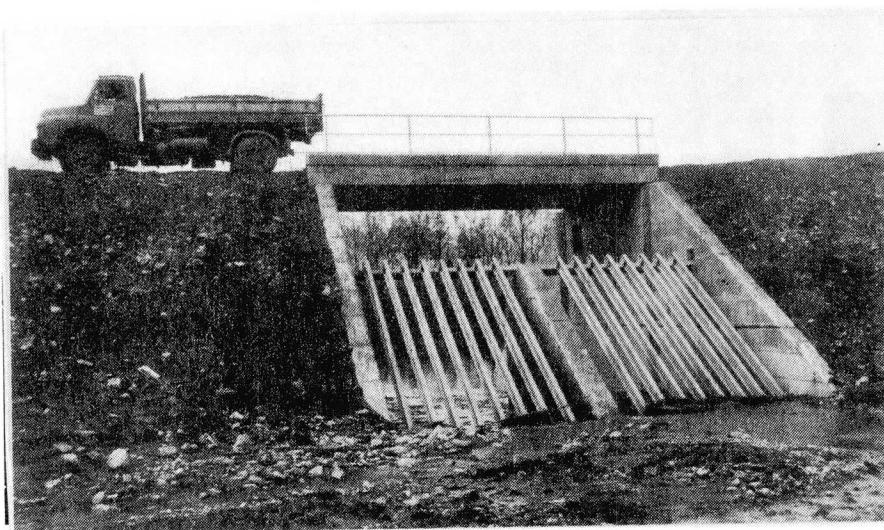


Bild 85 Schrägrechen gegen Treibholz im Geschiebeablageplatz der Lawenarüfe bei Balzers.

Das gute Funktionieren dieser Schrägrechen lässt sich wie folgt erklären: Es wird ein Wasserstau im Becken vorausgesetzt, wobei das Treibholz mit dem Wasserspiegel steigt. Erreicht es den Schrägrechen, so legt es sich erfahrungsgemäss bei der leichtesten Berührung quer zur Fliessrichtung. Damit wird es nicht in den Rechen gespiesst, sondern es rollt daran auf. Dieser grosse Unterschied im Vergleich zu den vertikalen Rechen ist sehr wichtig und konnte mit den Modellversuchen ebenfalls belegt werden (Bilder 86 und 87). Sinkt nun der Wasserstau im Ablagerungsplatz, so bleibt das mehr oder weniger parallel gerichtete Holz am oberen Teil des Rechens hängen, d.h. es rutscht nicht zurück und verlegt den unteren Teil des Rechens nicht, so dass das Geschiebe dort für eine effektvolle Spülung durchziehen kann. Diese Beobachtung konnte allerdings in den Modellversuchen nicht bestätigt werden: Das Holz rutschte immer zurück und verhinderte eine Spülung. Wahrscheinlich geschah dies wegen der zu glatten Rechenstäbe und der zu wenig kompakten Verklausungen, weil die feineren Aeste fehlten. Kettl (1973) und andere Praktiker bestätigen hingegen, dass das Holz im Massstab 1:1 erst nach Stunden oder gar Tagen zurückrutscht.

Die gute Funktion der schrägen Rechen kann noch begünstigt werden, wenn man den oberen Teil des Rechens horizontal, also gewissermassen als Tirolerwehr baut. Es leuchtet ein, dass das Treibholz beim Sinken des Staues dort oben liegenbleibt, falls

- die Stauhöhe grösser war als jene des Tirolerwehrs,
- das Holz infolge Ueberströmens der Abflusssektion nicht über die Sperre geschwemmt worden ist.

Zwischen Rechen und Schlitz oder Balkenteil der Sperre besteht wenig Verklausungsgefahr für Kleinholz, da die Strömung geradlinig und nicht eingengt bleibt. Wie Kettl (1973) richtig schreibt, bleibt die Funktion des Systems nur solange bestehen, wie die Spiegelhöhe zwischen Rechen und Schlitz

annähernd gleich gross ist wie jene im Ablagerungsplatz. Ist der Wasserstau im Becken bedeutend höher, so entsteht am Rechen ein hydrostatisch (-dynamischer) Druck, der das Treibholz an den Rechen drückt. Damit entstehen dichtere Verklausungen, und als Folge davon vergrössert sich die Wasserspiegeldifferenz noch mehr. Die Schräglage der Rechenstäbe wirkt dieser Entwicklung zwar entgegen, kann sie aber nicht ganz verhindern (Kettl, 1973).

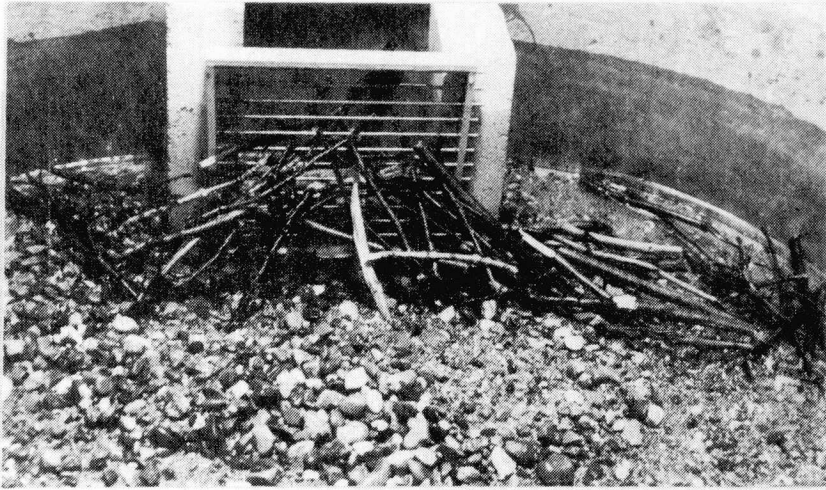


Bild 86 Bei den vertikalen Gittern (mit horizontalen Stäben) wird das Treibholz zwischen die Stäbe gespiesst und bleibt dort hängen.

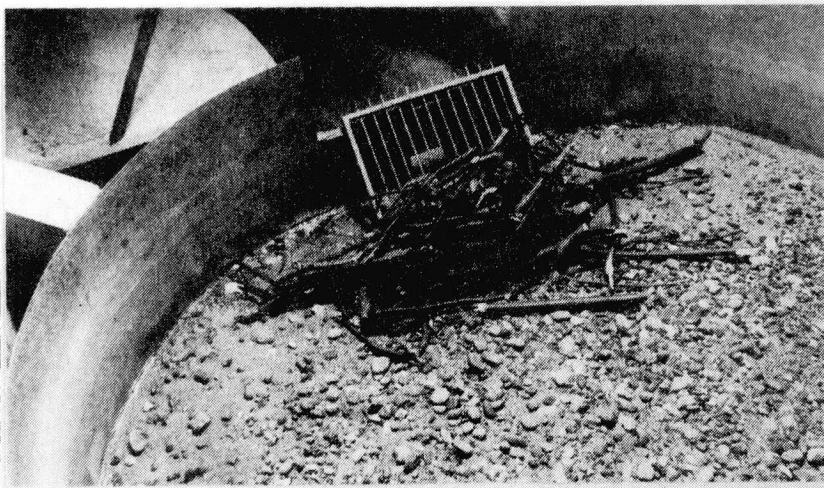


Bild 87 Bei den Schrägrechen rollt das Treibholz bei steigendem Wasserstau quer zur Fliessrichtung dem Rechen entlang hinauf. Bei sinkendem Stau rutscht das Holz in der Praxis (im Gegensatz zu den Modellversuchen) nicht zurück, sondern bleibt hängen.



Wie auf dem Bild 85 gezeigt wurde, sollten die schrägen Rechenstäbe möglichst nicht durch horizontale Träger unterbrochen sein. Aus seiner praktischen Erfahrung empfiehlt Kettl für die Rechenkonstruktion folgendes:

- Verhältnis Rechenfläche : Durchflussfläche (= Schlitz- oder Balkenöffnung, u.U. Grossdolenöffnung) = 3 : 1
- Neigung des Rechens 1 : 1 bis 2 : 3

Links und rechts liegt der Rechen auf zwei in der Ansicht dreieckigen Mauern auf, die mehr oder weniger rechtwinklig zur Rückhaltesperre stehen.

In neueren österreichischen Projekten werden Schrägrechen gebaut, deren Neigung oben grösser ist (z.T. annähernd senkrecht) als weiter unten (Bild 88). Die Rechen können mehrmals geknickt sein und laufen ganz unten in ein Tirolerwehr aus, dessen Stababstände aber so gross sind, dass neben dem Wasser auch das Geschiebe bis zu einem gewünschten Korndurchmesser durchfällt und unter dem Rechen hindurch abtransportiert wird. Die bisherige Erfahrung mit solchen Bauwerken soll recht positiv sein (Kettl 1983), indem sich der unterste horizontale Teil des Rechens kaum mit Treibholz verlegt. Wegen der grossen Öffnungen verzichtet man allerdings bewusst auf einen gezielten Rückstau im Ablagerungsplatz, was auch Nachteile mit sich bringt, wie in dieser Arbeit gezeigt worden ist. Bautechnisch sind diese Rückhaltesperren zudem im Vergleich zu den eher konventionellen aufwendiger (Spülgerinne unter dem Rechen). Unter dem Rechen liegengebliebenes Grobgeschiebe dürfte zudem nicht immer einfach zu beseitigen sein.

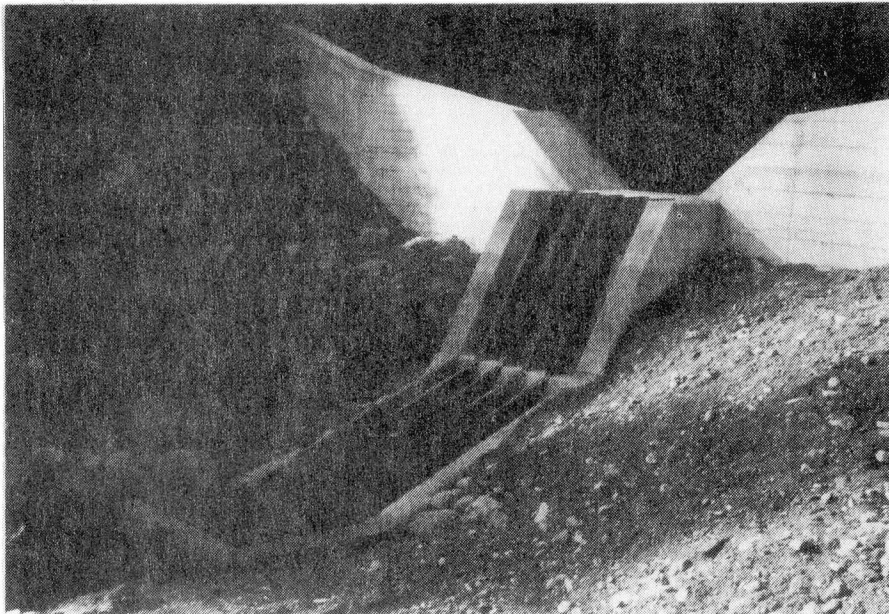


Bild 88 Neu errichtete Rückhaltesperre im Geschiebeablagerungsplatz des Ahornkargrabens bei Wagrain, Oesterreich. (Foto: W. Kettl, Salzburg)

#### 8.4.3.6. Holztrift über die Rückhaltesperre

Die folgende Idee ist naheliegend, wohl aber aus Sicherheitsgründen in der Praxis noch nie (?) durchgeführt worden: Es soll bewusst ein so hoher Stau im Ablagerungsbecken provoziert werden, dass das Treibholz über die Rückhaltesperre getriftet wird. Gerade anschliessend müsste es natürlich mit Horizontalrechen oder Netzen zurückgehalten oder gar in einem eigenen Triftkanal - ähnlich den "Riesen" bei der früheren Holztrift - abgeleitet werden.

Die Idee ist nicht ausgereift und soll lediglich als Denkanstoss gelten. Es wurden dazu einige wenige Modellversuche durchgeführt, um zu ermitteln, wie gross die Wassertiefe über der Abflusssektion sein müsste, damit das Holz wirklich abgeschwemmt würde. Vor der Darlegung dieser Ergebnisse muss noch kurz darauf eingegangen werden, wie ein Holzstück die Ueberfallsektion überschwimmt.

Das Holz nähert sich der Sperre mit der Längsachse in Fliessrichtung. In dieser Lage kann es die Sperre nur passieren, wenn die Wassertiefe über der Abflusssektion ein Mehrfaches des Holzdurchmessers beträgt. Andernfalls gelangt nur der vordere Teil des Holzes über die Sperre. Dieser kragt aus dem Wasser und ist damit relativ schwerer als der hintere, noch schwimmende Teil. Als Folge davon senkt sich das Holzstück vorne bis auf die Ueberfallsektion, wodurch es dort hängenbleibt. Anschliessend dreht die Wasserströmung das Holz, bis es quer über die Sperre geschwemmt wird.

Dieser Vorgang ist in zwei Fällen nicht möglich, nämlich wenn

- mehrere Hölzer gleichzeitig die Sperre erreichen, so dass sie sich, wegen der gegenseitigen Behinderung, nicht mehr ungehindert quer zur Fliessrichtung drehen können, oder wenn
- die Abflusssektion weniger breit ist als das Holzstück, bzw. wenn dieses ganz auf eine Seite gedreht wird und dann an den Flügelanzügen hängenbleibt.

Mehrere Holzstücke zusammen können zu einer schwimmenden Verklausung an der Abflusssektion führen, welche nur bei bedeutend grösseren Wassermengen über diese abgeschwemmt werden kann.

Die Modellversuche brachten das Ergebnis, dass Treibholz bis zu Längen des zwölffachen Durchmessers

- einzeln bei Wassertiefen von etwa ihrem Durchmesser eine breite Ueberfallsektion problemlos passieren,
- in Gruppen (schwimmende, relativ lose Holzpakete) nur bei Wassertiefen von mehr als dem zweifachen Durchmesser über die Sperre geschwemmt werden; unter Umständen kann aber sogar eine Tiefe des vierfachen Durchmessers für eine Abtrift nicht genügen. Diese Holzpakete werden bis zu einem nicht unbedeutenden Ueberhang über die Sperre geschoben, bevor sie darüber hinweggeschwemmt werden.

Die geschilderte Idee ist noch nicht vollständig durchdacht und müsste näher untersucht werden. Ihre Vor- und Nachteile sind:

- Eine nahezu vollständige Trennung von Holz und Geschiebe ist möglich.

- Nach dem Rückgang des Staus kann eine selbsttätige Entleerung ungehindert ablaufen.
- Eine geeignete Lösung, wie das Treibholz nach dem Ueberfall abgefangen wird, muss noch gesucht werden.
- Während des Wasserstaus fliesst der gesamte Abfluss ohne Geschiebe durch das Unterlaufgerinne, welches damit erosionsgefährdet ist.
- Das ganze System ist nicht risikolos, wenn z.B. das Treibholz ins Unterlaufgerinne gelangen sollte, oder wenn nach Füllung des Ablagerungsplatzes auch Geschiebe über die Sperre fließen könnte.

#### 8.4.4. Unterhalt

Zu den wichtigsten Massnahmen gegen Schäden, die vor allem durch das Treibholz verursacht werden, gehört ein guter Unterhalt der Verbauungen und eine periodische Kontrolle der Treibholzherde. Konkret heisst das:

1. Alles Treibholz im Geschiebeablagerungsplatz, am Rückhaltebauwerk und bei den Verbauungen im Zulaufgerinne sollte rechtzeitig beseitigt oder mindestens in Stücke zerkleinert werden, die kaum mehr grössere Verklausungen und Schäden anrichten können (Länge der Hölzer unter 50 cm).
2. Potentielle und aktuelle Treibholzherde müssen unter Kontrolle gehalten, d.h. die bachnahen Teile von Rutschhängen gerodet, einsturzgefährdete Ufer gesäubert, Lawinenholz entfernt oder zerkleinert und Holzlager in Bachnähe kontrolliert, besser aber beseitigt werden.

Was für den Geschiebeablagerungsplatz allgemein gilt, trifft für die Probleme im Zusammenhang mit dem Treibholz besonders zu: Mit einem gut organisierten und damit gewährleisteten Unterhalt können viele unnötige Schäden oder sogar das Nichtfunktionieren der Anlagen vermieden werden.

#### 8.5. Zusammenfassung

Das porenfreie Material jeder Holzart ist mit einer Reindichte von etwa  $1,52 \text{ g/cm}^3$  schwerer als Wasser. Voll gesättigtes Holz schwimmt darum nicht. Dieser Fall kommt in der Natur jedoch selten vor. Treibholz schwimmt im Normalfall. Als Treibholzquellen kommen Altholz (liegt bereits im Bach), Holz von Rutschungen und Lawinen und Holz von Sägereien infrage. Ueber die bei Hochwasser zu erwartenden Holzmassen können keine allgemeinen Angaben gemacht werden. Die Beurteilung der konkreten Verhältnisse ist dazu unerlässlich. Bei Hochwasserereignissen wurden bis gegen  $200 \text{ m}^3/\text{km}^2$  Treibholz gemessen. Im allgemeinen fällt der grösste Teil des Holzes in einem Ablagerungsplatz mit oder kurz nach der Spitze einer Hochwasserwelle an.



Bei den Holzablagerungen kann man die harmloseren ohne Verklausungen von den unangenehmeren mit Verklausungen - meistens an der Rückhaltesperre - unterscheiden. Schwimmende Holzteppiche können vom Geschiebe unterflossen werden. Die Folgen der Holzablagerungen sind ein erhöhter Wasserstau (vollständiger Rückhalt des Geschiebes), behinderte oder ganz unterbundene Spülungen und oft aufwendige Beseitigungsarbeiten.

Bei den Gegenmassnahmen sollte nicht von der Idee des Rückhaltes der Hölzer, sondern vom Ziel der Trennung von Holz und Geschiebe ausgegangen werden. Im Zulaufgerinne bewähren sich lediglich die nicht bis auf den Grund reichenden Netz- oder Gittersperren. Im Ablagerungsplatz selbst hingegen werden die Schlitz- und Balkensperren am besten mit vorgeschalteten Schrägrechen vor Verklausungen geschützt. Diese Rechen reichen von der Ueberfallsektion bis auf den Grund des Beckens und können oben und unten als Tirolerwehr ausgebildet sein. Ihr Gefälle kann von unten nach oben zunehmen. Das Holz rollt bei Stau am Rechen hoch und bleibt oben hängen. Die Weiterentwicklung dieser Idee (Trift über die Rückhaltesperre) existiert erst in Ansätzen.

Für alle baulichen Massnahmen im Zusammenhang mit dem Treibholz ist ein guter Unterhalt und eine regelmässige Kontrolle der Holzherde von zentraler Bedeutung.



**Bild 89** Die Verklausung ist die am meisten gefürchtete Folge beim Anfall von Treibholz. Im Valle d'Arena im Vergeletto (TI) verklauste sich beim Hochwasser von 1978 der linke Brückendurchlass dieser Alpstrasse, mit der Folge, dass das Wasser konzentriert auf der rechten Seite abfloss und dabei diesen Teil der Brücke vollständig wegriss.

»In die Ecke,  
Besen! Besen!  
Seid's gewesen!  
Denn als Geister  
Ruft euch nur zu seinem Zwecke  
Erst hervor der alte Meister.«

## 9. Folgerungen =====

### 9.1. Grundsätze für den Entwurf eines Geschiebeablageungsplatzes

#### 9.1.1. Einleitung

Aus den vorhergehenden Kapiteln sind nun Folgerungen zu ziehen. Zudem werden Hinweise auf noch nicht behandelte Fragen (Umfassungsdämme, Zufahrt u.a.) gegeben und Lösungen skizziert. Trotzdem sind die folgenden Hinweise weder eine Zusammenfassung der Arbeit noch ein Rezeptbuch.

Die wichtigsten Grundlagen für den Entwurf eines Geschiebeablageungsplatzes ergeben sich aus den folgenden Fragen:

1. Welches ist der Zweck des Ablagerungsplatzes? (Zulässige Belastung von Unterlauf und Vorfluter mit Wasser und Geschiebe u.a.)
2. Mit welcher Geschiebefracht ist in welcher Zeit zu rechnen (Kapitel 7).
3. Welche Höchstwassermengen treten auf? Wie sieht die Abflussganglinie aus? Auf welchen Abflusswert (Jährlichkeit) wird bemessen? (Hydrologie)
4. Wieviel Treibholz wird anfallen? (Kapitel 8)

#### 9.1.2. Gesamtanordnung und Zweck

##### 9.1.2.1. Wahl des Ortes

###### - Hydraulisch-geschiebetechnische Gesichtspunkte

- Die Dimensionierung der Anlage auf das hundertjährige Hochwasser (DIN-Norm 19 663 u.a.) ist nur als grober Anhaltspunkt zu empfehlen. Je nach Schutzerfordernissen können im konkreten Fall Werte darüber oder darunter angenommen werden.
- Das Zulaufgerinne muss die Wasser- und Geschiebemengen störungsfrei in den Ablagerungsplatz führen (genügend hohe Ufer bei möglichem Rückstau und Ablagerungen im Gerinne, Erosionsschutz).
- Unterlauf und Vorfluter müssen in der Lage sein, die gespülten Wasser- und Geschiebemengen abzutransportieren. Es müssen auch Extremsituationen (geschiebeloser Abfluss u.a.) berücksichtigt werden.
- Auf einen möglichst geradlinigen Zu- und Ablauf ist zu achten. Je ausgeprägter der Wildbachcharakter des Baches ist, desto eher sind selbst Bögen

mit grossen Radien zu vermeiden.

- Topographische Gegebenheiten

- Die beste Lage für einen Ablagerungsplatz ergibt sich jeweils unterhalb eines Gefälleknickes, wo das steile in das flache Gefälle übergeht.
- Muss der ganze Schwemmkegel geschützt werden, eignet sich prinzipiell die Stelle am Kehlhals (Uebergang von der Tobelstrecke auf den Schwemmkegel).
- Umlagerungstrecken können unter Umständen zu Ablagerungsplätzen ausgebaut werden.
- Natürliche Hänge eignen sich bedingt als Umfassungsdämme. Sie müssen gegen Erosion geschützt werden.

- Kriterien für die Bewirtschaftung

- Jeder Geschiebeablagerungsplatz muss geleert werden können. Eine Zufahrt für Baumaschinen ist darum vorzusehen.
- In der roten Gefahrenzone liegende Strecken der Zufahrt sollten möglichst kurz sein.

- Planerische Randbedingungen und Konflikte

- Die Bedürfnisse des Landschafts- und Naturschutzes sind den Bedingungen für einen Geschiebeablagerungsplatz unterzuordnen.
- Nach dem Ort der zu schützenden Zonen richtet sich in beschränktem Rahmen (siehe oben) der Ort des Ablagerungsplatzes.
- Lage und Platzbedarf für einen Geschiebeablagerungsplatz können zu Abgrenzungsschwierigkeiten gegenüber den meist unveränderbaren Schutzzonen führen.
- Ein bereits vorhandener Gefahrenzonenplan kann sich nach dem Bau des Ablagerungsplatzes nur unterhalb der Anlage ändern.

9.1.2.2. Probleme der Mehrzwecknutzung

In der Literatur wird diese Frage im Zusammenhang mit den Geschiebeablagerungsplätzen noch nicht erörtert. In einem Beitrag über Kiesgruben und grössere Reservoirs erwähnt Karn (1977) auch die Interessen des Tourismus an solchen Anlagen. Er lehnt eine Nutzung der Becken zu Recht ab, wenn Hochwasserwellen zu erwarten sind. Noch ausgeprägter ist diese Forderung für Wildbäche zu stellen. Abgesehen von einem unten erwähnten Beispiel sind sonst keine Literaturstellen zu diesem Thema bekannt. Aufgrund der eigenen Untersuchungen kommen für Mehrzweckprojekte fünf Möglichkeiten in Frage:

- Rückhalt von Schnee und Eis:

Dazu gibt es in der Schweiz einige Beispiele. So wurden links und rechts des

Mittelwasebachs zwischen Gluringen und Reckingen im Wallis hohe Dämme geschüttet, um ein Ausbrechen der Fließlawinen zu verunmöglichen. Die Dämme führen vom Geschiebeablagerungsplatz an der Strasse (unten auf dem Schwemmkegel) bis zum Austritt der Tobelstrecke auf den Schwemmkegel.

Im Oltschibach bei Brienz (Bild 90) dringen Lawinen zwar nicht bis zum unteren Ablagerungsplatz vor, doch werden die Schneemassen, zum Teil zu richtigen Eisschollen gepresst, mit dem Wasser in den Ablagerungsplatz getrieben und schmelzen dort. Seinen Zweck als Ablagerungsplatz für Geschiebe könnte das Becken im frühen Frühling nur ungenügend erfüllen, was aber in dieser Jahreszeit dort nicht nötig ist.

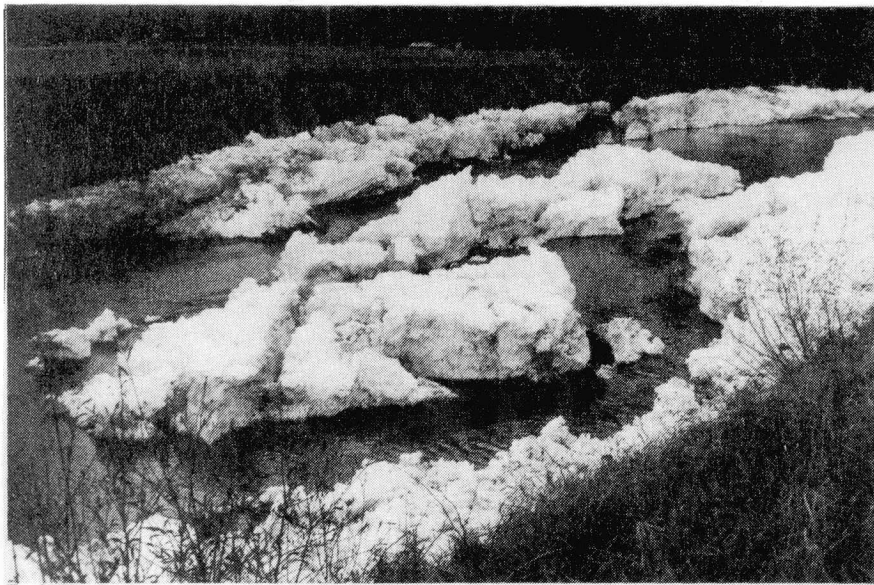


Bild 90 Der untere Ablagerungsplatz des Oltschibaches bei Brienz dient im Frühling als Schmelzsee für die heruntergeschwemmten Lawinenschneeschollen.

Falls Lawinen direkt in einen Ablagerungsplatz fließen können, müssen die Umfassungsdämme höher und nach lawinendynamischen Gesichtspunkten gestaltet werden.

#### - Kieswerke .....

Wenn die Geschiebeablagerungen industriell abgebaut werden, stellen die Bau-firmen ihre Maschinen - und hin und wieder sogar Bauten - in die Ablagerungs-plätze. Vor allem das Letztere ist zu unterlassen. Bei kleinen Einzugsgebieten sind die Gefahren grösser. In der Zeit der Sommergewitter darf in solchen Ablagerungsplätzen nicht gearbeitet werden. Es sei in diesem Zusammenhang auf

das untenstehende Beispiel des Enterbaches verwiesen (Spiel- und Badeplätze).

- Mündung von zwei Bächen in einen Ablagerungsplatz:  
.....

Auch dafür gibt es Beispiele, die im Prinzip aus rationellen Gründen zu befürworten sind. Die Gefahr dabei besteht allerdings, dass nicht beide Bäche geradlinig in den Ablagerungsplatz geführt werden können, so dass Ausuferungen oberhalb zu befürchten sind (siehe hydraulisch-geschiebetechnische Gesichtspunkte).

- Forstliche Nutzung  
.....

Ein Beispiel aus der Schweiz ist dem Autor nicht bekannt, hingegen erwähnt Kotoulas (1975) eines aus Griechenland: Ein grosser Geschiebeablagungsplatz wird durch Pappelanbau forstlich genutzt. Bei uns dürften solche Anlagen kaum in Frage kommen. Zudem müsste man von Fall zu Fall klären, wie sinnvoll der Anbau von Treibholz in einem Ablagerungsplatz ist...

Immerhin ist es denkbar, dass bei bescheidenen Ansprüchen, knappem Boden und selten überfluteten Becken die Ablagerungsfläche auch landwirtschaftlich genutzt wird. Aus Nepal sind dem Autor viele Beispiele bekannt, wo Bauern in Ablagerungsstrecken der Flösschen Landwirtschaft betreiben. Mit dem zeitweiligen Verlust der Ernte findet man sich ab, denn das ist jeweils von den Göttern gewollt!

- Spiel- und Badeplätze  
.....

Leider gibt es auch dafür Beispiele, wie das Bild 91 zeigt. Es sei dazu der Enterbach in Oesterreich erwähnt, wo sich die Leute am 26.6.1969 im Bad auf dem Wildbachschwemmkegel vergnügten, während im Einzugsgebiet des Baches ein starkes, konzentriertes Gewitter niederging. Als Folge davon wurden die Badenden von einer gewaltigen Mure überrascht, die das Bad zerstörte und weitere grosse Schäden anrichtete (Aulitzky 1970).

Die Forderung ist klar: Geschiebeablagungsplätze sind weder Kinderspielplätze noch Vergnügungstätten. Dies ist mit ein Grund, weshalb ein dauernder Wasserstau vermieden werden muss (siehe auch 9.1.6.).

Somit sind Geschiebeablagungsplätze in Mehrzweckfunktion nur in Ausnahmefällen sinnvoll und verantwortbar.

### 9.1.3. Das Zulaufgerinne

- Die Transportkapazität des Gerinnes muss ausreichend sein (Gefälle, Fliessquerschnitt), so dass keine Ablagerungen stattfinden.
- Die Ufer müssen gegen Erosion geschützt werden.
- Bei Rückstau aus dem Ablagerungsplatz sollten keine negativen Folgen auftreten (Austritt des Baches aus dem Gerinne).

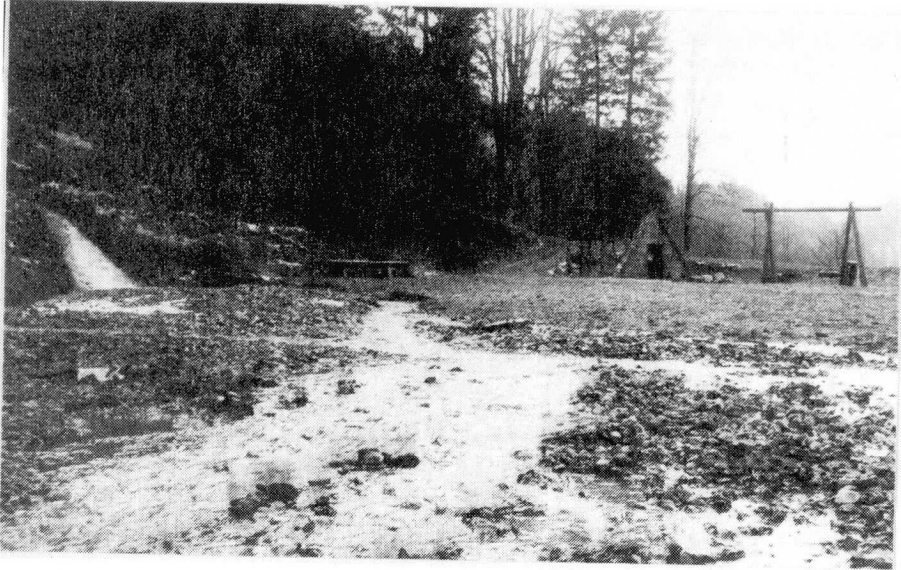


Bild 91 Geschiebeablagerungsplatz des Dorfbaches ob Lungern. Obschon es sich um einen schönen Aussichtspunkt handelt, gehören Rastbank und Spielgeräte für Kinder nicht in den Ablagerungsplatz.



Bild 92 Ablagerungsplatz des Eistlenbaches bei Hofstetten (BE) 1981: Durch Seitenerosion sind die Ufer des Zulaufgerinnes und die oberen Teile der Umfassungsdämme schwer beschädigt worden.



#### 9.1.4. Das Einlaufbauwerk

Das Einlaufbauwerk gewährleistet bzw. verbessert den Zulauf und die Wirkung des Ablagerungsplatzes. Um Situationen wie in Bild 92 gezeigt, zu vermeiden, empfiehlt sich sein Bau.

- Wenn immer möglich, sollte ein Einlaufabsturz gebaut werden (vertikaler Absturz oder Gefällevergrößerung bis deutlich unter das Verlandungsgefälle).
- Vor allem der vertikale Absturz verlangt nach einer Kolksicherung.
- Eine Ufersicherung gegen Erosion als Uebergang zu den Umfassungsdämmen ist vorzusehen.



Bild 93 Einlauf und oberer Teil des Geschiebeablageplatzes Schopflibach bei Seedorf (Uri). Die linienförmige Pflästerung des sehr steilen Einlaufes mit kaum ausgebildetem Bauwerk und das schmale Gerinne im Becken dürften grösseren Wassermengen nicht standhalten, womit die Umfassungsdämme gefährdet sind.

#### 9.1.5. Form und Grösse des Ablagerungsplatzes

- Die Grösse des Beckens ist abhängig von der erwarteten Geschiebefracht und vom Spülvermögen der selbsttätigen Entleerung.
- Die Geschiebefracht lässt sich mit Hilfe von stattgefundenen Ereignissen, aus der Beurteilung des Einzugsgebietes, mit Formeln (Hoffmann, Kronfellner-Kraus, Geschiebetrieb) oder mit den anderen unter

#### 7.4.1. beschriebenen Methoden schätzen.

- Für die Spülungen sind Ueberlegungen nach Kapitel 6, Erfahrungen, Spekulationen und Modellversuche notwendig.
- Spülungen werden begünstigt durch schmale und kurze Ablagerungsplätze sowie durch ein steiles Längsgefälle.
- Falls die Möglichkeit vorhanden ist, kann das Längsgefälle gleich gross gewählt werden wie jenes im Unterlauf. Wenn zusätzlich im Ablagerungsplatz auch die Gerinnegeometrie nachgebildet wird, so treten im Becken erst dann Ablagerungen auf, wenn das Unterlaufgerinne überlastet wäre. In diesem Fall empfiehlt sich eine muldenförmige Ausgestaltung des Beckens (Querprofil), was sonst nicht zwingend notwendig ist.
- Mit grösserem Längsgefälle muss die Rückhaltesperre höher gebaut werden, oder das verfügbare Volumen sinkt.
- Die selbsttätigen Entleerungen werden bei birnenförmigem Grundriss (Stiel nach oben) begünstigt.
- Für optimale Ablagerungen empfehlen sich Grundrisse in der Form von Kreissegmenten, Halbkreisen und Halbovalen (Sehne beim Einlaufbauwerk, quer zur Fliessrichtung).
- Ungünstig für Ablagerungen und Spülungen sind eckige Grundrisse.
- Optimale Beckenfüllungen lassen sich bei langen, schmalen Ablagerungsplätzen erreichen, wenn zwischen dem Einlauf und der Ueberfallsektion der Rückhaltesperre eine Neigung in der Grössenordnung des Verlandungsgefälles besteht.
- Das Verlandungsgefälle lässt sich am besten aus der Natur kopieren oder mit Formeln schätzen (siehe 7.4.2.3.).

#### 9.1.6. Umfassungsdämme

Sofern die Umfassungsdämme aus Erdmaterial oder natürlichen Hängen bestehen, sind sie erosionsgefährdet. Obschon man aus den Ablagerungs- und Spülvorgängen erkennt, dass diese Gefährdung im allgemeinen nicht sehr gross ist, kann es aber doch lokal zu bemerkenswerten Beanspruchungen der Dämme kommen. Diese meistens nicht lange anhaltenden Situationen können durch den Coanda-Effekt oder aus zufällig sich entwickelnden, asymmetrischen Spülphasen verursacht sein. Sie sind ohne Modellversuche nur schwer vorhersehbar.

Die wichtigsten Anforderungen an die Umfassungsdämme sind die folgenden:

- Die Dämme müssen bis auf die Höhe des Maximalstaus gegen Erosion gesichert sein. Je flacher die Böschungen, desto schwächer dürfen die Sicherungen sein.
- Eine Dimensionierung auf Grundbruch der wasserseitigen Böschungen empfiehlt sich, da der Wasserstau im Becken nach einer Hochwasserwelle relativ schnell sinken kann. Die Gefahr ist zwar wegen der kurzen Hochwasserwellen in Wildbächen, während derer sich die Dämme kaum bis sehr tief unter die Oberfläche sättigen können, nicht sehr gross. Von Fall zu Fall ist sie jedoch zu berücksichtigen.



- Für die Böschungssicherungen genügt Grünverbau normalerweise nicht. Ein fachgerechter Blockwurf wird empfohlen. Verwendet werden sollen Steine über der Grösse des grössten Korndurchmessers.
- Die Dämme müssen so hoch sein, dass sie nicht überströmt werden können, da die Luftseiten kaum je erosionsgeschützt sind.

#### 9.1.7. Das Rückhaltebauwerk

Die Abflusssektion und die Begrenzungen der Oeffnungen sind grössten Beanspruchungen ausgesetzt. Schilcher (1971) erwähnt, dass sich im Granit innerhalb von drei Jahren an der verstärkten Rückhaltesperre eines konkreten Beispiels Rillen von 20 - 30 cm Tiefe bildeten. Zeller (1973) führt für quarzreiche Gebiete in der Schweiz bei mit Spezialbeton verkleideten Wehrschwellen sogar Abriebwerte von 10 - 20 cm pro Jahr an.

Ist ein Ablagerungsplatz dauernd eingestaut, so bilden sich regelmässig Schlamm- und Feinstmaterialablagerungen, die für eine maschinelle Räumung äusserst unangenehm sind, da sie kaum mehr befahren werden können. Zudem entstehen Gefahren für Kinder und Erholungssuchende.



Bild 94 Der unterste Teil des Geschiebeablagerungsplatzes der Badtobelröfe bei Vilters besteht aus einem immer eingestauten, seichten Tümpel, in welchem sich Schlamm- und Feinstmaterial absetzen, und der darum auch mit Raupenfahrzeugen nicht befahren werden kann. Zudem ist er nicht nur in gefrorenem Zustand eine Gefahrenquelle für spielende Kinder.

Die Empfehlungen für das Rückhaltebauwerk lauten wie folgt:

- Als Konstruktion eignet sich eine Balkensperre nach den Forderungen unter 7.3.5.

- Die Dimensionierung des Schlitzes richtet sich nach den gewünschten Ablagerungs- und Spülvorgängen (Stauverhältnisse), bei gegebener Abflussganglinie und Geschiebefracht.
- Für wirkungsvolle Spülungen und grosse Ablagerungsvolumina sind hohe Rückhaltesperren notwendig, wobei die Höhe der Ueberfallsektion sinnvollerweise unter jener des Einlaufes bleiben sollte.
- Sperrenflügel aus Erdmaterial müssen wie die Umfassungsdämme gegen Erosion gesichert sein.
- Als Massnahmen gegen das Treibholz eignen sich Schrägrechen über die ganze Höhe des Schlitzes am besten. Die Neigung kann oben grösser sein als unten und sowohl oben wie auch unten wie ein Tirolerwehr in die Horizontale abgeknickt sein.
- Für die Rechen- und Balkenabstände gilt das unter 7.3.5.2, für die Balkenkonstruktion das unter 7.3.5.3. Gesagte.
- Abflusssektion und Begrenzungen der Oeffnungen sind gegen stärkste Abnützung zu schützen (Spezialbeton, Steinverkleidung).
- Ein Dauerstau (auch nur im vorderen Teil des Ablagerungsplatzes) ist zu vermeiden. Die untere Begrenzung des Schlitzes der Balkensperre sollte darum immer dem tiefsten Punkt des Ablagerungsplatzes entsprechen. Sind selbsttätige Entleerungen unerwünscht, so werden dauernd freizuhaltende grosse Entwässerungsdolen bis zum Grund der Rückhaltesperre notwendig.
- Der Kolksicherung der Rückhaltesperre ist besondere Beachtung zu schenken. Ein Beispiel dazu zeigt Bild 95.

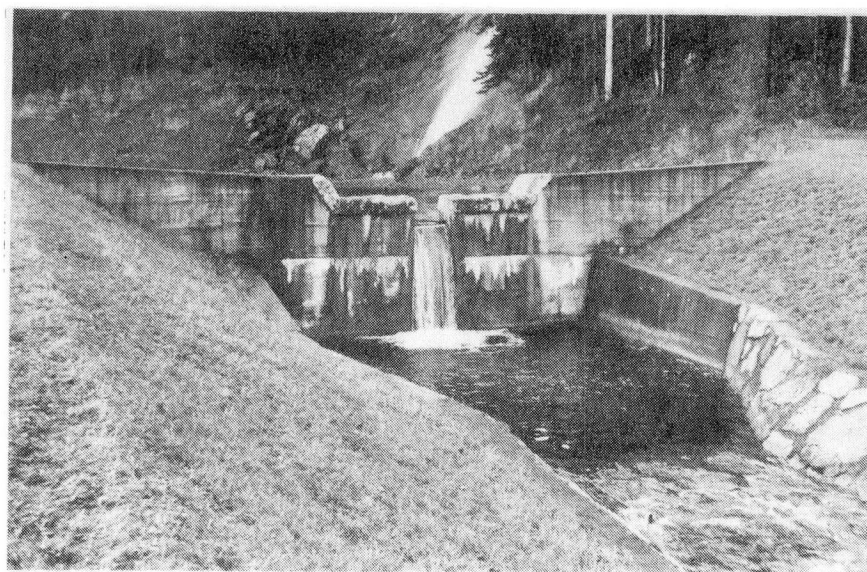


Bild 95 Rückhaltesperre des Ablagerungsplatzes am Saarbach bei Vilters mit mustergültiger Kolksicherung.

### 9.1.8. Das Unterlaufgerinne

Im Unterlauf muss man einerseits mit praktisch geschiebelosen Abflüssen und andererseits mit sehr hohen Geschiebekonzentrationen rechnen. Daraus ergeben sich die folgenden Forderungen:

- Das Gerinne ist gegen starke Erosion zu sichern (Pflästerung).
- Die Transportkapazität muss so gross sein (Gefälle, Fliessquerschnitt), dass auch bei extrem hohen Geschiebekonzentrationen (bis über 40 Vol.%) keine Ablagerungen und Auflandungen entstehen.
- Ein grosszügiges Freibord ist vorzusehen. Brücken und Durchlässe dürfen den Fliessquerschnitt nicht einengen.

### 9.1.9. Der Zufahrtsweg

Jeder Geschiebeablagerungsplatz muss maschinell leerbar sein. Lediglich bei kleinsten Becken ist dies mit einem Bagger mit langem Ausleger von den Umfassungsdämmen oder der Rückhaltesperre aus durchführbar. Bei mittleren und grossen Ablagerungsbecken ist darum eine Zufahrt ins Becken hinein notwendig.

- Der letzte Teil der Zufahrt ins Becken in Form einer Rampe soll von hinten in den Ablagerungsplatz nach vorne führen und nicht umgekehrt (Bild 96). Im zweiten Fall besteht die Gefahr, dass das Trasse bei hohem Stau oder vollem Becken vom Wasser als Auslaufgerinne benützt wird.
- Erfolgt die Zufahrt trotzdem von vorne nach hinten (Gefälleverhältnisse), so sind Massnahmen zu treffen, dass das Wasser nicht über den Weg aus dem Becken fliessen kann (Gefälle, Dammbalken).
- Die Ausführung der Zufahrt im Becken soll auf einfachste Weise geschehen, da sie dort jederzeit überströmt und zerstört werden kann.
- Bei genügend grossem Schlitz der Rückhaltesperre kann dieser als Ersatz für eine seitliche Zufahrt benützt werden.

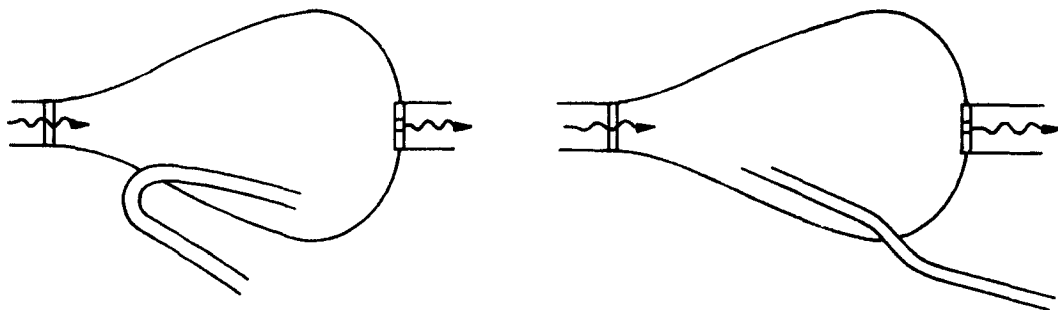


Bild 96 Die Zufahrt in den Ablagerungsplatz soll wenn möglich von hinten nach vorn (links im Bild), und nicht umgekehrt erfolgen, da sonst die Gefahr besteht, dass sie vom Wasser als Auslaufgerinne benützt wird.

## 9.2. Folgerungen aus den Untersuchungen

Die zu Beginn der Arbeit formulierten Ziele konnten weitgehend erreicht werden. Da es sich dabei aber vor allem um Uebersichten, Erweiterung der Grundlagen und generelle Antworten handelt, bleiben noch einige offene Fragen und vor allem ungelöste Detailprobleme. Von ihnen ist im folgenden die Rede.

### 9.2.1. Folgerungen aus den besichtigten praktischen Beispielen

Beim Studium der ausgeführten Projekte und der z.T. bereits seit Jahren funktionierenden Anlagen fielen dem Autor vor allem vier Punkte auf:

- Eine systematische Sammlung von Erfahrungen mit Geschiebeablagerungsplätzen existiert nicht.
- Gemachte Erfahrungen werden bei Neubauten nicht angewandt, weil sie, ohne Literaturstudium oder mindestens gezielte Umfragen, nicht ohne weiteres verfügbar sind.
- Nur in Ausnahmefällen (vor allem, wenn Kraftwerksgesellschaften daran interessiert sind) sind Messungen über Abflüsse, Geschiebefrachten, Verlandungsgefälle usw. vorhanden.
- Es gibt keine Bestandesaufnahme der Geschiebeablagerungsplätze in der Schweiz. Jeder Kanton berücksichtigt ausschliesslich seine eigenen Erfahrungen.

### 9.2.2. Folgerungen aus den Modellversuchen

In mancherlei Beziehung konnten die vorliegenden Modellversuche nur in sehr beschränktem Rahmen durchgeführt werden. Ergänzungen aus der Literatur liegen extrem spärlich vor. Die drei generellen Folgerungen aus den Modellversuchen lauten darum:

- Weitere Versuche sind für viele schlüssige Aussagen notwendig, und zwar
  - quantitativ (Reproduzierbarkeit der Versuche) und
  - qualitativ (Veränderung der Kornverteilungskurve u.a.).
- Nach dieser Arbeit bleiben noch viele Detailfragen ungeklärt.
- Für viele Ergebnisse der Modellversuche fehlt die Ueberprüfung mit den Vorgängen in der Natur.

### 9.2.3. Mögliche Folgeprojekte

Die folgende Liste kann nicht vollständig sein. Sie soll auf die wichtigsten ungelösten Probleme aufmerksam machen. In Klammern wird jeweils angegeben, ob sich die Untersuchungen vor allem auf den Massstab 1:1 (FU = Felduntersuchungen) oder vorerst einmal auf Modellversuche (MV) beziehen.

- Ueberprüfung und ev. Erweiterung der Morphologie für Ablagerungen und Spülungen bei veränderten, extremen Kornverteilungen. (MV)
- Erweiterte Untersuchungen über das Rückhaltevermögen und den Füllungsgrad der Ablagerungsplätze (Trap Efficiency-Theorie). (MV)
- Messung des Sortiereffektes von Rückhaltesperren bei verschiedenen Kornverteilungen. (MV)
- Untersuchungen über die Wirkung von halbdurchlässigen und undurchlässigen Einbauten auf Ablagerungen und Spülungen. (MV)
- Erarbeitung von mathematischen Modellen für Ablagerungen und Spülungen in Ablagerungsplätzen. (MV)
- Abklärung von weiteren Möglichkeiten zur Trennung von Treibholz und Geschiebe (Optimierung der Schrägrechen, überströmte Rückhaltesperren u.a.). (MV)
- Erweiterte Forschung in Natur und Modell zu Transport und Ablagerung von Treibholz. (FU) (MV)
- Bestimmung der zu erwartenden Geschiebefracht anhand von typischen Merkmalen und Parametern des Einzugsgebietes (Geologie, Topographie, Vegetation u.a.); Kriterienkarten dazu. (FU)
- Ergänzungen zu den Erfahrungen mit selbsttätigen Entleerungen anhand von Naturbeispielen. (FU)
- Messungen des Verlandungsgefälles in der Natur in Abhängigkeit von der Kornverteilung und dem Abfluss. (FU)
- Systematische und zielgerichtete Bestandesaufnahme aller interessanten Geschiebeablagerungsplätze in der Schweiz. Statistische Auswertung der erhobenen Grössen. (FU)

### 9.3. Abschliessende Bemerkungen

Aus den vielen offenen Fragen geht die Erkenntnis hervor, dass man sich beim Entwurf eines Geschiebeablagerungsplatzes zwar nicht als hilfloser Zauberlehrling vorkommen muss, dass die heute vorhandenen, in dieser Arbeit zu einem grossen Teil gesammelten "Zaubersprüche des Hexenmeisters" aber noch lange nicht alle Probleme lösen. Eine weitere wissenschaftliche Befassung mit den Geschiebeablagerungsplätzen ist notwendig. Dabei sollten die Schwerpunkte weniger auf Laboruntersuchungen liegen (hydraulische Modelle), sondern es muss grosses Gewicht auf Ereignisanalysen, d.h. auf Naturbeobachtungen gelegt werden. Eine Zusammenarbeit mit den japanischen Fachkollegen wäre zu prüfen, denn sie scheinen bereits Erfahrungen mit der künstlichen Auslösung von Hochwässern und Murgängen zu haben. Die wissenschaftliche Ueberwachung einer grösseren Anzahl von Geschiebeablagerungsplätzen in unserem Berggebiet würde nach einigen Jahren zu wertvollen Ergebnissen führen, die man mit Modellversuchen trotz ihrer grossen Vorteile nur zu einem Teil erhalten kann.

Der praktisch tätige, projektierende Ingenieur sollte sich immer bewusst bleiben, dass er mit einem Geschiebeablagerungsplatz lediglich Symptome bekämpft. Bei der Dimensionierung wird er oft auf Ermessensfragen stossen, da es beim Geschiebetransport in Wildbächen immer Faktoren geben wird, die unsicher oder gar nicht voraussehbar sind. Andere Werte sind kaum zu quantifizieren. Der Ingenieur wird dabei nicht um subjektive Entscheide herumkommen. Selbst bei einem nach bestem Wissen projektierten und optimal konzipierten Ablagerungsplatz verbleiben immer Restrisiken. Wenn die vorliegende Arbeit einen Beitrag dazu geleistet hat, diese Risiken mit besseren Grundlagenkenntnissen etwas zu vermindern, so ist ihr Zweck erreicht.

## 10. Anhang =====

### 10.1. Bezeichnungen und Definitionen der Wildbachsperrren

#### 10.1.1. Einleitung

Bei der Durcharbeitung der Literatur zur vorliegenden Arbeit fielen die zahlreichen Bezeichnungen für Wildbachsperrren auf. Im folgenden werden alle gefundenen Ausdrücke angeführt und definiert. Obschon es sich um über 90 Begriffe handelt, dürfte die Liste noch nicht vollständig sein. Sie enthält aber sicher die wichtigsten und immer wieder verwendeten Bezeichnungen. In der Zusammenstellung ist nur die deutschsprachige Literatur berücksichtigt. Auf ein eigenes Literaturverzeichnis zu diesem Anhang wird verzichtet (siehe Literatur der gesamten Arbeit und besonders "Torrent Control Terminology" der FAO, 1981).

Nicht immer war es einfach, eindeutige Definitionen für bestimmte Bezeichnungen zu finden, vor allem, wenn sie praktisch nur von einem Autor verwendet wurden, ohne dass dieser sie klar beschrieben hätte. In solchen Fällen ist in der Zusammenstellung der jeweilige Autor mit dem Erscheinungsdatum der entsprechenden Publikation aufgeführt. Weiter fiel auf, dass viele Begriffe falsch oder zumindest inkonsequent verwendet wurden. Auch haben einige Autoren eigene Vorstellungen zu sonst oder später in der allgemeinen Literatur gebrauchten und klar definierten Bezeichnungen. So versteht z.B. Ueblagger (1972) unter einer Filtersperre lediglich die (U-Boot)Netzsperrre, oder für Zeller (1976) ist eine Rostsperrre eine Betonsperre mit vielen grossen Dolen. Bei einigen Begriffen handelt es sich um Wortneuschöpfungen einzelner Autoren, um unklare, unsinnige, unschöne oder falsche Wortbildungen und schliesslich um solche Bezeichnungen, für welche bereits in der Literatur bekannte, klar definierte andere Wörter bestehen. Alle diese Ausdrücke sollten vermieden werden und sind in der Zusammenstellung mit einem \* bezeichnet.

Um klare Grenzen zu anderen Fachgebieten zu ziehen, sei noch kurz der Oberbegriff der "Wildbachsperrre" definiert: Man versteht darunter ein Querwerk in einem Wildbach, welches mindestens mannshoch ist (in der Literatur schwanken die Angaben zwischen 1,5 und 2,0 m) und der Hebung und Fixierung der Bachsohle oder dem Geschieberückhalt dient. Querwerke mit Absturzhöhen unter 1,5 m werden üblicherweise als Schwellen bezeichnet, solche von einer Höhe über 15 m hingenen als Talsperren, die man nicht mehr zu den Wildbachsperrren zählt.

Die 12 wichtigsten Sperrrentypen sind in der Zusammenstellung unter 10.1.3. neben den Definitionen mit Skizzen illustriert. Alle anderen können von diesen Grundtypen abgeleitet werden.

#### 10.1.2. Versuch einer systematischen Darstellung

Die Durchsicht aller Sperrrenbezeichnungen ergibt, dass man jeden Begriff mindestens einem der vier folgenden Gebiete zuordnen kann:

1. Funktion
2. Konstruktion
3. Baumaterial
4. Statik

Einige Bezeichnungen sind Mischformen, bzw. können zwei Gebieten zugewiesen werden, so z.B. die Bogen- oder Plattensperre (Konstruktion und Statik), und die Holzkastensperre (Konstruktion und Baumaterial).

Leys und Riccabona (1970), Puglisi (1972 und 1973) und Leys (1973) haben die Aufstellung einer Systematik der verschiedenen Sperrentypen versucht. Die Ergebnisse können nur bedingt befriedigen, vor allem deshalb, weil die Autoren versuchten, die oben erwähnten vier Blickwinkel zu mischen. Ohne Anspruch auf eine neue und fehlerlose Klassifikation der Sperren zu erheben, seien im folgenden den vier Kriterien die wichtigsten Typen in möglichst systematischer Weise zugeteilt.

#### 10.1.2.1. Unterteilung nach der Konstruktion der Sperren

- a) Vollwandsperren:
  - Gewölbesperren
  - Plattensperren
  - Kastensperren (gefüllt)
  - Kaskadensperren
  - Pfeilerplattensperren
  - Dolensperren
  - Winkelsperren
  
- b) Offene Sperren:
  - Schlitzsperren i.w.S.:
    - Schlitzsperren
    - Balkensperren
    - Rechensperren
    - Leitersperren
    - Christbaumsperren
  - Pfeilersperren i.w.S.:
    - Pfeilersperren
    - Pfeilerreihensperren
    - Strebepfeilersperren
  - Gittersperren i.w.S. :
    - Gittersperren
    - Netzsperren
    - Gitterkastensperren

#### 10.1.2.2. Unterteilung nach der Funktion der Sperren

- a) Rückhaltesperren:
  - Geschiebestausperren :
    - Konsolidierungssperren
    - Rückhaltesperren in Geschiebeablageplatz (dauernder Rückhalt)
  - Entleerungssperren :
    - Dosiersperren (quantitativ)
    - Sortiersperren (qualitativ)
  
- b) Gegensperren
  
- c) Murverbauungssperren



### 10.1.2.3. Unterteilung nach den Baumaterialien der Sperren

- a) Holzsperrern
- b) Steinsperren :
  - Trockenmauerwerk
  - Zementmörtelmauerwerk
- c) Betonsperren
- d) Stahlsperren
- e) Netzsperrern
- f) Mischformen:
  - Drahtschottersperren
  - Stahlbetonsperren

### 10.1.2.4. Unterteilung nach der Statik der Sperren

- a) Schwergewichtssperren
- b) Gewölbesperren
- c) Plattensperren
- d) Pfeiler- (inkl. Strebepfeiler-) Sperren
- e) Zugsperren
- f) Winkelsperren

### 10.1.3. Die Begriffe und ihre Definitionen

- Ablenksperrre (FAO 1981) Querwerk zur Ableitung eines Baches. Falls die Funktion des Ablenkens im Vordergrund steht, in der Praxis eher "Damm" oder "Buhne".
- \* Auslaufsperrre (Leys 1965) Lediglich von Leys gebrauchter Ausdruck für → Entleerungssperre.
- Balkensperre Sperre besteht teilweise oder ganz aus horizontalen Balken. Meistens sind die Balken in eine Schlitz- oder → Pfeilersperre eingebaut (Bild 97).
- \* Balkenentleerungssperre Lediglich von Leys (1976 u.a.) verwendeter, von der Wortbildung her unsinniger Ausdruck für eine Entleerungssperre in der Art der → Balkensperre.
- Balkenpfeiler-sperre Mehrteilige → Balkensperre, durch Pfeiler unterteilt.
- Betonsperre Aus Beton gebaute Sperre.

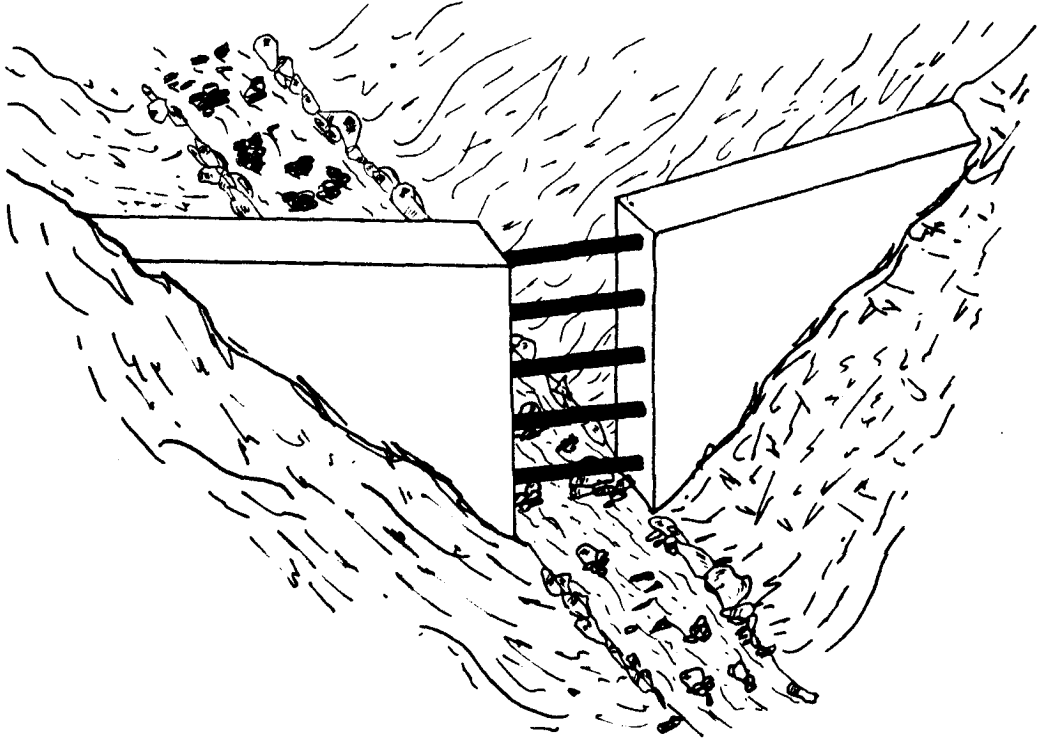


Bild 97 Balkensperre

- Bogensperre Sperre mit bogenförmigem Grundriss, Scheitel bachaufwärts gerichtet. Wirkt statisch als Gewölbe, deshalb auch → Gewölbesperre genannt (Bild 98).
- \* Bogen-Winkel-Sperre (Kronfellner-Kraus, 1972). Gemeint ist wahrscheinlich eine → Bogensperre, welche wie eine → Winkelsperre auf einem horizontalen Fundament steht.
- \* Bühnenstausperre (Leys 1976). Bühnen auf gleicher Höhe links und rechts des Bachlaufes; → Schlitzsperre mit sehr weitem Schlitz.
- Christbaumsperre Eine der neuesten Entwicklungen in Oesterreich, eine Mischung aus → Schlitz-, → Balken- und → Pfeilersperre, wobei die Pfeiler quer zur Bachachse auf verschiedenen Höhen in regelmässigen Abständen Kragarme aufweisen (Bild 99).
- \* Dammsperre → Erddammsperre.
- \* Deponiesperre → Geschiebestausperre. Dient vorwiegend dem dauernden Geschieberückhalt.

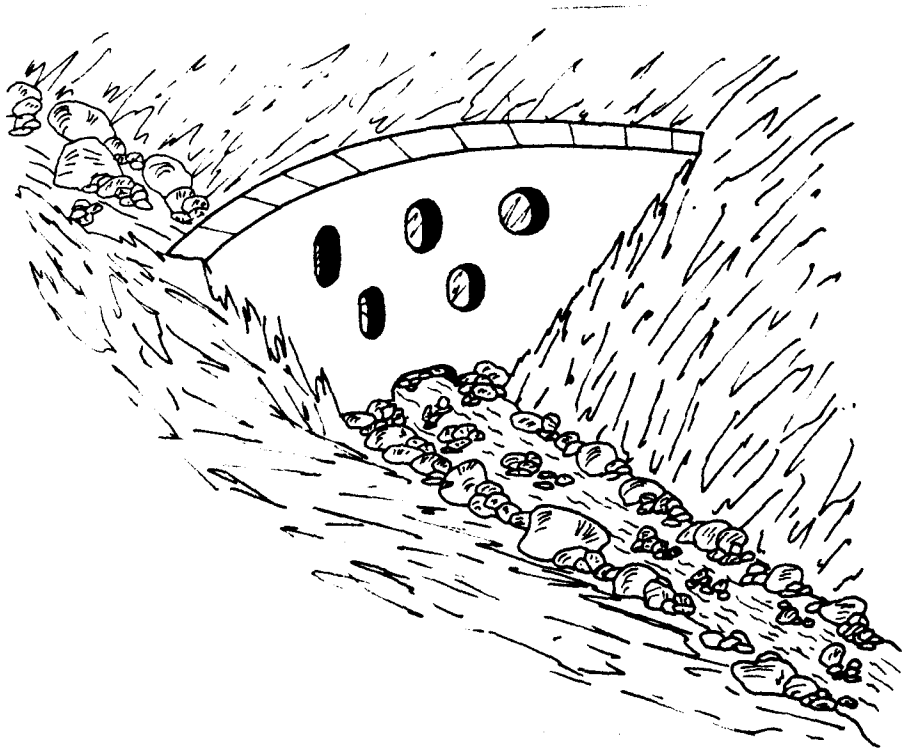


Bild 98 Bogensperre

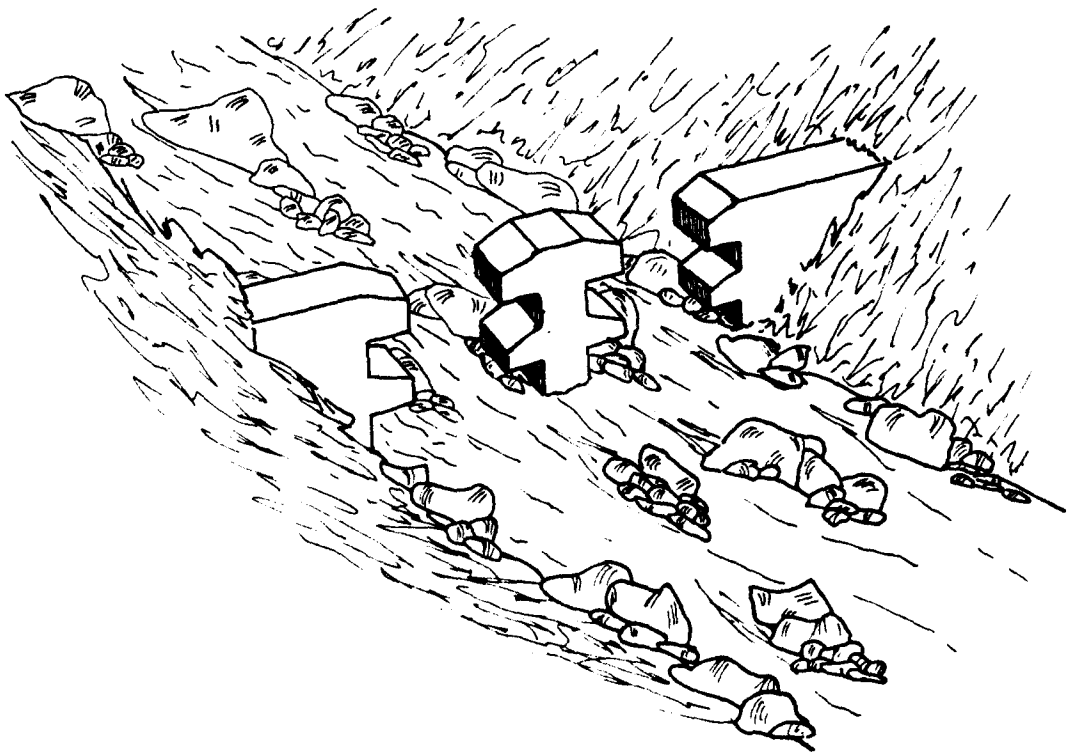


Bild 99 Christbaumsperre

- Dolensperre → Vollwandsperre mit grösseren oder kleineren Dolen, durch welche nicht nur die Entwässerung, sondern bei entsprechender Verlandung auch der Geschiebetransport stattfinden sollte.
- \* Dolentleerungs-sperre Lediglich von Leys (1976 u.a.) verwendeter, von der Wortbildung her unsinniger Ausdruck für eine grossdolige Sperre mit der Funktion der selbsttätigen Entleerung.
- Dosiersperre → Geschieberückhaltesperre, die bei Extremereignissen den grössten Teil der Geschiebefracht zurückhält. Kleinere Abflüsse sollen jedoch ungestaut abfliessen und den Verlandungskörper abbauen können.
- Drahtschotter-sperre Querwerk aus Drahtschotterkörben (Gabionen).
- Entleerungssperre Mehr oder weniger offen gebaute Sperre, die den Geschiebetransport nur bei Extremereignissen behindern oder gar stoppen soll. Bei kleinem Hoch- und Mittelwasser wird der Verlandungsraum hingegen selbsttätig entleert.
- Erddamm Sperre, deren ganzer Körper oder mindestens die Flügel aus Erddämmen bestehen. Dem Wasser ausgesetzte Teile (Ueberfallbauwerk u.a.) müssen jedoch gegen Erosion geschützt sein.
- \* Erddruck Sperre, welche auf Erddruck dimensioniert ist.
- \* Fenstersperre Sperre mit grossen, rechteckigen und breiten Dolen.
- \* Filtersperre Von Leys (1976) verwendeter Ausdruck für die → Sortiersperre.
- \* Filtriersperre Vor allem von Kronfellner-Kraus (1970) verwendeter Begriff für die → Sortiersperre.
- Gegensperre Unterhalb der → Hauptsperre errichtetes Querwerk, das verhindern soll, dass sich am Fuss der Hauptsperre ein Kolk bildet, der diese zum Einstürzen bringen könnte. Auch Vorsperre genannt.
- \* Geschiebesperre Nur von Schoklitsch (1962) verwendeter Begriff für die Wildbachsperre.
- Geschieberück-haltesperre Sperre, welche bewirken soll, dass das Geschiebe oberhalb entweder dauernd oder vorübergehend abgelagert wird.
- Geschiebestau-sperre Sperre mit dem Zweck der dauernden Geschiebeablagung oberhalb des Bauwerkes.

- Gewichtssperre Sperre, die statisch als Schwergewichtsmauer dimensioniert ist.
- Gewichtsplattensperre Als Schwergewichtsmauer in Plattenform dimensionierte Sperre.
- Gewölbesperre → Bogensperre.
- Gittersperre Durchlässige Sperre in Gitterform (Verbindung von horizontalen und vertikalen Trägern), meistens Stahlkonstruktion.
- Gitterkastensperre → Gittersperre mit kastenartiger Ausdehnung in der dritten Dimension. Die einzelnen Elemente (Kästen) können auch in Drahtschotterbauweise gefüllt sein (Bild 100).

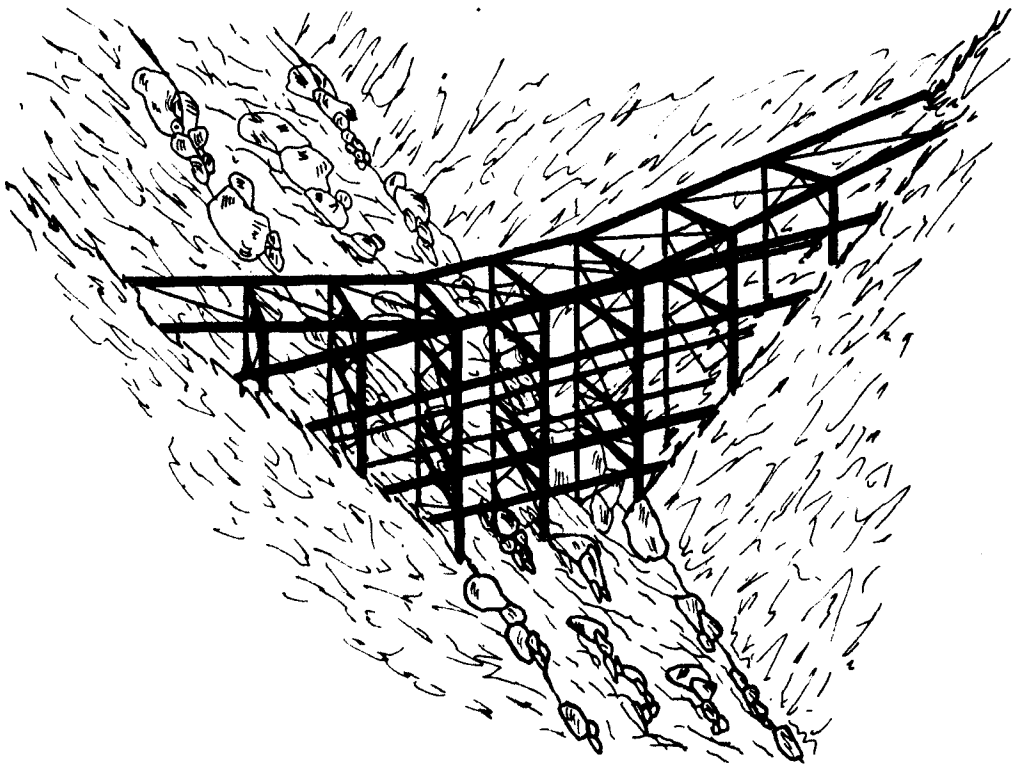


Bild 100 Gitterkastensperre

- \* Gitterrostsperrre → Gittersperre
- \* Gitterwerksperre → Gittersperre
- Grassperre Lediglich von Strele (1950) verwendeter Ausdruck für eine Art von Faschinenverbauung (also keine

eigentliche Sperre): In trockenen Runsen wird Astwerk zusammengeschichtet und mit Steinen und Material beschwert. (Grass = Reisig)

- Grossdolige Sperre

→ Dolensperre, wobei die Dolen besonders gross ausgestaltet sind. Dadurch sollte das Bauwerk mindestens zeitweise als → Entleerungssperre wirken (Bild 101).

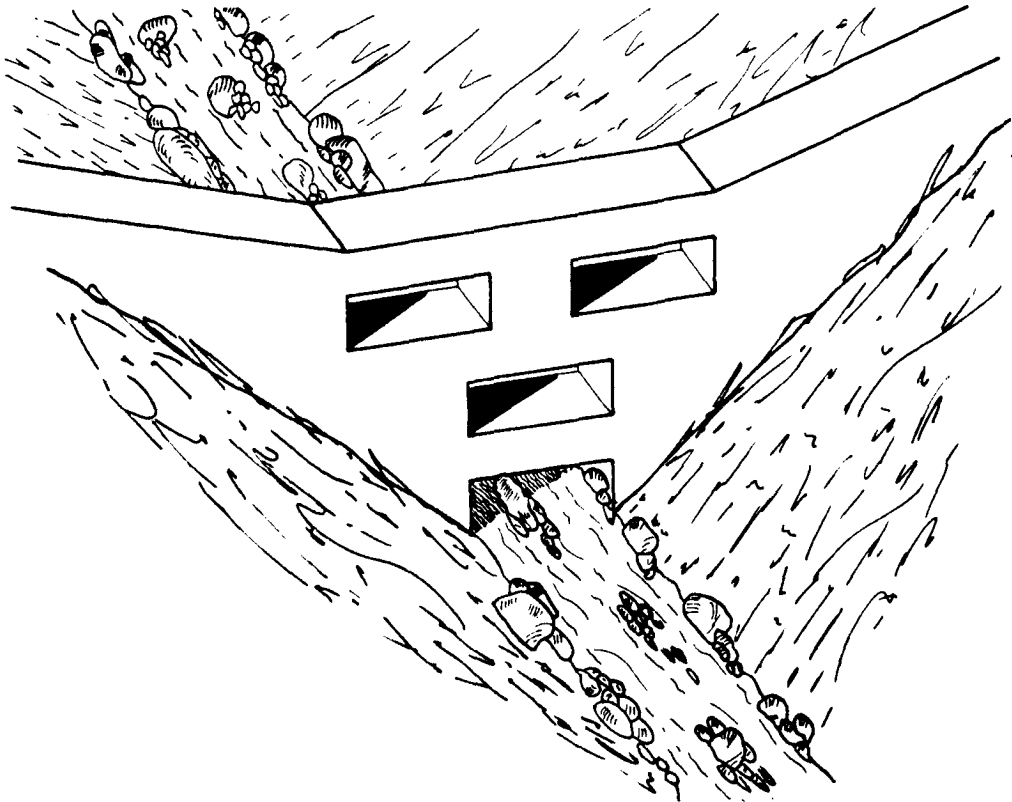


Bild 101 Grossdolige Sperre

- \* Grundsperre      Querwerk mit einer Fallhöhe von maximal 1,5 m (je nach Autor z.T. 2 m), die allerdings richtigerweise als Grundschwelle oder gar Sohlgurte bezeichnet werden muss.
- Hauptsperre      Im Gegensatz zur Vor- oder → Gegensperre ein grösseres Querwerk, das gegen Unterkolkung geschützt werden muss.
- Holzsperrre      In Holz errichtete Sperre.
- \* Kammsperre      (Kronfellner-Kraus 1972); → Rechensperre. Hin und wieder wird darunter auch eine einfache Treibholzrückhaltesperre aus nebeneinander vertikal ins

Bachbett geramten Pfählen oder Trägern verstanden.

- Holzkastensperre → Kastensperre, bei welcher das Skelett aus Holz besteht (Füllung aus Steinen).
- Kaskadensperre Grosse Fallhöhen werden durch treppenartige Ausbildung der Sperre auf der Talseite unterteilt (Bild 102).

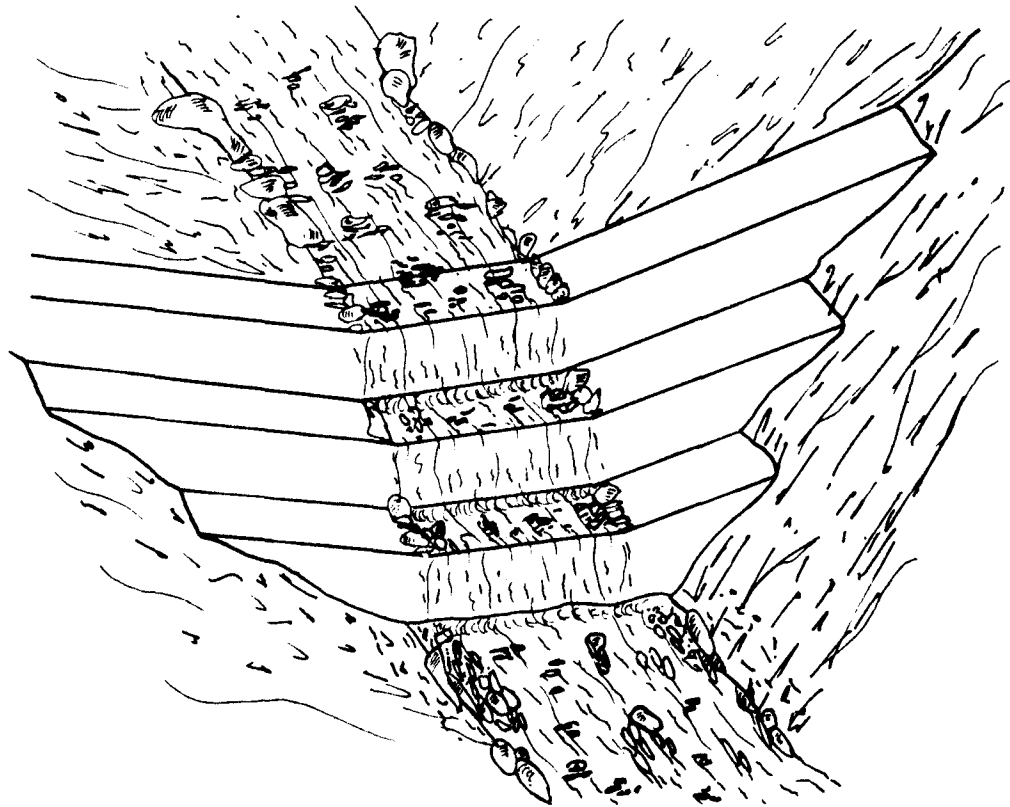


Bild 102 Kaskadensperre

- Kastensperre Aus einzelnen Quaderskeletten (Stahlkästen, Drahtschotterkörben, Betonbalken) zusammengesetzte Sperre.
- Konsolidierungssperre Sperre mit der Aufgabe, die Bachsohle zu heben (Verlandung hinter dem Querwerk), mit dem Zweck, die Böschungsfüsse zu stützen und die Tiefenerosion des Baches zu unterbinden.
- Kronengeschlossene Sperre Sperre, bei welcher die beiden Flügel in der Mitte durch eine ununterbrochene Abflusssektion fest miteinander verbunden sind, und zwar nicht nur optisch, sondern auch konstruktiv-statisch.

- Kronenoffene Sperre Sperre, bei welcher die beiden Flügel in der Mitte vom statischen System her nicht miteinander verbunden sind (vor allem → Schlitz-, → Balken- und → Pfeilersperren).
- \* Lebende Sperre (FAO 1981); Sperre, die Material ausschlagfähiger Holzarten enthält (Pflöcke, Ruten).
- Leitersperre → Schlitzsperre, wobei der Oeffnung bergseits eine schräg von oben (Abflussektion) nach unten (Bachbett) verlaufende Reihe von Trägern mit beidseitig tragenden, dreieckigen Flügelmauern voran-gebaut ist (Bild 103).

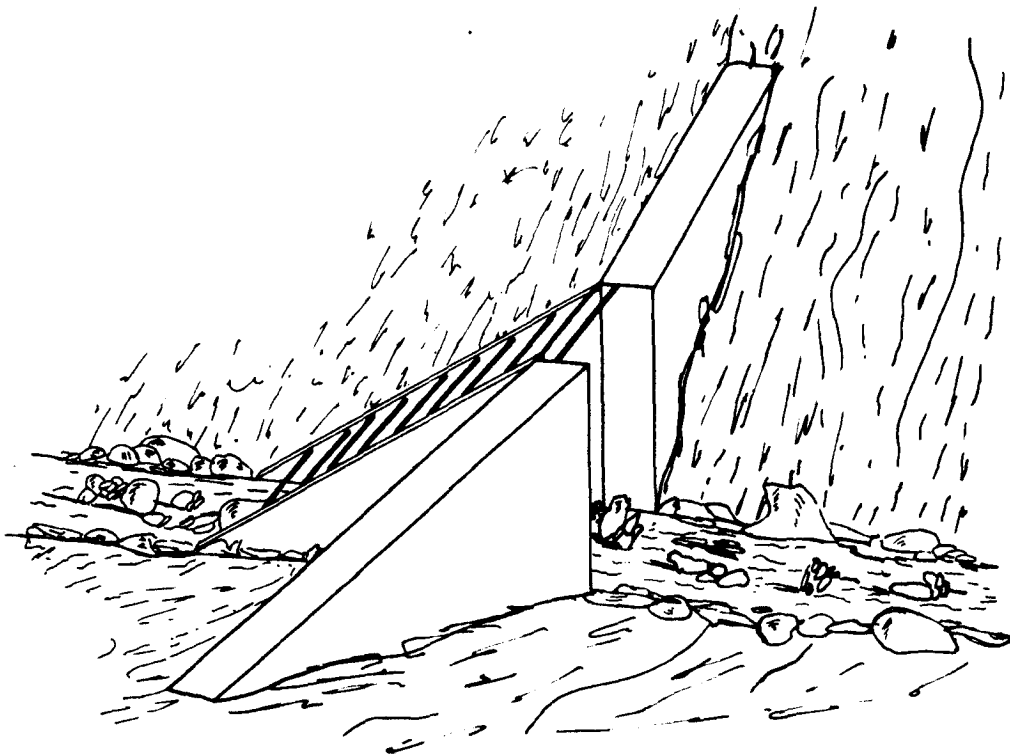


Bild 103 Leitersperre

- Mauerwerksperre In Mauerwerk erstellte Sperre.
- Mursperre Sperre, deren Abflussektion als Murprofil ausgebildet ist (ohne Ecken, in der Mitte am tiefsten, gegen die Hänge konkav ansteigend).
- Murverbauungsperre (Kronfellner-Kraus 1973); in Russland verwendeter Typ der → Kastensperre, wobei die einzelnen, dreieckigen Elemente in verschiedenen Kombinationen zu Sperren, Murbrechern, Abweisdämmen usw. zusammengefügt werden.



- **Netzsperr** An Seilen aufgehängtes, grobmaschiges Netz, das meistens nicht bis zur Bachsohle hinunterreicht. Bei Extremereignissen soll darin das Treibholz hängenbleiben (Bild 104).

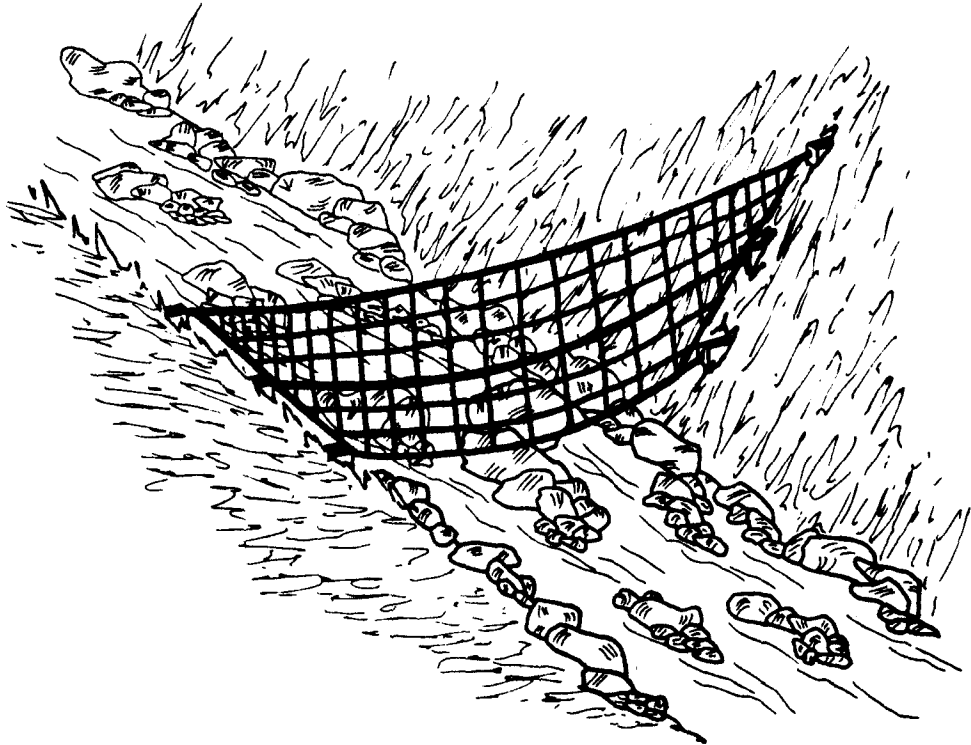


Bild 104 Netzsperr

- **Offene Sperr** Sperr mit mehr oder weniger grossen Oeffnungen (Schlitzen, Dolen, Gittern u.a.) mit dem Ziel, einen Teil des Geschiebes ungehindert passieren zu lassen.
- **Pfeilersperr** Meistens breitere, durch Pfeiler in verschiedene Segmente unterteilte Sperr (Bild 105).
- **Pfeilerreihensperr** → Pfeilersperr, bei welcher eine ganze Reihe von Pfeilern vorhanden ist.
- **Pfeilerreihen-Platten-Sperr** (Kronfellner-Kraus 1972); → Pfeilerreihensperr, bei welcher zwischen den einzelnen Pfeilern statisch als Platten dimensionierte Sperrnelemente eingefügt sind.
- **Plattensperr** Statisch als Platte dimensionierte Sperr.

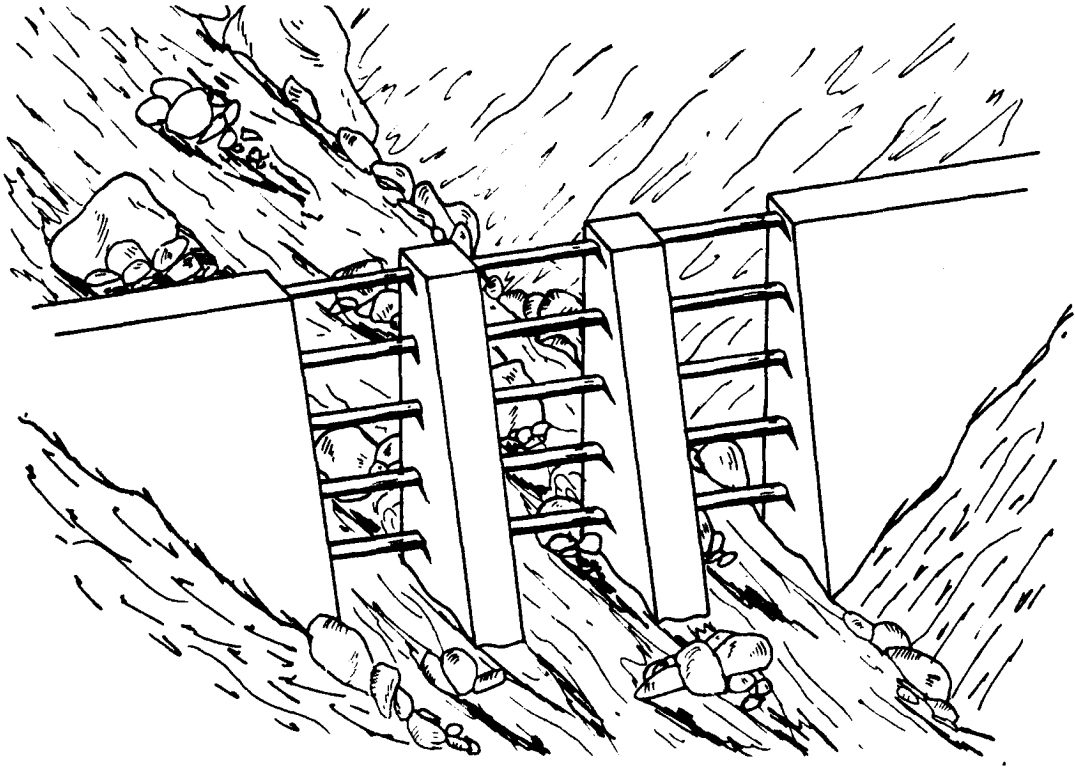


Bild 105 Pfeilersperre, Pfeilerbalkensperre.

- \* Prügelsperre (FAO 1981); Sperre aus übereinandergelagerten, durch Querstämmen voneinander getrennten Dielen aus stärkerem Rundholz und einer entsprechenden Vorfeldsicherung.
- Rechensperre Sperre, welche ganz oder teilweise aus vertikalen Stäben besteht (Bild 106).
- \* Rauhbaumsperre Von Strele (1950) verwendeter Begriff für die einwandige Holzsperrung, die durch Rauhbaume nach hinten in ihren Verlandungskörper zurückgebunden ist.
- \* Rechenbalkensperre Ausschliesslich von Leys und Riccabona (1970) verwendeter Begriff, der in sich widersprüchlich ist. Möglicherweise ist die → Gittersperre gemeint.
- \* Rechenentleerungssperre Lediglich von Leys (1976 u.a.) verwendeter, von der Wortbildung her unsinniger Begriff für eine → Entleerungssperre in der Art der → Rechensperre.
- Retentionssperre Fremdwort für → Rückhaltesperre.

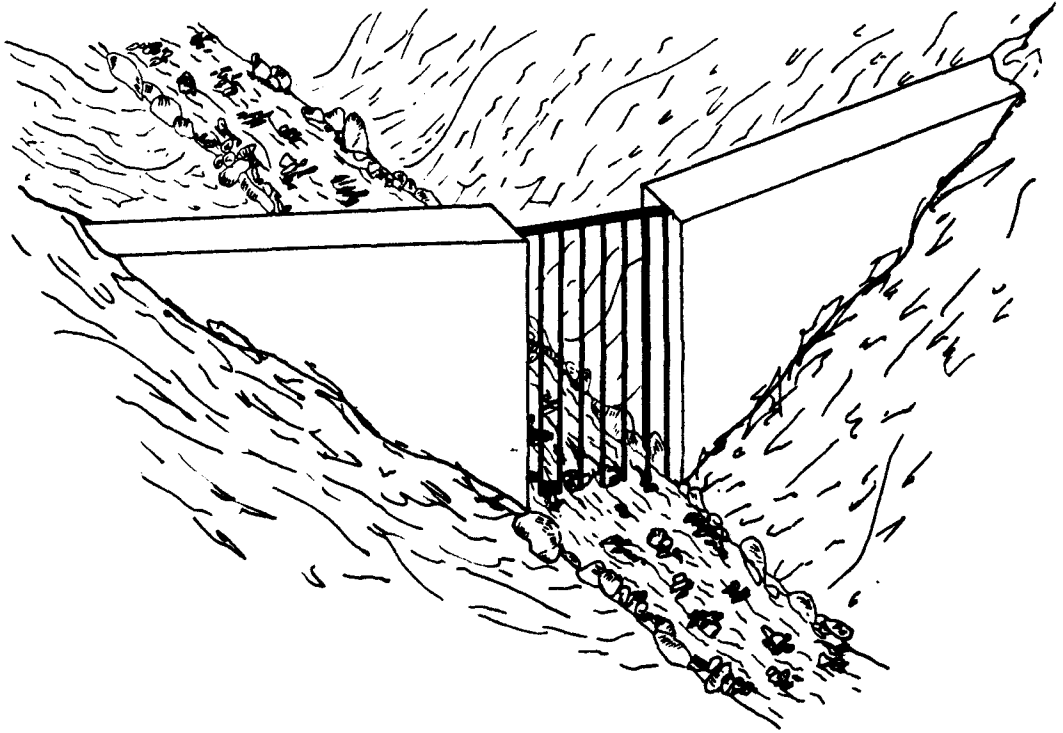


Bild 106 Rechensperre

- \* Rostsperrre Vor allem von Kronfellner-Kraus (1970) als eine Art Ueberbegriff für → Balken-, → Rechen-, → Gitter- und → Kammsperren verwendeter Ausdruck.
- Rückhaltesperre Sperre, die dem dauernden oder vorübergehenden Geschieberückhalt dient.
- \* Scherensperre Ausschliesslich von Strele (1942) verwendeter Begriff: Einwandige Holzsperrre, deren quer zum Wasserlauf angeordnete Wandbäume mit schrägen, sich scherenartig kreuzenden Zangen aus beasteten Stämmen zurückgebunden und mit Strauchwerk und Steinen hinterfüllt sind.
- Schlitzsperrre Sperre mit in der Mitte angeordnetem, vertikalem Schlitz, welcher von der Abflusssktion meistens bis hinunter zum Bachbett reicht und sich je nach Funktion auch nach oben oder unten verjüngen kann. Von der Idee her die klassische → Entleerungssperre (Bild 107).
- Schottersperre Nur von Schaffernak (1950) verwendeter Begriff für die → Geschieberückhaltesperre.

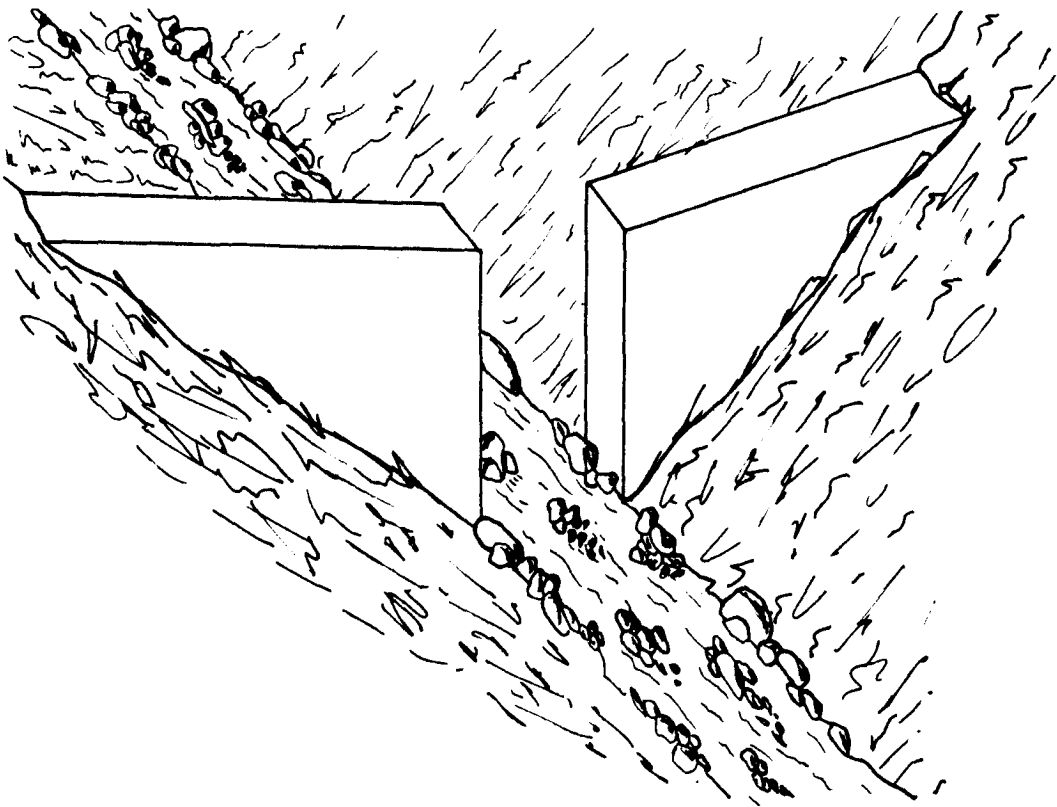


Bild 107 Schlitzsperre

- Schwergewichtssperre      Statisch als Schwergewichtsmauer dimensionierte Sperre.
- Seilsperre                    → Netzsperre.
- \* Siebsperre                Von Kronfellner-Kraus (1970) verwendeter Ausdruck, den er jedoch nicht explizit definiert. Er dürfte einen Ueberbegriff für die durchlässigen, bzw. für die → Sortiersperren meinen.
- \* Sohlsperrre                Hin und wieder falsch verwendeter Begriff für die Sohlgurte (Querwerk ohne Absturz).
- Sortiersperre                → Entleerungssperre, die jedoch das Geschiebe über einem bestimmten Korndurchmesser vollständig zurückhalten soll. Meist → Balken- oder → Rechen-sperre.
- \* Spaltsperre                Lediglich von Zeller (1977) verwendeter Ausdruck für die → Schlitzsperre.
- \* Stabsperre                 Selten gefundener Ausdruck als Ueberbegriff der → Balken-, → Rechen- und → Kammsperren.
- Stahlsperre                 Ausschliesslich in Stahl konstruierte Sperre.
- Stahlbetonsperre          In Stahlbeton gebaute Sperre.

- \* Stahlrostsperrre Lediglich von Kronfellner-Kraus (1970 u.a.) verwendeter Begriff für die → Gittersperre in Stahl.
- Stahlkorbsperrre Von Kronfellner-Kraus (1982) gebrauchter Ausdruck für die → Gitterkastensperre, wobei die einzelnen Elemente beim Bau nicht gefüllt werden.
- Stausperre Sperre mit dem Zweck, Wasser und/oder Geschiebe im Verlandungsraum zu stauen. Meistens ist die → Geschiebestausperre gemeint.
- Steinkastensperre → Kastensperre, wobei sich (im Gegensatz zur → Holzkastensperre) "Stein" nicht auf das Skelett, sondern auf den Inhalt der Kästen bezieht.
- Steinsperre In Stein erstellte Sperre (Trocken- oder Zementmauerwerk).
- Strebepfeilersperre Von Kronfellner-Kraus (1973) verwendeter Begriff für die japanische Murverbauungsstahlsperre: Ins Unterwasser leicht geneigte Serie von Balken- (bzw. → Leitersperren-) elementen, welche von unten durch schräge Strebstützen in Stahl gestützt werden (Bild 108).

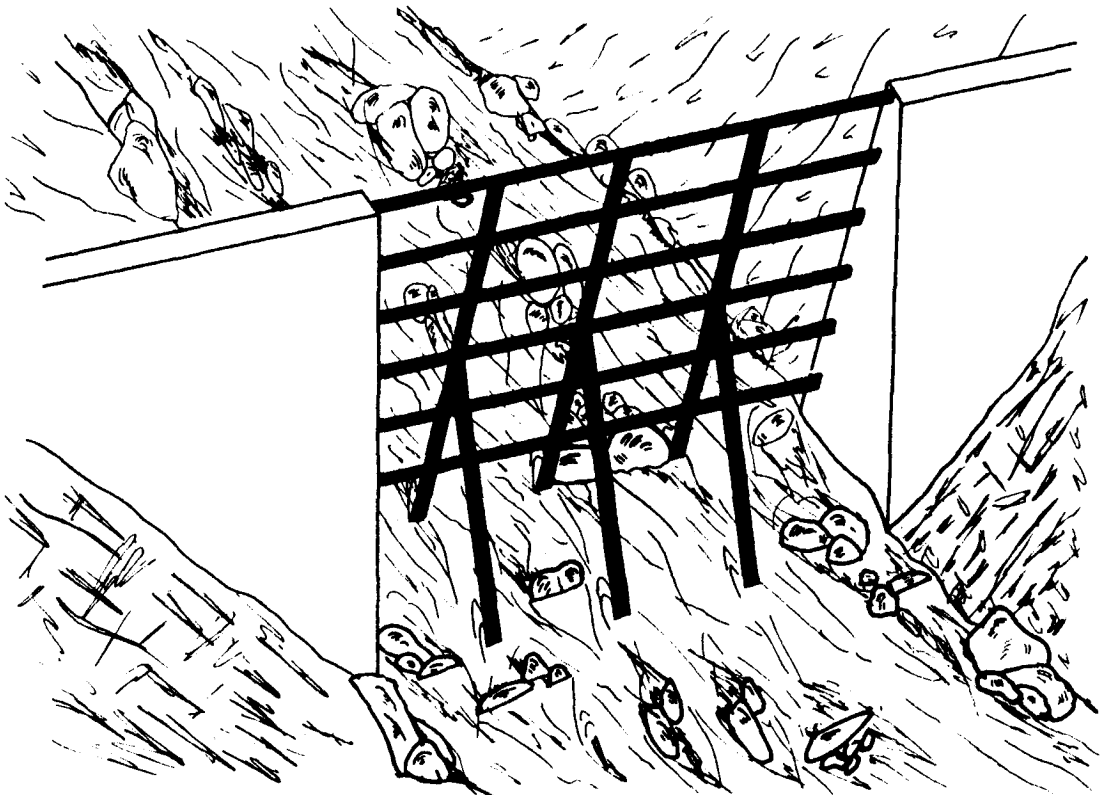


Bild 108 Strebepfeilersperre

- Talsperre                    Zum Zweck der Wasserspeicherung errichtetes, grösseres Bauwerk; keine Sperre der Wildbachverbauung.
- \* Tauschwandsperre        Von Leys (1976) gebrauchter Begriff für die → Balkensperre, wobei der Balkenabstand durch Verschieben in den Nuten der beiden Sperrenflügel bis auf Null verkleinert werden kann. Dadurch entsteht eine austauschbare, variable Wand.
- \* Verkläusungssperre      Lediglich von Leys (1976) verwendeter Begriff für die Entleerungssperre, die verkläusen soll (?) und sich nach der manuellen oder maschinellen Lösung der Verkläusung entleert.
- Verkleidete Sperre        Normalerweise → Betonsperre, welche aus ästhetischen Gründen mit Natursteinen verkleidet ist.
- Verlandungssperre        → Konsolidierungssperre.
- \* Vollsperrre                Abkürzung für → Vollwandsperre.
- Vollwandsperre            Sperre, welche weder einen Schlitz noch grosse Dolen aufweist; höchstens durch kleine Entwässerungsdolen unterbrochene, durchgehende Mauer.
- Vorsperre                   Vor der → Hauptsperre errichtetes, niedriges Querwerk, das die Kolkbildung vor der Hauptsperre verhindern soll.
- \* Wassersperre             Nur von Schaffernak (1950) verwendete Bezeichnung für Sperren, die verschliessbare Grundablässe besitzen und lediglich der Wasserstauregulierung dienen.
- \* Wasserdrucksperrre     Auf Wasserdruck dimensionierte Sperre.
- Winkelsperre              1. Sperre, die mit einer horizontalen Fundamentplatte fest verbunden ist, so dass im Querschnitt die Form eines L oder eines auf dem Kopf stehenden T entsteht.  
  
\*2. Selten wird der Begriff auch für eine im Grundriss gewinkelte Sperre verwendet.
- Zugsperre                  Im Gegensatz zu den üblichen Bauweisen der Sperren, bei welchen die Bauwerke vor allem Druckkräfte aufnehmen müssen, ist die Zugsperre durch Seile, Zugstangen o.ä. auf der Oberwasserseite verankert, so dass sie Zugkräfte aufnimmt.

- Zuggewölbesperre → Bogensperre, bei welcher der Scheitel jedoch bachabwärts gerichtet ist. Sie "hängt" in den Talflanken, im Gegensatz zur Bogensperre, welche in diese hineingedrückt wird.

\* = Begriffe, die nicht verwendet werden sollten (Wortneuschöpfungen einzelner Autoren; unklare, unsinnige oder falsche Wortbildungen).

## 10.2. In der Schweiz und in Liechtenstein besichtigte Geschiebeablagerungsplätze

---

Der Autor besichtigte nicht nur eigentliche Geschiebeablagerungsplätze, sondern auch Umlagerungsstrecken und Ablagerungen in Seen. Die Zusammenstellung enthält alle diese Objekte. Viele weitere, im Ausland liegende, sind nicht aufgeführt.

Die Liste ist nach Kantonen und alphabetisch nach den Bachnamen geordnet und enthält daneben den nächsten Ort, Pass oder See, die Koordinaten sowie das Blatt der Landeskarte 1:25'000, auf der der Bach zu finden ist.

Nr.	Bach	Ort	Koordinaten	LK Nr.
<u>Kanton Bern</u>				
1	Dorfbach	Hilterfingen	617 200 / 176 400	1207
2	Dornigräbli	Brienz	643 250 / 178 450	1209
3	Eistlenbach	Hofstetten	649 450 / 178 650	1209
4	Falchernbach	Meiringen	656 100 / 174 750	1210
5	Fallbach	Blumenstein	606 750 / 176 050	1207
6	Grosse Bachtale	Brienz	643 600 / 178 400	1209
7	Gschwandgraben	Zweisinmen	595 600 / 149 700	1246
8	Heitibach	Frutigen	616 500 / 161 700	1227
9	Hüsenbach	Meiringen	655 800 / 176 600	1210
10	Kleine Bachtale	Brienz	643 750 / 178 600	1209
11	Leimbach	Frutigen	615 100 / 160 500	1227
12	Narrenbach	Diemtigtal	604 900 / 161 550	1227
13	Oltschibach	Unterbach	651 700 / 176 200	1209
14	Oltschibach	Unterbach	651 800 / 176 400	1209
15	Riederbach	Oberhofen	618 100 / 175 700	1207
16	Schlüöchtbach	Reuti	659 400 / 175 720	1210
17	Spissibach	Leissigen	626 100 / 166 900	1228
18	Turbach	Gstaad	593 800 / 147 100	1246
19	Wachtlammgraben	Guttannen	665 100 / 167 300	1230
<u>Fürstentum Liechtenstein</u>				
20	Badtobelrüfe	Balzers	758 300 / 217 600	1155
21	Lawenarüfe	Balzers	758 100 / 217 100	1155
<u>Kanton Glarus</u>				
22	Durnagel	Linthal	719 500 / 198 500	1173

Nr.	Bach	Ort	Koordinaten	LK Nr.
<u>Kanton Graubünden</u>				
23	Arieschbach	Luzern	776 400 / 198 800	1176
24	Arieschbach	Luzern	775 900 / 198 100	1176
25	Chessirüfi	Zizers	762 500 / 199 900	1176
26	Dorfrüfi	Trimmis	760 900 / 196 800	1176
27	Felldrüfi	Fläsch	757 200 / 209 900	1155
28	Gazienarüfi	Malans	763 350 / 206 300	1156
29	Hagrüfi	Trimmis	197 800 / 761 600	1176
30	Kaltbrunnrüfi	Chur	193 200 / 760 500	1196
31	Kaltbrunnrüfi	Chur	192 900 / 761 200	1196
32	Maschänser Rüfi	Trimmis	762 100 / 194 400	1176
33	Pendlatobel	Grüsch	768 800 / 204 300	1176
34	Punteglias	Trun	718 600 / 177 800	1213
35	Punteglias	Trun	718 100 / 178 600	1213
36	Schlundrüfi	Igis	763 200 / 200 700	1176
37	Schlundrüfi	Igis	201 600 / 761 700	1176
38	Selfirüfi und Uell	Jenins	206 400 / 760 600	1156
39	Selfirüfi und Uell	Jenins	207 850 / 761 200	1156
40	Sinzera	Trun	718 900 / 178 500	1213
41	Teilerrüfi	Jenins	759 800 / 208 700	1155
42	Tersierbach	Schiers	770 000 / 205 000	1176
43	Valparghera	Felsberg	756 200 / 189 800	1195
44	Valparghera	Felsberg	756 000 / 189 900	1195
45	ohne Namen	Schiers	772 600 / 203 500	1176
46	ohne Namen	Mastrils	760 400 / 204 500	1176
<u>Kanton Obwalden</u>				
47	Bützighoferbach	Sarnen	661 450 / 195 150	1170
48	Dorfbach	Lungern	655 800 / 181 800	1210
49	Dürrbach	Engelberg	675 150 / 186 350	1191
50	Engelberger Aa	Engelberg	676 400 / 184 350	1191
51	Foribach	Sarnen	662 500 / 194 300	1170
52	Gerenbach	Lungern	653 900 / 181 600	1209
53	Grosse Schliere	Alpnach	664 000 / 198 000	1170
54	Grosse Schliere	Alpnach	663 000 / 197 700	1170
55	Grosse Schliere	Fallhörnli	659 100 / 198 900	1170
56	Grossteiler Bach	Giswil	655 200 / 189 200	1190
57	Hundsbach	Engelberg	676 900 / 183 600	1191
58	Kleine Melchaa	Giswil	657 500 / 187 800	1190
59	Kleine Schliere	Alpnach	664 000 / 200 000	1170
60	Kleine Schliere	Alpnach	662 350 / 199 200	1170
61	Lau	Giswil	656 200 / 187 100	1190
62	Lau	Giswil	653 500 / 188 400	1190
63	Lauibach	Brünig	652 600 / 180 850	1209
64	Leiti-Delligraben	Giswil	656 600 / 186 200	1190
65	Melchaa	Sarnen	661 400 / 192 700	1190
66	Rütibach	Giswil	655 900 / 189 500	1190



Nr.	Bach	Ort	Koordinaten	LK Nr.
<u>Kanton Obwalden (Forts.)</u>				
67	Schatzlibach	Sarnen	661 900 / 195 900	1170
68	Tellenbach	Sarnen	662 200 / 196 300	1170
69	Wildibach	Alpnachstad	664 750 / 202 100	1170
70	Wolfortbach	Alpnachstad	664 500 / 201 600	1170
<u>Kanton St. Gallen</u>				
71	Dreinamenbach	Gams	750 830 / 230 670	1115
72	Dreinamenbach	Gams	751 640 / 230 110	1115
73	Felsbach	Gams	751 220 / 231 080	1115
74	Gadöhlbach	Gams	752 080 / 232 660	1115
75	Gasenzenbach	Gams	751 580 / 231 040	1115
76	Grossbach	Vilters	752 100 / 210 600	1155
77	Hagerbach	Mels	748 400 / 215 600	1155
78	Mühlbach	Oberschan	753 920 / 218 660	1135
79	Nässibach	Rufi	722 300 / 227 400	1133
80	Plonerbach	Rüthi	758 400 / 240 320	1115
81	Rufibach	Rufi	721 900 / 226 300	1173
82	Saarfall	Vilters	754 200 / 209 600	1155
83	Saxbäche	Flums	745 200 / 216 360	1155
84	Seveler Bach	Sevelen	754 680 / 220 260	1135
85	Simmi	Gams	750 800 / 228 850	1135
86	Simmi	Gams	752 200 / 229 500	1135
87	Steinenbach	Kaltbrunn	721 600 / 230 150	1113
88	Steinenbach	Kaltbrunn	719 800 / 229 200	1133
89	Tobelbach	Buchs	753 850 / 224 740	1135
90	Tobelbach	Rüthi	758 060 / 240 750	1115
91	Tobel-Plonerbach	Rüthi	758 820 / 240 200	1115
92	Vilterser Bach	Vilters	752 700 / 210 800	1155
93	Walchenbach	Grabs	752 300 / 227 800	1135
94	Widenbach	Altstätten	757 430 / 247 600	1095
95	Widenbach	Altstätten	757 800 / 247 800	1095
96	Widenbach	Altstätten	758 600 / 247 700	1095
97	ohne Namen	Rüthi	758 480 / 240 560	1115
98	ohne Namen	Rufi	722 500 / 226 200	1133
<u>Kanton Schwyz</u>				
99	Ahorenbach	Sihlsee	703 900 / 216 100	1152
100	Alp	Einsiedeln	698 400 / 219 000	1132
101	Alp	Alpthal	697 400 / 214 500	1152
102	Chlausenbach	Lauerz	686 400 / 210 600	1151
103	Dimmerbach	Willerzell	702 800 / 220 500	1132
104	Dorfbach	Merlischachen	673 600 / 213 500	1151
105	Eubach	Euthal	704 300 / 217 100	1152
106	Grossbach	Einsiedeln	700 800 / 218 100	1132
107	Gründelisbach	Seewen	690 600 / 210 400	1152
108	Mächlerruns	Schübelbach	712 400 / 225 500	1133

Nr.	Bach	Ort	Koordinaten	LK Nr.
<u>Kanton Schwyz (Forts.)</u>				
109	Minster	Sihlsee	704 300 / 215 500	1152
110	Muota	Muotathal	702 800 / 203 100	1172
111	Nidlaubach	Stöcken	703 400 / 213 700	1152
112	Nietenbach	Schwyz	690 800 / 208 400	1152
113	Rickentalbach	Willerzell	702 600 / 221 000	1132
114	Rigiaa	Goldau	683 800 / 211 100	1151
115	Rufibach	Buttikon	715 500 / 226 000	1173
116	Rütibach	Reichenburg	716 300 / 225 900	1173
117	Siechenbach	Seewen	691 400 / 209 800	1152
118	Siechenbach	Seewen	690 300 / 209 600	1152
119	Sihl	Studen	707 200 / 213 700	1152
120	Spreitenbach	Lachen	707 900 / 227 700	1133
121	Steinbach	Sihlsee	702 600 / 216 800	1152
122	Steiner Aa	Sattel	690 800 / 214 800	1152
123	ohne Namen	Unteriberg	704 600 / 213 500	1152
124	ohne Namen	Studen	706 500 / 214 900	1152
125	ohne Namen	Studen	706 300 / 215 000	1152
<u>Kanton Uri</u>				
126	Chummetbach	Attinghausen	690 200 / 190 100	1192
127	Schächen	Altdorf	694 050 / 192 750	1192
128	Schopflibach	Seedorf	688 600 / 193 600	1191
<u>Kanton Wallis</u>				
129	Bächibach	Reckingen	661 500 / 146 650	1250
130	Geschinerbach	Geschinen	665 000 / 149 930	1250
131	Mühlbach	Obergesteln	667 800 / 152 750	1250
132	Mühlbach	Obergesteln	668 300 / 152 300	1250
133	Niederbach	Geschinen	665 500 / 150 300	1250

### 10.3. Ausflussmengen aus verschiedenen Sperrenöffnungen

#### 10.3.1. Grundsätzliches zu den Berechnungen

Die Berechnungen geschahen nach der bekannten Formel für Ausflüsse aus grossen Oeffnungen, wobei die Anströmgeschwindigkeit bei der Sperre vernachlässigt (Null gesetzt) wurde. Ebenso wurden Hysterese-Effekte (steigender und fallender Stau) nicht berücksichtigt. Für  $\mu$  wurde der Wert 0,65 angenommen. Da die Diagramme nur Vergleichszwecken dienen, fallen alle diese Annahmen und Ungenauigkeiten nicht ins Gewicht.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot \sqrt{h^3} \quad \text{dabei sind}$$

$Q = \text{Ausfluss in m}^3/\text{s}$   
 $\mu = \text{dimensionslos}$   
 $g = \text{Erdbeschleunigung in m/s}^2$   
 $b = \text{Breite der Oeffnung in m}$   
 $h = \text{Höhe des Staus in m}$

### 10.3.2. Berechnungen für die konischen Schlitz

Die Ausgangsformel war die gleiche, nur in allgemeinerer Art:

$$Q = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \int_0^h (h_x^{1/2} \cdot b_x) dh_x$$

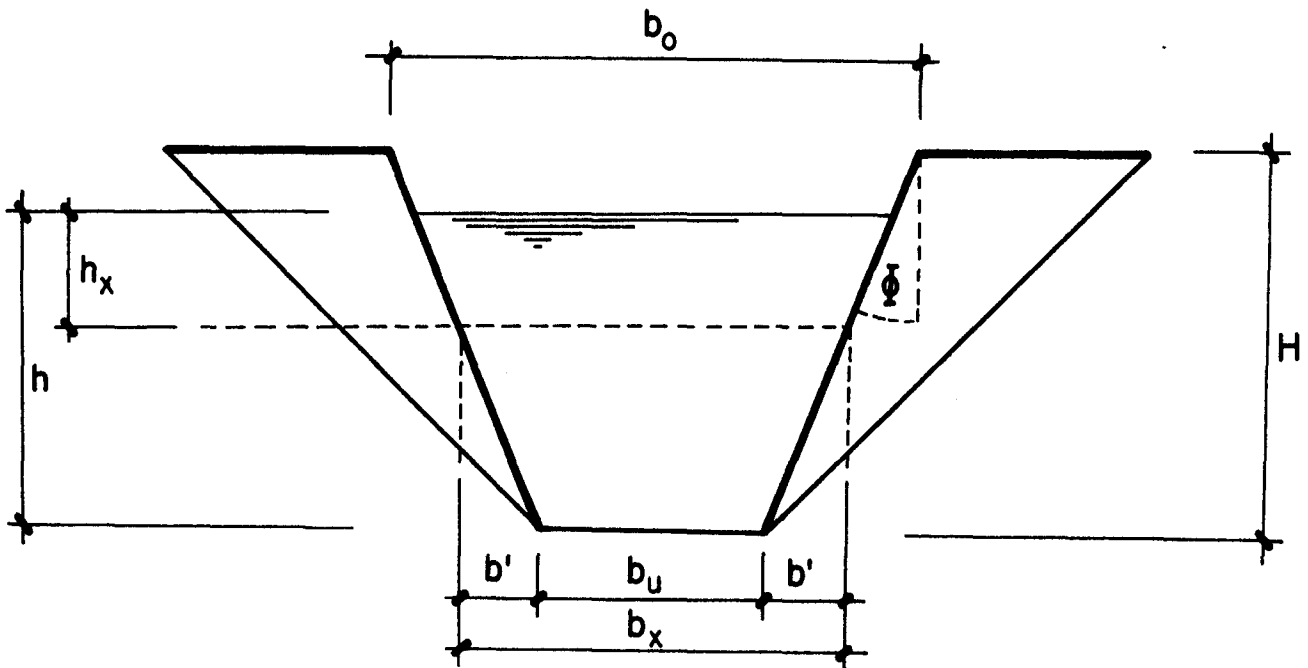


Bild 109 Vermassung des nach oben erweiterten Schlitzes

Nach oben erweiterter Schlitz

$$\text{tg } \phi = \frac{b'}{h - h_x} \quad \Rightarrow \quad b' = h \cdot \text{tg } \phi - h_x \cdot \text{tg } \phi$$

$$b_x = b_u + 2b' = b_u + 2 \cdot h \cdot \text{tg } \phi - 2 \cdot h_x \cdot \text{tg } \phi$$

daraus folgt:

$$\begin{aligned}
 Q &= \mu \cdot \sqrt{2g} \left[ \int_0^h \left( h_x^{1/2} \cdot \langle b_u + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \phi - 2 \cdot h_x \cdot \operatorname{tg} \phi \rangle \right) dh_x \right] \\
 &= \mu \cdot \sqrt{2g} \left[ b_u \int_0^h h_x^{1/2} dh_x + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \phi \int_0^h h_x^{1/2} dh_x - 2 \operatorname{tg} \phi \int_0^h h_x^{3/2} dh_x \right] \\
 &= \mu \cdot \sqrt{2g} \left[ \frac{2 \cdot b_u \cdot h^{3/2}}{3} + \frac{4 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot h^{3/2}}{3} - \frac{4 \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot h^{5/2}}{5} \right]
 \end{aligned}$$

$$Q = \mu \cdot \sqrt{8g} \cdot h^{3/2} \left( \frac{b_u}{3} + 0.267 \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot h \right)$$

Nach unten erweiterter Schlitz

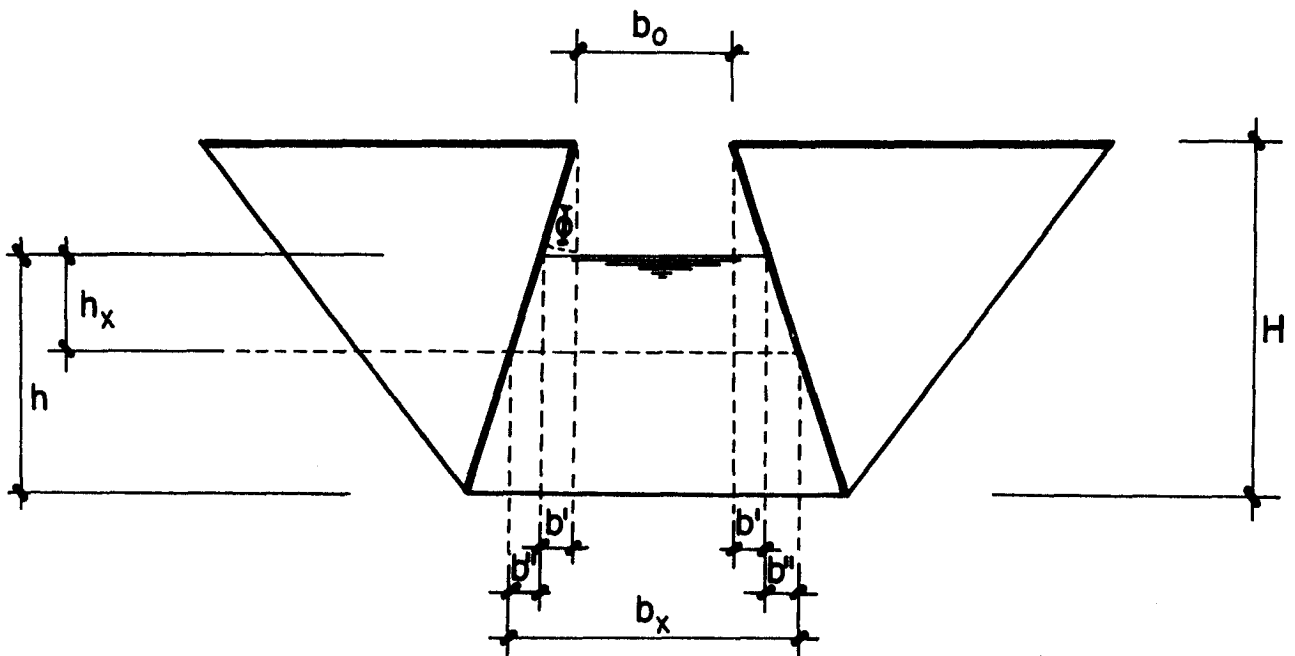


Bild 110 Vermassung des nach unten erweiterten Schlitzes

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \phi &= \frac{b''}{h_x} = \frac{b'}{\Delta h} && \text{falls } \Delta h = H - h \\
 &\Rightarrow b' = \Delta h \cdot \operatorname{tg} \phi && b'' = h_x \cdot \operatorname{tg} \phi \\
 b_x &= b_0 + 2b' + 2b'' = b_0 + 2 \cdot \Delta h \cdot \operatorname{tg} \phi + 2 \cdot h_x \cdot \operatorname{tg} \phi
 \end{aligned}$$

daraus folgt:

$$Q = \mu \cdot \sqrt{2g} \left[ b_0 \int_0^h h_x^{1/2} dh_x + 2 \cdot \Delta h \cdot \text{tg} \phi \int_0^h h_x^{1/2} dh_x + 2 \text{tg} \phi \int_0^h h_x^{3/2} dh_x \right]$$

$$= \mu \sqrt{2g} \left[ \frac{2 \cdot b_0 \cdot h^{3/2}}{3} + \frac{4 \cdot \Delta h \cdot h^{3/2} \cdot \text{tg} \phi}{3} + \frac{4 \cdot h^{5/2} \cdot \text{tg} \phi}{5} \right]$$

$$Q = \mu \sqrt{8g} h^{3/2} \left( \frac{b_0 + 2(H-h) \cdot \text{tg} \phi}{3} + \frac{2 \cdot \text{tg} \phi}{5} \cdot h \right)$$

### 10.3.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Form von Diagrammen in den folgenden Bildern dargestellt. Ein Kommentar zu den Vergleichen der verschiedenen Sperröffnungen findet sich unter 7.3.6.

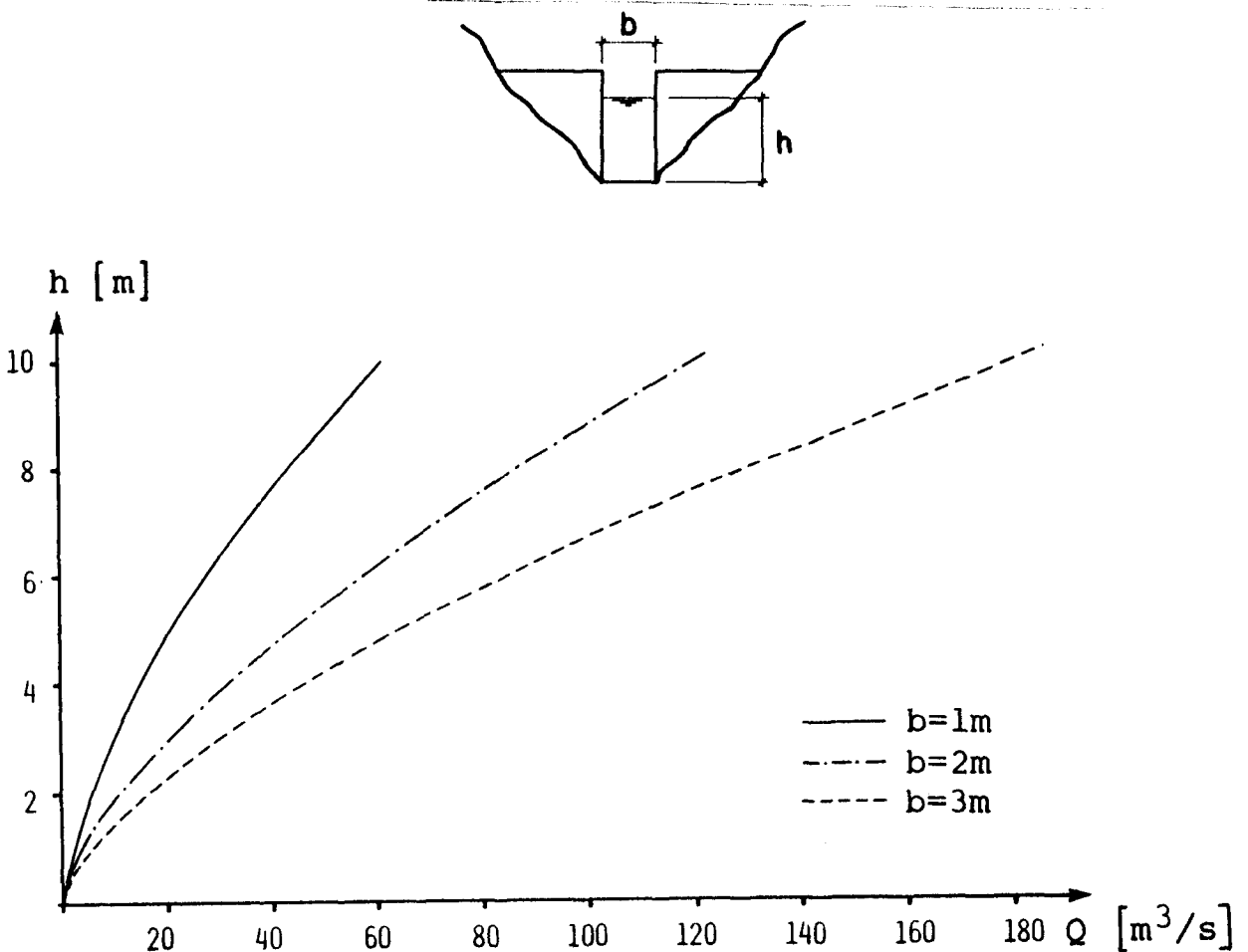


Bild 111 Schlitzsperre: Wasserausfluss

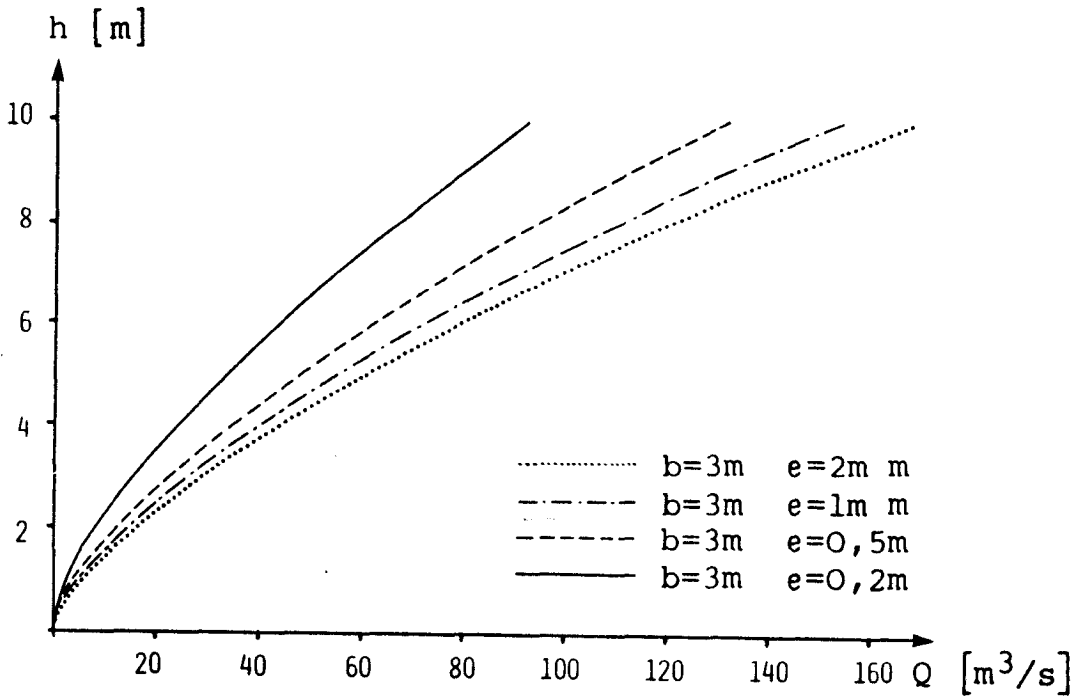
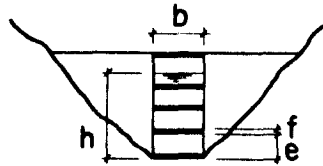
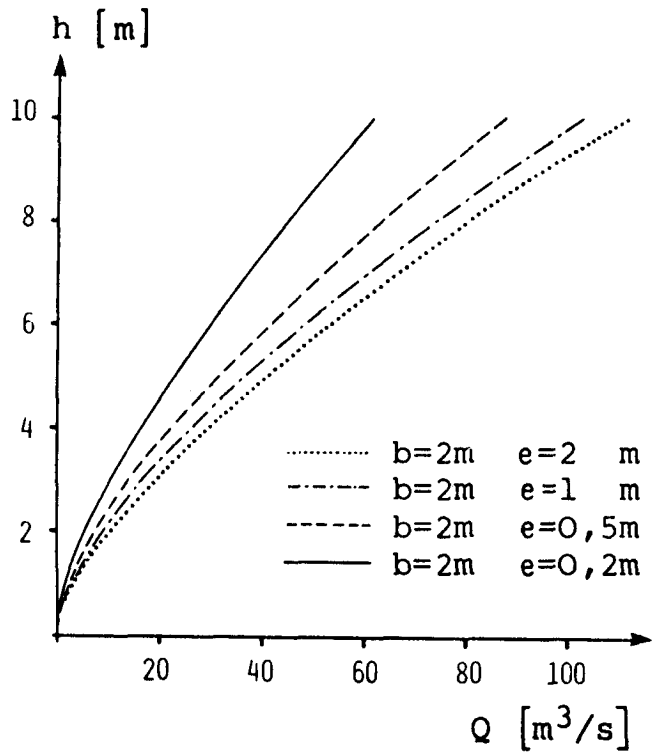
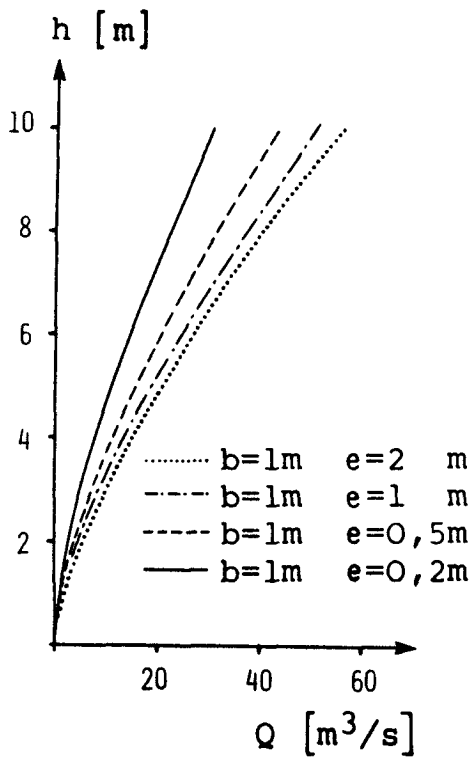


Bild 112 Balkensperre: Wasserausfluss (Balkendurchmesser  $f = 0,2$  m)

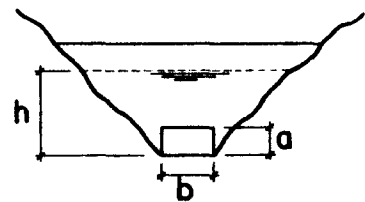
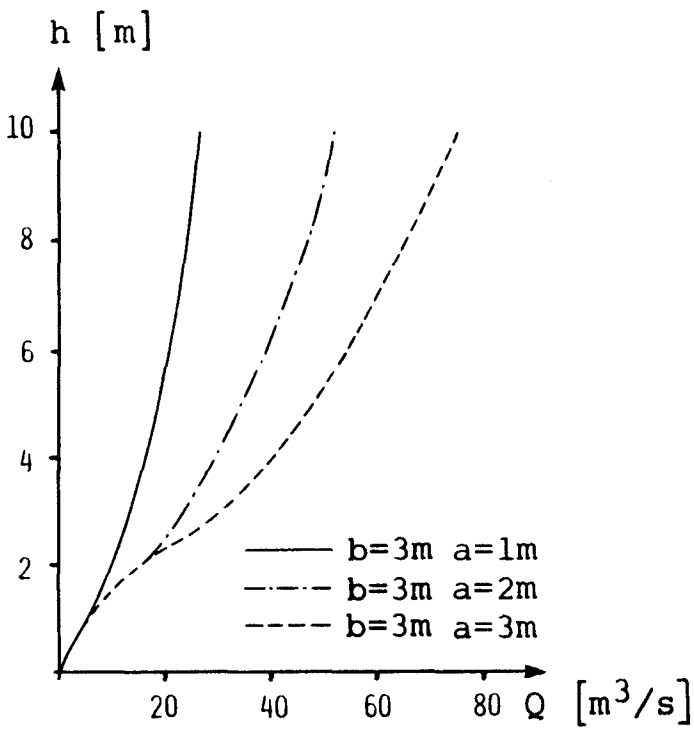
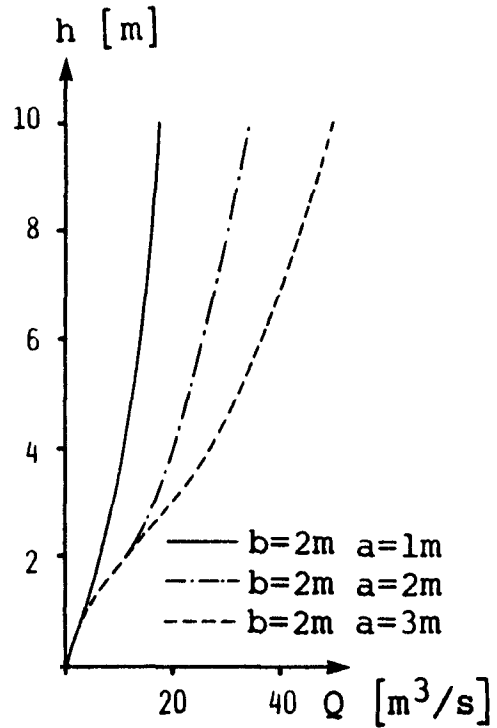
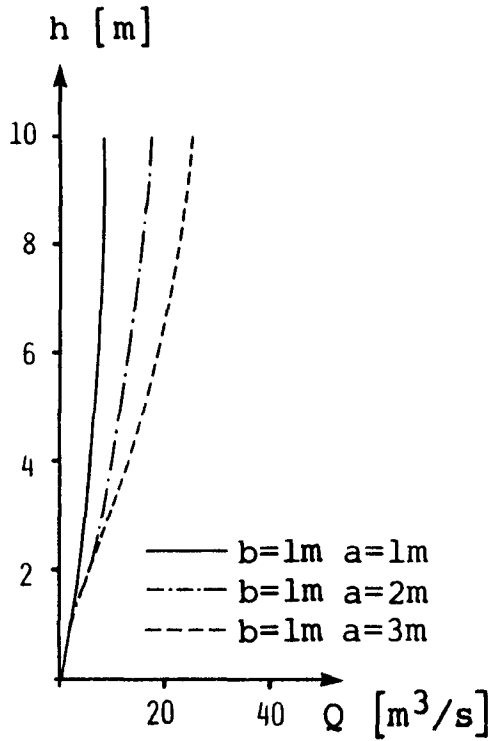


Bild 113 Grunddole: Wasserausfluss

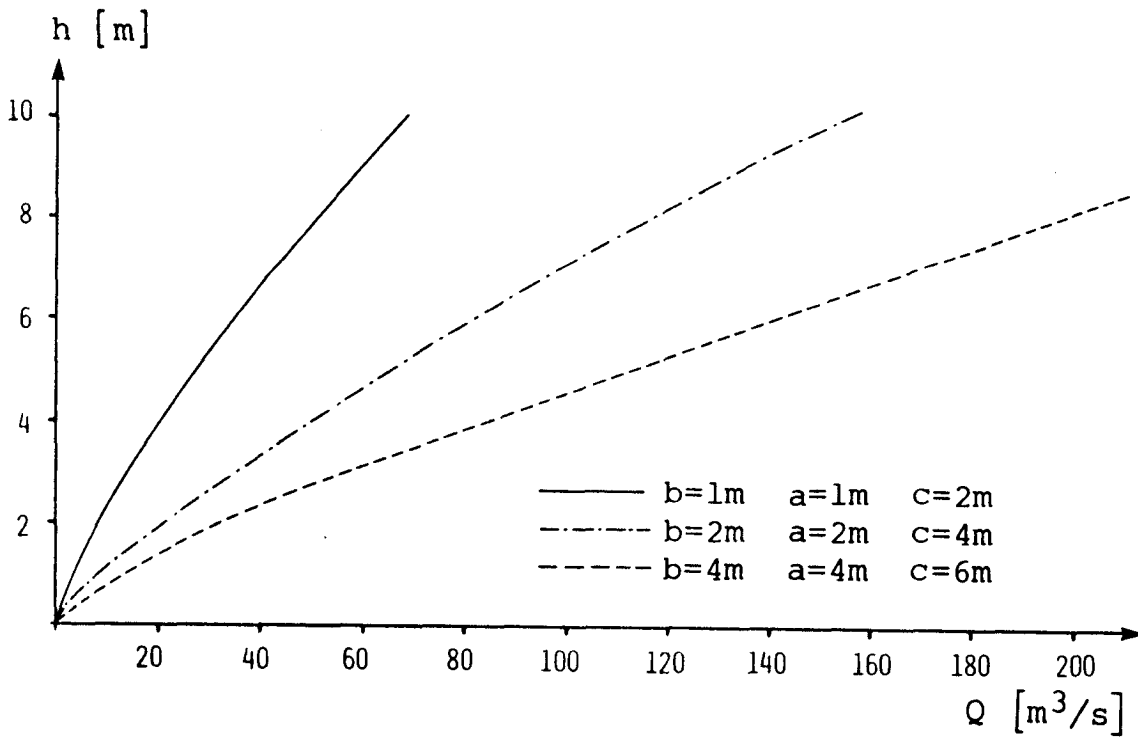
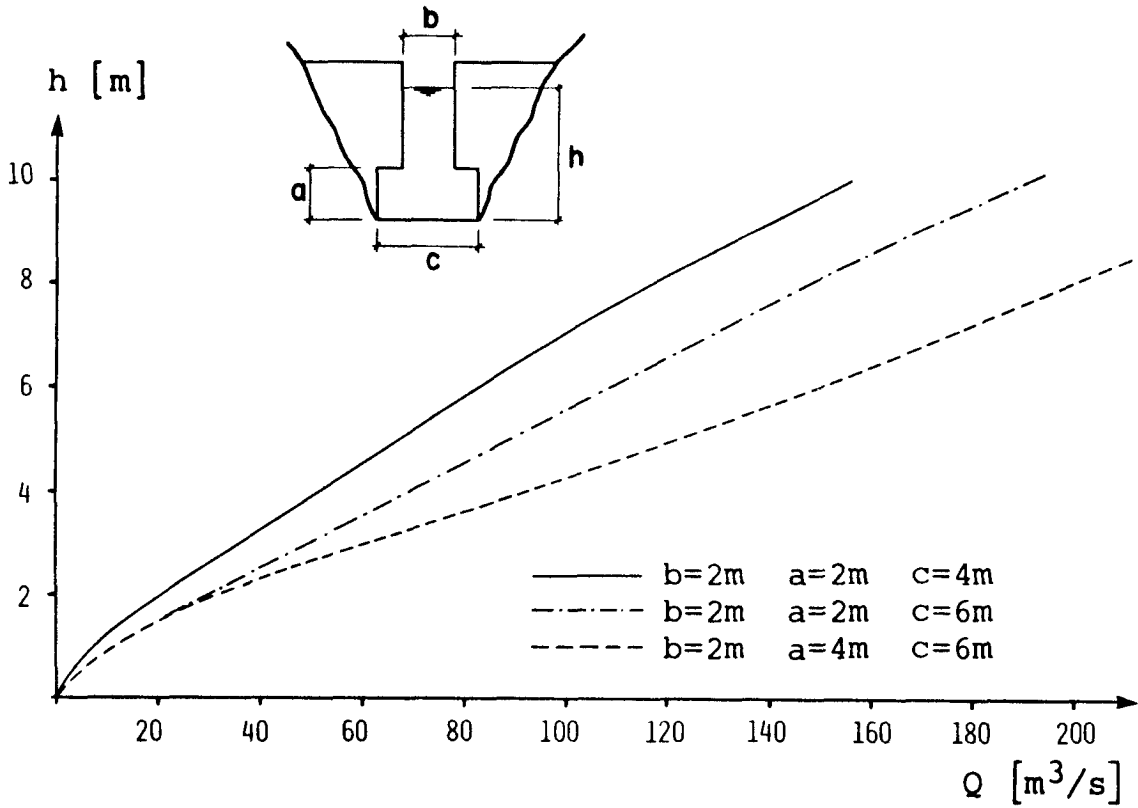


Bild 114 Schlitzsperre mit Erweiterung unten: Wasserdurchfluss



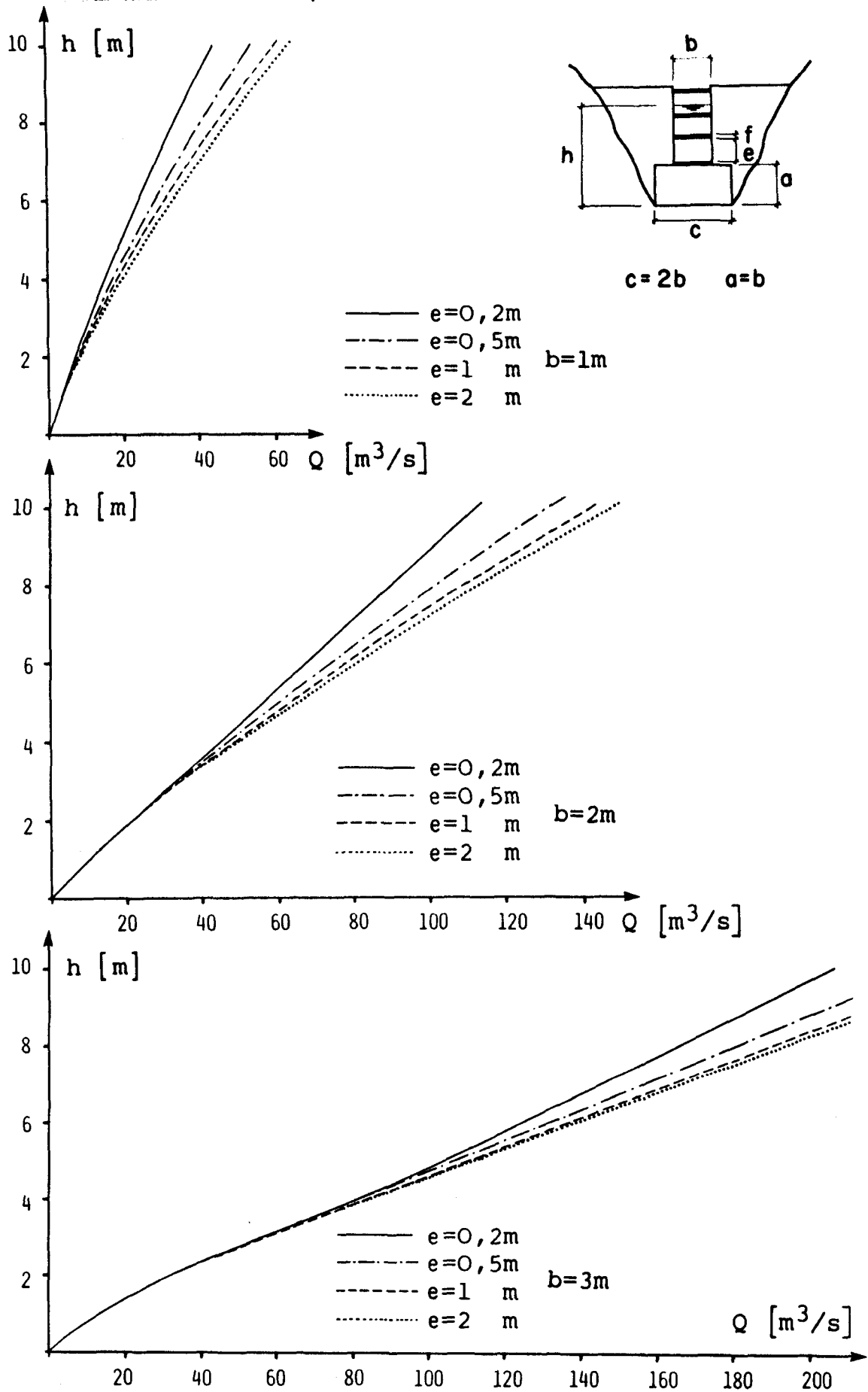


Bild 115 Balkensperre mit Erweiterung unten: Wasserausfluss  
 (Balkendurchmesser  $f = 0,2\text{ m}$ )

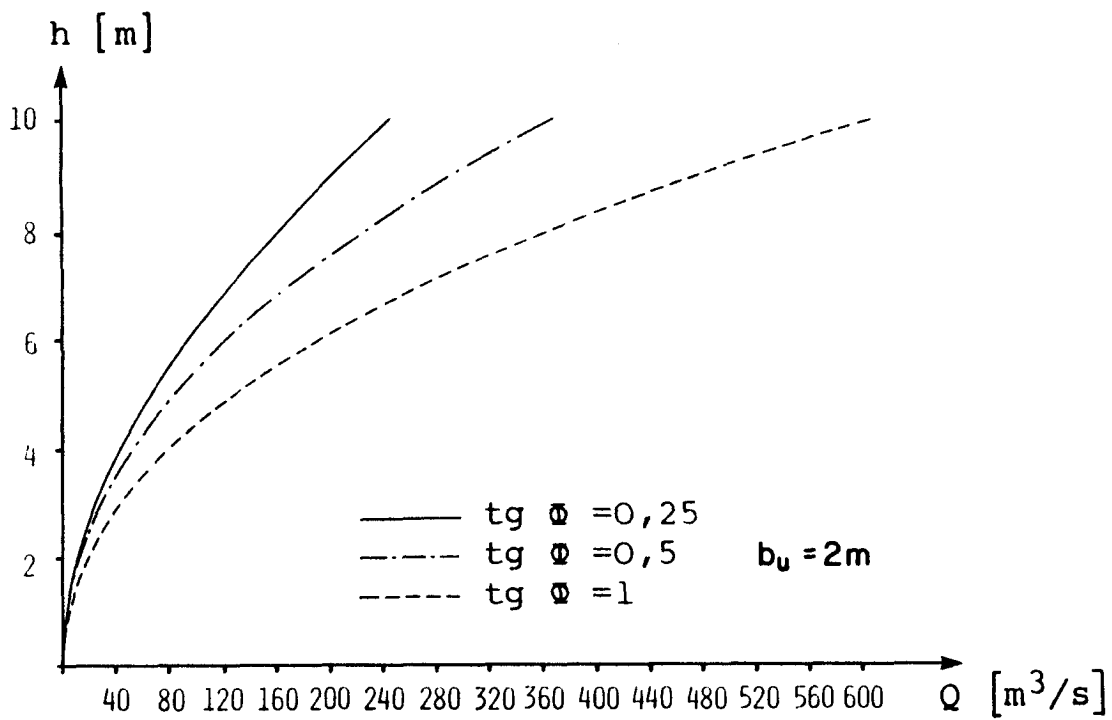
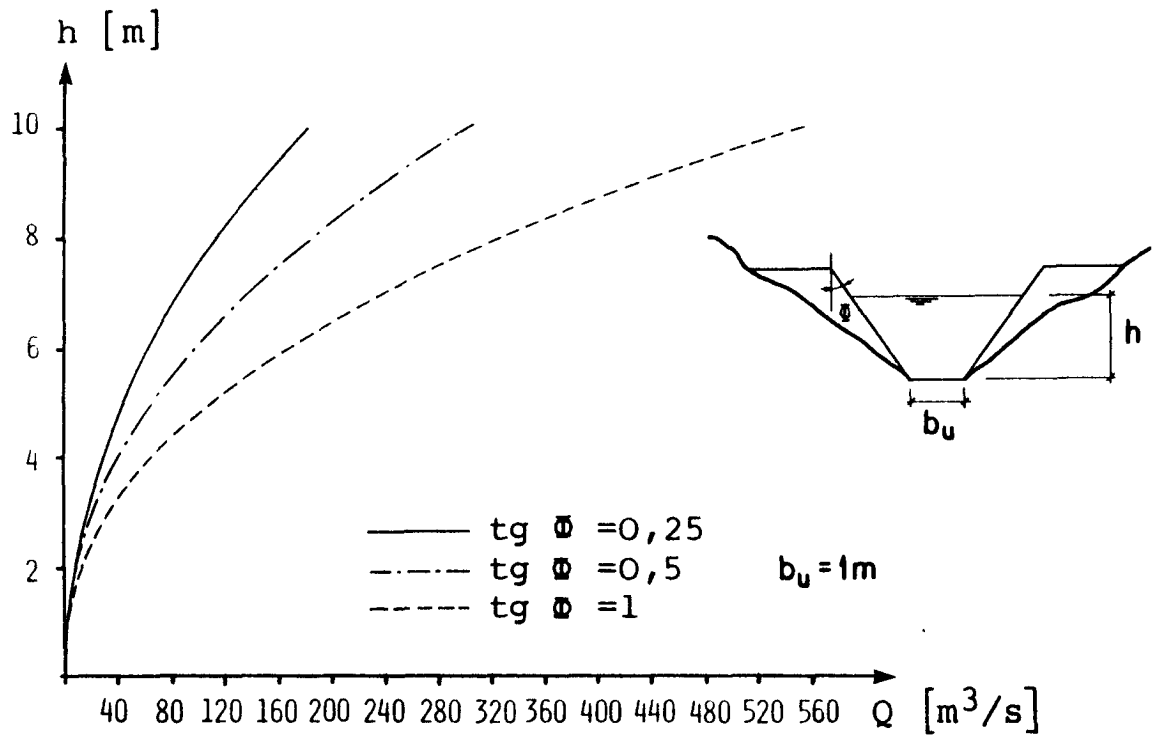


Bild 116 Sperre mit konischem Schlitz (oben weit): Wasserausfluss

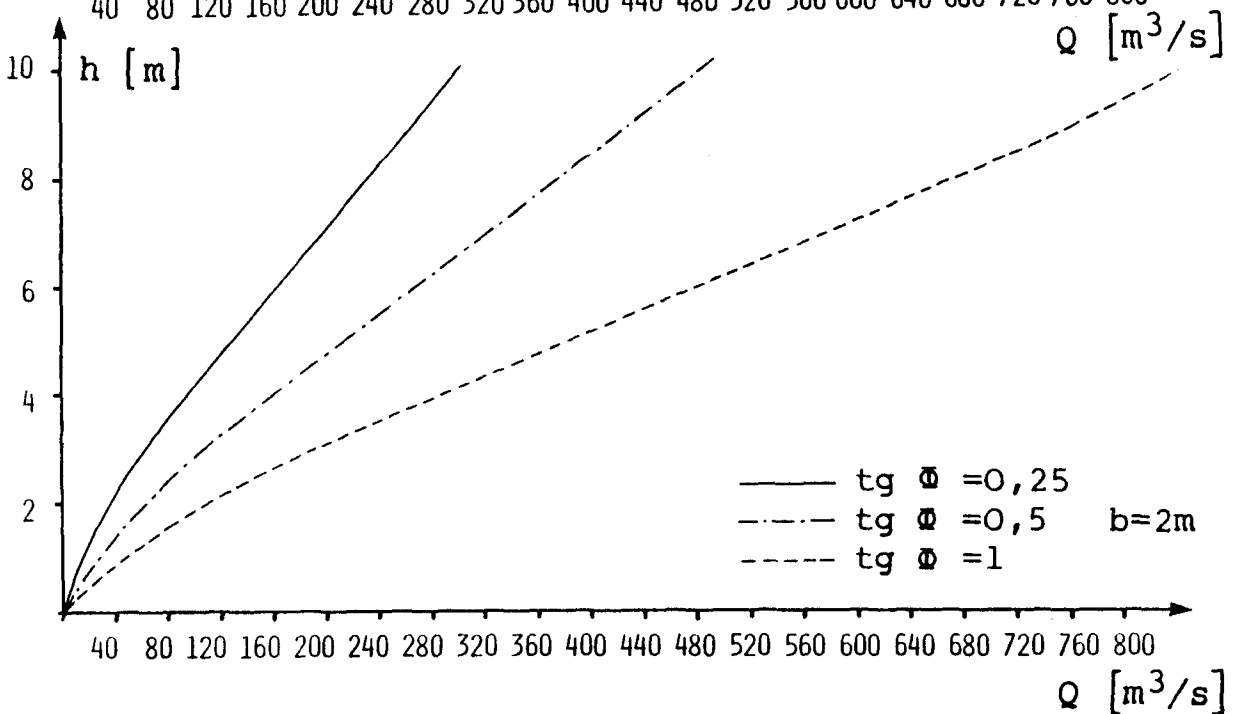
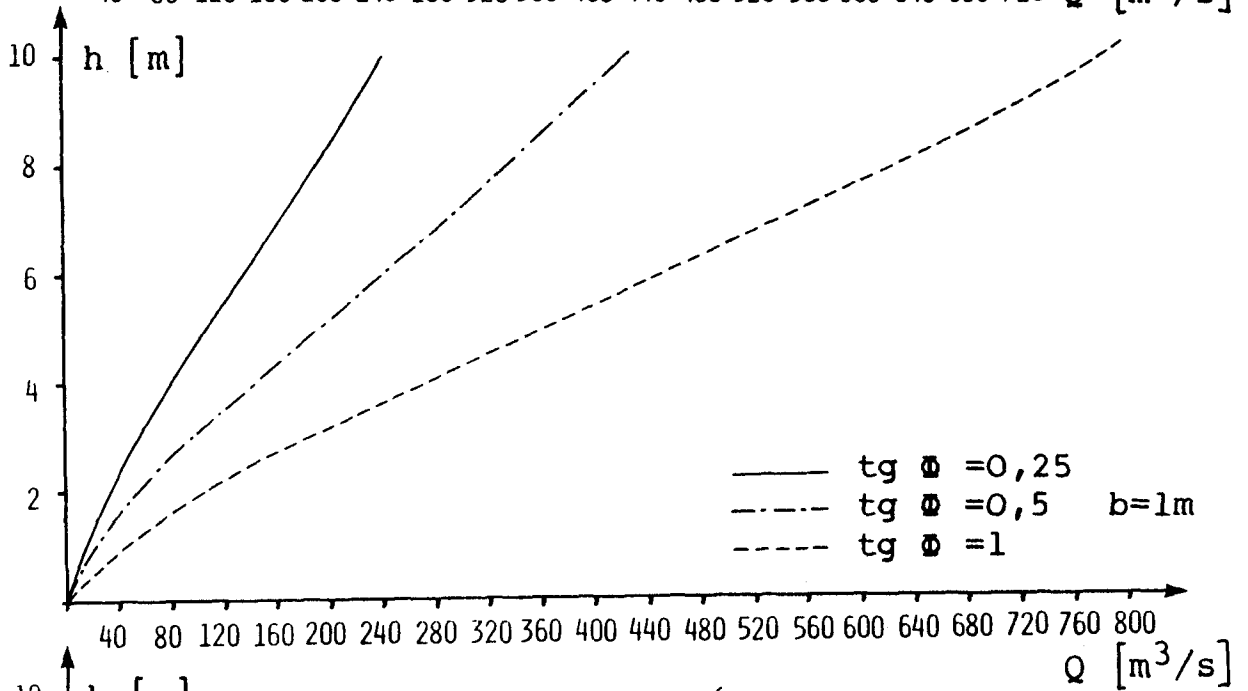
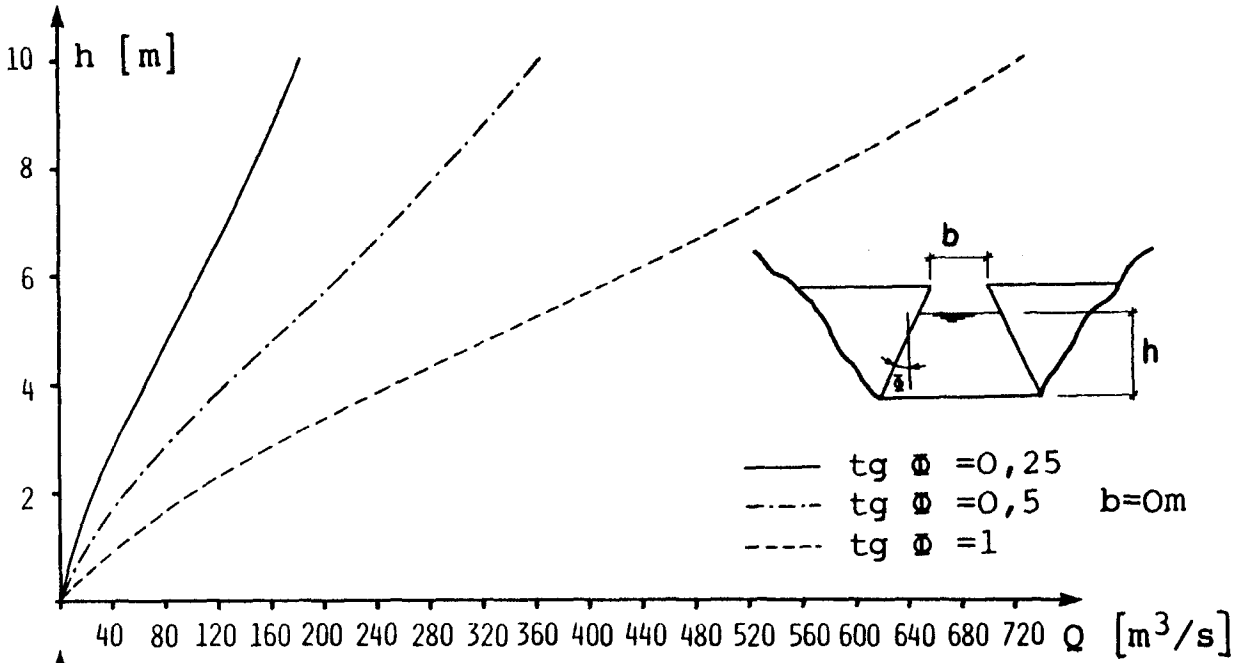


Bild 117 Sperre mit konischem Schlitz (unten weit): Wasserausfluss

#### 10.4. Die Versuche mit nicht konstantem Wasser- und Geschiebeabfluss

Alle Modellversuche, denen Ganglinien (Wasser und Geschiebe) zugrunde liegen, sind im folgenden in Form von Diagrammen aufgeführt, soweit sie nicht bereits im Hauptteil der Arbeit dargestellt worden sind. Es handelt sich um die Versuche 205 - 322. Sie lassen sich wie folgt gliedern:

205 - 260 - Aenderung der Beckenlänge, wobei ohne Leerung zwischen den Versuchen 6 Hochwasserwellen hintereinander durchgeführt wurden:

213 - 224 für die Länge 50 cm,  
249 - 260 für die Länge 100 cm,  
231 - 242 für die Länge 150 cm.

261 - 270 - Versuche zur Reproduzierbarkeit (im Hauptteil dargestellt)

271 - 286 - Aenderungen der Geschiebekonzentration und der Dauer der Ganglinien

289 - 300 - Ablagerungen ohne Einlaufabsturz

301 - 322 - Variation der Beckenform (Birne mit Stiel nach unten und oben)

Die Versuche 275/276 und 287/288 sind Wiederholungen des Versuches 209/210.

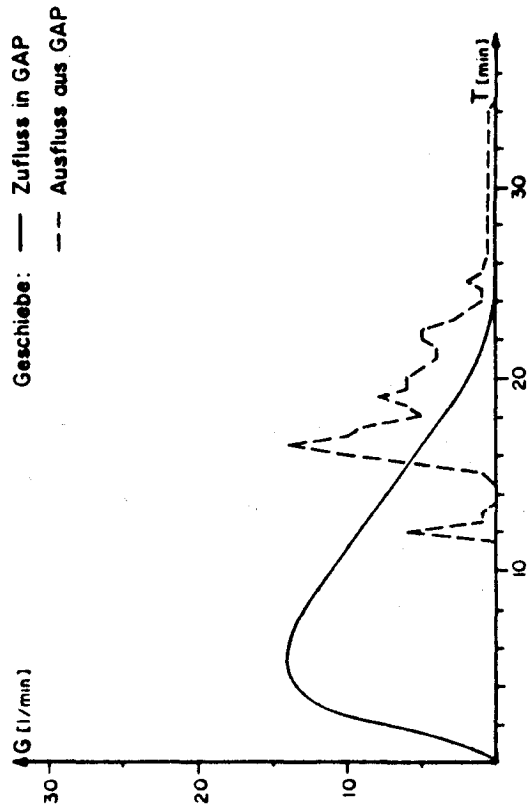
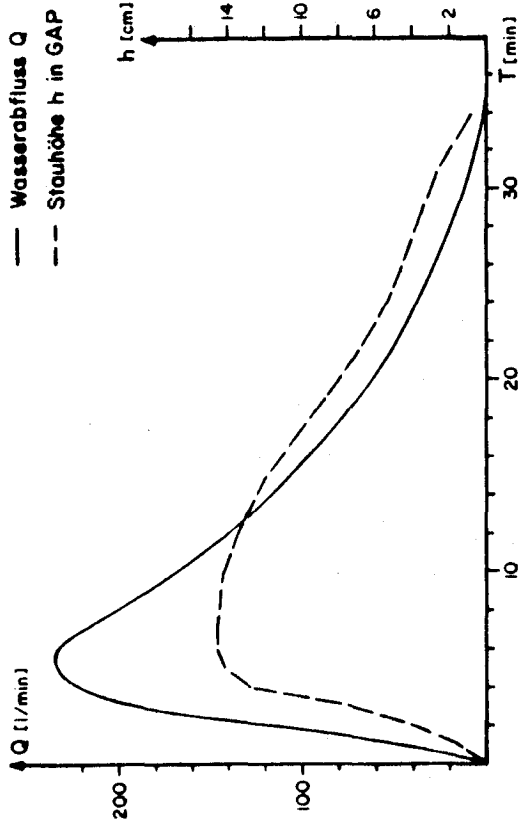
Auf jedem Doppeldiagramm sind zusätzlich angegeben:

- |                                 |          |                       |
|---------------------------------|----------|-----------------------|
| - Länge des Ablagerungsplatzes  | L        | in cm                 |
| - Breite des Ablagerungsplatzes | B        | in cm                 |
| - Höhe des Einlaufabsturzes     | A        | in cm                 |
| - Gefälle des Zulaufgerinnes    | I        | in %                  |
| - Beschickte Geschiebemenge     | $G_t$    | in l (Litern)         |
| - Ausgespülte Geschiebemenge    | $G_{sp}$ | in l                  |
| - Besonderes                    |          | Form des Beckens u.a. |

Die folgenden Versuche sind in der Zusammenstellung nicht enthalten, weil sie bereits im Hauptteil der Arbeit zur Abbildung kamen: 261 - 270  
289 - 292  
317 - 320

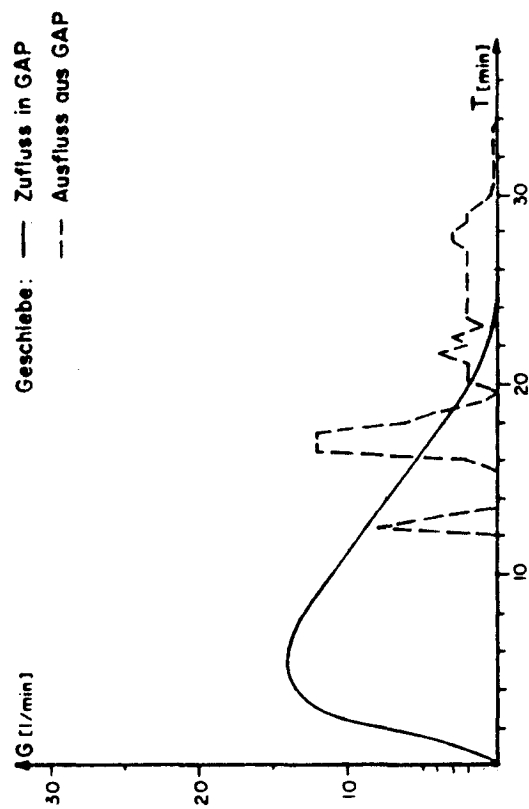
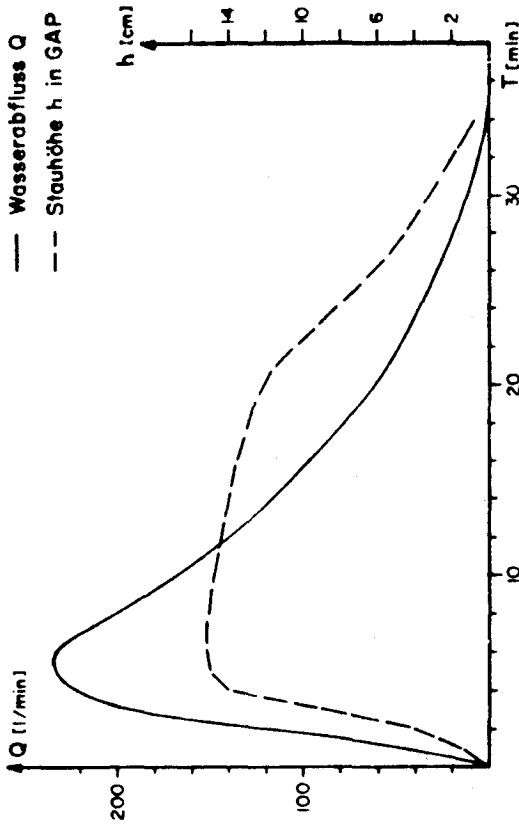
Die Versuche 297 - 300 fehlen ebenfalls. Sie wurden nicht graphisch dargestellt, weil kein Geschiebe ausgespült worden ist.

Versuch 207/208



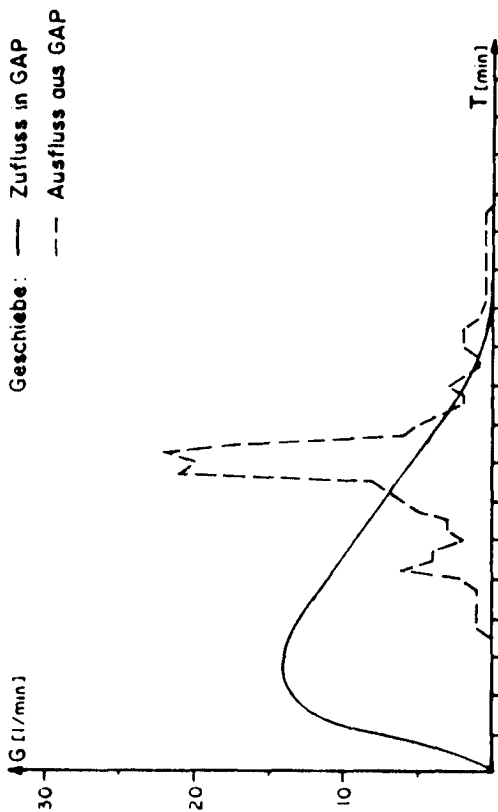
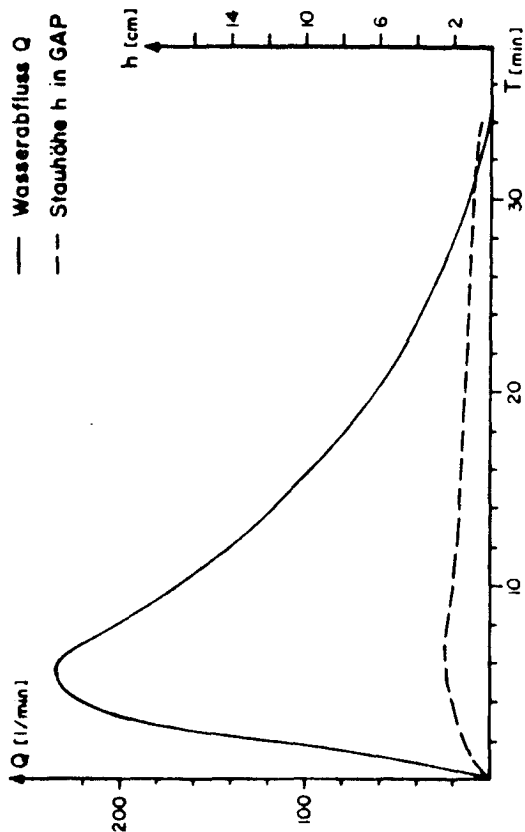
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 66$  l

Versuch 205/206



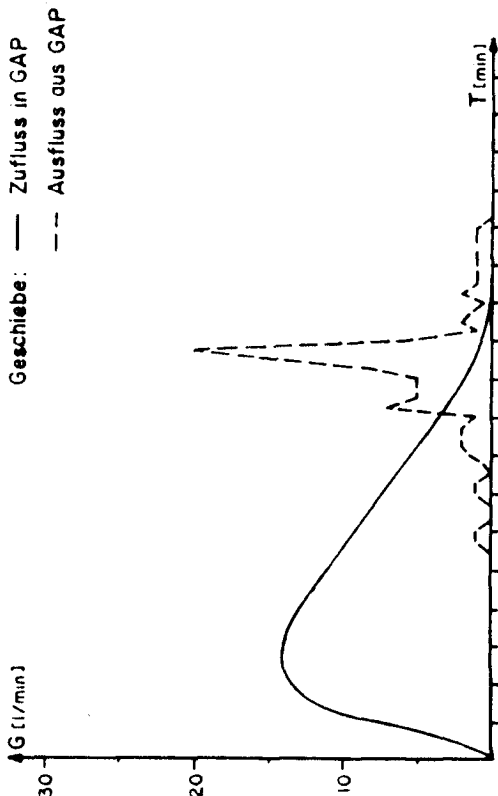
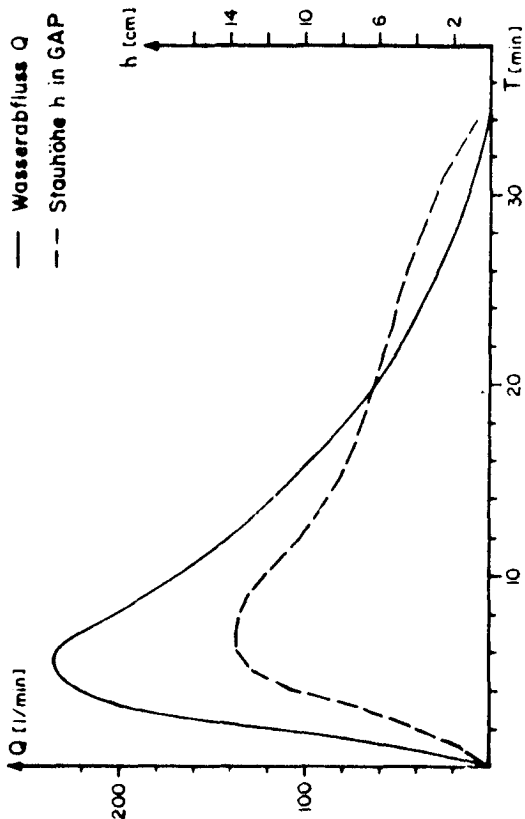
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 61$  l

Versuch 211 / 212



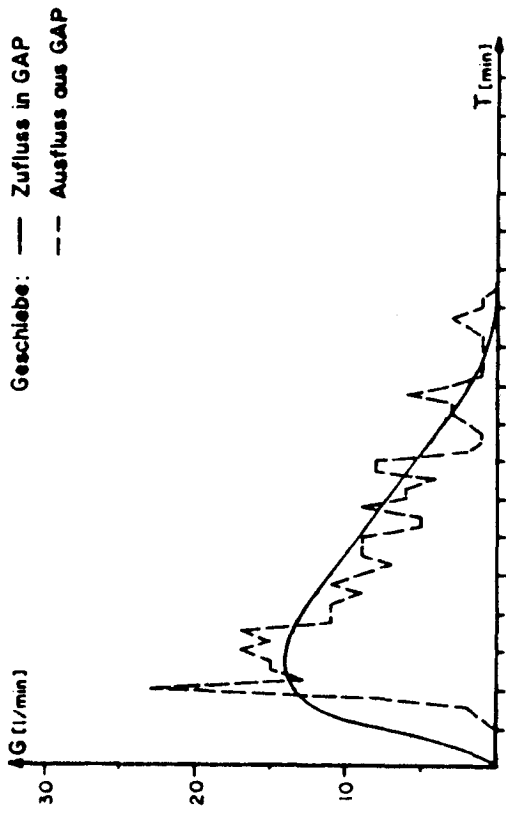
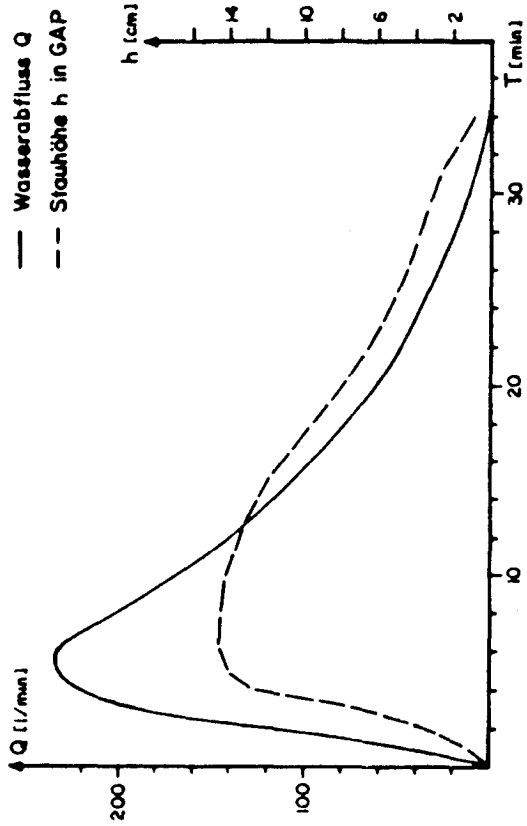
$L = 100 \text{ cm}$   $B = 100 \text{ cm}$   $A = 25 \text{ cm}$   $I = 18\%$   
 $G_t = 170 \text{ l}$   $G_{sp} = 63 \text{ l}$

Versuch 209 / 210



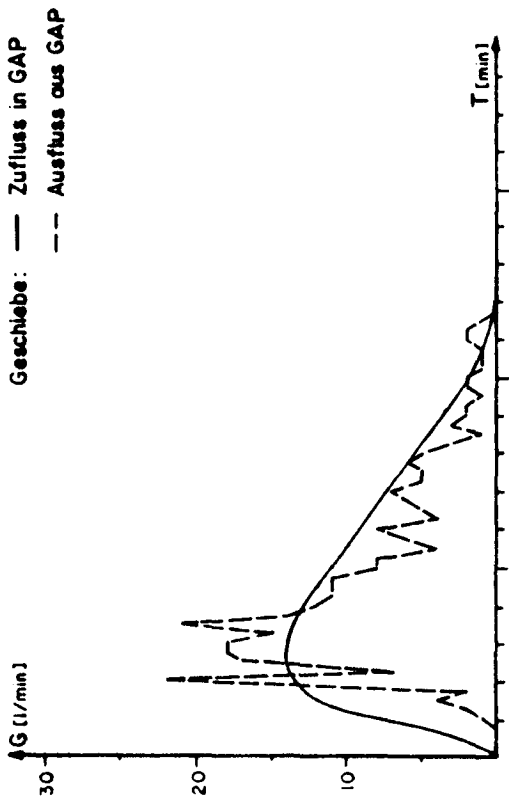
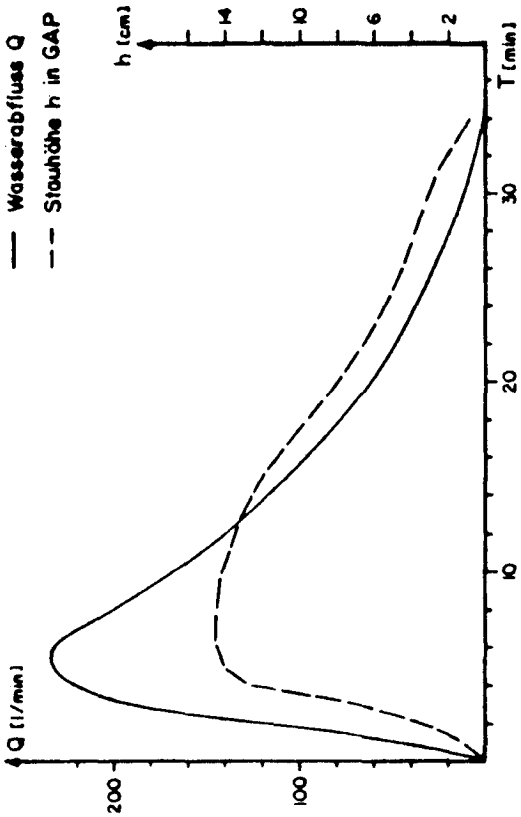
$L = 100 \text{ cm}$   $B = 100 \text{ cm}$   $A = 25 \text{ cm}$   $I = 18\%$   
 $G_t = 170 \text{ l}$   $G_{sp} = 51 \text{ l}$

Versuch 215/216



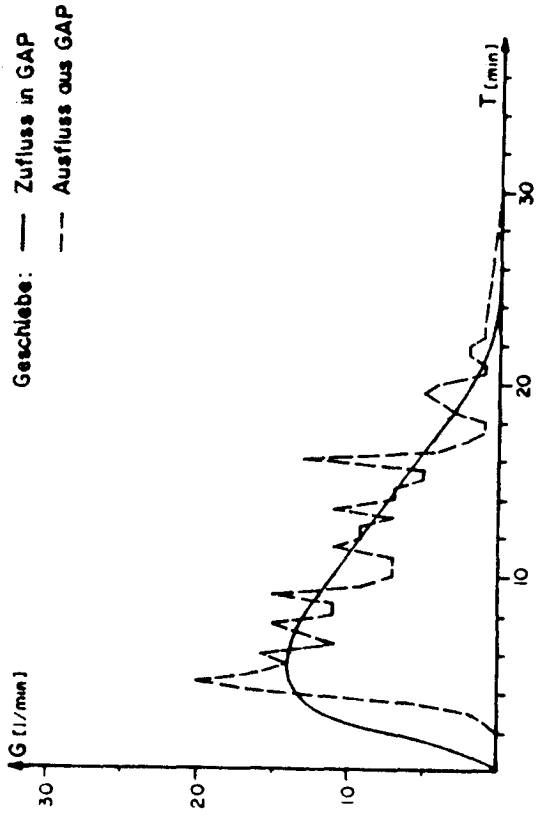
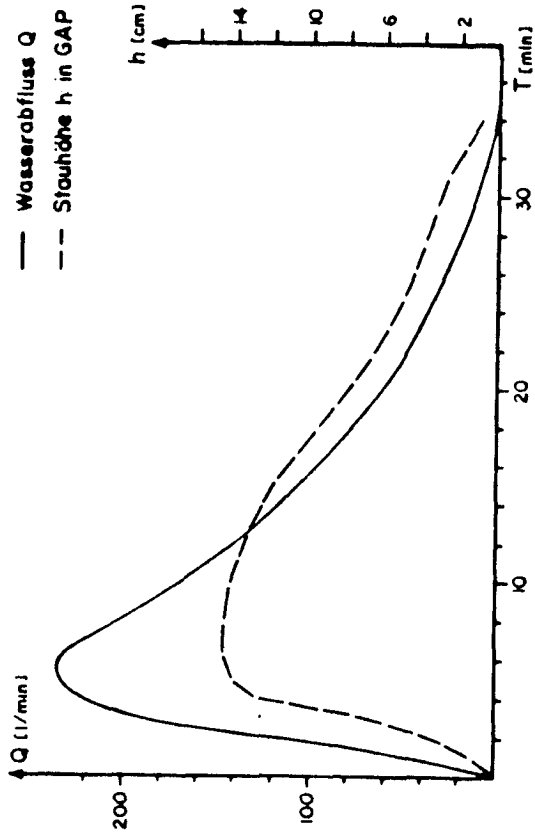
$L = 50$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 167$  l  
 Gehört zur Serie 213 - 224

Versuch 213/214



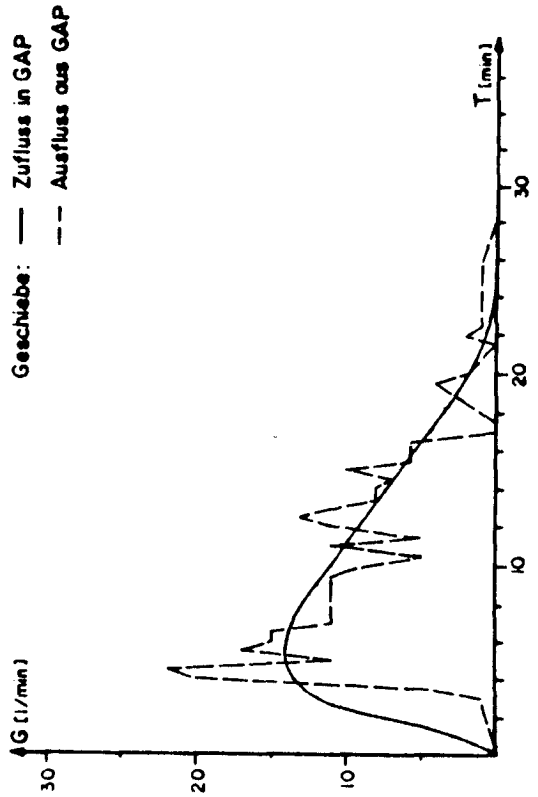
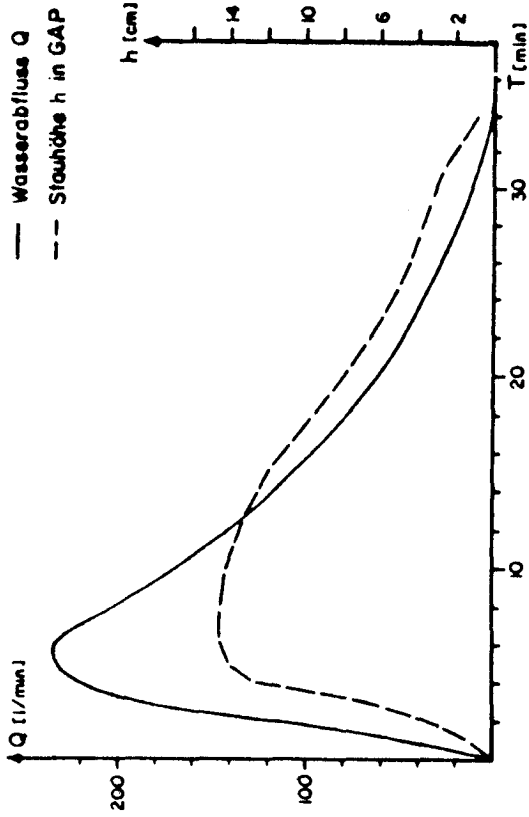
$L = 50$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 132$  l  
 Gehört zur Serie 213 - 224

Versuch 219/220



$L = 50$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 173$  l  
 Gehört zur Serie 213 - 224

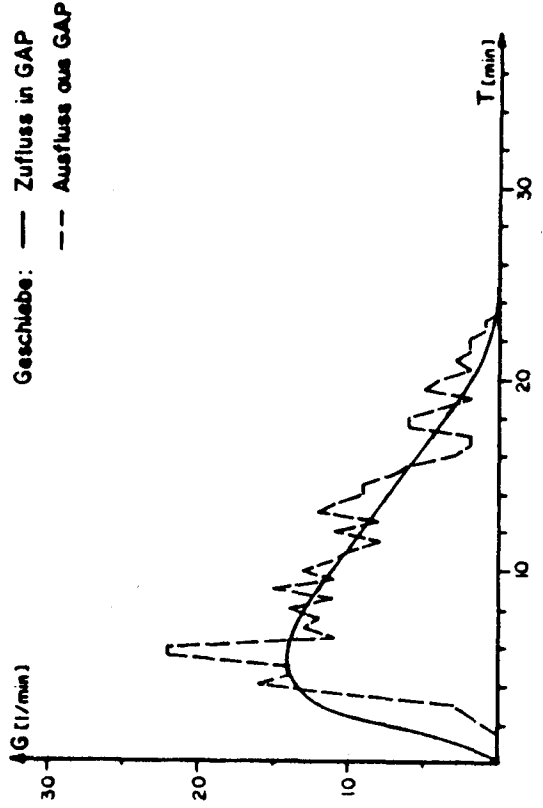
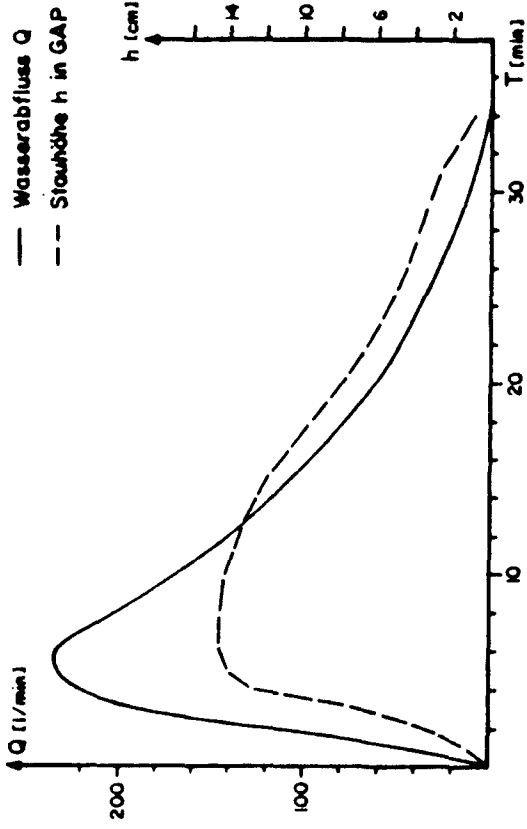
Versuch 217/218



$L = 50$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 169$  l  
 Gehört zur Serie 213 - 224

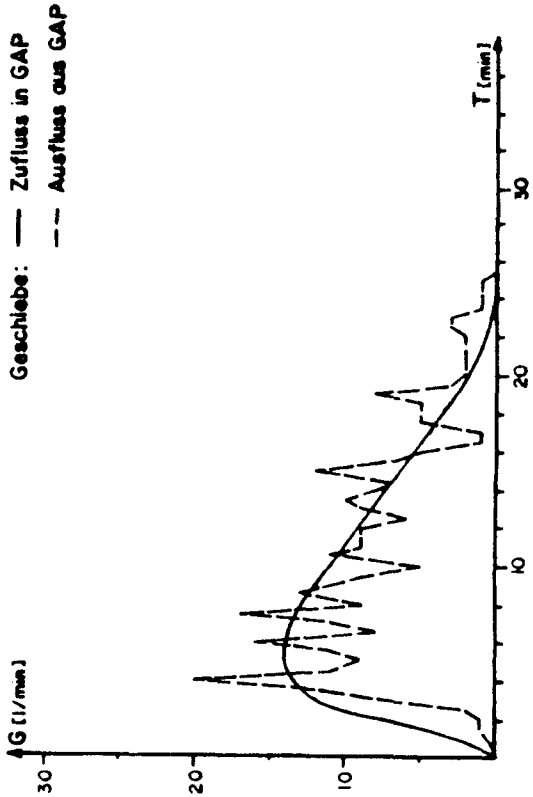
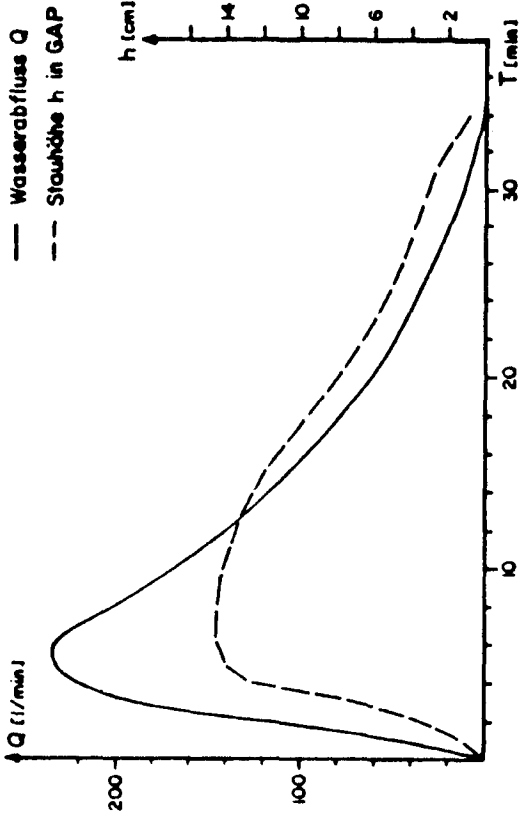


Versuch 223/224



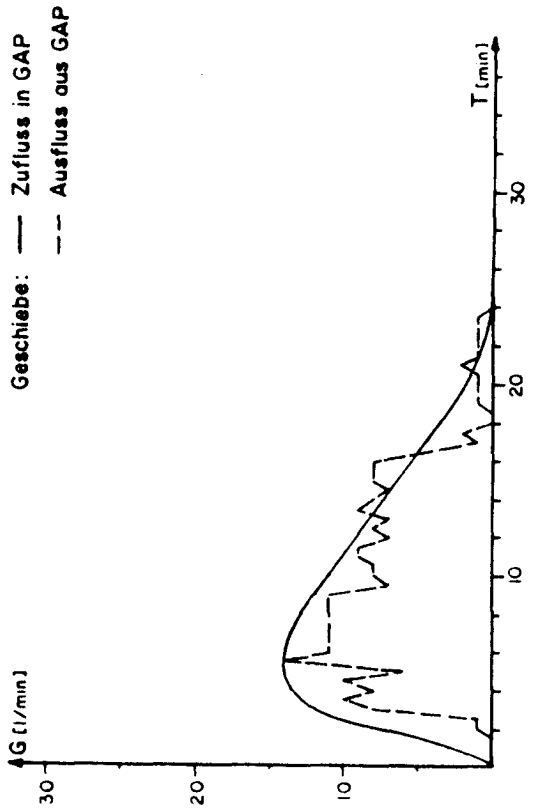
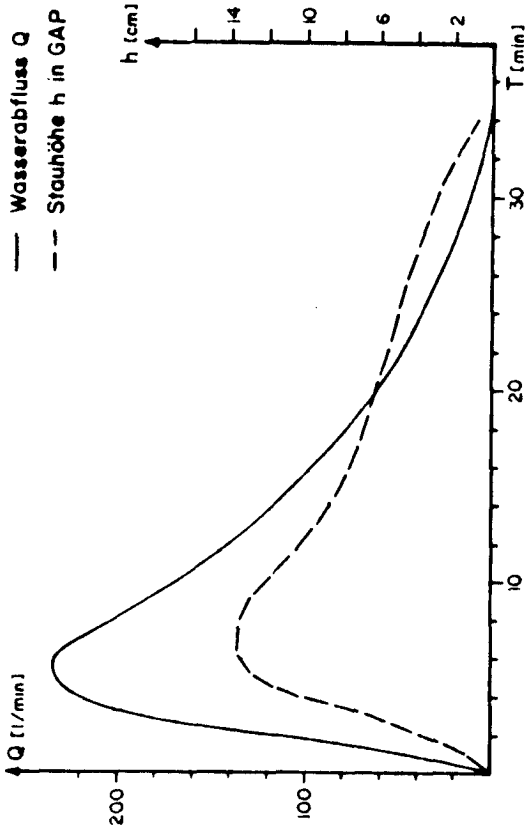
$L = 50$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 177$  l  
 Gehört zur Serie 213 - 224

Versuch 221/222



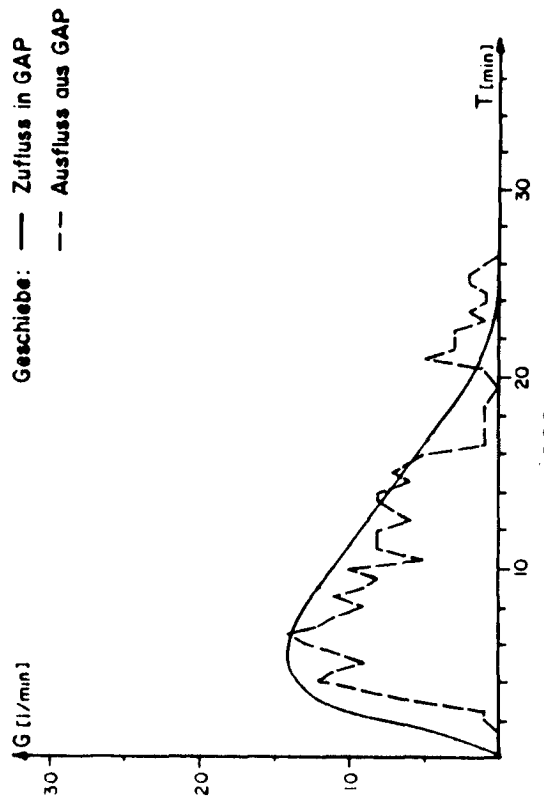
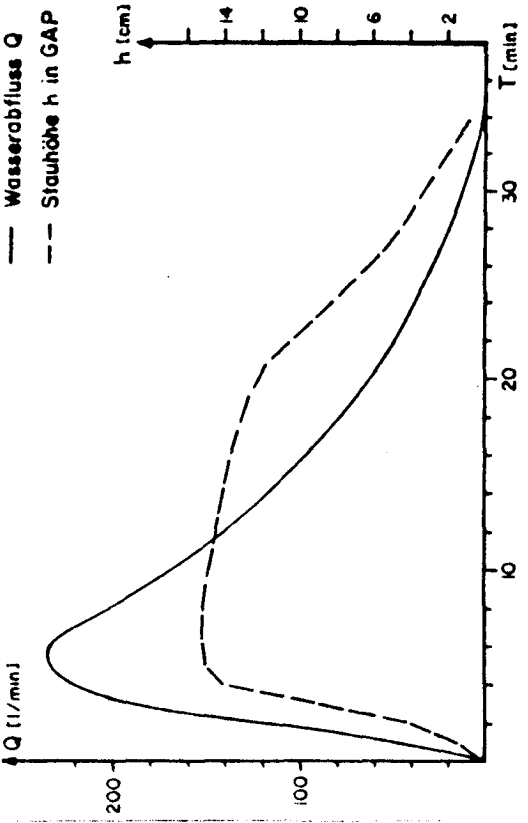
$L = 50$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 172$  l  
 Gehört zur Serie 213 - 224

Versuch 227/228



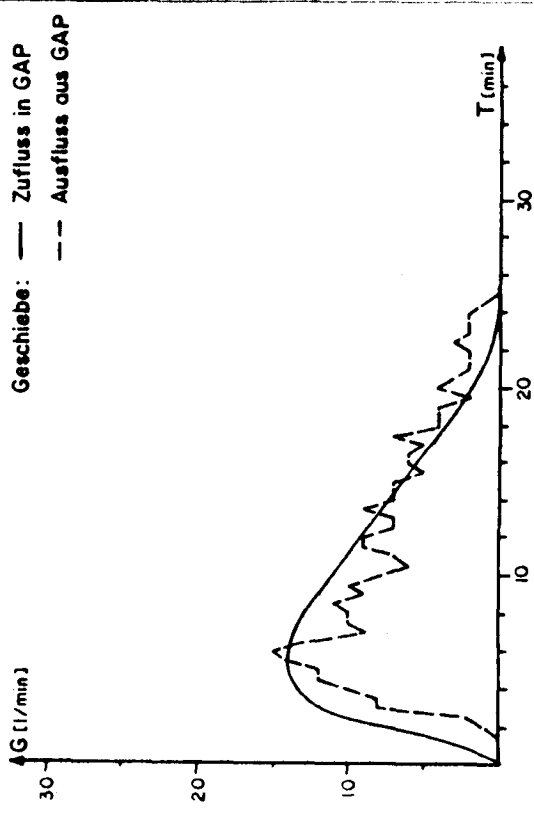
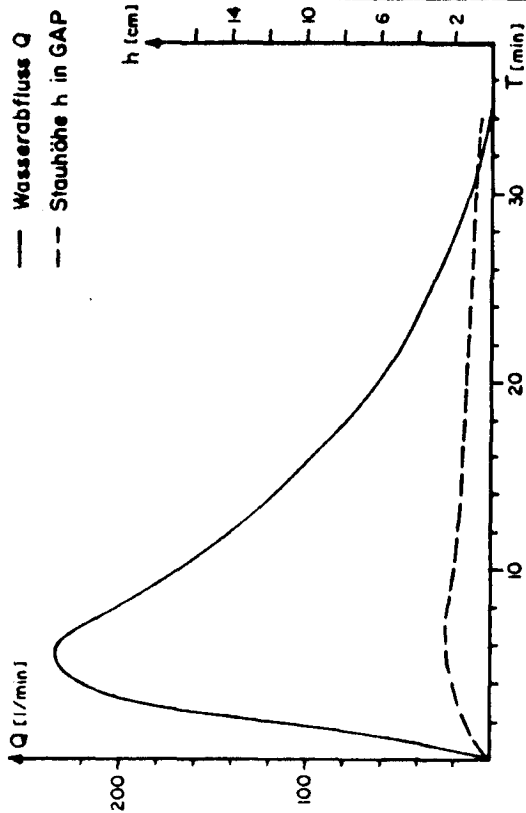
$L = 50 \text{ cm}$   $B = 100 \text{ cm}$   $A = 25 \text{ cm}$   $I = 18\%$   
 $G_t = 170 \text{ l}$   $G_{sp} = 144 \text{ l}$

Versuch 225/226



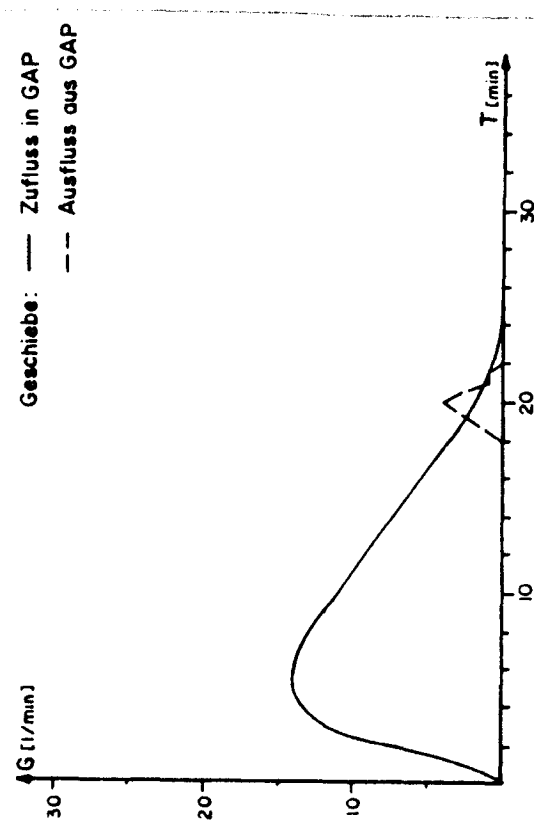
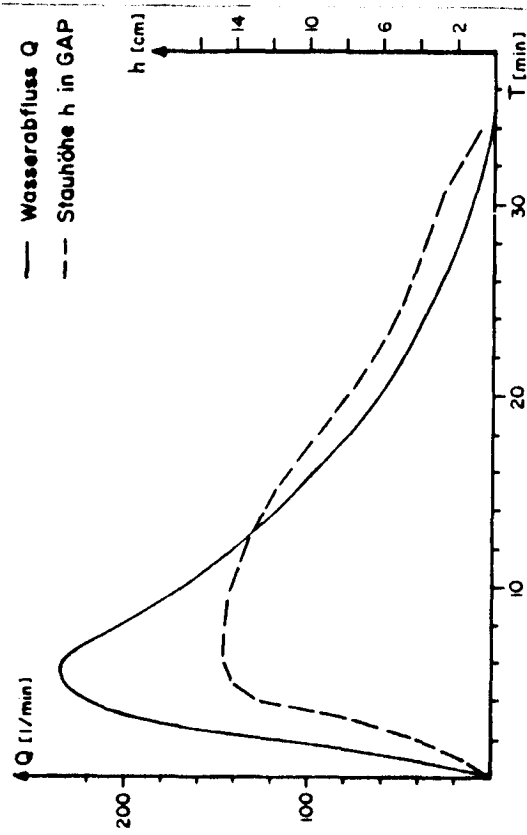
$L = 50 \text{ cm}$   $B = 100 \text{ cm}$   $A = 25 \text{ cm}$   $I = 18\%$   
 $G_t = 170 \text{ l}$   $G_{sp} = 146 \text{ l}$

Versuch 229/230



L = 50 cm B = 100 cm A = 25 cm I = 18%  
 G<sub>t</sub> = 170 l G<sub>sp</sub> = 163 l

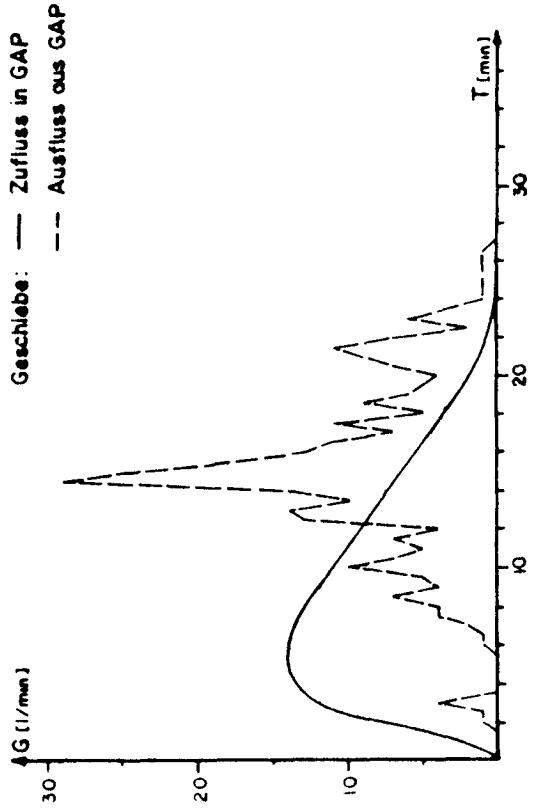
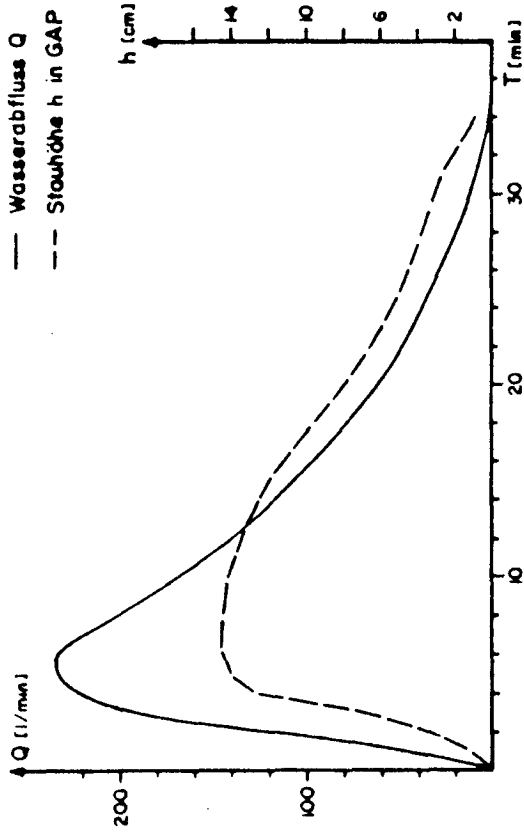
Versuch 231/232



L = 150 cm B = 100 cm A = 25 cm I = 18%  
 G<sub>t</sub> = 170 l G<sub>sp</sub> = 9 l

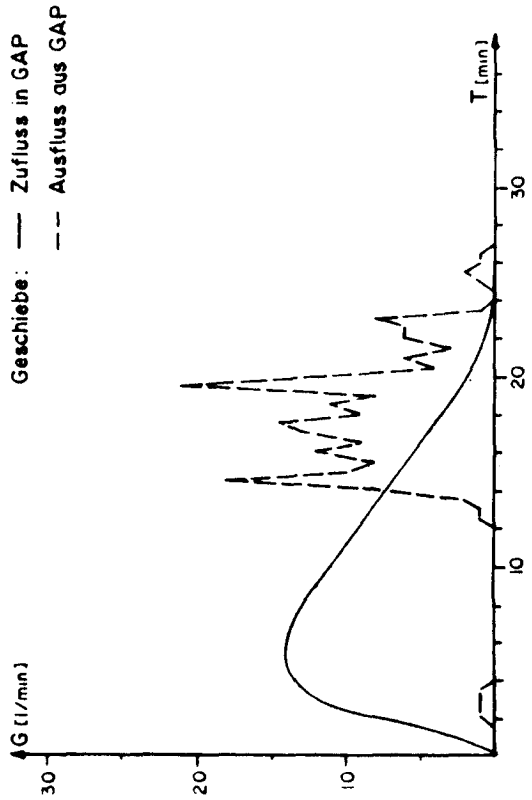
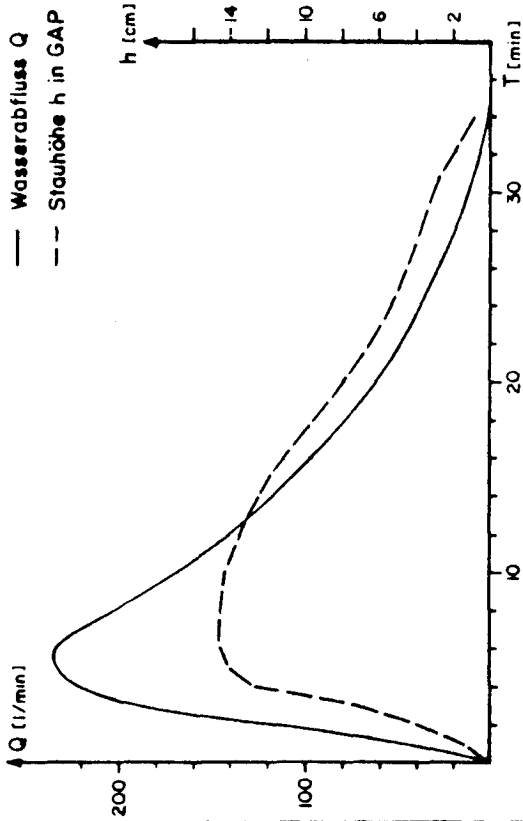
Gehört zur Serie 231 - 242

Versuch 235/236



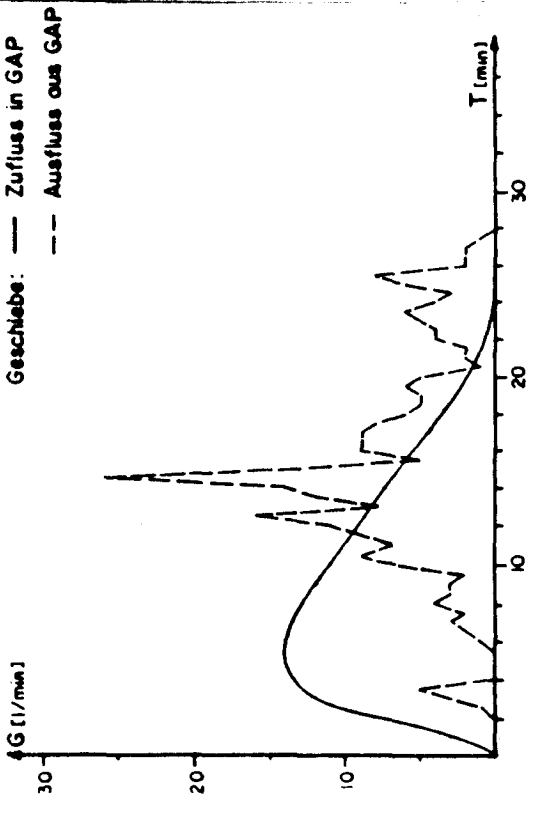
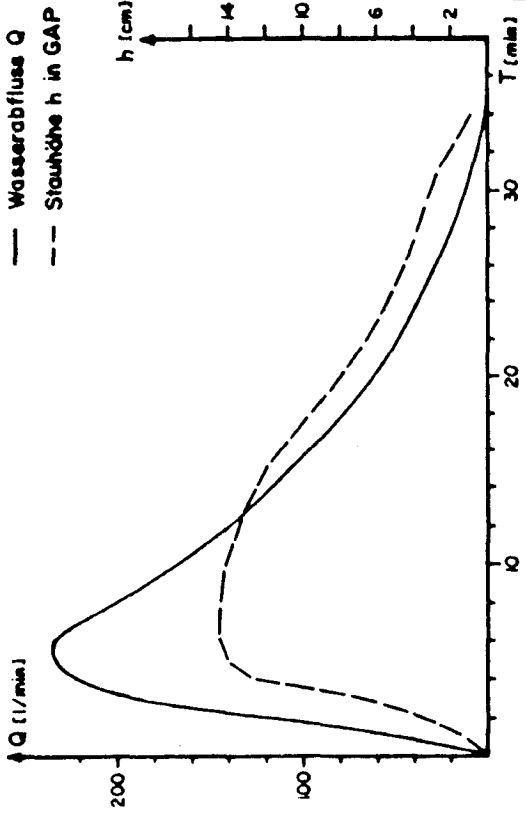
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 168$  l  
 Gehört zur Serie 231 - 242

Versuch 233/234



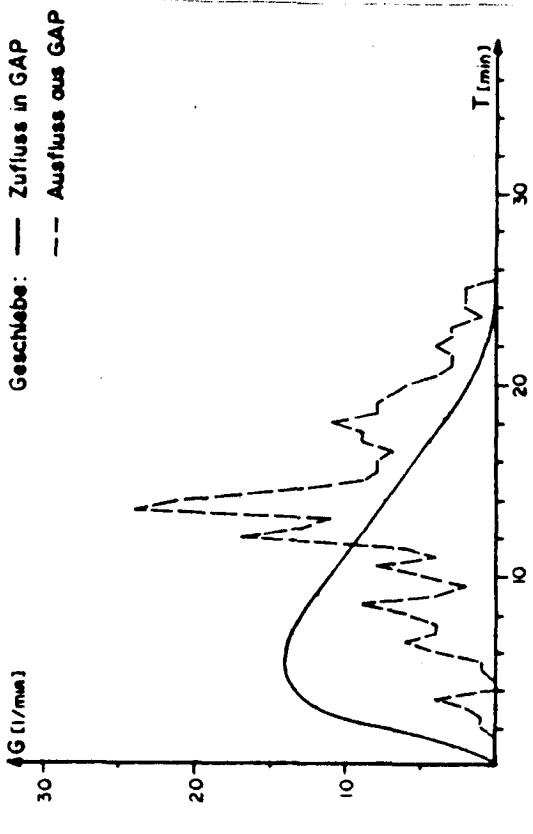
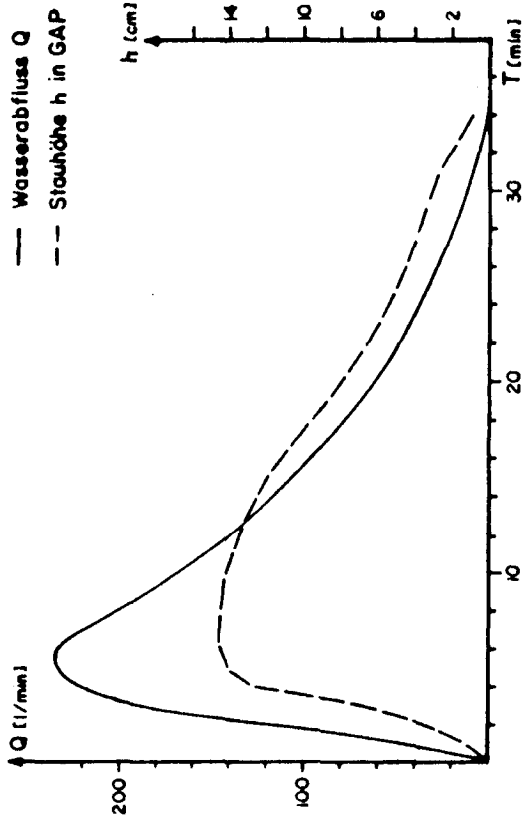
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 112$  l  
 Gehört zur Serie 231 - 242

Versuch 237/238



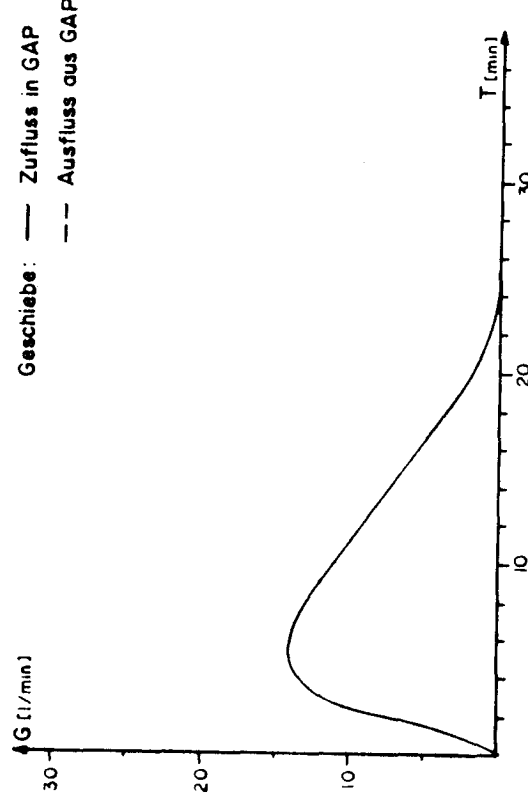
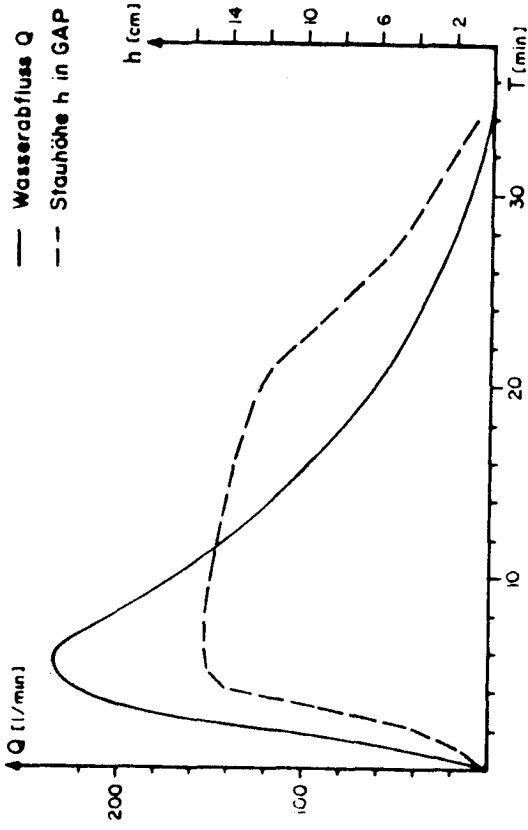
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 164$  l  
 Gehört zur Serie 231 - 242

Versuch 239/240



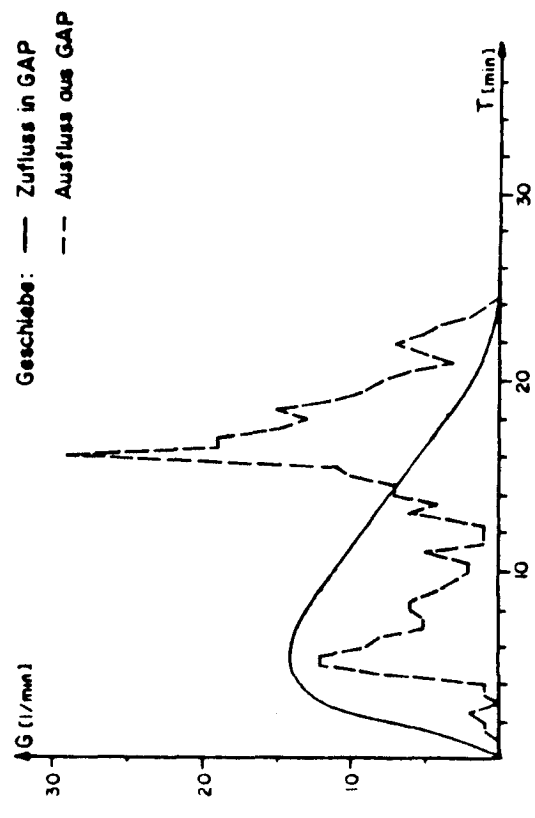
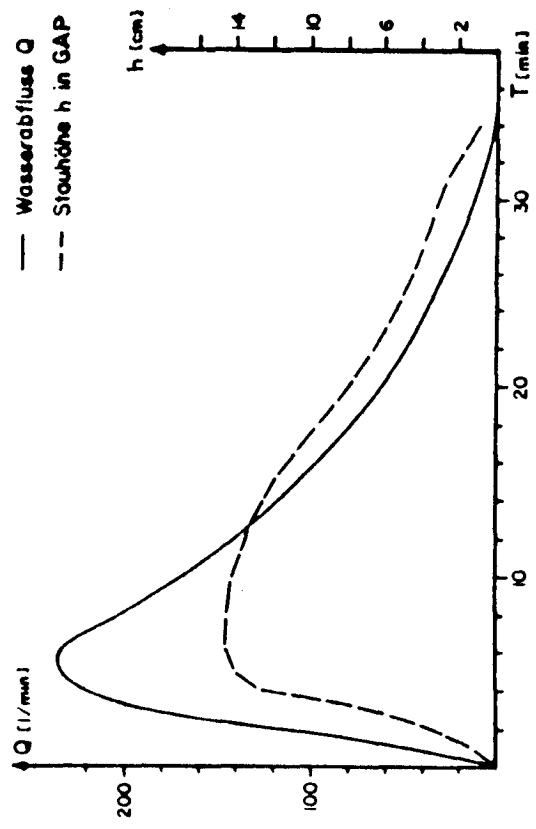
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 155$  l  
 Gehört zur Serie 231 - 242

Versuch 243/244



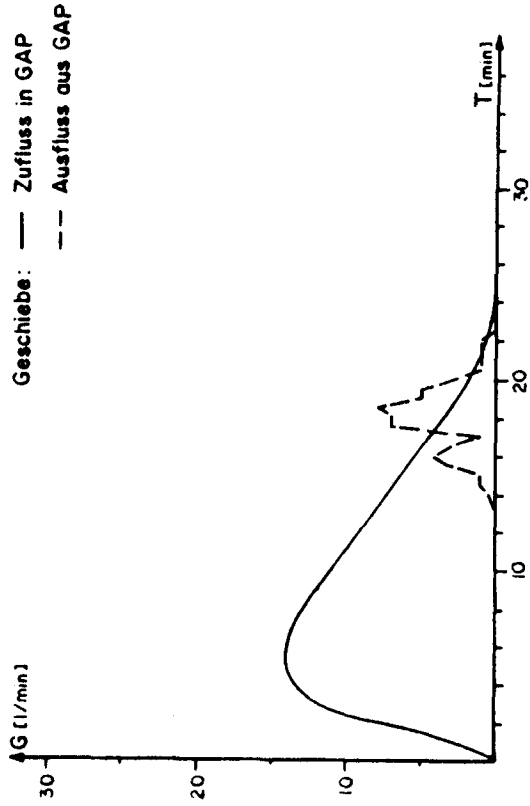
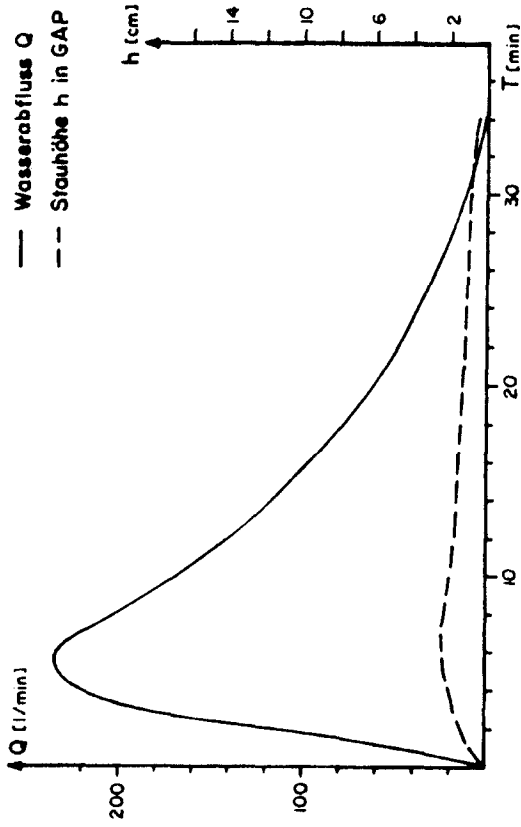
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 0$  l

Versuch 241/242



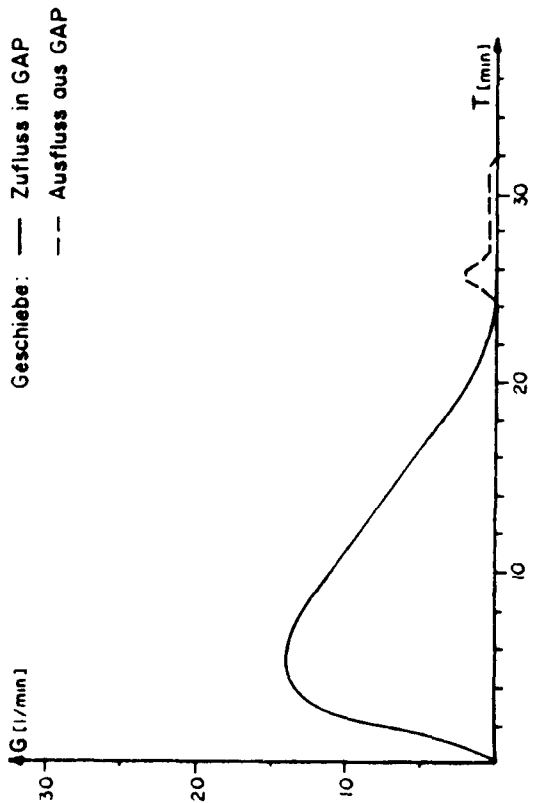
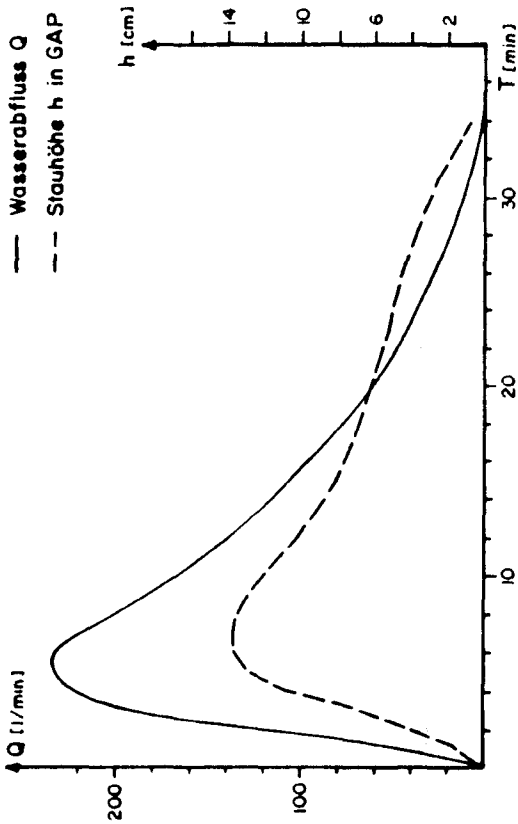
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 171$  l  
 Gehört zur Serie 231 - 242

**Versuch 247/248**



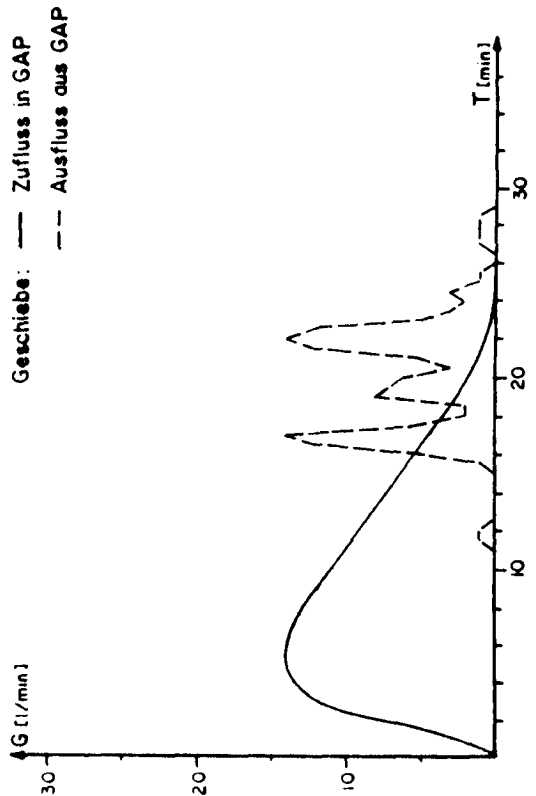
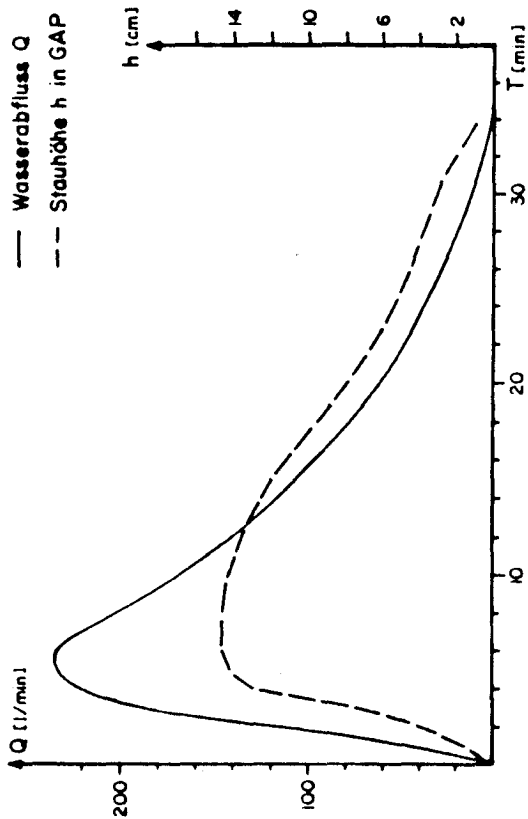
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{Sp} = 31$  l

**Versuch 245/246**



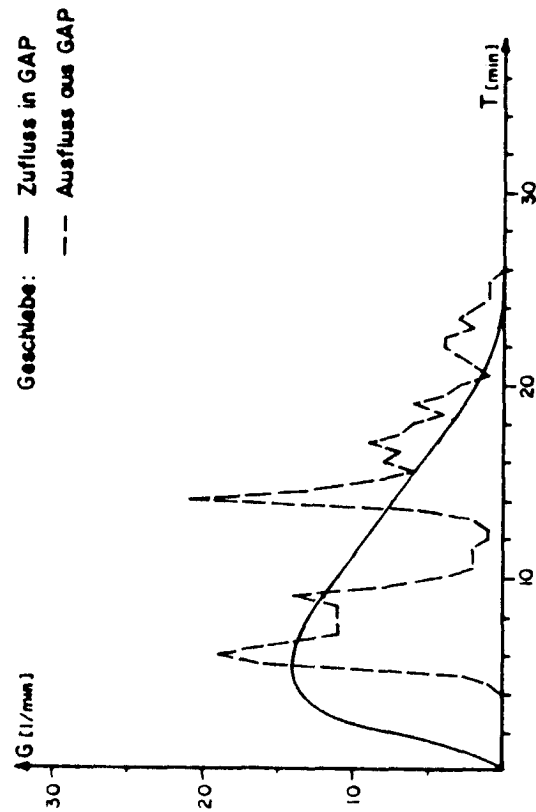
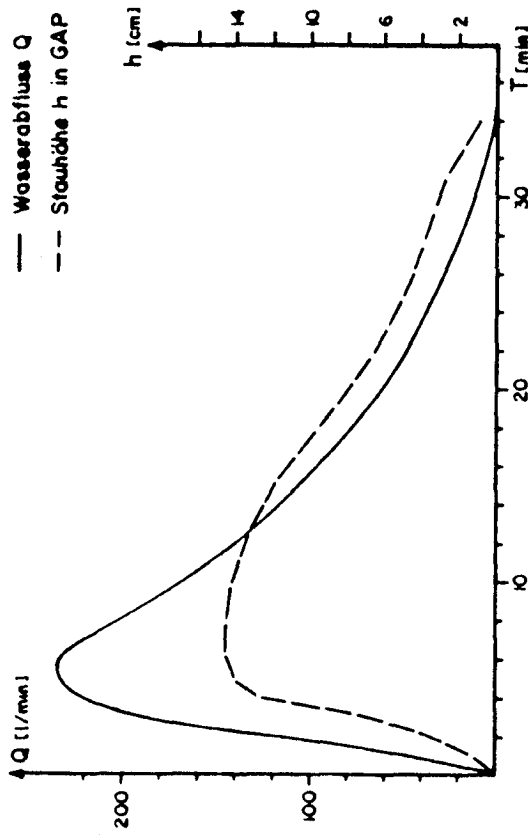
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{Sp} = 6$  l

Versuch 249/250



$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 59$  l  
 Gehört zur Serie 249 - 260

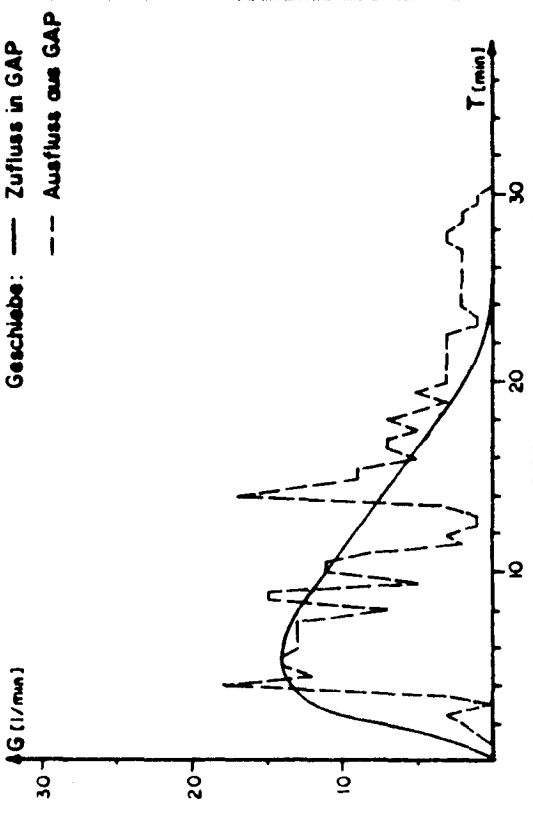
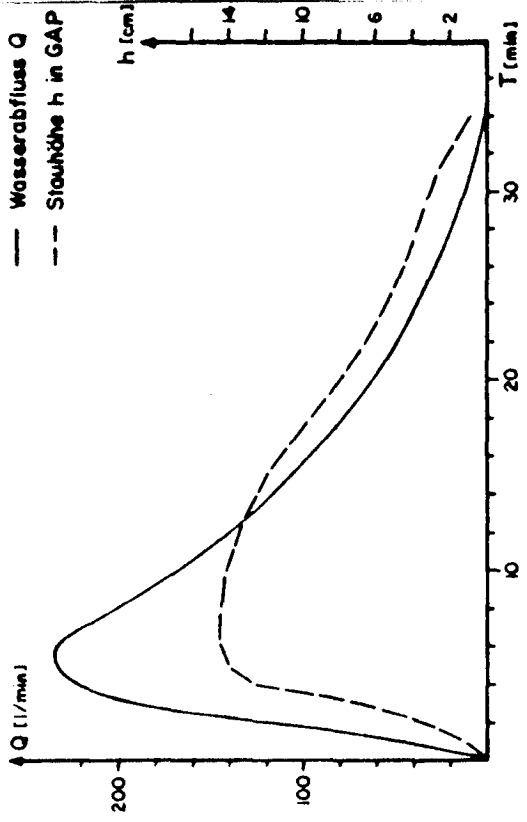
Versuch 251/252



$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 151$  l  
 Gehört zur Serie 249 - 260

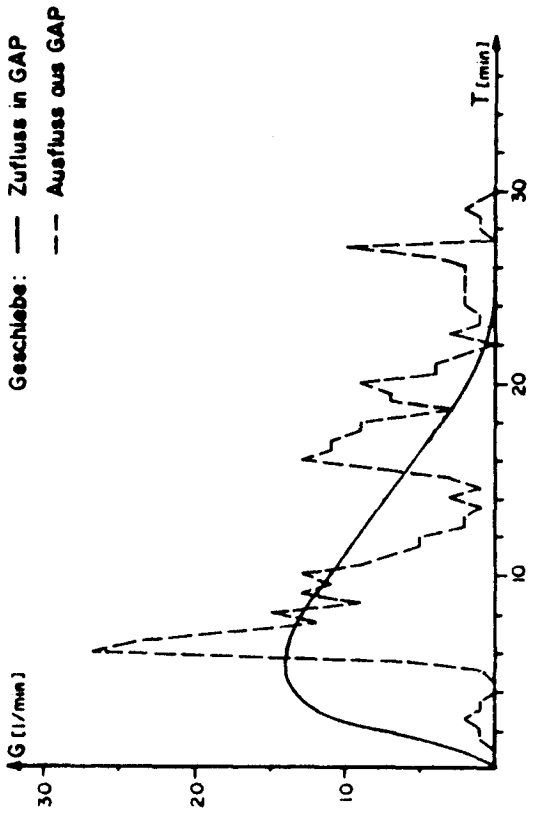
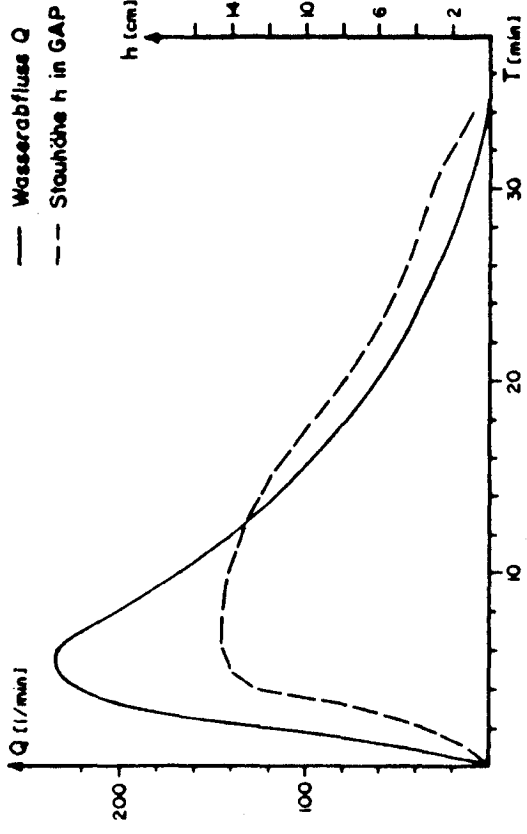


Versuch 253/254



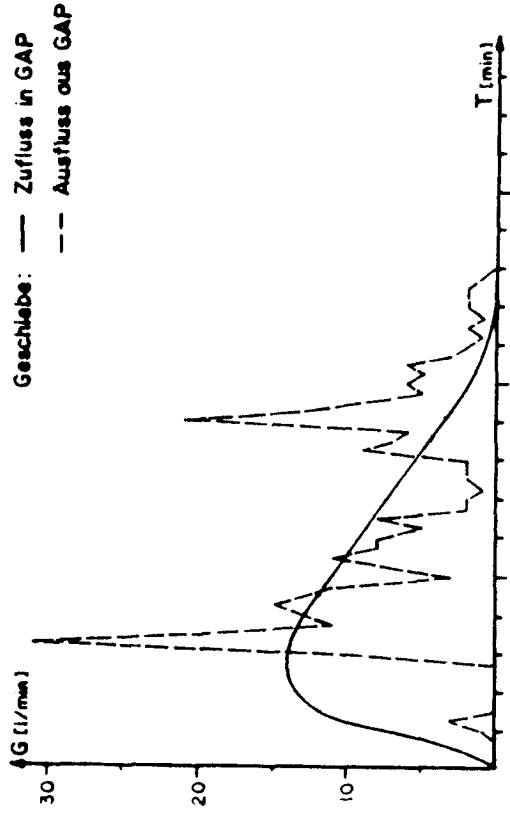
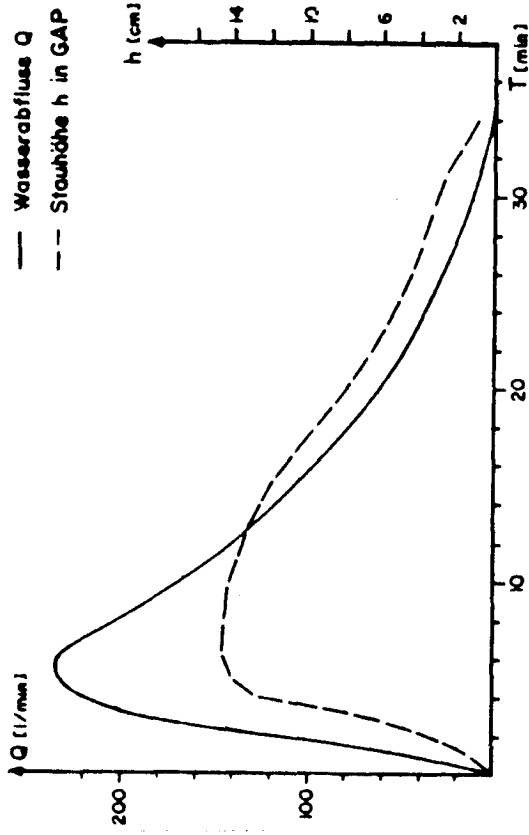
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 188$  l  
 Gehört zur Serie 249 - 260

Versuch 255/256



$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 177$  l  
 Gehört zur Serie 249 - 260

**Versuch 259/260**

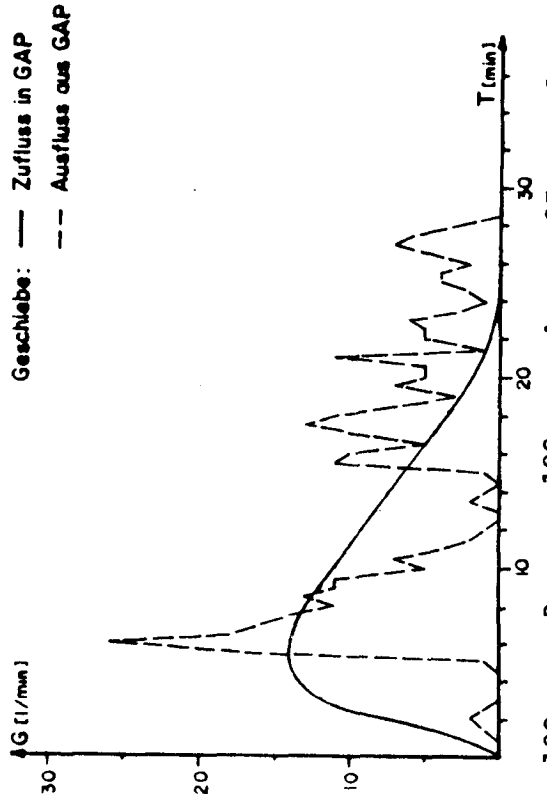
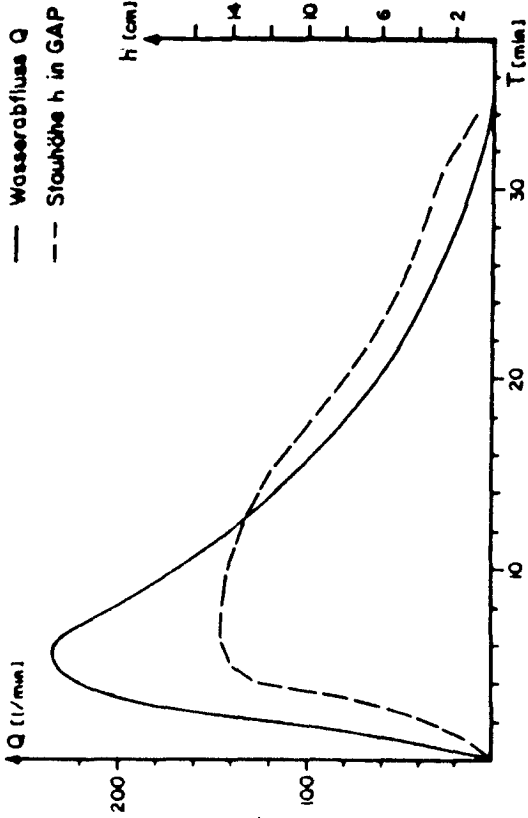


$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$

$G_t = 170$  l  $G_{sp} = 163$  l

Gehört zur Serie 249 - 260

**Versuch 257/258**

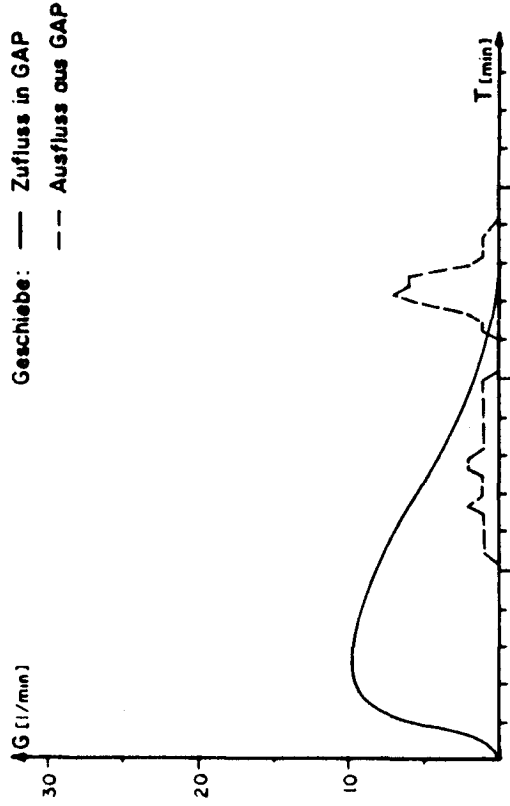
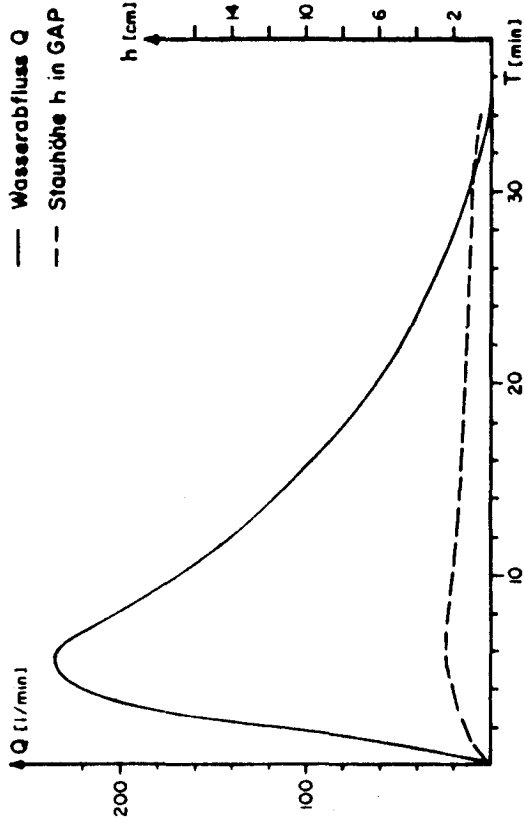


$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$

$G_t = 170$  l  $G_{sp} = 173$  l

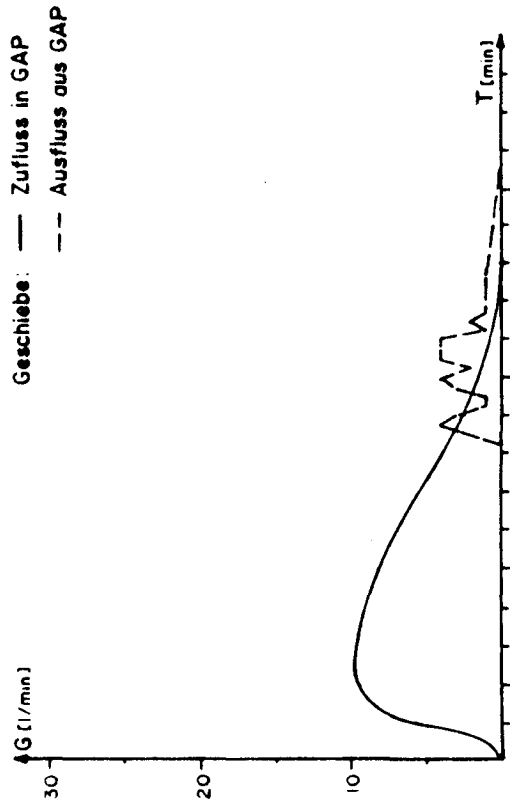
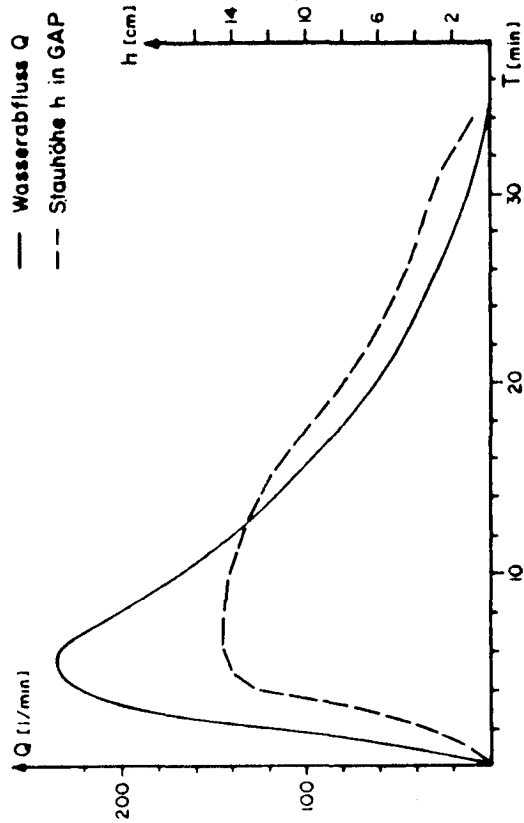
Gehört zur Serie 249 - 260

Versuch 273/274



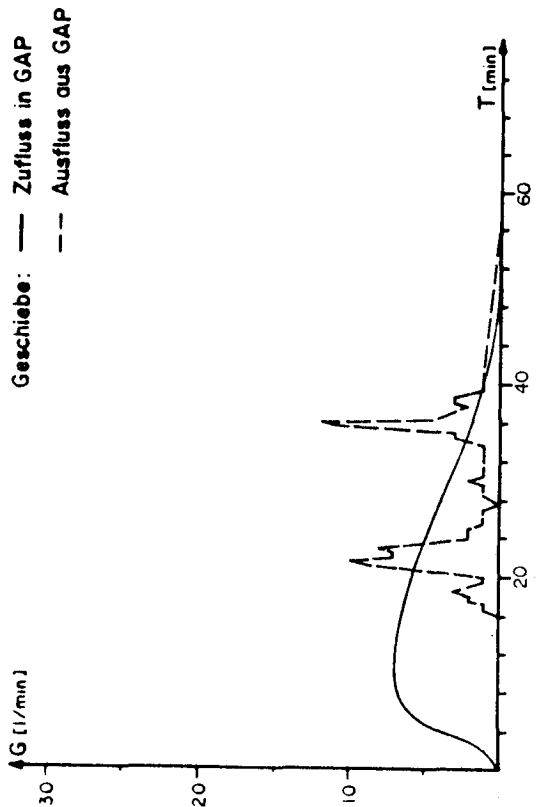
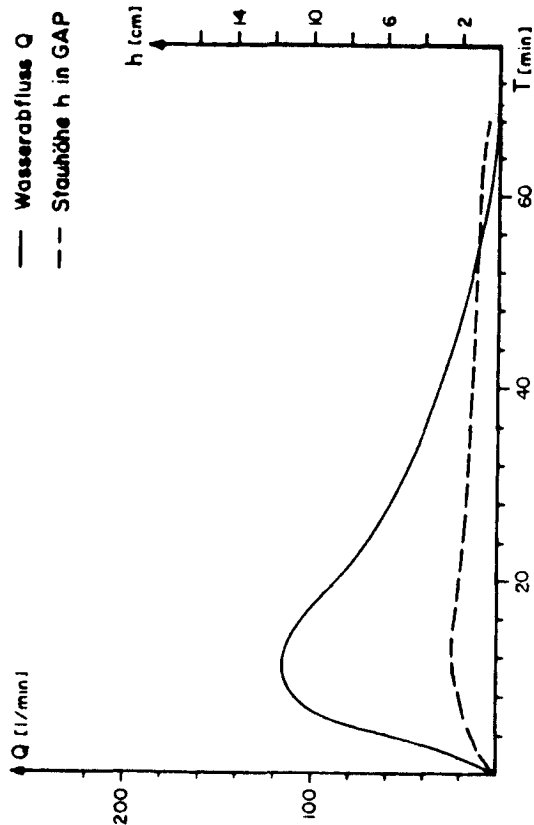
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 115$  l  $G_{sp} = 38$  l

Versuch 271/272



$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 115$  l  $G_{sp} = 23$  l

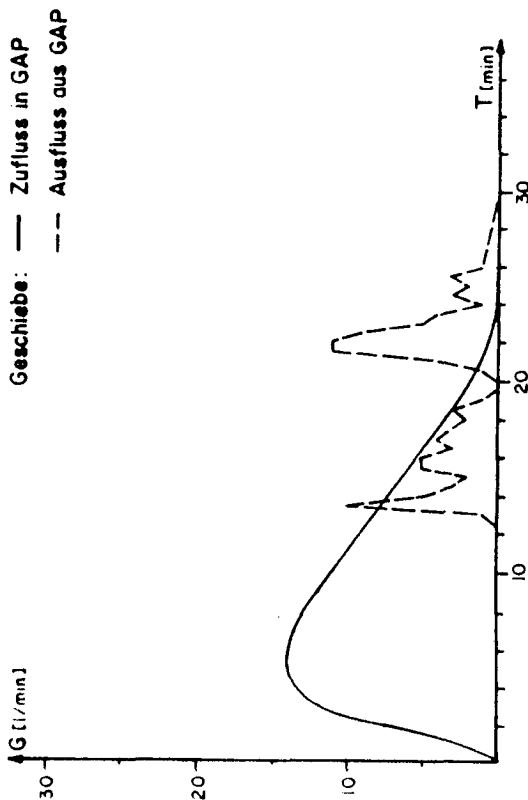
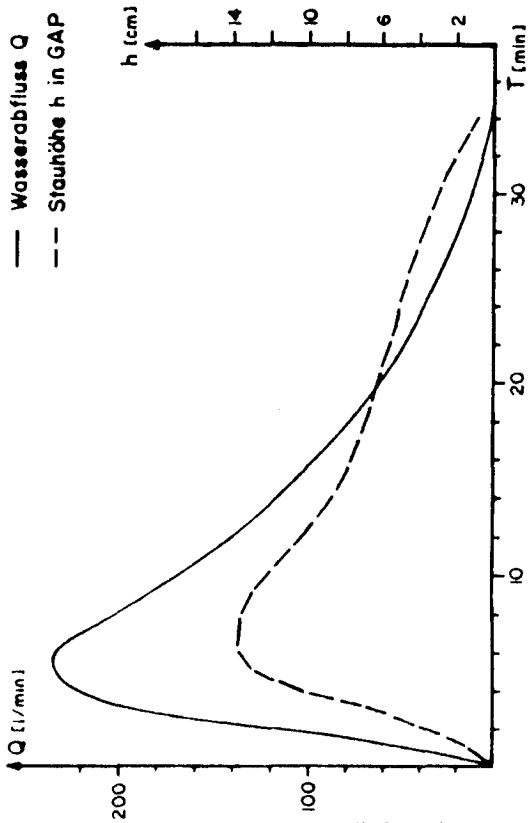
Versuch 277/278



$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 76$  l

Versuchsdauer doppelt so lang wie üblich

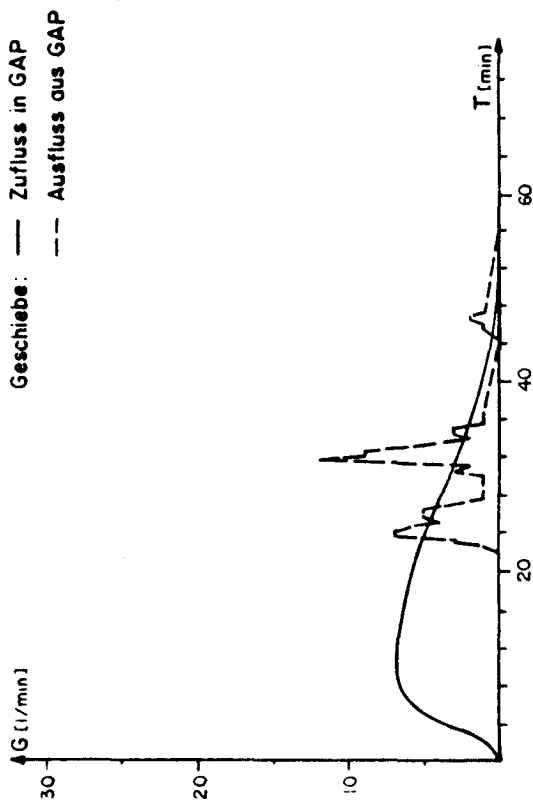
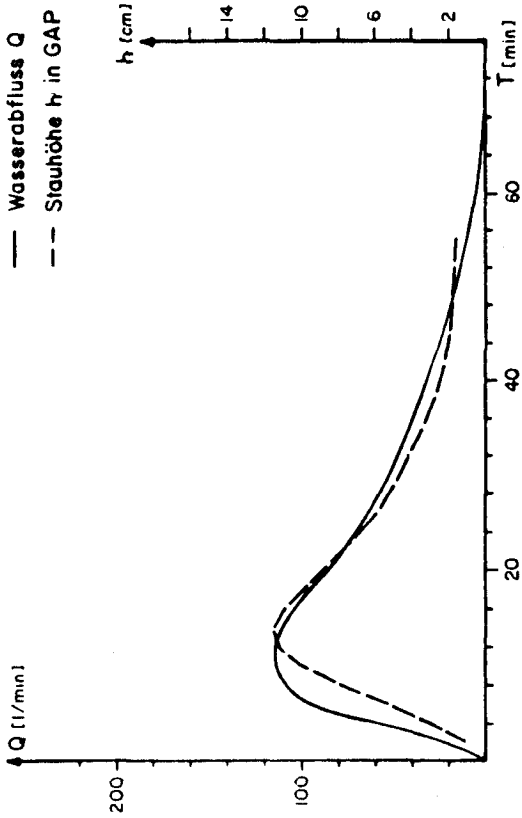
Versuch 275/276



$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 58$  l

Wiederholung von Versuch 209/210

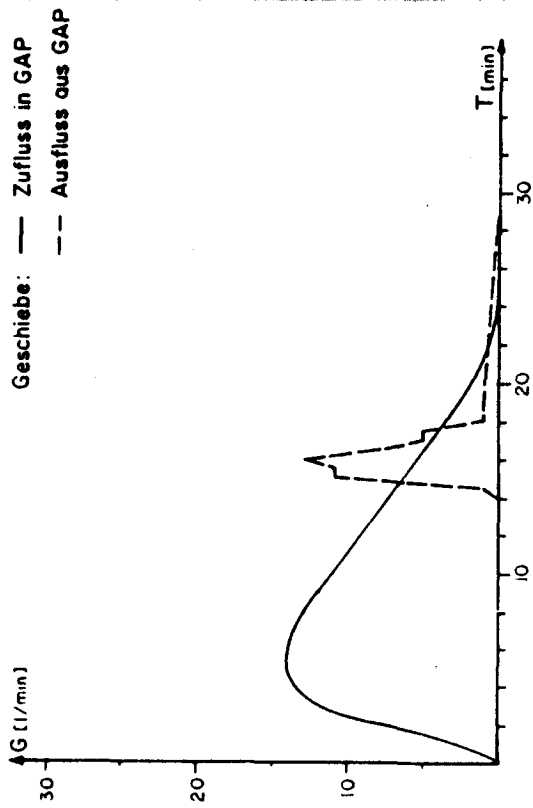
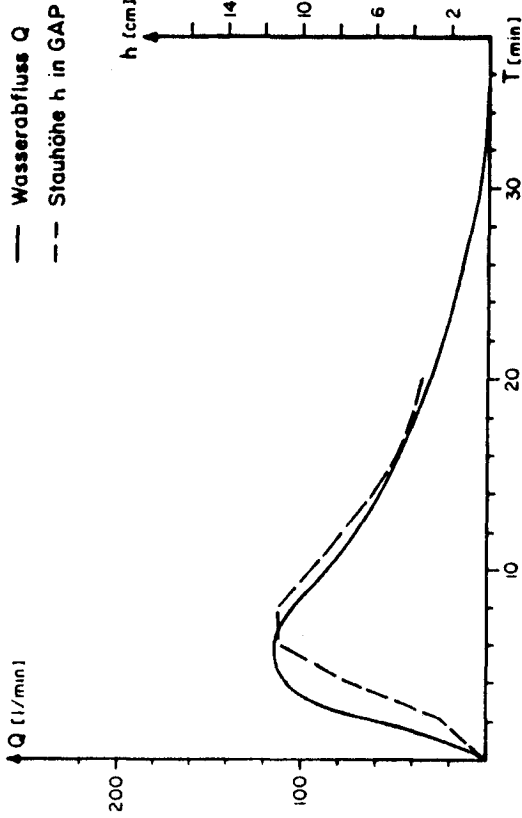
Versuch 279/280



$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 65$  l

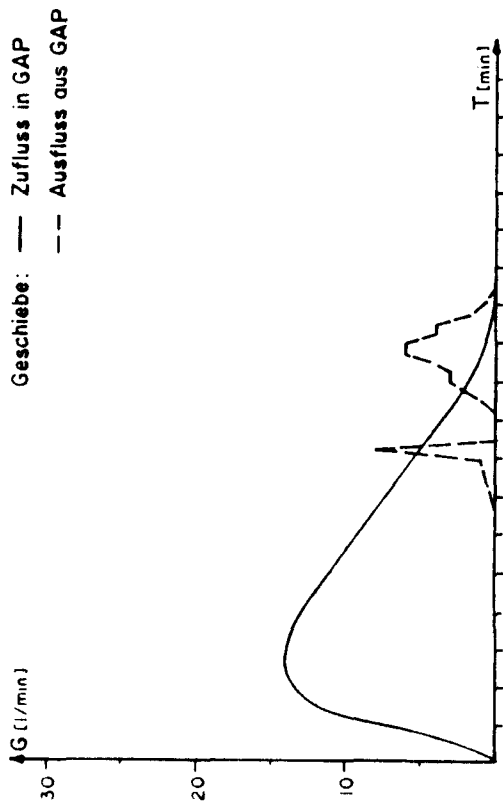
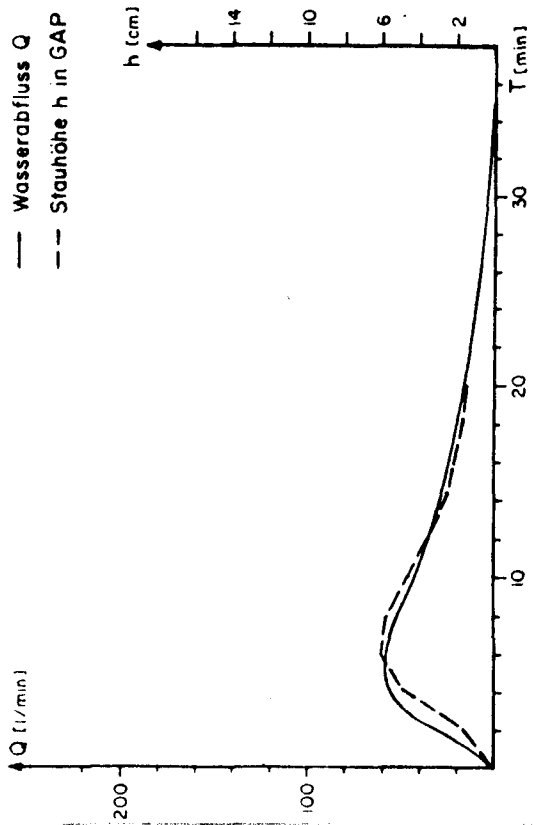
Versuchsdauer doppelt so lang wie üblich

Versuch 281/282



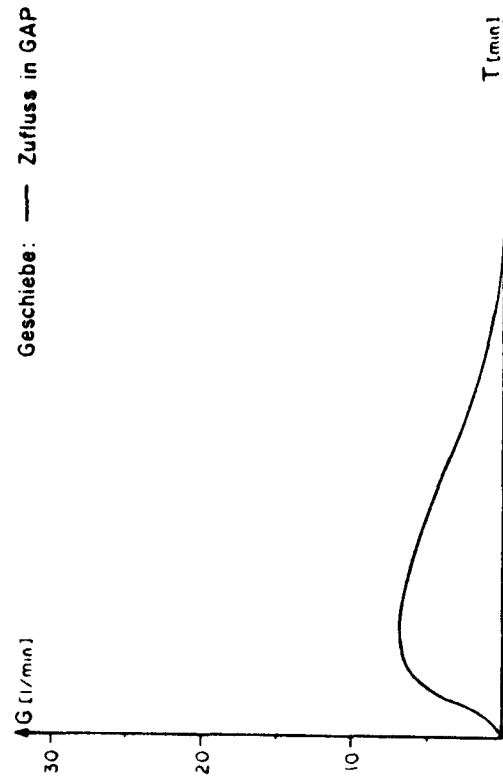
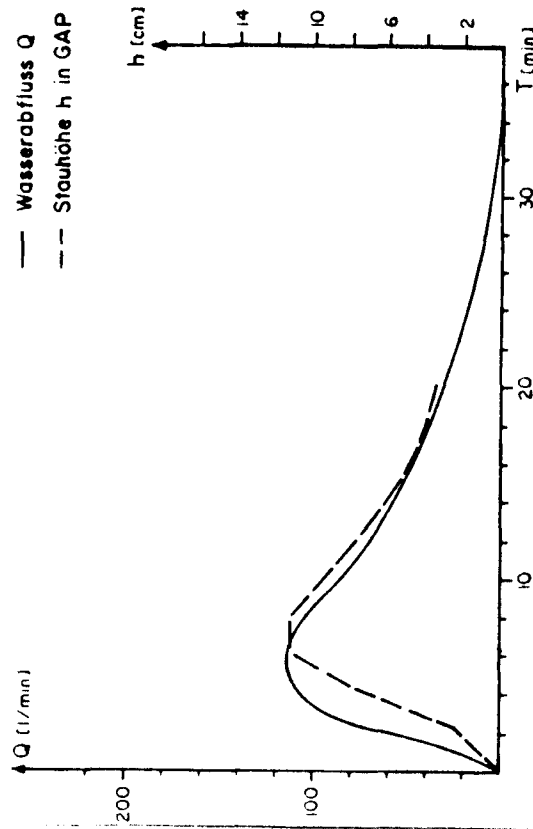
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 32$  l

Versuch 283/284



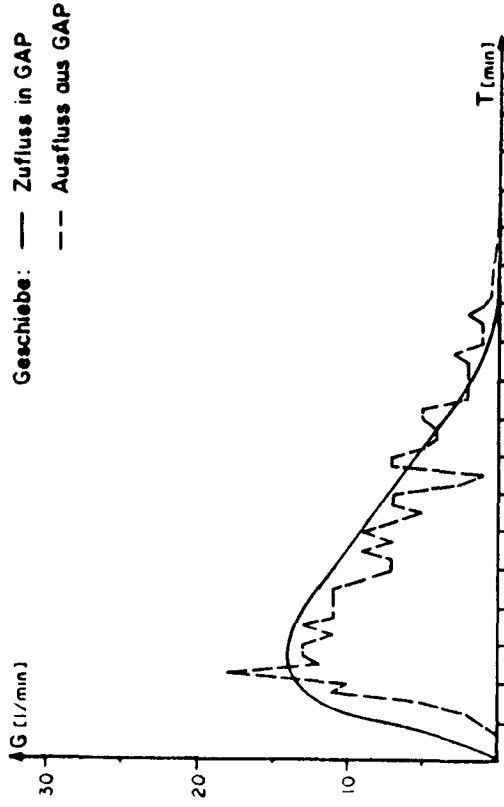
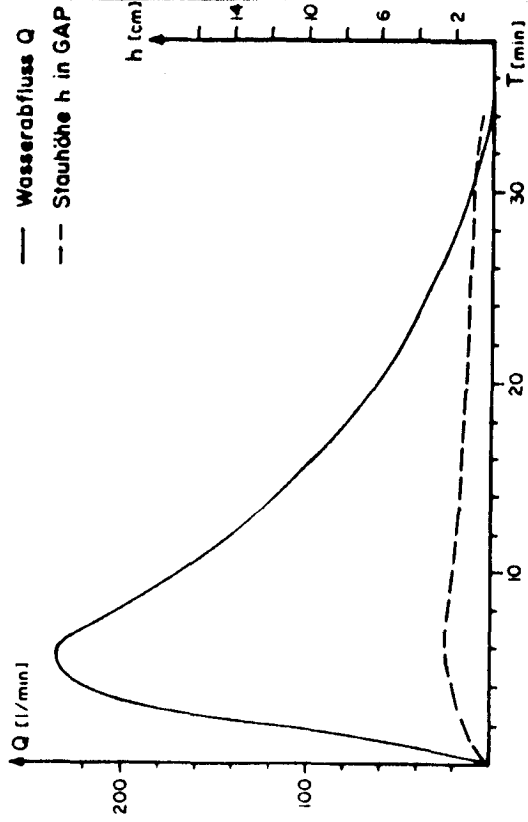
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 18$  l

Versuch 285/286



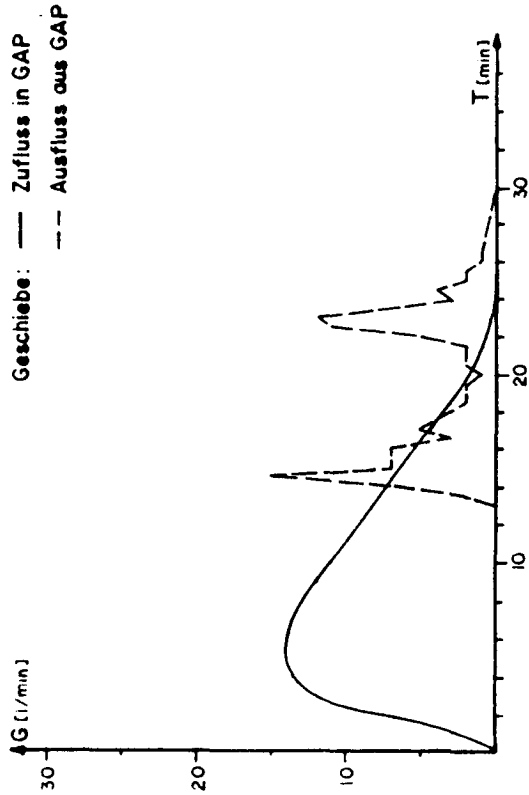
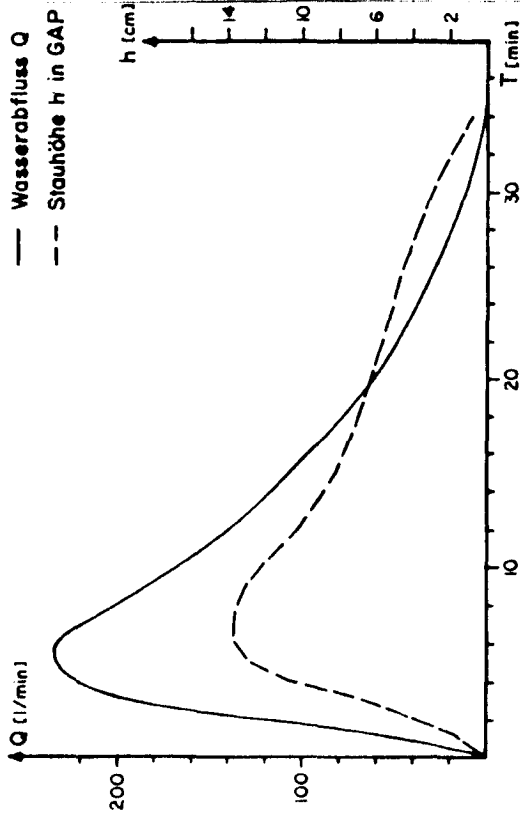
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 85$  l  $G_{sp} = 0$  l

Versuch 293/294



$L = 50 \text{ cm}$   $B = 100 \text{ cm}$   $A = 25 \text{ cm}$   $I = 18\%$   
 $G_t = 170 \text{ l}$   $G_{sp} = 157 \text{ l}$

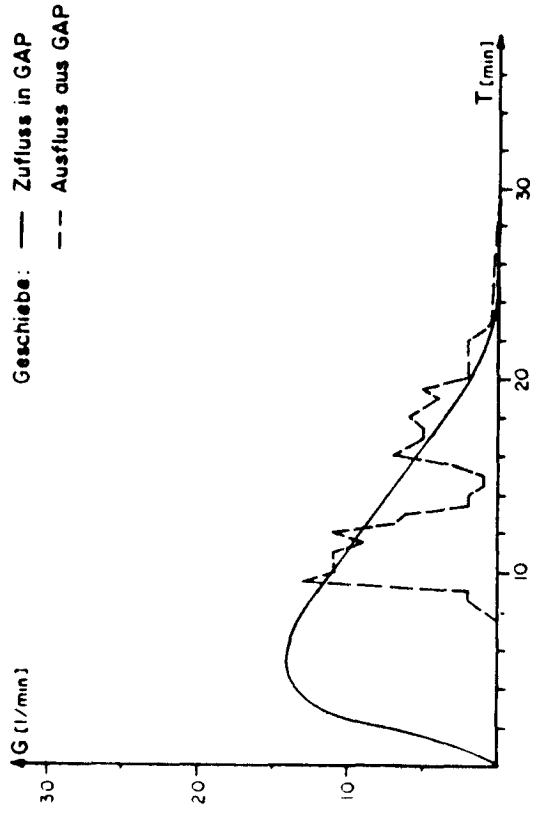
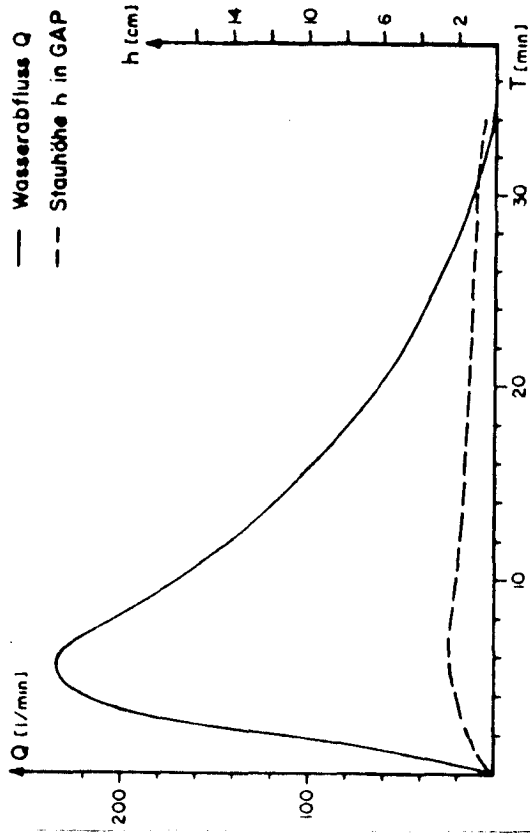
Versuch 287/288



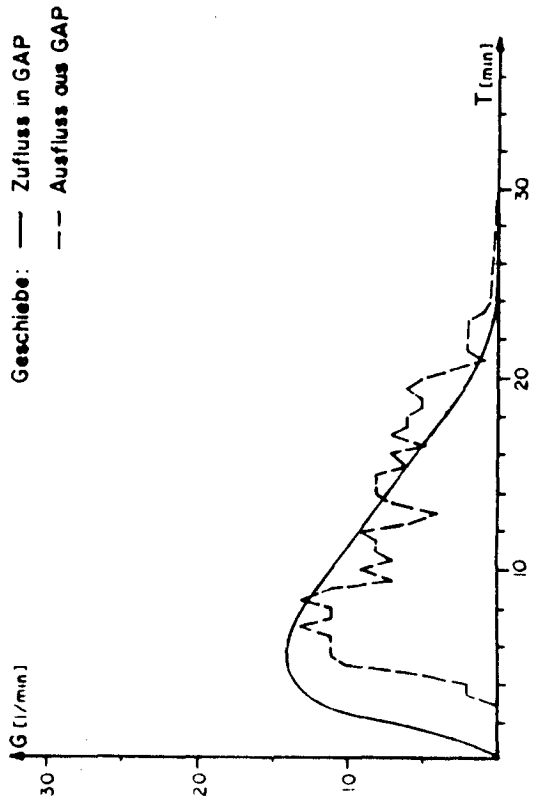
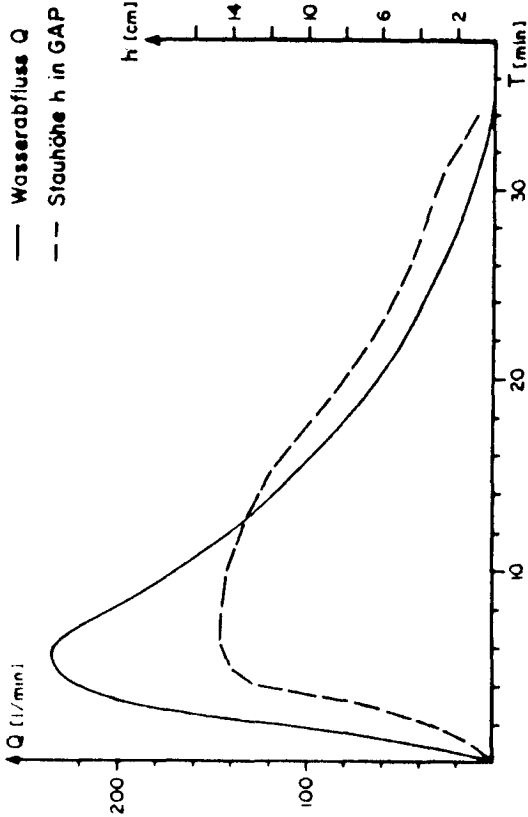
$L = 100 \text{ cm}$   $B = 100 \text{ cm}$   $A = 25 \text{ cm}$   $I = 18\%$   
 $G_t = 170 \text{ l}$   $G_{sp} = 65 \text{ l}$

Wiederholung des Versuches 209/210

Versuch 301 / 302



Versuch 295 / 296



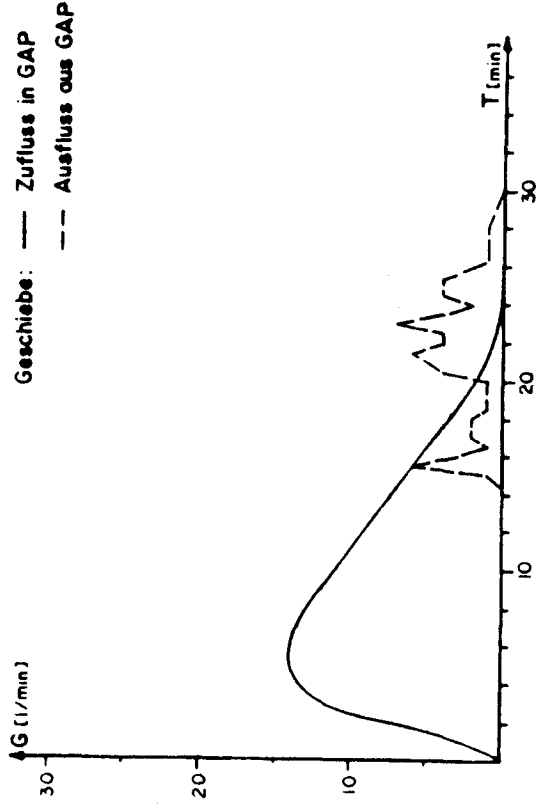
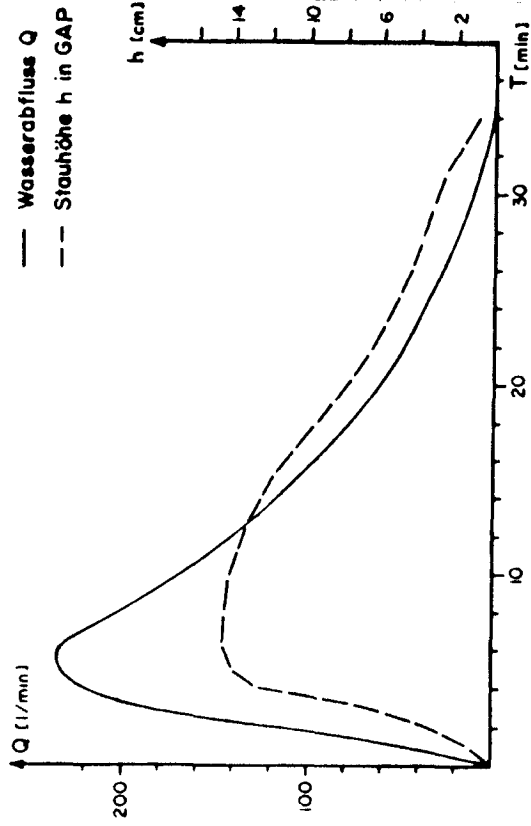
$L = 100$  cm  $B = 100$  cm  $A = 0$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 149$  l

$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 0$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 79$  l

Form des GAP: Birne, Stiel nach unten



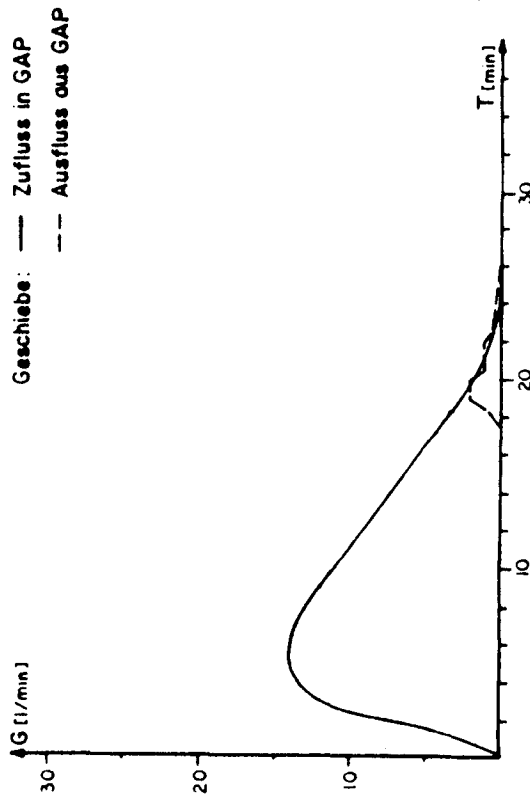
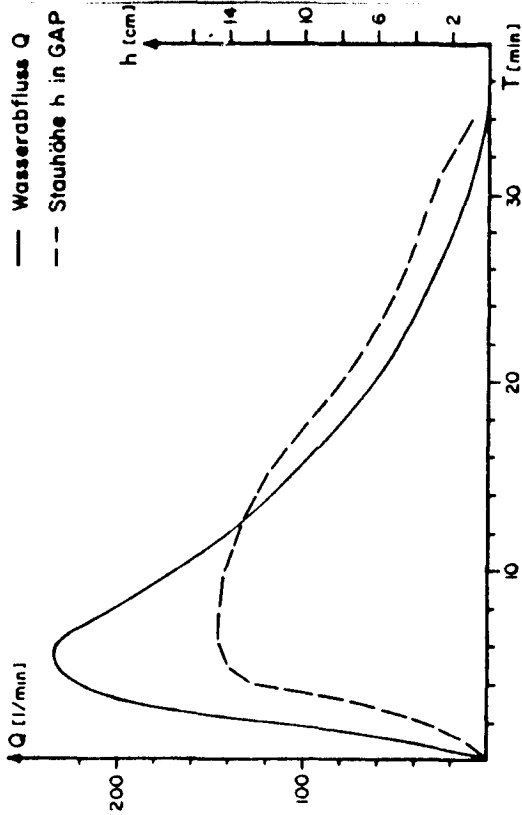
**Versuch 305 / 306**



$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 0$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 39$  l

Form des GAP: Birne, Stiel nach unten

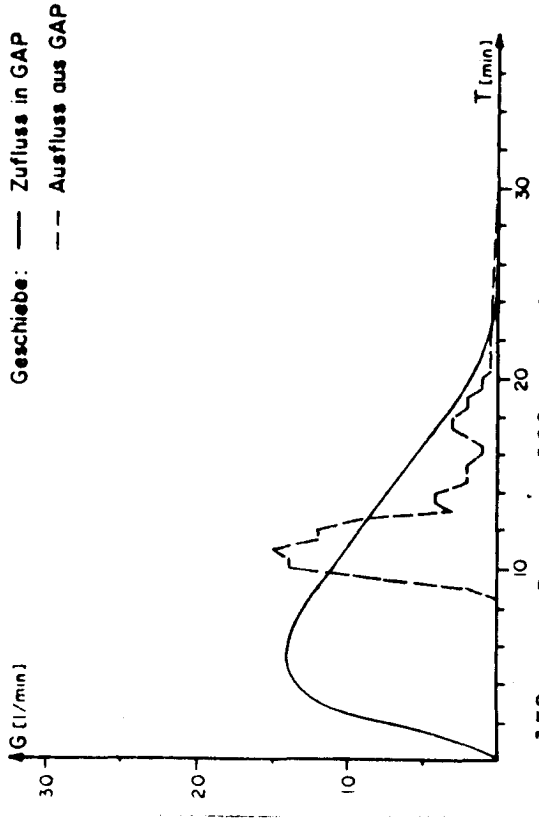
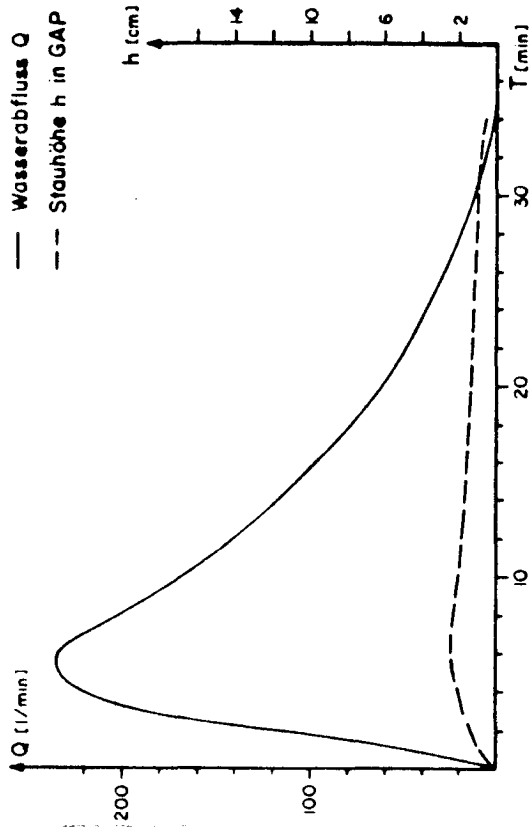
**Versuch 303 / 304**



$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 0$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 6$  l

Form des GAP: Birne, Stiel nach unten

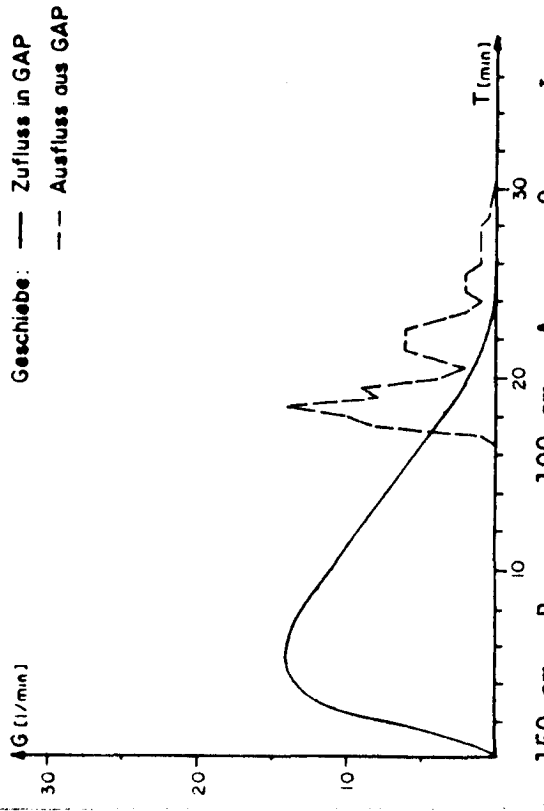
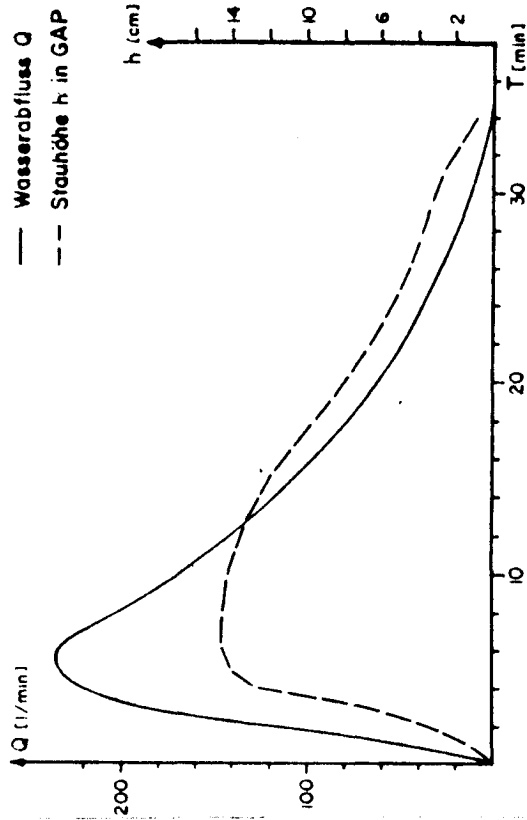
Versuch 309/310



$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 0$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 66$  l

Form des GAP: Birne mit Stiel nach oben

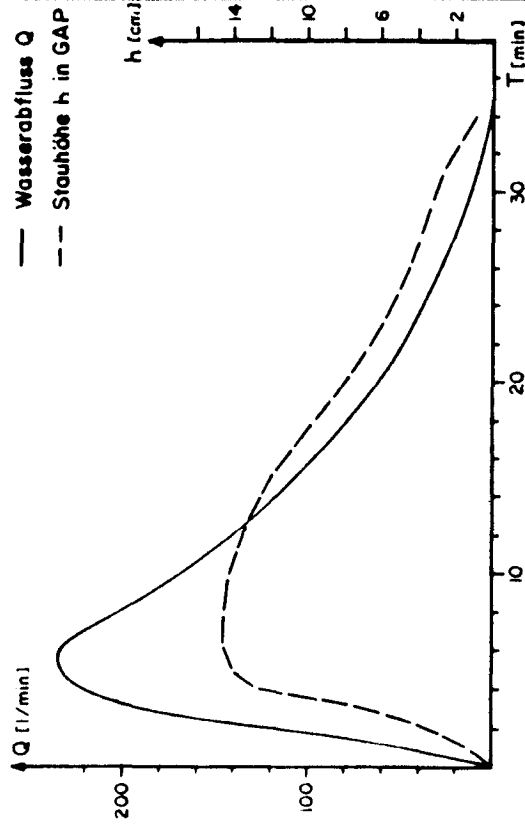
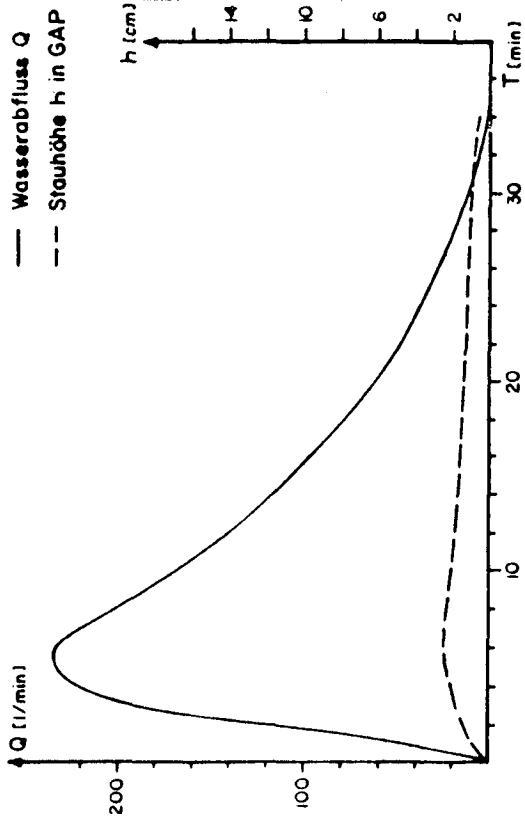
Versuch 307/308



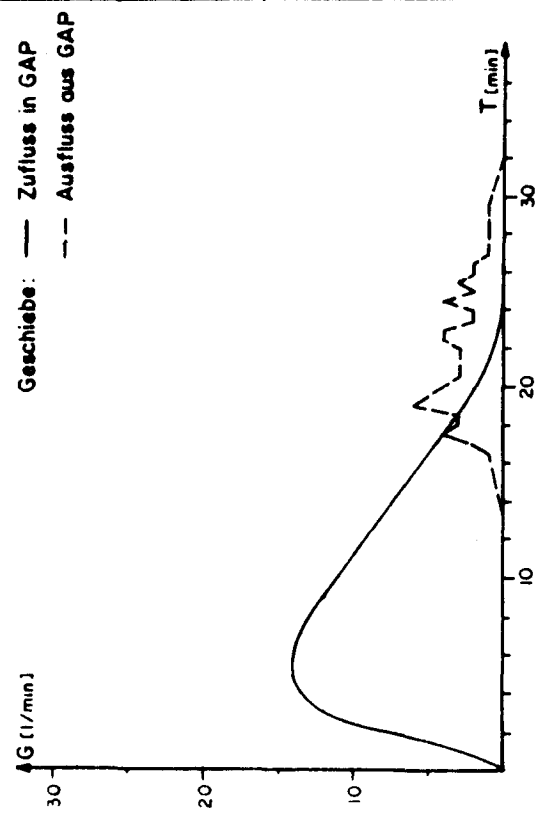
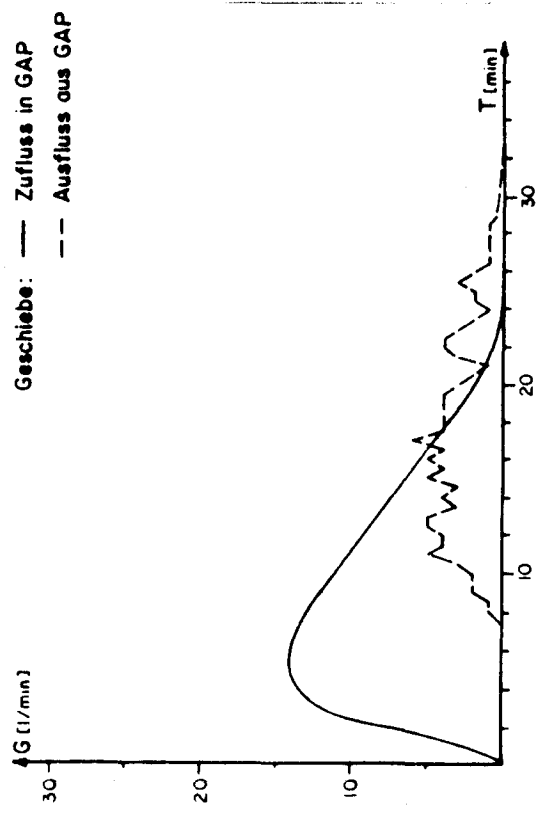
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 0$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 52$  l

Form des GAP: Birne, Stiel nach oben

Versuch 311 / 312



Versuch 313 / 314



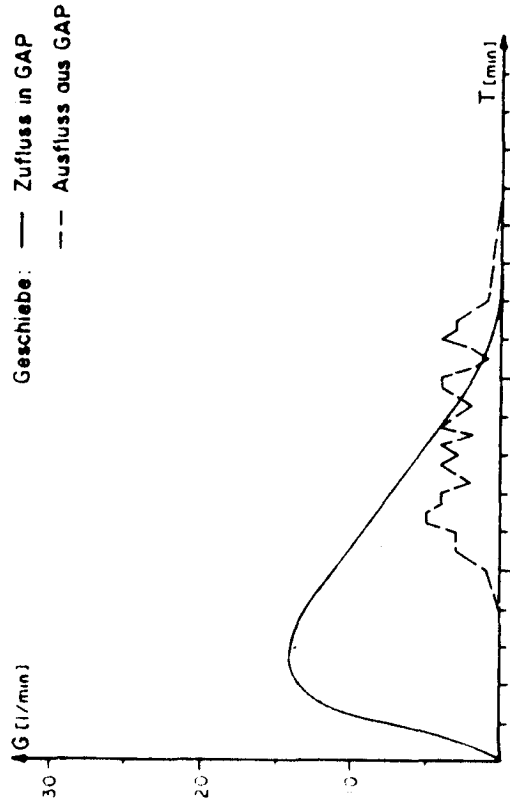
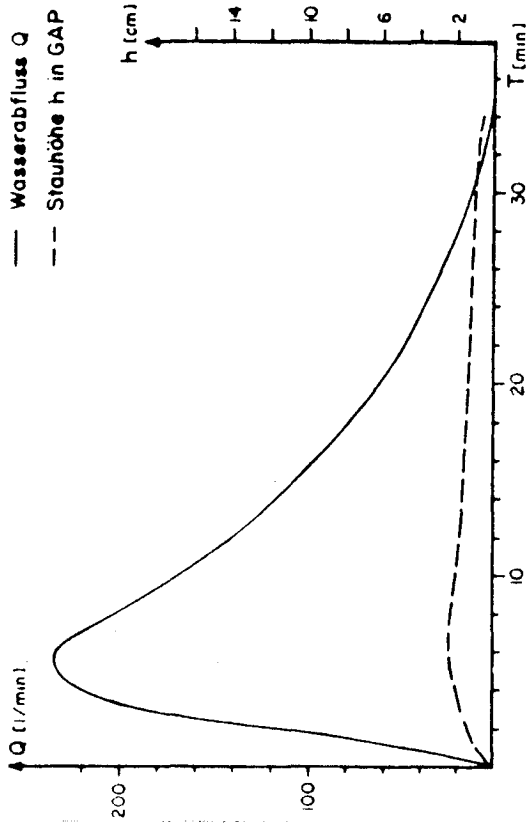
$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 69$  l

Form des GAP: Birne mit Stiel nach oben

$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 37$  l

Form des GAP: Birne mit Stiel nach oben

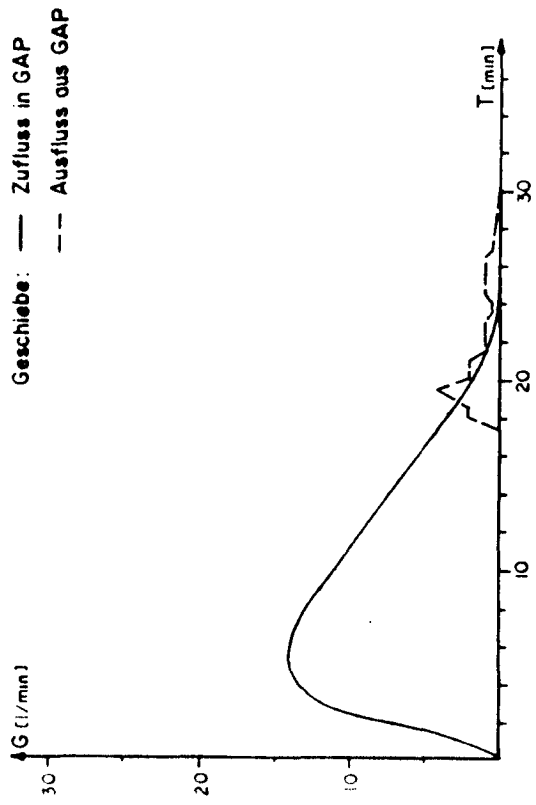
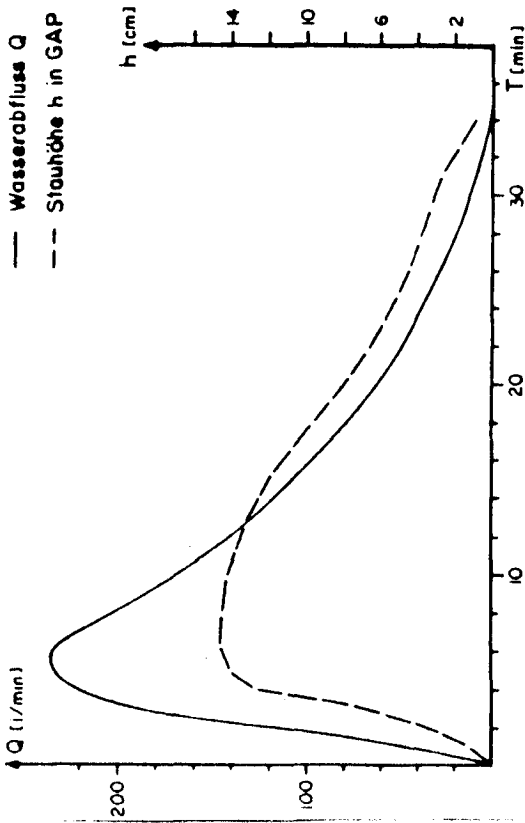
Versuch 321 / 322



$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 48$  l

Form des GAP: Birne mit Stiel nach unten

Versuch 315 / 316



$L = 150$  cm  $B = 100$  cm  $A = 25$  cm  $I = 18\%$   
 $G_t = 170$  l  $G_{sp} = 14$  l

Form des GAP: Birne mit Stiel nach unten

### 10.5. Dreidimensionale Darstellung einiger Ablagerungsformen

Zur besseren Veranschaulichung wurden sieben Endstadien von Modellversuchen mit Hilfe der Programme von Rüedin (1983) in einer perspektivischen Ansicht dargestellt. Die Maschenweite des horizontalen Gitters in den folgenden Bildern entspricht 2 cm im Modell.

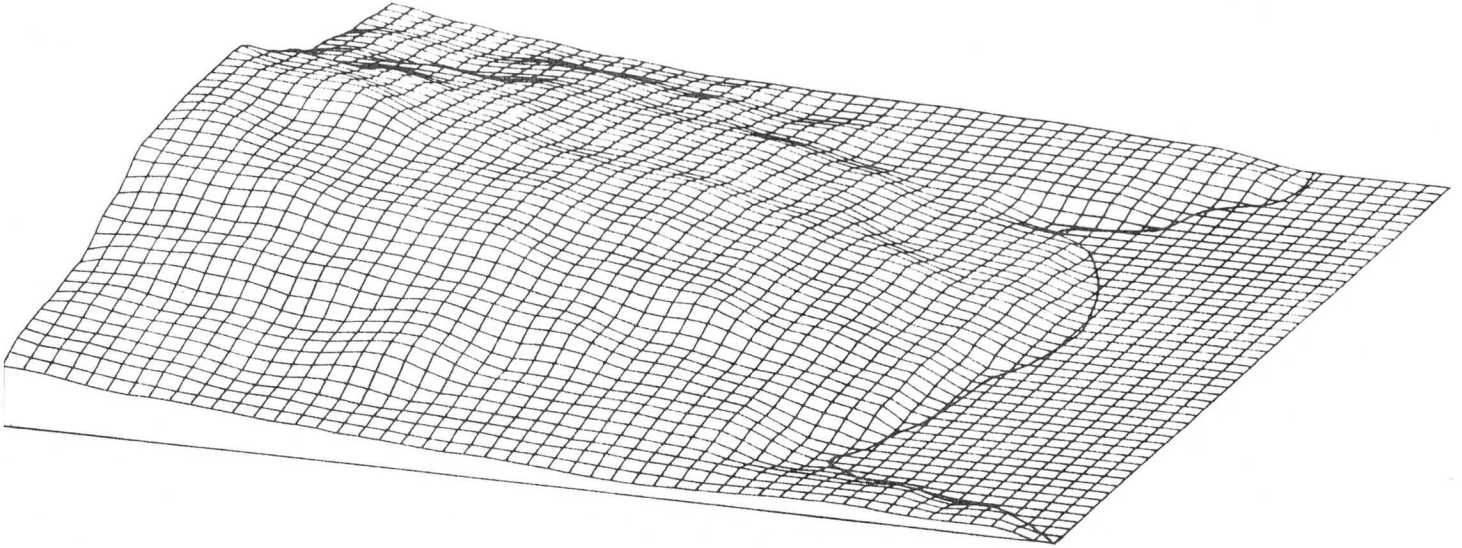


Bild 118 Endstadium des Versuchs 155. Man erkennt die seitlich nach vorne gezogenen Sekundärkegel links und rechts des Hauptkegels. (Höhenkurven: Bild 35)

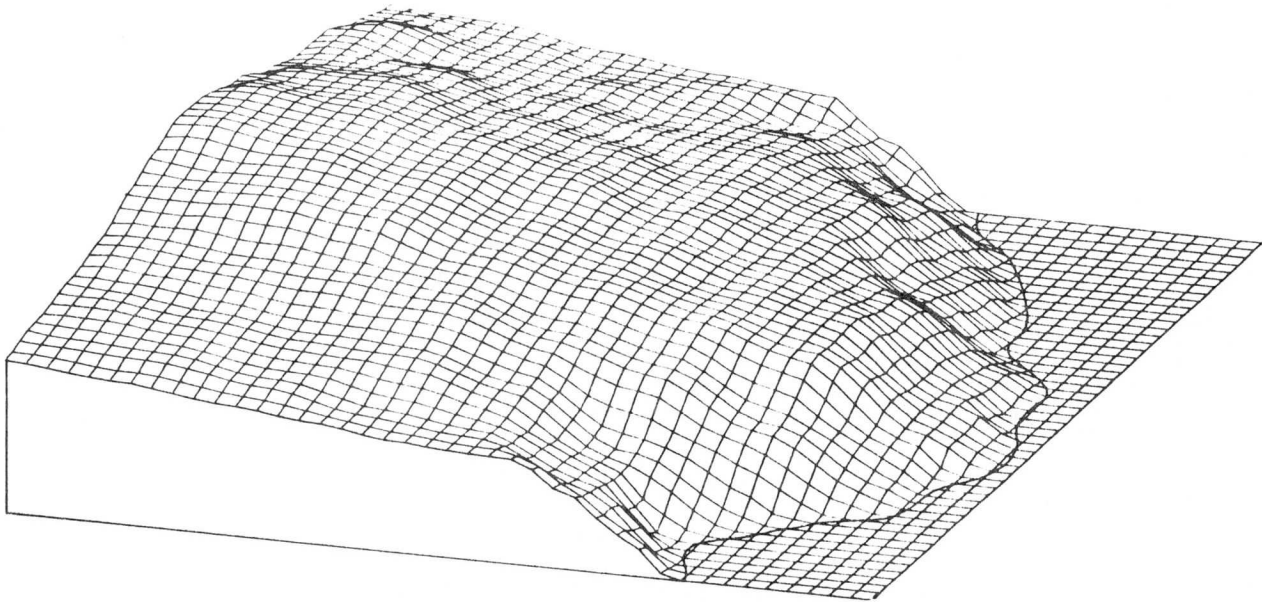
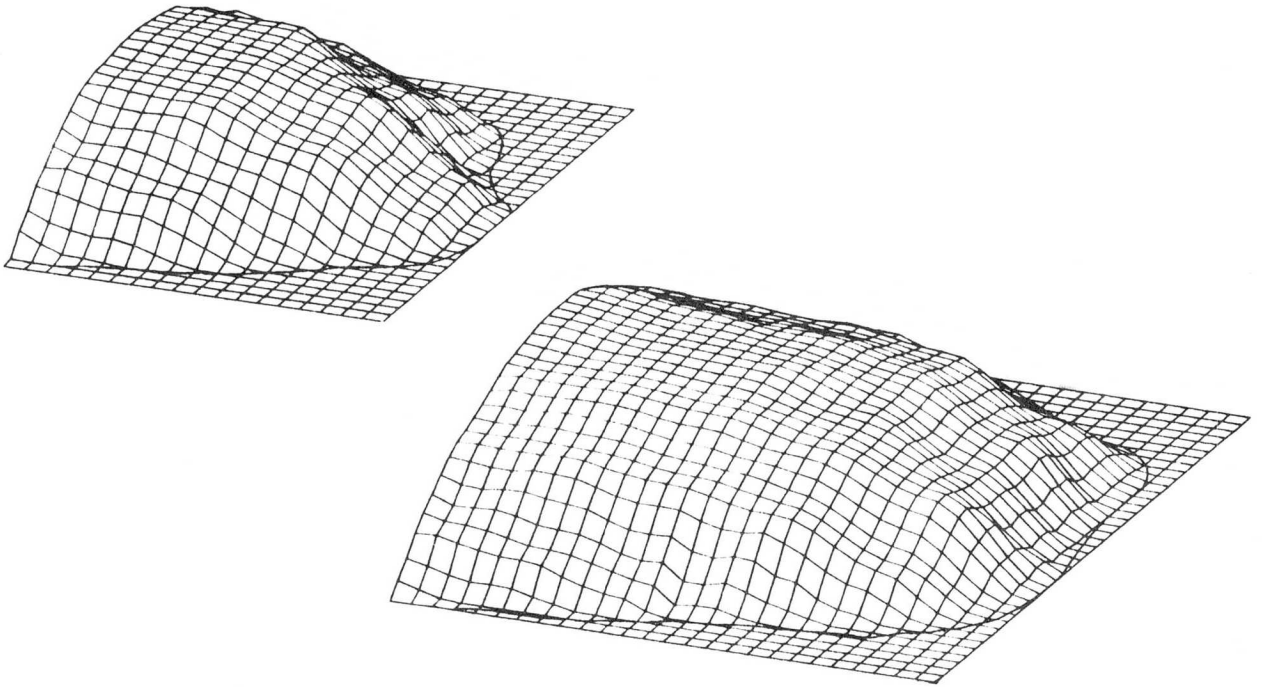


Bild 119 Endstadium des Versuchs 083. Der untere Teil des Schwemmkegels wurde unter Wasser gebildet und weist darum ein steileres Gefälle auf als der obere Teil. Vor allem im Längsprofil sieht man den Gefälleknick sehr klar. (Höhenkurven: Bild 32)



Bilder 120 und 121 Endstadien der Versuche 105 (oben) und 171 (unten). Nach dem Abschluss der Schwemmkegelbildungsphase 1 ist der Kegel kurz und breit (105), nach Phase 2 hingegen länger und relativ dazu schmaler. (Höhenkurven: Bild 33)

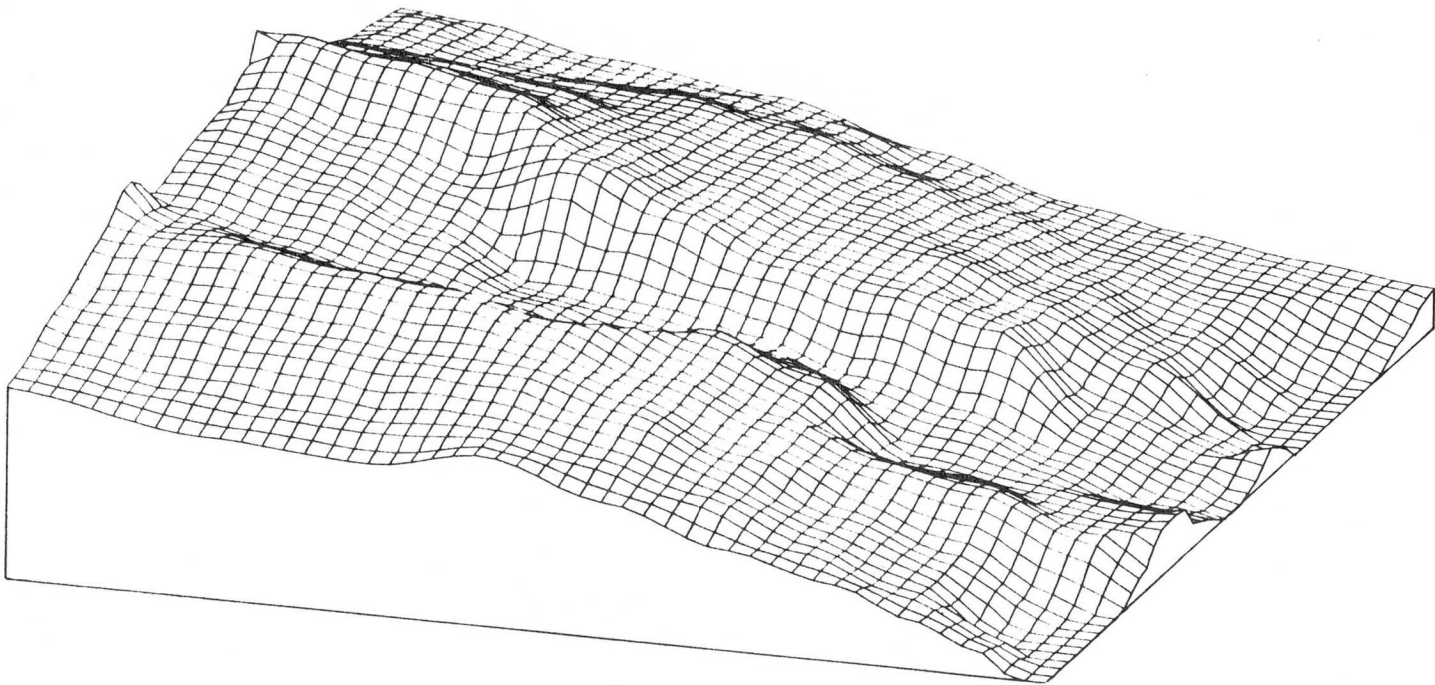


Bild 122 Endstadium des Versuchs 189. Der Schwemmkegel hat die vordere Begrenzung des Geschiebeablageplatzes erreicht. Ueber seine ganze Länge bildete sich eine Spülrinne. (Höhenkurven: Bild 39)

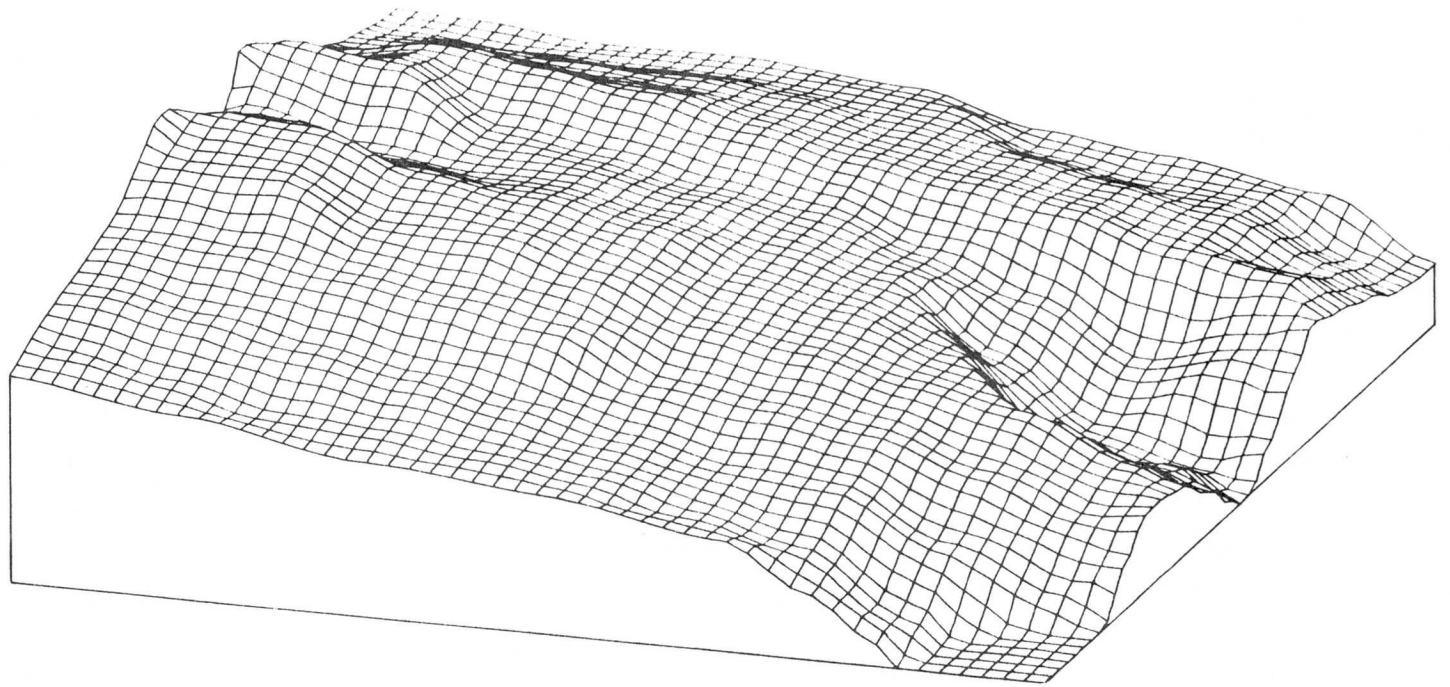


Bild 123 Endstadium des Versuchs 195. Der Schwemmkegel erreichte die Rückhaltesperre. Als Folge des Wasserstaus bildete sich vorne die Arena-artige Spülform. Hinten sind die seitlichen Kolkwalle zu sehen. (Höhenkurven: Bild 41)

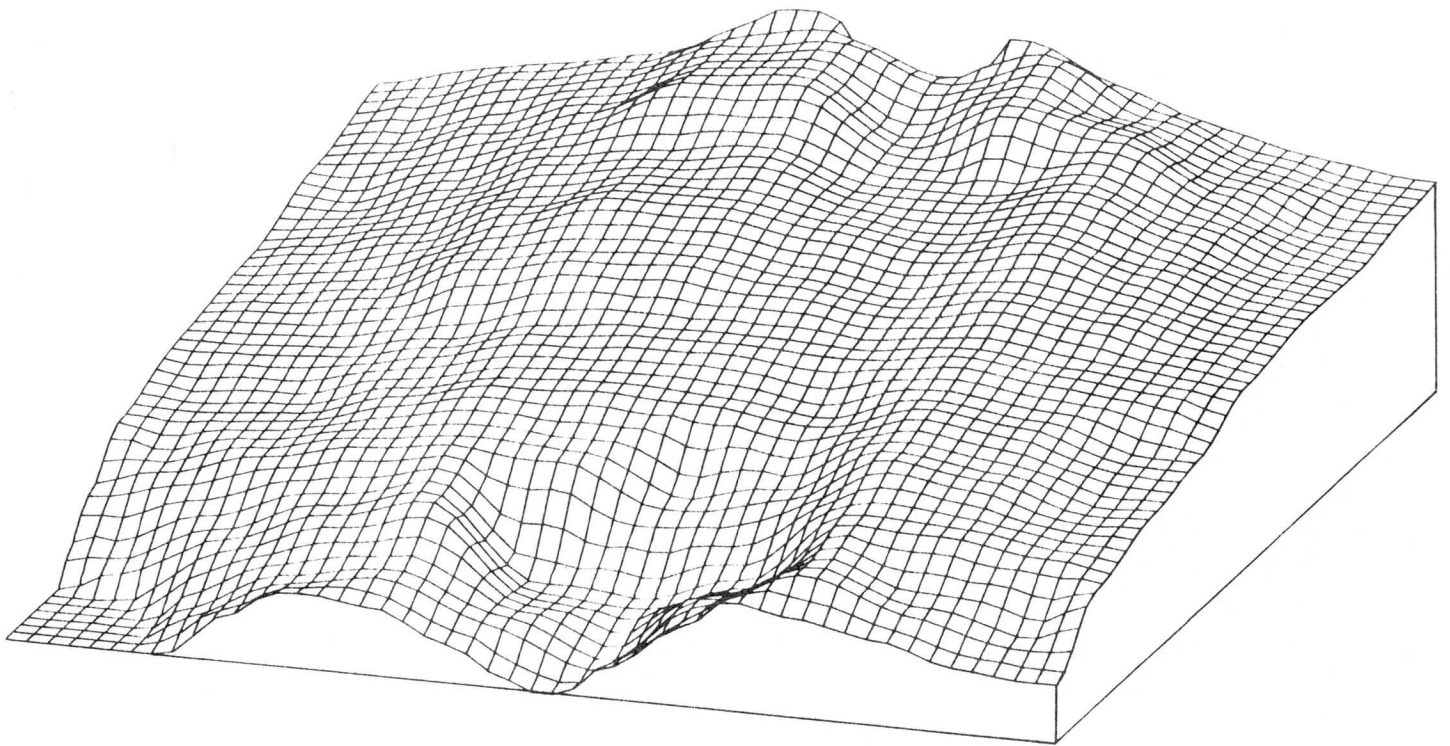


Bild 124 Endstadium des Versuchs 195. Andere Ansicht als in Bild 123.

## 10.6. Zusammenstellung aller durchgeführten Versuche

### 10.6.1. Hauptversuche

Die folgende Tabelle der 322 Hauptversuche gibt die nachstehenden Informationen:

- Nummer: ungerade Zahl = Ablagerung, gerade Zahl = anschliessende Spülung
- Ablagerungsplatz: - Form (Re = Rechteck, Bo = Birne, Stiel nach oben, Bu = Birne, Stiel nach unten)
  - Länge (L) in cm
  - Breite (B) in cm
- Absturzhöhe vom Zulaufgerinne auf den Beckenboden (A) in cm
- Gefälle des Zulaufgerinnes (I) in %
- Wasserstau: - Art (0 = nie Vollstau, 1 = Vollstau während 4 Min., 2 = Vollstau 9 Min., 3 = Vollstau 15 Min.)
  - Höhe des Vollstaus in cm
- Wasser und Geschiebe (Q+G): Beschickung konstant (k) oder als Ganglinie (Gl)
- Geschiebe: -  $G_t$  = beschickte Geschiebefracht in l  
 -  $G_{sp}$  = ausgespülte Geschiebefracht in l

Nummer	Ablagerungsplatz				Wasserstau		Q+G	$G_t$	$G_{sp}$	
	Form	L	B	A	I	Höhe				
001/002	Re	150	100	30	20	-	-	k	60	-
003/004	Re	150	100	30	18	-	-	k	260	10
005/006	Re	150	100	30	18	-	-	k	200	2
007/008	Re	150	100	30	18	-	-	k	290	11
009/010	Re	150	50	30	18	-	-	k	130	24
011/012	Re	150	50	30	18	-	-	k	120	10
013/014	Re	150	50	30	18	-	-	k	130	9
015/016	Re	150	50	30	18	voll	30	k	65	6
017/018	Re	150	50	30	18	voll	30	k	65	2
019/020	Re	150	50	30	18	voll	15	k	105	4
021/022	Re	150	50	30	18	voll	15	k	105	5
023/024	Re	150	100	30	18	voll	15	k	182	2
025/026	Re	150	100	30	18	voll	30	k	70	-
027/028	Re	150	100	30	18	voll	30	k	67	-
029/030	Re	150	100	30	18	voll	15	k	235	2
031/032	Re	150	100	30	18	voll	15	k	220	2
033/034	Re	150	100	30	10	-	-	k	260	10
035/036	Re	150	100	30	10	-	-	k	298	31
037/038	Re	150	100	30	10	voll	15	k	210	10
039/040	Re	150	100	30	10	voll	15	k	228	2
041/042	Re	150	50	30	10	voll	15	k	126	31
043/044	Re	150	50	30	10	voll	15	k	150	45
045/046	Re	150	50	30	10	-	-	k	192	139
047/048	Re	150	50	30	10	-	-	k	211	41



Nummer	Form	L	B	A	I	Art	Höhe	Q+G	G <sub>t</sub>	G <sub>sp</sub>
049/050	Re	150	50	30	10	-	-	k	180	42
051/052	Re	150	50	30	10	-	-	k	162	46
053/054	Re	150	50	30	10	-	-	k	140	52
055/056	Re	150	100	20	18	-	-	k	110	-
057/058	Re	150	100	20	18	-	-	k	110	1
059/060	Re	150	100	20	18	-	-	k	99	-
061/062	Re	150	100	20	18	-	-	k	100	-
063/064	Re	150	100	20	18	voll	20	k	33	-
065/066	Re	150	100	20	18	voll	20	k	30	-
067/068	Re	150	100	20	18	voll	10	k	80	-
069/070	Re	150	100	20	18	voll	10	k	81	-
071/072	Re	150	100	20	18	-	-	k	106	-
073/074	Re	150	100	20	10	-	-	k	90	-
075/076	Re	150	100	20	10	-	-	k	106	1
077/078	Re	150	100	20	10	voll	20	k	34	1
079/080	Re	150	100	20	10	voll	20	k	29	-
081/082	Re	150	100	20	10	voll	10	k	106	-
083/084	Re	150	100	20	10	voll	10	k	90	-
085/086	Re	150	50	20	10	-	-	k	47	3
087/088	Re	150	50	20	10	voll	10	k	50	3
089/090	Re	150	50	20	10	voll	20	k	28	-
091/092	Re	150	50	20	5	voll	20	k	24	-
093/094	Re	150	50	20	5	voll	10	k	51	-
095/096	Re	150	50	20	5	-	-	k	58	1
097/098	Re	150	100	20	5	voll	20	k	31	-
099/100	Re	150	100	20	5	-	-	k	124	2
101/102	Re	150	100	10	10	-	-	k	26	-
103/104	Re	150	100	10	10	-	-	k	32	-
105/106	Re	150	100	10	10	voll	10	k	12	-
107/108	Re	150	100	10	10	voll	10	k	9	-
109/110	Re	150	50	10	10	-	-	k	23	1
111/112	Re	150	50	10	10	voll	10	k	10	-
113/114	Re	150	100	10	18	-	-	k	25	-
115/116	Re	150	100	10	18	-	-	k	22	-
117/118	Re	150	100	10	18	-	-	k	22	-
119/120	Re	150	100	10	18	-	-	k	23	-
121/122	Re	150	100	10	18	voll	10	k	10	-
123/124	Re	150	100	10	18	voll	10	k	11	-
125/126	Re	150	100	10	18	voll	10	k	11	-
127/128	Re	150	100	10	18	-	-	k	49	-
129/130	Re	150	100	10	18	-	-	k	43	-
131/132	Re	150	100	10	18	-	-	k	50	-
133/134	Re	150	100	10	18	voll	10	k	37	-
135/136	Re	150	100	10	18	voll	10	k	34	-
137/138	Re	150	100	10	18	voll	10	k	42	-
139/140	Re	150	40	10	18	voll	10	k	27	1
141/142	Re	150	40	10	18	voll	10	k	26	-
143/144	Re	150	40	10	18	-	-	k	35	1
145/146	Re	150	40	10	18	-	-	k	29	2
147/148	Re	150	40	10	29	-	-	k	31	-
149/150	Re	150	40	10	29	-	-	k	26	1
151/152	Re	150	40	10	29	voll	10	k	23	-
153/154	Re	150	40	10	29	voll	10	k	22	1

Nummer	Form	L	B	A	I	Art	Höhe	Q+G	G <sub>t</sub>	G <sub>sp</sub>
155/156	Re	150	100	10	29	-	-	k	52	-
157/158	Re	150	100	10	29	-	-	k	46	-
159/160	Re	150	100	10	29	-	-	k	39	-
161/162	Re	150	100	10	29	voll	10	k	36	-
163/164	Re	150	100	10	29	voll	10	k	34	-
165/166	Re	150	100	10	10	-	-	k	51	-
167/168	Re	150	100	10	10	-	-	k	60	-
169/170	Re	150	100	10	10	voll	10	k	38	-
171/172	Re	150	100	10	10	voll	10	k	29	-
173/174	Re	150	40	10	10	voll	10	k	29	-
175/176	Re	150	40	10	10	voll	10	k	32	-
177/178	Re	150	40	10	10	-	-	k	31	-
179/180	Re	150	40	10	10	-	-	k	31	-
181 /186	Vorversuche zu den Ganglinien									
187/188	Re	100	100	25	18	1	13	G1	147	18
189/190	Re	100	100	25	18	2	13	G1	144	22
191/192	Re	100	100	25	18	3	13	G1	155	3
193/194	Re	100	100	25	18	2	13	G1	125	72
195/196	Re	100	100	25	18	3	13	G1	167	70
197 /204	Vorversuche zu den Stauverhältnissen									
205/206	Re	100	100	25	18	3	14	G1	170	61
207/208	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	66
209/210	Re	100	100	26	18	1	14	G1	170	51
211/212	Re	100	100	25	18	0	-	G1	170	63
213/214	Re	50	100	25	18	2	14	G1	170	132
215/216	Re	50	100	25	18	2	14	G1	170	167
217/218	Re	50	100	25	18	2	14	G1	170	169
219/220	Re	50	100	25	18	2	14	G1	170	173
221/222	Re	50	100	25	18	2	14	G1	170	172
223/224	Re	50	100	25	18	2	14	G1	170	177
225/226	Re	50	100	25	18	3	14	G1	170	146
227/228	Re	50	100	25	18	1	14	G1	170	144
229/230	Re	50	100	25	18	0	-	G1	170	163
231/232	Re	150	100	25	18	2	14	G1	170	9
233/234	Re	150	100	25	18	2	14	G1	170	112
235/236	Re	150	100	25	18	2	14	G1	170	168
237/238	Re	150	100	25	18	2	14	G1	170	164
239/240	Re	150	100	25	18	2	14	G1	170	155
241/242	Re	150	100	25	18	2	14	G1	170	171
243/244	Re	150	100	25	18	3	14	G1	170	-
245/246	Re	150	100	25	18	1	14	G1	170	6
247/248	Re	150	100	25	18	0	-	G1	170	31
249/250	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	59
251/252	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	151
253/254	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	188
255/256	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	177
257/258	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	173
259/260	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	163
261/262	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	57
263/264	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	48

Nummer	Form	L	B	A	I	Art	Höhe	Q+G	G <sub>t</sub>	G <sub>sp</sub>
265/266	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	59
267/268	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	45
269/270	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	52
271/272	Re	100	100	25	18	2	14	G1	115	23
273/274	Re	100	100	25	18	0	-	G1	115	38
275/276	Re	100	100	25	18	1	14	G1	170	58
277/278	Re	100	100	25	18	0	-	G1	170	76
279/280	Re	100	100	25	18	2	14	G1	170	65
281/282	Re	100	100	25	18	2	11	G1	170	32
283/284	Re	100	100	25	18	2	6	G1	170	18
285/286	Re	100	100	25	18	2	11	G1	85	-
287/288	Re	100	100	25	18	1	14	G1	170	65
289/290	Re	100	100	-	18	2	14	G1	170	100
291/292	Re	100	100	-	18	0	-	G1	170	109
293/294	Re	50	100	-	18	0	-	G1	170	157
295/296	Re	50	100	-	18	2	14	G1	170	149
297/298	Re	150	100	-	18	2	14	G1	170	-
299/300	Re	150	100	-	18	0	-	G1	170	-
301/302	Bu	150	100	-	18	0	-	G1	170	79
303/304	Bu	150	100	-	18	2	14	G1	170	6
305/306	Bu*	150	100	-	18	2	14	G1	170	39
307/308	Bo	150	100	-	18	2	14	G1	170	52
309/310	Bo	150	100	-	18	0	-	G1	170	66
311/312	Bo	150	100	25	18	0	-	G1	170	69
313/314	Bo	150	100	25	18	2	14	G1	170	37
315/316	Bu	150	100	25	18	2	14	G1	170	14
317/318	Bu*	150	100	25	18	2	14	G1	170	38
319/320	Bu	150	100	25	18	2	14	G1	170	48
321/322	Bu	150	100	25	18	0	-	G1	170	48

\* = Umfassungsdämme bis genau zur Sperrenöffnung hin gezogen.

### 10.6.2. Sperrenöffnungen

Es geht um die horizontalen und vertikalen Sperrenöffnungen, d.h. um die Verlandungszeiten hinter diesen Oeffnungen. Die Tabelle enthält:

- Nummer des Versuchs: - ungerade Nummer = vertikale Stäbe  
- gerade Nummer = horizontale Stäbe
- Abfluss Q in l/s
- Geschiebetrieb G in l/s
- Gefälle des Gerinnes I in %
- Stababstand in mm
- Zeit der Verlandung bis auf eine Höhe von 10 cm in Min.: s für
  - vertikale Stäbe (T<sub>vert</sub>)
  - horizontale Stäbe (T<sub>hori</sub>).

Nummer	Q	G	I	Abst.	T <sub>vert</sub>	T <sub>hori</sub>
401/402	2	0,03	11	13	Testlauf	I
403/404	2	0,03	11	13	Testlauf	II
405/406	1	0,03	16	9	2 : 10	2 : 20
407/408	1	0,1	16	9	1 : 15	1 : 20
409/410	1	0,1	16	21	3 : 40	∞
411/412	1	0,1	16	17	2 : 00	5 : 50
413/414	1	0,1	16	13	1 : 30	1 : 50
415/416	1	0,03	16	13	3 : 40	4 : 20
417/418	1	0,03	16	5	2 : 40	2 : 50
419/420	1	0,1	16	5	1 : 10	1 : 15
421/422	0,5	0,03	16	13	4 : 50	6 : 30
423/424	1	0,03	22	13	2 : 15	2 : 50
425/426	2	0,03	16	13	2 : 50	3 : 35
427/428	1	0,1	16	25	10 : 00	∞
429/430	1	0,1	16	29	∞	∞
431/432	1	0,03	16	9	2 : 40	3 : 00
433/434	1	0,03	16	5	2 : 30	2 : 50
435/436	1	0,03	16	17	6 : 30	20 : 20
437/438	1	0,03	13	13	4 : 10	5 : 00
439/440	1	0,03	19	13	2 : 50	3 : 55
441/442	1	0,03	11	13	4 : 40	5 : 50

### 10.6.3. Treibholz

Die vor allem qualitativen Versuche betrafen folgende Aspekte:

- 501 - 512 Holztransport im Ablagerungsplatz
- 513 - 525 Verklausungen an Rechen und Balken
- 526 - 534 Vergleich Schrägrechen - Vertikalrechen
- 535 - 542 Probleme rund um den Holzteppich
- 543 - 557 Holztrift über die Rückhaltesperre

## 10.7. Literatur

- Aulitzky H. Der Enterbach am 26. Juli 1969. WB&LV, Heft 1 1970, pp. 31 - 67.
- ASCE (Editor: V. Vanoni) Sedimentation Engineering. ASCE Headquarters, New York, 1975, 700 p.
- Baumann P. The Function and Design of Check Dams. ASCE, Civil Engineering, Vol. 6, No. 6, 1936, pp. 355 - 358.
- Benini G. Caratteri generali delle opere idrauliche necessarie per la correzione dei torrenti. Atti delle giornate di studio di idraulica, Udine: Nuovi criteri di progettazione e nuove opere di sistemazioni dei torrenti. 1972, pp. 33 - 35.
- Bergthaler J. Besichtigung des Litzbaches, Rasafeibaches und Gampadellsbaches. WB&LV, Sonderheft Dezember 1974, pp. 18 - 26.
- Bergthaler J. Hochwasseranalyse und Hochwasserprognose bei Wildbächen. Symposium Interpraevent 1975 der FVHB, Bd. 1, pp. 191 - 206.
- Bericht des zivilen kantonalen Führungsstabes des Kantons Uri über die Hilfeleistungen anlässlich der Unwetterkatastrophe vom 31.7./1.8. 1977, Altdorf, 1979, 200 p.
- Brown C. Discussion of "Sedimentation in Reservoirs" by B. Witzig. Proceedings of ASCE, Vol. 69, No. 6 1943, pp. 793 - 815 and pp. 1493 - 1499.
- Brune G. Trap Efficiency of Reservoirs. Transactions of the American Geophysical Union, Vol. 34, No. 3 1953, pp. 407 - 418.
- Bull W. Geomorphology of Segmented Alluvial Fans in Western Fresno County, California. Geological Survey, Professional Paper 352-E, USA 1964, pp. 89 - 128.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Hochwasser, Muren, Lawinen. Heft 2 der Schriftenreihe Wasserwirtschaft, Wien 1973, 272 p.
- Chang H. Fluvial Hydraulics and Alluvial Fans. ASCE, Vol. 108, No. HY 11 1982, pp. 1282 - 1295.
- Cola R. Criteri di progettazione esecutiva delle opere idrauliche del torrente Pesarina. Atti delle giornate di studio di idraulica, Udine: Nuovi criteri di progettazione e nuove opere di sistemazioni dei torrenti. 1972, pp. 48 - 55.
- Deutsche Norm DIN 19 663, Wildbachverbauung (Begriffe, Planung und Bau), Entwurf, März 1983, 27 p.
- Dhillon G. Assessment and Control of Siltation in Small Reservoirs on Mountain Torrents. Proceedings of the Symposium on Silting of Reservoirs, Central Board of Irrigation and Power, New Delhi, publication No. 126, 1977, pp. 77 - 88.
- Popli D.
- Dragogna G. Trasporto di masse e briglie selettive. Symposium Interpraevent 1975 der FVHB, Bd. 1, pp. 75 - 89.
- Dragosits F. Sommerstudienreise 1981, Schladming, Besichtigung Mörsbach. WB&LV, Sonderheft Dezember 1981, pp. 22 - 25.

- Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Wasserwirtschaft Hochwasserschutz an Fliessgewässern - Wegleitung 1982. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale Bern, 77 p.
- Fattorelli S. Un nouveau type de barrage à contreforts. FAO/UNO, groupe de travail sur l'aménagement des bassins versants de montagne, FO:CEF/BM/72/3.1.2., 1972, 12 p.
- Fattorelli S. Tipi di briglie in cemento armato e loro progettazione. Ministero dell'agricoltura e delle foreste, Padova. Opere per la correzione dei torrenti - Moderne tecniche costruttive e nuovi procedimenti di calcolo, 1972, pp. 147 - 170.
- Fattorelli S. Untersuchungen an Wildbachsperrren aus Stahlbeton. Mitt. der forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, Heft 102, 1973, pp.63 - 90.
- Fiebiger G. Mündliche Mitteilung 1983.
- Fiebiger G. Typen, Funktion, Bezeichnung und Statik der kronenoffenen Sperrren. Erscheint 1984 im Rahmen des Jubiläums "100 Jahre Wildbachverbauung in Oesterreich".
- Fischer K. Murkegel, Schwemmkegel und Kegelsimse in den Alpentälern. Mitt. der Geographischen Gesellschaft München, Bd. I 1976, pp. 127 - 159.
- Food and Agriculture Organisation of the United Nations Torrent Control Terminology. FAO-Conservation Guide No. 6, 1981, 156 p.
- Fux C. Verlandung und Spülung des Ausgleichsbeckens Mattsand. Mitt. der VAW/ETH No. 53 (Verlandung von Flusstauhaltungen), 1981, pp. 175 - 182.
- Grubinger H. Die Verhütung von Unwetterkatastrophen, Berichte zur Raumforschung und Raumplanung Nr. 6, Wien 1971.
- Grubinger H. Der Schutz alpiner Lebensräume, Oesterreichische Wasserwirtschaft, Nr. 3/4 1976, pp. 41 - 46.
- Grubinger H. Die Naturraum-Analyse als eine der Grundlagen vorbeugender Massnahmen, Symposium Interpraevent 1980 der FVHB, Bd. 4, pp. 19 - 25.
- Gschwendtner A. Entleerungssperre Anlaufbach, Schlitzsperre Aisdorferbach. WB&LV, Sonderheft Dezember 1970, pp. 4 - 8.
- Haiden A. Bauerfahrungen über die Wildbachverbauung im Mittelpinzgau. Wasserwirtschaft und Technik, Hefte 1 - 4 und 7, 1935, 16 p.
- Hampel R. Geschiebeablagerung in Wildbächen dargestellt in Modellversuchen. WB&LV, Hefte 1 und 2, 1968, 100 p.
- Hampel R. Grundlagen der Wildbachverbauung. WB&LV, Heft 2, 1970, pp. 69 - 139.
- Hampel R. Ein Beitrag zur Planung von Ablagerungsplätzen. WB&LV, Heft 2 1972, pp. 63 - 87.
- Hampel R. Die Wirkungsweise von Wildbachsperrren. WB&LV, Heft 1 1974, pp. 2 - 79.
- Hampel R. Die Wirkungsweise von Wildbachsperrren. Oesterr. Wasserwirtschaft, Heft 11/12 1974, pp. 265 - 273.

- Härtel O. Wildbach- und Lawinenverbauung. Verlag Carl Gerold's Sohn, Wien und Leipzig 1934, 316 p.
- Hoffmann L. Geschiebestausperren mit selbsttätiger Entleerung von Feingeschiebe. Fachl. Vereinszeitschrift der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Oesterreichs, Heft 6 1956, pp. 49 - 60.
- Hoffmann L. Die Hochwasserdurchflussmenge bei Balkensperren. WB&LV, Heft 1 1976, pp. 59 - 63.
- Huber A. Modellversuche zur Spülung von Auflandungen des Ausgleichsbeckens Rempfen. Mitt. der VAW/ETH No. 53 (Verlandung von Flusstauhaltungen), 1981, pp. 165 - 174.
- Jäggi M. Anwendung der Photogrammetrie bei hydraulischen Modellversuchen. Mitt. der VAW/ETH No. 16, 1975, 95 p.
- Jäggi M. Alternierende Kiesbänke. Mitt. der VAW/ETH No. 62 1983, 286 p.
- Jäggi M. Bestimmung der Feststofftransportkapazität in Steilgerinnen, Symposium Interpraevent 1984, im Druck, 10 p.
- Karn R. Reclamation of Open-Pit Quarries for Multiple Uses. ASCE, Journal of the Urban Planning and Development Division, July 1977, pp. 127 - 135.
- Kettl. W. Sortierwerke im Pongau: Theorien, Erfahrungen. WB&LV, Heft 2 1973, pp. 15 - 23.
- Kettl W. Briefliche und mündliche Mitteilung vom 22.9.1983.
- Kobus H. Wasserbauliches Versuchswesen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft, Mitteilungsheft Nr. 4, 1978, 360 p.
- Koller E. Die Holztrift im Salzkammergut. Verlag des Amtes der oberösterreichischen Landesregierung, Linz 1954, 101 p.
- Kollmann F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer-Verlag, Bd. I, 1951, 476 p.
- Kotoulas D. Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands: Vergleichsstudium der Verbauungsprinzipien (2. Teil). Mitt. No. 31 der Versuchsanstalt für Wasserbau der Techn. Universität München, Oskar v. Miller Institut, 1975, 152 p.
- Kretschmer F. Bedeutende Wildbachverbauungen in Oberösterreich. Amt der oberösterreichischen Landesregierung: "Hochwasserabwehr Oberösterreich", 1980, pp. 169 - 176.
- Kronfellner-Kraus G. Wildholz- und Grobgeschiebefänger in Wildbächen. Informationsdienst der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 128. Folge, 1970, 1 p.
- Kronfellner-Kraus G. Ueber offene Wildbachsperren. Mitt. No. 88 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1970, pp. 8 - 76.
- Kronfellner-Kraus G. Ueber einige aktuelle Untersuchungen auf dem Gebiet der Wildbach- und Lawinenverbauung. Symposium Interpraevent 1971 der FVHB, Bd. 3, pp. 419 - 430.
- Kronfellner-Kraus G. Neue Bauweisen in der Wildbach- und Lawinenverbauung in internationaler Sicht. Centralblatt für das gesamte Forstwesen, Heft 1 1972, pp. 33 - 57.

- Kronfellner-Kraus G. Aktuelle Wildbachsperrprobleme. Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 13 - 61.
- Kronfellner-Kraus G. Einige Entwicklungen von offenen oder vorgefertigten Wildbachsperrprobleme. Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 373 - 385.
- Kronfellner-Kraus G. Zur Geschiebebilanzierung. Symposium Interpraevent 1975 der FVHB, Bd. 1, pp. 49 - 61.
- Kronfellner-Kraus G. Quantitative Aspekte der Wildbacherosion aus der Sicht der jüngsten Katastrophenereignisse. Mitt. No. 115 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1976, pp. 71 - 83.
- Kronfellner-Kraus G. Ueber den Geschiebe- und Feststofftransport in Wildbächen. Oesterr. Wasserwirtschaft, Heft 1/2 1982, pp. 12 - 21.
- Krumdieck A.  
Chamot P. Spülungen von Sedimenten in kleinen und mittleren Speicherbecken. Mitt. der VAW/ETH No. 53 (Verlandung von Flusstauhaltungen), 1981, pp. 257 - 270.
- Kucera J. Persönliche Mitteilung, 26.6.1982.
- Leys E. Schlitzdolen und Eisenrechen bei geraden Auslaufsperrprobleme von Geschiebeablagerungsbecken. WB&LV, Heft 23 1965, pp. 57 - 65.
- Leys E. Beispiele für Wildholzfänge bei Sperrdolen und bei Abflusssektionen. WB&LV, Heft 23 1965, pp. 45 - 48.
- Leys E. Allgemeines über Schlitz-, Rechen- und Balkensperrprobleme in der Wildbachverbauung. Allg. Forstzeitung, Folge 4 1968, pp.80 - 81.
- Leys E.  
Riccabona B. Vorschlag für die Einreihung der Entleerungssperrprobleme in ein Namensschema. WB&LV, Sonderheft Dezember 1970, pp. 41 - 46.
- Leys E.  
Riccabona B. Entleerungsbauten im Geschiebesperrproblemebau. WB&LV, Sonderheft Dezember 1970, pp. 37 - 40.
- Leys E. Die Bedeutung der grossdoligen und der kronenoffenen Bauweise in der Wildbachverbauung zur Vorbeugung von Hochwasser- und Murschäden. Symposium Interpraevent 1971 der FVHB, Bd. 3, pp. 441 - 449.
- Leys E. Vorschlag für die Systemeinteilung der Quer- und Längsbauten in der Wildbachverbauung. WB/LV Heft 1 1973, pp. 43 - 60.
- Leys E. Das Geschiebe und das Wildholz als Bemessungswert für die Oeffnungsweite bei den Entleerungsbauwerken in der Wildbachverbauung. Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 317 - 334.
- Leys E. Die technischen und wirtschaftlichen Grundlagen in der Wildbachverbauung der grossdoligen und kronenoffenen Bauweise. Diss. der Universität für Bodenkultur Wien, 1976, 180 p.
- Leys E. Wasserrückhaltung im Bereich der Wildbachverbauung. 18. Kulturbautagung, Innsbruck 1975, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien 1976, pp. 57 - 66.
- Leys E. Grenzen der "Machbarkeit" in Gebirgslandschaften - Darstellung für den Bereich der Wildbachverbauung. Symposium Interpraevent 1980 der FVHB, Bd. 2, pp. 268 - 275.



- Li R.  
Simons D.  
Ward T.  
Orvis C. Hydraulic Model Study of Flow Control Structures. Department of Civil Engineering, Engineering Research Center of the Colorado State University, Fort Collins, 1979, 129 p.
- Markwalder R.  
Chervet A. Die Bewirtschaftung des Emmekiesfanges beim Kraftwerk Flumenthal. Mitt. der VAW/ETH No. 53 (Verlandung von Flusstauhaltungen) 1981, pp. 223 - 232.
- Martini O. Die Hochwasserkatastrophe 1978 am Ausgleichsbecken Palagnedra. Mitt. der VAW/ETH No. 53 (Verlandung von Flusstauhaltungen) 1981, pp. 233 - 239.
- Mertens W. Strömungsverhältnisse in Flusssandfängen (Vortragsmanuskript). 2. Fortbildungslehrgang für technische Hydraulik und Sedimenttransport in offenen Gerinnen, München 1981, 18 p.
- Morawetz S. Beobachtungen an Schutthalden, Schuttkegeln und Schuttflecken. Zeitschrift für Geomorphologie, Bd. VII, 1932/33, pp. 25 - 43.
- Morawetz S. Schwemmkegelstudien. Petermanns Geographische Mitteilungen, Heft 3 1942, pp. 84 - 91.
- Morf M. Verlandungs- und Räumungsprobleme im Stauraum des Kraftwerkes Eglisau. Mitt. der VAW/ETH No. 53, 1981, pp. 81 - 88.
- Moore C.  
Wood W.  
Renfro G. Trap Efficiency of Reservoirs, Debris Basins and Debris Dams. ASCE, Journal of the Hydraulic Division, 1962, pp. 58 - 87.
- Puglisi S. Nuove opere per la correzione dei torrenti. Atti delle giornate di studio di idraulica, Udine: Nuovi criteri di progettazione e nuove opere di sistemazione dei torrenti, 1972, pp. 37 - 40.
- Puglisi S. Rapporto sulla prefabbricazione delle opere per la correzione dei torrenti. Ministero dell'agricoltura e delle foreste, Padova: Opere per la correzione dei torrenti, moderne tecniche costruttive e nuovi procedimenti di calcolo, 1972, pp. 25 - 60.
- Puglisi S. Briglie aperte e prefabbricate. Ministero dell'agricoltura e delle foreste, Padova: Opere per la correzione dei torrenti, moderne tecniche costruttive e nuovi procedimenti di calcolo, 1972, pp. 133 - 145.
- Puglisi S. Barrages à claire-voie et préfabriqués. Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 253 - 271.
- Rechten A. Fluidik. Springer Verlag Berlin, Heidelberg und New York, 1976, 224 p.
- Rüedin B. Programme zur dreidimensionalen Darstellung von digitalen Geländemodellen. Ausführung 1983 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ.
- Schaffernak F. Flussmorphologie und Flussbau. Springer Verlag, Wien, 1950, 115 p.
- Scheidegger A. Theoretical Geomorphology. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1970, 435 p.
- Schilcher C. Rutschung Bärenalpe und Schlitzsperre in der Litz, Gemeinde Silbertal, Bezirk Bludenz. Excursionsführer, 1971, 6 p.

- Schilcher C.      Erfahrungsbericht über die Schlitzsperre im Litzbach in der Gemeinde Silbertal. Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 293 - 305.
- Schmid W.        Die allgemeine dreidimensionale Kolkentwicklung unter besonderer Berücksichtigung des Geschiebetriebes und der Zeit. Diss. No. 4859 der ETHZ, 1972, 224 p.
- Schnell N.        Durchströmung und Ablagerungsvorgänge in Geschieberückhaltebecken. Diplomarbeit am Leichtweissinstitut der Universität Braunschweig, 1977, 95 p.
- Schöberl F.       Die Erfassung des zeitlichen Abbaus von Verlandungskörpern während Staauraumpülungen. Mitt. der VAW/ETH No. 53 (Verlandung von Flusstauhaltungen), 1981, pp. 57 - 65.
- Schoklitsch A.    Handbuch des Wasserbaus. Springer Verlag, Wien, 1962, 2 Bände, 1072 p.
- Schulthess D.    Hochwasserentlastung der Staumauer Palagnedra. Bericht No. 397 der VAW/ETH 1979, 103 p.
- Schumm S.        The Fluvial System. John Wiley & Sons, New York, 1977, 338 p.
- Schwab P.        Mündliche Mitteilung vom 29.11.1983.
- Sommer N.        Langjährige Hochwasser- und Geschiebebeobachtungen im Einflussbereich des Achenseekraftwerkes. Symposium Interpraevent 1975 der FVHB, Bd. 1, pp. 207 - 222.
- Sommer N.        Untersuchungen über die Geschiebe- und Schwebstoffführung in Gebirgsbächen. Symposium Interpraevent 1980 der FVHB, Bd. 2, pp. 69 - 94.
- Sperlich R.      Einfangwerke bei Geschiebestausperren. Oesterr. Wasserwirtschaft, Heft 7 1952, pp. 163 - 166.
- Stauder S.        Balkensperren im Zillertal - Eine neue Verbauungstypen der Wildbachverbauung. WB&LV, Heft 1 1972, pp. 1 - 45.
- Stauder S.        Verschiedene Konstruktionen von Balkensperren. Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1972, pp. 307 - 316.
- Stiny J.         Die Muren. Verlag der Wagner'schen Universitätsbuchhandlung Innsbruck, 1910, 140 p.
- Stiny J.         Versuche über Schwemmkegelbildung. Geologische Rundschau, Bd. VIII 1917, pp. 189 - 196.
- Streiff S. et al.        25 Jahre Durnagelkatastrophe. Neujahrsbote für das Glarner Hinterland, 1969/70, 36 p.
- Strele G.        Geologie und Wildbachverbauung. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Heft 7 1942, pp. 145 - 156.
- Strele G.        Grundriss der Wildbach- und Lawinenverbauung. Springer-Verlag Wien, 1950, 340 p.
- Tschada H.      Beobachtungen über die Geschiebefracht von Hochgebirgsbächen. Symposium Interpraevent 1975 der FVHB, Bd. 1, pp 109 - 126.
- Trucco G.        Sanierungsarbeiten der Staumauer Palagnedra nach dem Hochwasser 1978. Mitt. der VAW/ETH No. 53 (Verlandung von Flusstauhaltungen), 1981, pp. 241 - 247.

- Üblagger G. Retendieren, dosieren und sortieren. Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 335 - 372.
- Uhden O. Taschenbuch Landwirtschaftlicher Wasserbau. Franckh'sche Verlagshandlung Stuttgart, 1964, 658 p.
- Taus K. Kiesfang an der Emme beim Kraftwerk Flumenthal: Modellversuche und Betriebserfahrungen. Bericht I 47 der VAW/ETH, 1980, 13 p.
- Vischer D. Hochwasserkatastrophen - Hochwasserschutz. Jahresbericht 1978 der VAW/ETH, 1979, pp. 7 - 18.
- Wakabayshi R. Wildbach- und Lawinenverbauung in Japan. WB&LV, Heft 2 1972, pp. 125 - 131.
- Wang F. Grundriss der Wildbachverbauung. Verlag S. Hirzel, Leipzig, Band I, 1901, 209 p., Band II, 1903, 480 p.
- Weber A. Die Zwischenakkumulation von Wildbachgeschiebe in Ablagerungsplätzen. Centralblatt für das gesamte Forstwesen, Wien, 1967, pp. 383 - 399.
- Willi W. Zur Frage der Sohlenerosion bei grossen Gefällen. Bericht No. 68 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau der ETHZ, 1965, 129 p.
- Winsor L. The Barrier System of Flood Control. ASCE, Civil Engineering, Vol. 8 No. 10, 1938, pp. 675 - 678.
- Wühl A. Die Wildbäche und Lawinen Oberösterreichs. Amt der oberösterr. Landesregierung: Hochwasserabwehr Oberösterreich, 1980, pp. 157 - 168.
- Yalin M. Theory of Hydraulic Models. Mac Millan London, 1972, 366 p.
- Zeller J. Die Entleerung verlandeter Geschieberückhalteräume (Diskussionsbeitrag). Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 389 - 397.
- Zeller J. Die Wirkung von Dolen (Diskussionsbeitrag). Mitt. No. 102 der Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, 1973, pp. 121 - 126.
- Zeller J. Mündliche Mitteilungen vom 27.2.1983.
- Zemljik M. Calcul du débit solide. Symposion Interpraevent 1971 der FVHB, Bd. 2, pp. 359 - 371.
- Zollinger F. Die Ausscheidung von Gefahrenzonen. DISP No. 42 des ORL-Institutes der ETH Zürich, 1976, pp. 27 - 38.
- Zollinger F. The Sapt Kosi: Unsolved Problems of Flood Control in the Nepalese Terai. Schlussbericht FAO UNDP, Kathmandu 1980, 85 p.
- Zollinger F. Geschieberückhaltebecken Schächen - Bericht über die Modellversuche. Bericht No. 772 der VAW/ETH, 1981, 80 p.
- Zumofen G. CIP (Contour Interpolation Program), Programme zur Berechnung und Darstellung von Isolinien in digitalen Geländemodellen. Ausführung 1983 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ.

- ASCE = American Society for Civil Engineering
- FVHB = Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung  
Klagenfurt
- VAW = Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH  
Zürich
- WB&LV = Wildbach- und Lawinenverbauung, Zeitschrift des Vereins der  
Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Oesterreichs

Alle Filme und Photoplatten (Photogrammetrie) sind in der Photoabteilung der VAW archiviert.

L e b e n s l a u f

Name	Zollinger Fritz
geboren am	4. August 1949 in Basel
Heimatorte	Zürich und Küsnacht/ZH
1955 - 1961	Primarschule in Binningen/BL und Küsnacht/ZH
1961 - 1968	Realgymnasium in Zürich, Matur B
1969 - 1973	Studium an der Abt. VIII der ETH in Zürich Abschluss als Dipl. Kulturing. ETH
1974 - 1977	Unterrichts- und später Forschungsassistent am Institut für Kulturtechnik der ETH bei Prof. DDr. H. Grubinger
1978 - 1979	Einsatz als Experte für die FAO (UNDP) in Nepal
1979 - 1983	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kulturtechnik