



UMWELT-MATERIALIEN  
NR. 149

Umweltgefährdende Stoffe

Entwässerungs-  
verhalten und  
Schadstoffaustrag  
von Gleiskörpern



BUWAL Bundesamt für Umwelt,  
Wald und Landschaft



UMWELT-MATERIALIEN  
NR. 149

Umweltgefährdende Stoffe

Entwässerungs-  
verhalten und  
Schadstoffaustrag  
von Gleiskörpern

Untersuchungen über das Entwässerungs-  
verhalten und den Schadstoffaustrag von  
Gleiskörpern verschiedener Bauart

*Avec résumé en français*

Herausgegeben vom Bundesamt  
für Umwelt, Wald und Landschaft  
BUWAL  
Bern, 2002

**Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL

**Autor**

Dr. Hans Rudolf Keusen, GEOTEST AG

**Begleitende Arbeitsgruppe**

Bolliger Martin, Bundesamt für Verkehr

Brauchli Julia, Eidg. Forschungsanstalt für Obst- Wein- und Gartenbau,  
Wädenswil

Bregnard Georges, Bundesamt für Verkehr

Froidevaux Lucien, Bundesamt für Strassenbau

Fuhrer Emil, Regionalverkehr Mittelland, Burgdorf

Gut Daniel, Eidg. Forschungsanstalt für Obst- Wein- und Gartenbau,  
Wädenswil

Hartmann Daniel, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Kägi Bruno, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Karlaganis Georg, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Kuppelwieser Helmut, Baudirektion SBB

Mätzler Christian, Institut für angewandte Physik, Universität Bern

Pfarrer Heinz, Baudirektion SBB

Seiler Mathias, Baudirektion SBB

Stämpfli Urs, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

von Arx Roland, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Wüthrich Claude, Bundesamt für Gesundheit

**Bezugsquelle**

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Dokumentation

3003 Bern

Fax + 41 (0)31 324 02 16

E-Mail: docu@buwal.admin.ch

Internet: www.buwalshop.ch

**Bestellnummer**

UM-149-D

**Preis**

CHF 10.-- (inkl. MWSt)

© BUWAL 2002

---

Inhaltsverzeichnis	Seite
<b>Abstracts</b>	<b>5</b>
<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>9</b>
<b>Résumé</b>	<b>11</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2. Allgemeine Zielsetzungen</b>	<b>14</b>
<b>3. Aufbau der Versuchsstrecke</b>	<b>15</b>
3.1    Aufbau der Versuchsabschnitte	15
3.1.1    Baumaterialien	15
3.1.2    Entwässerung	16
3.2    Messeinrichtungen	16
3.2.1    Abflussmessung	16
3.2.2    Temperaturmessung im Gleiskörper	17
3.2.3    Klimadaten	17
<b>4. Durchgeführte Untersuchungen</b>	<b>18</b>
4.1    Meteorologische Untersuchungen	18
4.2    Hydrometrie	19
4.3    Umweltchemie	19
4.4    Temperaturverhalten des Gleisunterbaus	20
4.5    Geotechnik	20
<b>5. Resultate</b>	<b>21</b>
5.1    Die klimatischen Bedingungen während der Versuchsdauer	21
5.2    Das Entwässerungsverhalten der Gleiskörper	21
5.2.1    Allgemeines	21
5.2.2    Die Beregnungsversuche	22
5.2.3    Entwässerungsverhalten unter natürlichen Bedingungen	23
5.2.4    Eignungstests der Lysimeter für die Schadstoffbilanzierung (KBr-Tracerversuche)	26
5.2.5    KBr-Versuch "natürliche Bedingungen"	26
5.3    Umweltchemie	28
5.3.1    Baumaterialien	28
5.3.2    Analysen von Gleissickerwasser	28
5.4    Das Temperaturverhalten des Gleisunterbaus	31
<b>6. Folgerungen</b>	<b>32</b>
6.1    Allgemeine Charakterisierung der Gleisentwässerung	32
6.1.1    Abflussverhalten	32
6.1.2    Verdunstung	33
6.1.3    Langzeitverhalten im Bahnbetrieb	33
6.2    Chemismus der Sickerwässer	33
6.3    Dichtigkeit der Drainagen	34
<b>7. Empfehlungen für Neubaustrecken</b>	<b>35</b>
<b>8. Literatur</b>	<b>36</b>

<b>Anhangverzeichnis</b>	Seite
Anhang 1: SBB Versuchsstrecke Schüpfen Aufbau der Versuchsabschnitte	37
Anhang 2: Materialeigenschaften des verwendeten Kiessands und der Elektroofenschlacke	38
Anhang 3: Kenndaten der Planiematerialien	38
Anhang 4: Schematische Skizze Messschacht	38
Anhang 5: Durch die Drainagen entwässerte Flächen und Volumina	39
Anhang 6: Schematische Skizze Lysimeter	39
Anhang 7: Lageplan der Entwässerungssysteme	39
Anhang 8: Witterungskennzahlen der Untersuchungsperiode	40
Anhang 9: Ergebnis der Beregnungsversuche	41
Anhang 10: Abfluss im Abschnitt APlanum (Drainage) in Abhängigkeit der Niederschlags	42
Anhang 11: Abfluss im Abschnitt BPlanum (Drainage) in Abhängigkeit des Niederschlags	42
Anhang 12: Lysimeter: Niederschlagshöhen und Abfluss im Vergleich	43
Anhang 13: Eluattest mit Kiessand und Elektroofenschlacke	44
Anhang 14: Metallgehalte in Kiessand und Elektroofenschlacke	44
Anhang 15: Pflanzennährstoffe und Chlorid im Drainagewasser	45
Anhang 16: Schwermetallgehalte im Drainagewasser	46
Anhang 17: Allgemeine Belastungsparameter und Schadstoffe im Drainagewasser	47
Anhang 18: Ganglinien der Gleiskörper-Temperaturen in den Abschnitten A, D und E der Wintermonate 1996 / 1997	48

## Abstracts

On the experimental stretch Schüpfen (Bern to Biel railway line, Canton Bern) of the Swiss Federal Railways various types of track substructure were investigated for drainage behaviour, dispersal of pollutants and reaction to temperature.

The types of substructure varied significantly in runoff behaviour, where a marked increase in runoff coefficients during the first two years of operation were noted. The dispersal of pollutants through the seepage water decreases with increasing water level for all types of track substructure. The concentrations of pollutant measured satisfy the requirements of the Swiss Ordinance on the Protection of Waters of 1998.

Behaviour towards frost is variable; a gravel-sand mixture as substructure demonstrates the best qualities.

Auf der Versuchsstrecke Schüpfen (Bahnlinie Bern-Biel, Kanton Bern) der Schweizerischen Bundesbahnen SBB wurden verschiedene Gleisunterbautypen in Bezug auf das Entwässerungsverhalten, den Schadstoffaustrag und das Temperaturverhalten untersucht.

Die Unterbautypen unterscheiden sich deutlich im Abflussverhalten, wobei eine markante Zunahme der Abflusskoeffizienten während der ersten zwei Betriebsjahre festgestellt wurde. Der Schadstoffaustrag durch das Sickerwasser nimmt mit zunehmendem Wasserwert für alle Gleisunterbauten ab. Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen erfüllen die Anforderungen der Schweizerischen Gewässerschutzverordnung von 1998.

Das Verhalten gegenüber Frost ist unterschiedlich, wobei der Unterbautyp Kiessand die besten Eigenschaften zeigt.

Sur la ligne d'expérimentation de Schüpfen (ligne Berne-Bienne, canton de Berne) des Chemins de fer fédéraux suisses (CFF) divers types de corps de voie ont été étudiés quant aux eaux d'infiltration, aux émissions de polluants et à l'évolution de la température.

L'écoulement des eaux varie nettement d'un type de corps de voie à l'autre; on notera une forte augmentation du coefficient d'écoulement durant les deux premières années de service. Les émissions de polluants causées par le lavage des eaux d'infiltration diminuent pour tous les types de corps de voie lorsque la teneur en eau augmente. Les concentrations de polluants mesurées répondent aux exigences de l'ordonnance suisse sur la protection des eaux de 1998.

Le comportement vis-à-vis du gel est variable, les gravillons présentant les meilleures caractéristiques à cet égard.

Sulla linea di prova Schüpfen (linea ferroviaria Berna-Bienne, Canton Berna) delle Ferrovie federali svizzere, sono stati analizzati diversi tipi di infrastrutture della linea dal profilo della capacità di drenaggio, della dispersione di sostanze nocive e della reazione alla temperatura.

I diversi tipi di infrastrutture si differenziano l'un l'altro chiaramente dal punto di vista della capacità di drenaggio; durante i primi due anni di esercizio è stato rilevato un marcato aumento dei coefficienti di deflusso. La dispersione di sostanze nocive dovuta all'acqua d'infiltrazione diminuisce per tutte le infrastrutture della linea con un equivalente d'acqua crescente. Le concentrazioni di sostanze nocive misurate soddisfano le esigenze dell'ordinanza del 1998 sulla protezione delle acque.

Il comportamento nei confronti del gelo è variabile, anche se il tipo di massicciata a ghiaia presenta le migliori caratteristiche.

## Vorwort

In den letzten Jahrzehnten wurden zur Bekämpfung von unerwünschtem Pflanzenaufwuchs auf Bahnanlagen – vor allem im Bereich der Gleise – erhebliche Mengen Herbizide eingesetzt. Wegen der schlechten Abbaubarkeit der verwendeten Stoffe und der guten Durchlässigkeit des Gleisunterbaus führten diese Anwendungen zu lokalen Belastungen des Grund- und Trinkwassers. Aus diesem Grund wurde im Jahr 1990 als Sofortmassnahme die Anwendung des Bodenherbizids Atrazin auf Bahnanlagen verboten, und seit 1992 dürfen nur noch die Blattherbizide Glyphosate und Sulfosate verwendet werden. Parallel zu diesen Anwendungsbeschränkungen haben das Bundesamt für Verkehr, die Schweizerischen Bundesbahnen und das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft verschiedene Forschungsvorhaben unterstützt, um das Problem „Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen“ umfassend zu untersuchen. Im Rahmen der Erstellung des zweiten Gleises der Linie Münchenbuchsee-Lyss haben die SBB 1989-1990 eine Versuchsstrecke mit dem Ziel gebaut, Grundlagen für die bevorstehenden Neu- und Ausbaustrecken von Bahn 2000 zu erhalten. Es war ein Gleisunterbau zu evaluieren, der bei hoher Verfügbarkeit und genügender Lebensdauer einen minimalen Unterhalt erfordert und minimale Jahreskosten erzeugt. Gleichzeitig sollte er dazu beitragen, dass das schädliche Pflanzenwachstum eingeschränkt wird.

Auf dieser Anlage, welche vermutlich einmalig ist und deshalb als Pionierleistung betrachtet werden darf, können das Trag-, Frost- und Entwässerungsverhalten des Gleiskörpers sowie die Kinetik von Fremdstoffen unter Feldbedingungen untersucht werden.

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der Untersuchungen über das Entwässerungsverhalten und den Schadstoffaustrag von Gleiskörpern verschiedener Bauart. Er richtet sich an die für den Bau und den Unterhalt von Gleisanlagen verantwortlichen Personen der Bahnunternehmungen und deren Beauftragten und soll dazu beitragen, das Wissen über umweltverträgliche Bahnanlagen zu vertiefen.

Schweizerische  
Bundesbahnen

Bundesamt für Verkehr

Bundesamt für Umwelt, Wald  
und Landschaft

Peter Winter  
Baudirektion

Peter Testoni  
Abteilung Infrastruktur

Georg Karlaganis  
Abteilung Stoffe, Boden  
Biotechnologie



## Zusammenfassung

Die Kenntnis des quantitativen und qualitativen Entwässerungsverhaltens von Gleiskörpern ist für die geplanten Neubaustrecken der SBB (Bahn 2000, Neue Alpentransversalen) von Bedeutung. In der Bahnstrecke Münchenbuchsee-Schüpfen konnte im Rahmen des Doppelspurausbaus bei Gsteig in den Jahren 1989 bis 1990 eine Versuchsstrecke eingerichtet werden. Die Anlage ist 250 m lang und in fünf Abschnitte (A - E) von je 50 m Länge unterteilt, in welchen verschiedene Unterbautypen eingebaut wurden. Als Unterbaumaterial wurde Kiessand, in Abschnitt B Elektroofenschlacke (EOS) der von Roll AG eingebaut. Die Oberfläche des Unterbaus (Planie) wurde in den einzelnen Abschnitten unterschiedlich erstellt: gewalzter Kiessand (Abschnitt A), gewalzte Elektroofenschlacke (Abschnitt B), bituminöse Oberflächenbehandlung OB (Abschnitt C), Heissmischtragschicht HMT (Abschnitt D) und Heissmischfundationsschicht HMF (Abschnitt E). Zur Bestimmung der für die Fragestellungen relevanten Parameter wurden die einzelnen Versuchsabschnitte instrumentiert und mit Messeinrichtungen versehen. Zusätzlich wurden die Klimadaten erfasst.

Schwerpunkte der in den Jahren 1991 bis 1996 durchgeführten Untersuchungen waren das Entwässerungsverhalten der verschiedenen Unterbautypen und dessen langzeitliche Veränderungen während des Bahnbetriebs, die Auswaschung von Schadstoffen aus den Baumaterialien und die Gleissickerwasserqualität unter Betriebsbedingungen sowie das Temperaturverhalten der Unterbautypen (Frosttiefe).

Während sechs Jahren konnten unter Bahnbetriebsbedingungen die Parameter Abfluss, Schadstoffaustrag und Gleistemperatur gemessen und zu den klimatischen Daten Niederschlag und Temperatur in Relation gesetzt werden. Ergänzend erfolgten Bewässerungs- und Tracerversuche auf ausgewählten Unterbautypen.

Aus den vorliegenden Untersuchungen können allgemein gültige Charakteristiken der **Gleis-entwässerung** abgeschätzt werden:

Abschnitt, Unterbautyp	Mittlere Abflusskoeffizienten (% des Niederschlags)		Speicherung in Gleiskörper (m <sup>3</sup> /m' Gleis)	
	0-2 Betriebsjahre	> 2 Betriebsjahre	0-2 Betriebsjahre	> 2 Betriebsjahre
<b>A Kiessand</b>				
– Planie	10 - 65	30 - 75	0.15	0.05
– Planum	10 - 65	30 - 75		
<b>B EOS</b>				
– Planie	10 - 60	30 - 60	0.05	0.01
– Planum	10 - 60	80 - 100		
<b>C, D, E, OB, HMT, HMF</b>				
– Planie	70 - 100	80 - 100	0.01	0.01
– Planum	0	0		

Die **Abflusskoeffizienten** sind stark variabel in Abhängigkeit der Verdunstung und dem Sättigungsgrad des Gleiskörpers vor Beginn des Niederschlags. Die mittlere **Verdunstung** aus einem Gleiskörper beträgt ca. 20 - 35% des Niederschlags. Die **Speicherfähigkeit** hat in den zwei ersten Betriebsjahren abgenommen und sich anschliessend stabilisiert. Die **Oberflächendichtigkeiten** der mit bituminösem Material gestalteten Planien C - E sind nach sechs Betriebsjahren noch dicht und leiten das gesamte Sickerwasser ab. Im Abschnitt A, Kiessand, sickert ca. 75 % des Wassers durch den Kiessand auf das Planum.

Die **Sickerwässer** aus allen Unterbautypen **erfüllen die Anforderungen an die Einleitung in ein Fließgewässer**, wobei die EOS-Abwässer durch einen hohen pH-Wert belastet sind.

Die Beobachtung des **Temperaturverlaufs** zeigt deutliche Unterschiede im Temperaturverhalten der Unterbautypen. Kiessand zeigt eine gute Isolierfähigkeit, welche deutlich besser als die von Asphalt ist. Das Schotterbett weist eine sehr gute Isolationsfähigkeit auf, wobei ein dominierendes Eindringen der Kälte in den Gleiskörper von oben festgestellt werden kann.

## Résumé

La connaissance qualitative et quantitative du comportement des eaux d'infiltration des ballasts n'est pas sans intérêt pour les nouvelles lignes que projettent des CFF (Rail 2000, Nouvelles transversales alpines). Dans les années 1989-1990, un tronçon d'expérimentation a pu être aménagé sur la ligne Münchenbuchsee-Schüpfen lors des travaux d'extension à deux voies près de Gsteig. Le tronçon a 250 m de longueur et comporte 5 secteurs (A-E), de 50 m chacun, dans lesquels divers types d'infrastructure ont été installés. Le matériau employé à cet effet est le gravillon, à l'exception du secteur B où on a utilisé des scories de four électrique (SFE) de l'entreprise von Roll SA. La partie supérieure de l'infrastructure (plate-forme) a été aménagée diversement sur chaque secteur: gravillon damé (secteur A), scories de four électrique damées (secteur B), bitume (secteur C), béton bitumeux pour couche de support (secteur D), couche de fondation à chaud (secteur E). Des instruments de mesure ont été installés sur chacun des secteurs afin de pouvoir déterminer les paramètres déterminants du problème posé. En outre, les données météorologiques ont été enregistrées.

Les essais effectués dans les années 1991 à 1996 avaient pour but d'étudier le comportement des eaux d'infiltration des divers types d'infrastructure et l'évolution à long terme de ces derniers pendant le service, l'extraction des polluants par lavage des corps de la voie et la qualité des eaux d'infiltration durant le fonctionnement ainsi que le comportement thermique des types d'infrastructure (profondeur du gel).

Durant six ans, et dans les conditions de service, les paramètres suivants ont pu être mesurés et mis en relation avec la température ambiante et les précipitations: quantité d'eaux évacuées, émissions de polluants et température des rails. En complément, des essais d'infiltration et des essais avec des indicateurs ont été effectués sur des infrastructures choisies.

Les caractéristiques générales qui ressortent des études faites sur le comportement des eaux d'infiltration des corps de la voie sont les suivantes:

Secteur Type d'infrastructure	Coefficient d'écoulement moyen (% des précipitations)		Accumulation dans les corps de la voie (m <sup>3</sup> /m' rail)	
	0-2 années service	> 2 années service	0-2 années service	> 2 années service
<b>A Gravillon</b>				
– Plate-forme	10 - 65	30 - 75	0.15	0.05
– Forme	10 - 65	30 - 75		
<b>B SFE</b>				
– Plate-forme	10 - 60	30 - 60	0.05	0.01
– Forme	10 - 60	80 - 100		
<b>C, D, E, OB, HMT, HMF</b>				
– Plate-forme	70 - 100	80 - 100	0.01	0.01
– Forme	0	0		

Les coefficients d'écoulement dépendent fortement de l'évaporation et du degré de saturation des corps de la voie avant les précipitations. L'évaporation moyenne à partir des corps de la voie se monte à env. 20-35% des précipitations. La capacité d'accumulation a baissé durant les deux premières années de fonctionnement, puis elle s'est stabilisée. L'étanchéité des parties superficielles bitumées (secteurs C-E) est encore parfaite après six années de fonctionnement: en effet, la totalité des eaux d'infiltration s'écoule. Sur le secteur A, 75% des eaux s'infiltrèrent à travers les gravillons et parviennent à la forme.

Les eaux d'infiltration de tous les types d'infrastructure répondent aux exigences de l'ordonnance sur la protection des eaux de 1998, mais il faut toutefois signaler que les eaux d'infiltration des scories de four électrique ont un pH élevé.

L'évolution des températures est nettement différente d'une infrastructure à l'autre. Les gravillons ont une bonne capacité d'isolation, nettement meilleure que celle de l'asphalte. Le lit de ballast a une bonne capacité d'isolation, mais il faut noter que l'entrée du froid dans le corps de la voie se fait en majorité par le haut.

## 1. Einleitung

In Zusammenhang mit den in nächster Zeit geplanten Neubaustrecken der SBB (Bahn 2000, NEAT) ist unter Anderem auch die Kenntnis des quantitativen und qualitativen Entwässerungsverhaltens von Gleiskörpern von Bedeutung.

Beim Bau der Neubaustrecke Münchenbuchsee-Schüpfen ergab sich die Gelegenheit zum Bau eines Versuchsabschnittes im Massstab 1:1. Die GEOTEST AG, Zollikofen, konnte bei Projektierung, Bau und Erstellung der Versuchsstrecke mitwirken und die späteren Versuche begleiten.

Im nachfolgenden Bericht werden die Ergebnisse der Untersuchungen zum Entwässerungsverhalten (Abfluss, Schadstoffe) verschiedener Gleisunterbautypen kommentiert. Auf die ebenfalls durchgeführten umfangreichen geotechnischen Abklärungen (Foundation des Gleiskörpers) wird nicht näher eingegangen. Zudem laufen zur Zeit Versuche mit Herbiziden. Über deren Ergebnisse wird später berichtet.

## 2. Allgemeine Zielsetzungen

Die Versuchsstrecke wurde in der Zeit von September 1989 bis Mai 1990 im Hinblick auf folgende Untersuchungsziele realisiert:

- **Geotechnik:**

Beurteilung verschiedener Unterbautypen auf ihre geotechnische Eignung als Gleiskörper.

- **Wasserhaushalt:**

- Untersuchung des Entwässerungsverhaltens der verschiedenen Unterbautypen bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen.
- Analyse von langzeitlichen Veränderungen des Abflussverhaltens während des Bahnbetriebs.
- Bestimmung der hydrometrischen Kenngrößen der Messanlage mittels Tracerversuchen als Vorbereitung späterer Versuche mit Wirkstoffen von Pflanzenbehandlungsmitteln.

- **Umweltchemie und Herbizide:**

- Untersuchung der Auswaschung von Schadstoffen aus den verwendeten Baumaterialien.
- Analyse der Gleissickerwasserqualität unter Betriebsbedingungen.
- Auswaschung von Herbiziden, welche gegen unerwünschten Aufwuchs eingesetzt werden.

- **Temperaturverhalten:**

Bestimmung der Frosttiefen verschiedener Unterbautypen.

### 3. Aufbau der Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke ist auf dem südlichen Gleis der Doppelspur Münchenbuchsee - Schüpfen angelegt. Sie ist 250 m lang und in fünf Abschnitte von 50 m Länge unterteilt, in welchen verschiedene Unterbautypen eingebaut wurden. Die Breite von ca. 6 m entspricht einer Gleisspur mit seitlich anschliessendem Bankett.

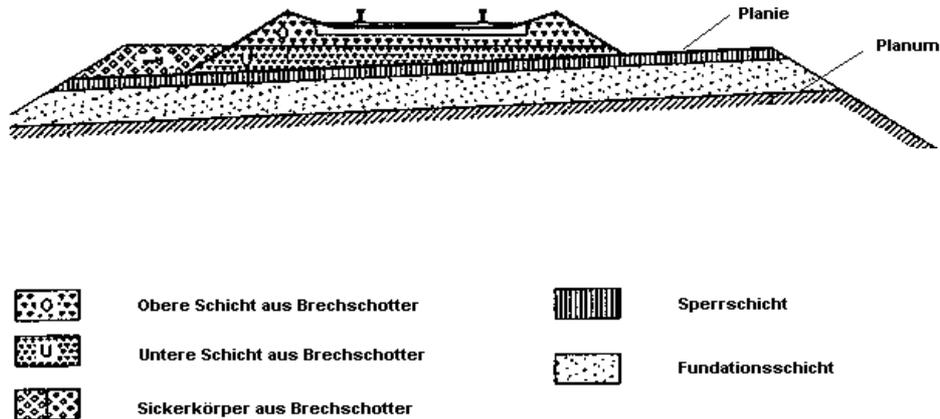


Abbildung 1: Normalprofil für einspurige Strecken der Schweizerischen Bundesbahnen

#### 3.1 Aufbau der Versuchsabschnitte

Die Abschnitte der Versuchsstrecke unterscheiden sich im Aufbau in den folgenden Punkten:

- Unterbau – Art des Materials (Kiessand oder Elektroofenschlacke)  
– Mächtigkeit des Einbaus
- Planie<sup>1\*</sup> – Art der Abdichtung  
– Wahl des Abdichtungsmaterials

In Anhang 1 ist der Aufbau der einzelnen Versuchsabschnitte dargestellt.

##### 3.1.1 Baumaterialien

- **Die Basisabdichtung** der gesamten Versuchsstrecke ist dreischichtig und besteht aus
  - Vlies Trevira 11 360
  - Folie Vaparoid, Vaprolen 70 3 EP
  - Vlies Trevira 11 360
- Als **Unterbaumaterial** wurde **Kiessand** in allen Abschnitten ausser Abschnitt B verwendet. Der Kiessand stammt aus einer regionalen Kiesgrube. In Abschnitt B wurde versuchsweise **Elektroofenschlacke** (EOS) der von Roll AG in Gerlafingen eingebaut.

<sup>1</sup> \* Planie = Oberfläche des Unterbaus (Basis der Gleisschotter)  
Planum = Oberfläche des anstehenden Bodens (Basis des Unterbaus)

Die Materialeigenschaften des verwendeten Kiessandes und der Elektroofenschlacke sind in Anhang 2 erläutert.

- Der **Bahnschotter** ist ein Gemisch verschiedener Lieferanten. Hauptkomponente ist Kieselkalk. Das Brechgut hat eine Körnung von 22 - 63 mm.
- **Planiematerialien**  
Die **Oberflächenbehandlung** (Abschnitt C) besteht aus einer doppelten Oberflächenbehandlung D2 gemäss SN 640 415 (mittlere Schichtstärke 3 cm). Die Planie des Abschnittes D bildet eine 7 cm starke **Heissmischtragschicht** (HMT), während in Abschnitt E **Heissmischgut** (HMF) von 15 cm Schichtstärke eingesetzt ist. Die Kenndaten der Planiematerialien finden sich in Anhang 3.

### 3.1.2 Entwässerung

Die Entwässerung erfolgt über in Planum und Planie verlegte Längsdrainagen im Bereich des Banketts. Die Drainagen bestehen aus HPE-Sickerrohren (Siroplast  $\varnothing$  0.15 m) auf einer Betonunterlage. Die Drainagen führen in abschnittsweise erstellte Sammelschächte (Anhang 1).

## 3.2 Messeinrichtungen

Zur Bestimmung der für die Fragestellungen relevanten Parameter wurden die einzelnen Versuchsabschnitte instrumentiert und mit entsprechenden Messeinrichtungen versehen. Zusätzlich erfolgte die Installation einer Messanlage zur Erfassung der Klimadaten.

### 3.2.1 Abflussmessung

- Drainagen

Das über Planie und Planum abfliessende Sickerwasser wird abschnittsweise in Drainagen aufgefangen und Messschächten zugeleitet. Die Messschächte sind mit zwei Messkammern zum Speichern des Sickerwassers ausgerüstet (Anhang 4).

Die Abflusserfassung erfolgte bei Versuchsbeginn mittels Abstichen in den Messkammern oder direkt am Einlauf in die Messkammer. Ab Herbst 1994 wurden in den Drainagekammern APlanum und BPlanum mechanische Kippwaagen mit einer elektronischen Zähleinheit zur Abflusserfassung installiert.

Die durch die Drainagen entwässerten Flächen und Volumina sind in Anhang 5 dargestellt.

- Lysimeter

Lysimeter sind Chromstahltrichter, welche das einsickernde Oberflächenwasser vollständig auffangen und über ein Chromstahlrohr zu einem Schacht ableiten (siehe Anhang 6). Die Lysimeter haben einen Durchmesser von 0.4 m (Auffangfläche = 0.13 m<sup>2</sup>). Die Einbaustellen der 30 Lysimeter sind aus den Lageplänen der Entwässerungssysteme ersichtlich (Anhang 1 und 7).

Die Abflussmengen in den Lysimetern wurden als Totalmengen pro Zeiteinheit (Niederschlagsereignis) erfasst.

### 3.2.2 Temperaturmessung im Gleiskörper

Die Gleiskörper wurden mit PT 100 - Widerstandthermistoren bestückt. Die Lage der Thermistoren ist aus Anhang 1 und 7 ersichtlich (T1 - T13).

Von den Thermistoren verlaufen Kabel zu den Messschächten, wo die Temperaturen mit einem geeigneten Ablesegerät gemessen werden können.

### 3.2.3 Klimadaten

- Niederschlag  
Als Niederschlagsmessgerät wurde bis Ende 1992 ein Pluviograph mit Kippeinrichtung der Firma Etrelec eingesetzt. 1992 erfolgte die Niederschlagsmessung mittels eines Totalisators. Seit September 1993 werden die Niederschlagsdaten kontinuierlich durch einen Pluviographen mit Waage und Trommelschreiber aufgezeichnet. Das Gerät vom Typ Belfort 5-780 ist ca. 200 m westlich der Versuchsstrecke positioniert.
- Lufttemperatur  
Bis Ende 1993 erfolgte die Lufttemperaturmessung mittels eines PT 100-Widerstandes mit gekoppeltem Datenlogger. Im ersten Halbjahr 1994 wurde die Lufttemperatur nur punktuell mit der Messung der Gleistemperaturen erhoben. Seit Mai 1994 wird die Lufttemperatur kontinuierlich durch einen Thermistor mit integriertem Kleinstdatenlogger aufgezeichnet. Das Gerät befindet sich beim Sammelschacht B, eine Messung erfolgt alle 48 Minuten.

## 4. Durchgeführte Untersuchungen

Von 1991 bis 1996 wurden verschiedene Parameter gemäss den formulierten Zielsetzungen gemessen. Die Datenerfassung erfolgte zeitlich und methodisch differenziert nach der jeweiligen Problemstellung. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der erfassten Parameter im zeitlichen Verlauf.

Tabelle 1: Versuche und erfasste Messgrössen

Versuche, Parameter	1991	1992	1993	1994	1995	1996
<u>Klimadaten</u>						
• Niederschlag	[Bar]		[Bar]	[Bar]		
• Lufttemperatur	[Bar]			[Bar]	[Bar]	
<u>Hydrometrie</u>						
• Abfluss Drainagen	[Bar]			[Bar]	[Bar]	[Bar]
• Abfluss Lysimeter	[Bar]			[Bar]	[Bar]	[Bar]
<u>Chemie Sickerwasser</u>						
• Drainagen	○	○		○	○	○
<u>KBr- Tracerversuche</u>						
• Abschnitt A				[Bar]	[Bar]	
<u>Gleistemperatur</u>	[Bar]	[Bar]	[Bar]	[Bar]	[Bar]	[Bar]
<u>Herbizidversuch</u>						[Bar]

### 4.1 Meteorologische Untersuchungen

Als klimatische Basisdaten wurden der **Niederschlag** und die **Lufttemperatur** gemäss Kapitel 3.2.3 möglichst kontinuierlich erfasst. Die erhobenen Werte wurden mit den Daten der umliegenden MZA-Stationen verglichen und überprüft. Bei Geräteausfällen konnten so die Niederschlagsmengen aus den MZA-Daten interpoliert werden. Zusätzlich sind für definierte Niederschlagsereignisse (Gewitter etc.) Totalisatordaten zu Kontrollzwecken erhoben worden.

## 4.2 Hydrometrie

Das Abflussverhalten der Gleiskörper wurde mit der Messanordnung gemäss Kapitel 3.2.1 erfasst. Da das Einzugsgebiet der einzelnen Gleisabschnitte bekannt ist, wurde versucht, die verantwortlichen Mechanismen im Wasserhaushalt abzugrenzen und soweit wie möglich zu quantifizieren (Abbildung 2).

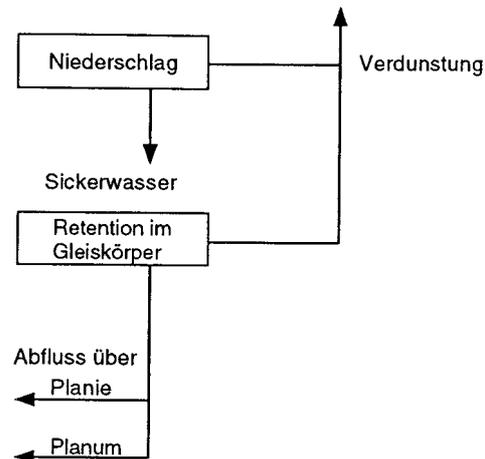


Abbildung 2: Wasserbilanz eines Gleiskörpers

Nach Abschluss der Bauarbeiten wurden **Berechnungsversuche** durchgeführt. Sie hatten zum Ziel, die Entwässerungsinstallationen auf ihre Funktionstüchtigkeit zu prüfen und gleichzeitig ein Extremniederschlagsereignis zu simulieren.

Zur hydrologischen Charakterisierung der Lysimeter wurden im Hinblick auf die Vorbereitung von Freilandherbizidversuchen **KBr-Tracerversuche** durchgeführt.

## 4.3 Umweltchemie

Das Sickerwasser aus den Gleisen gelangt durch verschiedene Entwässerungssysteme in die Umwelt. Zusammen mit dem Wasser können Stoffe aus dem Bahnbetrieb in den Boden, ins Grundwasser und ins Oberflächengewässer gelangen. Es wurden während der ganzen Versuchsdauer periodisch Wasserproben aus den Drainagerohren entnommen und vom Institut Bachema, Zürich, analysiert.

Untersuchte Parameter waren **umweltgefährdende Stoffe, Pflanzennährstoffe** und **allgemeine Verschmutzungsparameter**.

Abbildung 3 zeigt die für den Schadstoffhaushalt massgeblichen Mechanismen.

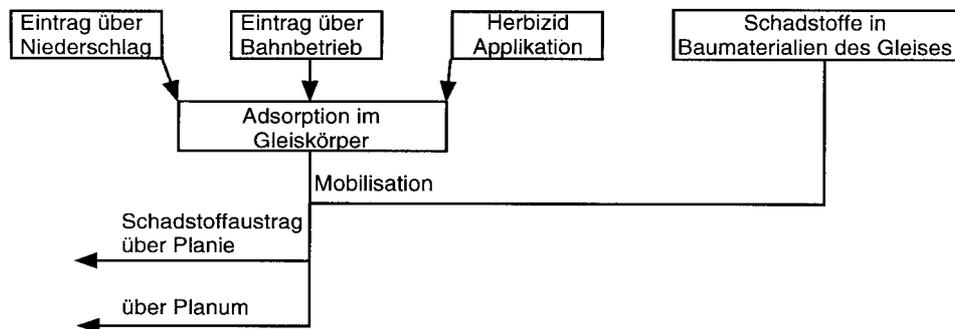


Abbildung 3: Schadstoffbilanz eines Gleiskörpers

#### 4.4 Temperaturverhalten des Gleisunterbaus

Zur Abklärung des **Temperaturverhaltens** der verschiedenen Gleisunterbautypen (Frosttiefe etc.) wurden die eingebauten Thermistoren während den Wintermonaten in ca. wöchentlichem Rhythmus abgelesen.

#### 4.5 Geotechnik

Die geotechnischen Eigenschaften der verschiedenen Unterbautypen wurden durch die SBB untersucht und sind nicht Bestandteil dieser Studie.

## 5. Resultate

### 5.1 Die klimatischen Bedingungen während der Versuchsdauer

Die Untersuchungsperiode 1991 bis 1995 war durch einen deutlichen Wärmeüberschuss gekennzeichnet. 1996 war eines der kältesten Jahre seit ca. zwei Jahrzehnten. Nachfolgend werden die Witterungsverhältnisse kurz charakterisiert. Anhang 8 zeigt die wichtigsten Kennzahlen zur Witterung während der Untersuchungsperiode.

- **1991** weist die Temperatur überdurchschnittliche Jahreswerte auf, was auf den grossen Wärmeüberschuss im August und September zurückzuführen ist. Die Niederschläge fielen im Jahreschnitt gering aus, die Trockenheit verstärkte sich gegenüber dem Vorjahr.
- **1992** zeichnete sich wiederum als sehr warmes Jahr mit normalen Sonnenschein- und Regensummen aus.
- **1993** war ein Jahr mit deutlichem Wärmeüberschuss. Nach der Trockenheit im Frühjahr folgten stärkere Niederschläge im Sommer. September und Oktober zeichneten sich durch Starkniederschläge aus.
- **1994** war das wärmste Jahr seit Messbeginn der MZA im 18. Jahrhundert. Die Niederschläge waren im Jahresmittel hoch und lagen leicht über der Norm.
- **1995** weist die Temperatur im Untersuchungsgebiet deutlich zu warme Jahreswerte auf. Die Niederschläge lagen ebenfalls über der Norm.
- **1996** war im zentralen Mittelland das kälteste Jahr seit 1987. Die Niederschlagssumme lag in der Norm.

### 5.2 Das Entwässerungsverhalten der Gleiskörper

#### 5.2.1 Allgemeines

Die festgestellten Abflussmengen in den Lysimetern und den Drainagen lassen zusammen mit dem gemessenen Niederschlag eine Bilanzierung des Wasserhaushaltes eines Versuchsabschnittes nach der Formel

$$N = A + V + S + W$$

N	=	Niederschlag
A	=	Abfluss
V	=	Verdunstung
S	=	Speicherung im Gleiskörper
W	=	Wasserverluste

zu. Problematisch gestaltet sich die Erfassung der Verdunstung, welche durch Wasserverluste im Drainagesystem in der Bilanz überlagert wird. Die Verdunstung findet sowohl an der **Oberfläche** des Gleiskörpers wie auch in dessen **Innern** statt.

### 5.2.2 Die Beregnungsversuche

Vor Inbetriebnahme des Bahnverkehrs wurden am 9.10. und 13.11.1990 Beregnungsversuche durchgeführt. Sie hatten zum Ziel, die Entwässerungsinstallationen auf ihre Funktionstüchtigkeit zu prüfen. Die Beregnung erfolgte mit einem handelsüblichen perforierten Gartenschlauch.

Mit dem Versuch wurde ein **quasi-stationärer Abfluss** erreicht, d.h. dass die vorhandenen Hohlräume des Gleiskörpers mit Wasser gesättigt sind und der Abfluss über längere Zeit konstant bleibt. So wurde das gesamte anfallende Wasser der Beregnung abflusswirksam und die Wasserbilanz reduziert sich auf

$$N = A + V + W$$

**Niederschlag** (N) = Beregnung und **Abfluss** (A) wurden kontinuierlich erfasst. Die Witterungsverhältnisse während des Versuchs und die Beschaffenheit der Verdunstungsfläche liessen eine **Verdunstungsrate** von 0.2 bis 0.3 N abschätzen.

Die Auswertung des Versuchs ist in Anhang 9 ersichtlich.

Es ist festzuhalten, dass die Beregnungsversuche nicht natürlichen Niederschlagsereignissen entsprechen. Ihre Intensität ist markant grösser.

Aus den Versuchen ergeben sich die folgenden Feststellungen:

- In den **Abschnitten C, D und E** mit oberflächenabgedichteter Planie fliesst das Wasser vollständig über diese ab. Auf dem Planum fiel kein Wasser an.
- Im **Abschnitt A** mit gewalztem Unterbau aus Kiessand floss ca. 25% des Wassers über die Planie ab, der Rest passierte die Planieoberfläche und wurde auf dem Planum aufgefangen.
- Im **Abschnitt B** (Elektroofenschlackenunterbau) konnte auf der Planie kein Abfluss festgestellt werden. Alles Wasser sammelte sich über dem Planum.

Es ergeben sich aus den Beregnungsversuchen folgende **Abflusskoeffizienten**<sup>2</sup> (Maximalwerte):

Tabelle 2: Maximale Abflusskoeffizienten vor Bahnbetriebsaufnahme

Abschnitt	Planie	Abflusskoeffizient
A	gewalzter verdichteter Kiessand	0.64
B	gewalzte verdichtete EOS	0.64
C	bituminöse Oberflächenbehandlung	0.81
D	HMT	0.74
E	HMF	(0.5*)

\* Undichte Drainage, der effektive Wert dürfte ebenfalls bei ca. 0.8 liegen.

Die **Speicherkapazität** zum Zeitpunkt der Beregnungsversuche, d.h. der maximal zurückgehaltene Wasseranteil ergibt sich pro m<sup>2</sup> Gleis für die Abschnitte A und B zu ca. 0.15 m<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Definition des Abflusskoeffizienten:  $\Psi = \frac{\text{Abflussmenge}}{\text{zugehörige Regenmenge}}$

(Speicherung im Unterbaumaterial Kiessand oder EOS), für die Abschnitte C, D und E zu ca.  $0.02 \text{ m}^3$  (Speicherung im Gleisschotter).

### 5.2.3 Entwässerungsverhalten unter natürlichen Bedingungen

Die während der Niederschlagsereignisse festgestellten Abflüsse in den Drainagen und Lysimetern wurden mit den gemessenen Niederschlagsmengen verglichen.

Massgebend für die festgestellten Abflussmengen sind die meteorologischen Verhältnisse während der Untersuchungsphase. Diese zeichneten sich durch **überdurchschnittlich hohe Temperaturen** aus. Dazu erfolgte der Niederschlag meist als **mässig intensive**, aber zahlreiche und lang andauernde Regenfälle. Der statistische Vergleich mit den langjährigen regionalen Niederschlägen zeigt, mit Ausnahme des Herbstes 1993, keine aussergewöhnlichen, nicht im Bereich der Auftretenswahrscheinlichkeit von wenigen Jahren liegenden Ereignisse. Für den Wasserhaushalt im Gleiskörper ergeben sich dadurch folgende Konsequenzen:

- Die **mässigen, lang andauernden Regenfälle** führen zu einer **langsamen Sättigung des Gleiskörpers**.
- Die **Verdunstung** wird durch die überdurchschnittlichen Temperaturen und die geringe Regenintensität stark erhöht.

#### Abflüsse in den Drainagen

Die bei natürlichen Niederschlägen auftretenden Abflüsse in den Drainagen wurden gemessen und mit den Niederschlagsmessungen in Bezug gesetzt. Es gilt zu beachten, dass das Abflussverhalten der Drainagen bis Ende 1994 für Niederschlagsereignisse  $>30 \text{ mm}$  (Drainage A<sub>Planum</sub>) resp.  $>15 \text{ mm}$  (Drainage B<sub>Planum</sub>) mittels der Messkammern nicht erfasst werden konnte. Das Volumen der Messkammern ist dazu zu klein. Die 1995 neu eingebauten Kippwagen zur Abflussmessung erlaubten in den beiden letzten Untersuchungs Jahren, auch solche Niederschlagsereignisse einbeziehen zu können.

Die folgenden Abflusskoeffizienten konnten bestimmt werden:

Tabelle 3: Gemessene Abflusskoeffizienten der Drainagen

Drainage	Abflusskoeffizient ( $\psi$ )	Korrelation ( $R^2$ )
A <sub>Planie</sub>	$<0.001$	
A <sub>Planum</sub>	0.04	0.87
B <sub>Planie</sub>	0	1
B <sub>Planum</sub>	0.16	0.81
C, D, E <sub>Planie</sub>	1	1
C, D, E <sub>Planum</sub>	0	1

Anhang 10 und 11 zeigen den Abfluss in den Drainagen A<sub>Planum</sub> und B<sub>Planum</sub> in Abhängigkeit des Niederschlags.

Die **Anlaufzeiten der Drainageabflüsse** nach Einsetzen des Niederschlags wurden in folgenden Abschnitten untersucht:

Tabelle 4: Festgestellte Anlaufzeiten (in den ersten zwei Betriebsjahren)

Drainage	Anlaufzeit
B <sub>Planum</sub>	2.5 - 3.5 h
C <sub>Planie</sub> (Bitumen)	0 - 2.5 h

Für die **Planumsabflüsse** ergeben sich Anlaufzeiten, die unabhängig von der Regenintensität in etwa gleich liegen. Bei den **Planieabflüssen** zeigen sich grössere Unterschiede in Abhängigkeit der **Anfangsintensität des Regens**.

### Abflüsse in den Lysimetern

Die in den Drainagen ermittelten Abflussmengen für die gesamten Abschnittsbereiche können mittels der Lysimeterdaten verfeinert werden. Im Speziellen ist eine **zeitliche Auflösung** des Abflussverhaltens in bezug auf die Betriebsdauer der Anlage möglich. Dabei können Aussagen betreffend der im Laufe der Zeit auftretenden Veränderung des **Retentionsvermögens** (Speicherfähigkeit) und der **Abflussmenge** gemacht werden.

Schwierig abzuschätzen bei Lysimetermessungen ist der **Einfluss von technischen Randbedingungen**. Eine Kontrolle der Funktionstüchtigkeit der Messanlage konnte aber mittels zweier KBr-Tracerversuche durchgeführt werden.

Die Analyse der beobachteten Lysimeterabflüsse während fünf Betriebsjahren zeigt eine **deutliche Diskrepanz zwischen den Werten der ersten beiden Betriebsjahre und den anschließenden drei Jahren**.

Nachfolgend werden die festgestellten Abflusswerte dargelegt und die Veränderungen im Laufe der Betriebszeit der Anlage erläutert.

Tabelle 5: Abflussverhalten der Lysimeter

Lysimeter Abschnitt	Minimaler Niederschlag zur Erzeugung eines Abflusses [mm]		Abflusskoeffizient (Lysimeterfläche 0.13 m <sup>2</sup> ) [ψ]	
	1991 - 1992	1993 - 1995	1991 - 1992	1993 - 1995
A <sub>Planie</sub>	16	6	0.13 - 0.64	0.30 - 0.82
A <sub>Planum</sub>	15	3	0.11 - 0.67	0.33 - 0.75
B <sub>Planie</sub>	15	5	~0.3	0.24 - 0.61
B <sub>Planum</sub>	12	2	~0.6	0.72 - ≤1
C <sub>Planie</sub>	3	1	≤1	≤1
D <sub>Planie</sub>	3	1	≤1	≤1

### Abschnitt A (Kiessand)

Planie- wie Planumslsylimeter zeigen ein ähnliches Abflussverhalten. Auffallend ist der um ca. 50% gegenüber der ersten Messperiode reduzierte Wert für einen Minimalniederschlag, der zu einem Abfluss führt.

Die Ursache ist in einer **Reduktion der Speicherkapazität** des Unterbaus innerhalb der ersten zwei Betriebsjahre zu suchen.

Ebenfalls **erhöht** hat sich die **Abflussmenge** in den Lysimetern relativ zur Niederschlagsmenge:

- Planie: von 0.13 - 0.64 auf 0.30 - 0.82
- Planum: von 0.11 - 0.67 auf 0.33 - 0.75

### Abschnitt B (Elektroofenschlacke)

Ab 1993 setzt sowohl in der Planie- wie auch in den Planumslsylimetern ein Abfluss bereits bei Niederschlägen von ca. 5 mm ein. Die in den ersten zwei Betriebsjahren beobachtete Retention ist nicht mehr festzustellen.

Die Abflussmengen in den **Planumslsylimetern** zeigen ebenfalls **erhöhte Werte**. Diese betragen 1991 - 1992 etwa 60% des Niederschlags, ähnlich wie im Abschnitt A. Die vorliegenden Resultate der weiteren Betriebsjahre zeigen einen Abflusskoeffizienten von 72 - 100%. Die **Speicherkapazität** der Elektroofenschlacke ist somit von anfänglich mit Kiessand vergleichbaren Werten gegen Null abgesunken. Dies ist z.T. durch den Austrag von Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) im Sickerwasser aus der Elektroofenschlacke bedingt (siehe Kapitel 5.3).

Auffallend ist der bis zu 100% grössere Abfluss in den Planumslsylimetern gegenüber der Planie. Als Ursache können die folgenden Faktoren in Betracht gezogen werden:

- Konstruktionsbedingt liegen die Planumslsylimeter des Abschnitts B am Rande des Schotterkörpers. Die Oberflächenmorphologie kann das Einzugsgebiet eines Lysimeters beeinflussen (Trichterbildung, seitlicher Zulauf).
- Es besteht ein hydraulisches Gefälle zu den Lysimetern. Das Wasser fließt subvertikal den Lysimetern zu.
- Durch chemische Lösung von Calcium aus der EOS entsteht eine bessere Wegsamkeit für Wasser ("Verkarstung").

### Abschnitt C (bituminöse Oberflächenbehandlung), Abschnitt D (HMT) und Abschnitt E (HMF)

Das Abflussverhalten hat sich während der gesamten Untersuchungsperiode kaum verändert. Das **Speichervermögen des Schotterkörpers** dürfte analog zu den anderen Abschnitten zurückgegangen sein. Kleinste Niederschlagsereignisse führen bereits zu einem Abflusskoeffizienten von nahezu 1. Die **Planien** sind nach sechs Betriebsjahren nach wie vor dicht.

Niederschlagshöhen im Vergleich zum Abfluss der Lysimeter sind in Anhang 12 dargestellt.

#### 5.2.4 Eignungstests der Lysimeter für die Schadstoffbilanzierung (KBr-Tracer-versuche)

Zur hydrologischen Charakterisierung (wirksames Einzugsgebiet) der Lysimeter und zur Überprüfung derer Funktionalität wurden im Herbst 1994 und Sommer 1995 zwei KBr-Tracerversuche durchgeführt. Des weiteren stand eine Überprüfung der Eignung der Anlage für spätere Freilandherbizidversuche zur Abklärung an.

Die Versuche wurden im Abschnitt A mit Kiessandunterbau ausgeführt.

#### 5.2.5 KBr-Versuch "natürliche Bedingungen"

Nach einem ersten KBr-Versuch mit künstlicher Beregnung wurde ein zweiter Versuch von Juni 1995 bis Mai 1996 unter "natürlichen Niederschlagsbedingungen" auf dem Abschnitt A durchgeführt. Die Versuchsanordnung und Auswertung finden sich im Bericht FAW vom Mai 1996.

Appliziert wurden  $37.5 \text{ g/m}^2$  mit einem "Sputnik"-Wagen der SBB. Die dazu notwendigen 8 kg KBr wurden in 180 l Wasser gelöst. Es erfolgte keine zusätzliche Bewässerung. Die Beprobung wurde jeweils nach natürlichen Niederschlagsereignissen vorgenommen und die Proben an die FAW (Frau Dr. Brauchli) zur Analyse gesandt.

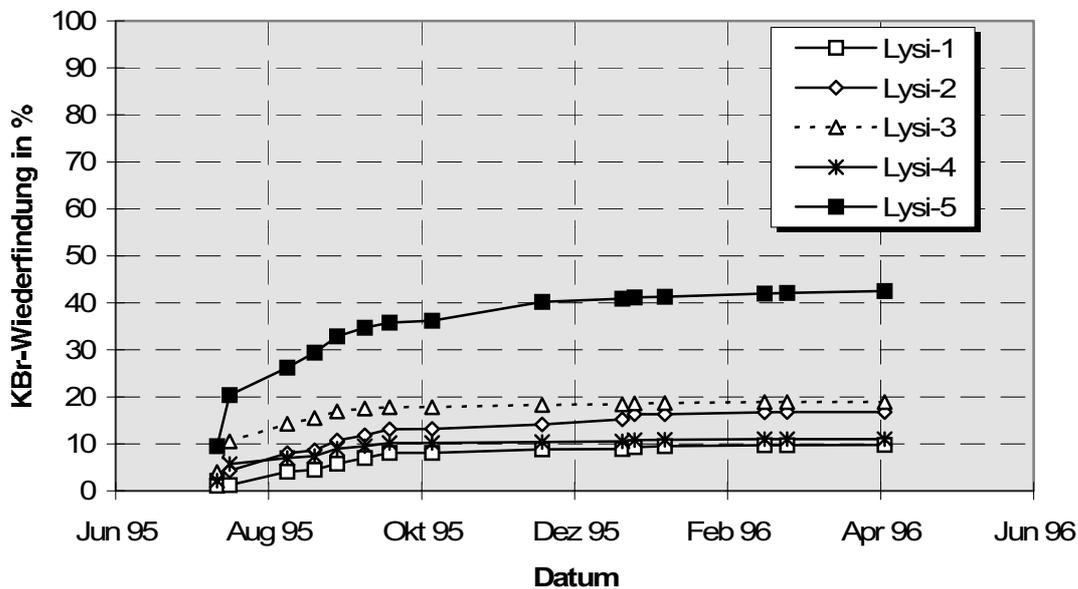
Zusammenfassend sollen hier die für die Charakterisierung der Lysimeteranlagen wichtigsten Resultate wiedergegeben werden:

- **Die Planumslysimeter** zeigen ein sehr einheitliches Verhalten mit Ausnahme von Nr. 2. **Das Lysimeter Nr. 2** ergibt auch aberrante Abflussmengen und muss als **nicht funktionsfähig** beurteilt werden (Abbildung 5).

Die **KBr-Wiederfindungsmengen** betragen in den ersten acht Monaten für die Planumslysimeter 37 bis 47%.

- Bei den **Planielysimetern**, welche im Gegensatz zu jenen des Planums in der Gleisachse (ev. Störung durch Schwellen) eingebaut sind, dürfte nur Lysimeter 5 repräsentativ sein. Es zeigt ähnliche Wiederfindungsraten wie die Planumslysimeter. Lysimeter 1-4 dürften wegen der Abdeckung zu niedrige Werte zeigen.
- Der Abschnitt A ist für die **Durchführung von Herbizidversuchen unter natürlichen Bedingungen geeignet**.

### KBr-Versuch Applikation 22.6.95: Lysimeter Planie



### KBr-Versuch Applikation 22.6.95: Lysimeter Planum

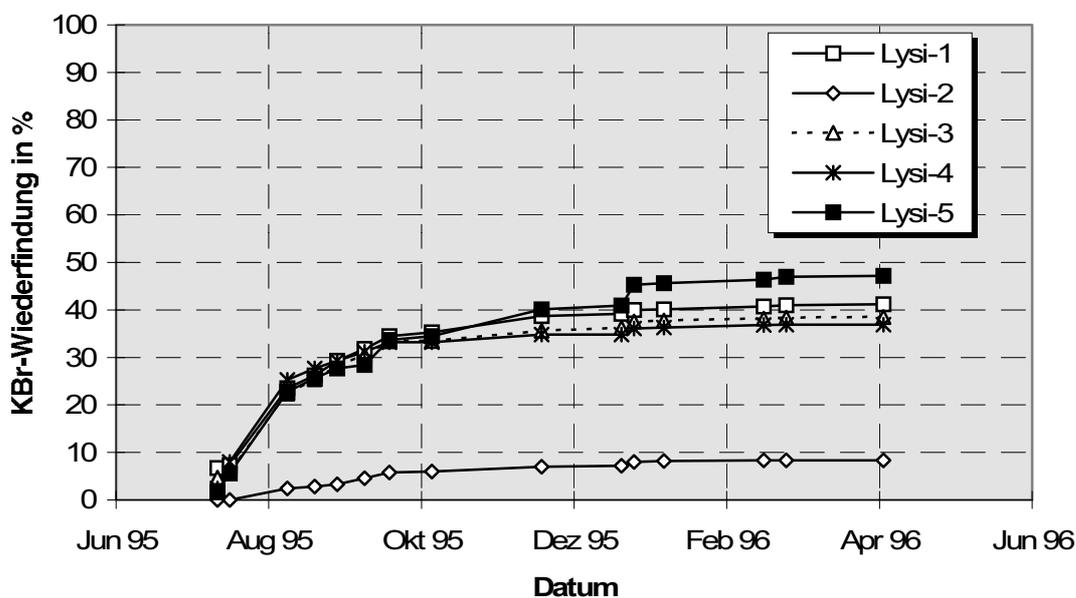


Abbildung 4 und 5: KBr-Versuche Planie und Planum Abschnitt A

## 5.3 Umweltchemie

Zur Beurteilung des Austrags von Schadstoffen aus dem Gleiskörper in die Umwelt wurden sowohl die Baumaterialien als auch das Sickerwasser auf umweltgefährdende Stoffe, Pflanzennährstoffe und allg. Verschmutzungsparameter untersucht.

### 5.3.1 Baumaterialien

Zur Überprüfung der Eigenschaften wurde EO-Schlacke und Kiessand einem Eluattest gemäss TVA<sup>3</sup> unterzogen.

- Die aus **Kiessand** ausgewaschenen Stoffe erfüllen die Anforderungen der TVA an Inertstoffe, während bei der **EO-Schlacke** zu hohe Zink- und Nitrit-Werte gemessen wurden (Anhang 13).
- Die Analyse der Metallgehalte in den Feststoffen ergab bei der **EO-Schlacke** einen zu hohen Gehalt an Zink gemäss Richtwert der TVA (Anhang 14).

### 5.3.2 Analysen von Gleissickerwasser

#### Analysen vor Betriebsaufnahme

Nach Bauabschluss 1990 und **vor Inbetriebnahme** der Versuchsstrecke wurden drei Wasserproben entnommen und analysiert (Anhänge 15 - 17):

- In den Abschnitten A und B wurden die Anforderungen der Verordnung über Abwasser-einleitungen für **Nitrit** in je einem Fall knapp überschritten.
- Die **Schwermetallgehalte** des Sickerwassers erfüllen die Anforderungen der TVA (Anhang 16). Sie zeigen aber bei der EO-Schlacke z.T. hohe Werte (Blei bis 66% des Richtwertes).

Ebenfalls untersucht wurden vor Betriebsaufnahme **allgemeine Belastungsparameter** und **Schadstoffe** im Drainagewasser (Anhang 17):

- Das Drainagewasser der Abschnitte A und B enthielt auffallend viel gelösten organischen Kohlenstoff (DOC). Die pH-Werte des Wassers aus den Abschnitten A, B und C überschritten die Anforderungen an die Einleitung in ein Fließgewässer z.T. massiv.

#### Analysen während des Bahnbetriebs

Während des Bahnbetriebs wurden die Sickerwässer periodisch beprobt. Die Ergebnisse der Analysen sind in Anhang 15 - 17 zusammengestellt. Generell zeigt sich **eine tendenzielle Abnahme der Schadstoffkonzentrationen mit zunehmendem Wasserwert**<sup>4</sup> (Abbildung 6 und 7) in den Sickerwässern.

Diese Entwicklung ist typisch für die Auswaschung von Schadstoffen aus den Baumaterialien. Sie wurde sowohl in andern Felduntersuchungen (N5, Kanton Solothurn) und Säulenversuchen im Kanton Zürich beobachtet.

**Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen erfüllen heute die Eidg. Verordnung über Abwassereinleitungen.**

---

<sup>3</sup> TVA = Technische Verordnung über Abfälle

<sup>4</sup> Wasserwert = Menge Regenwasser, welche den Bahnkörper bisher benetzt hat

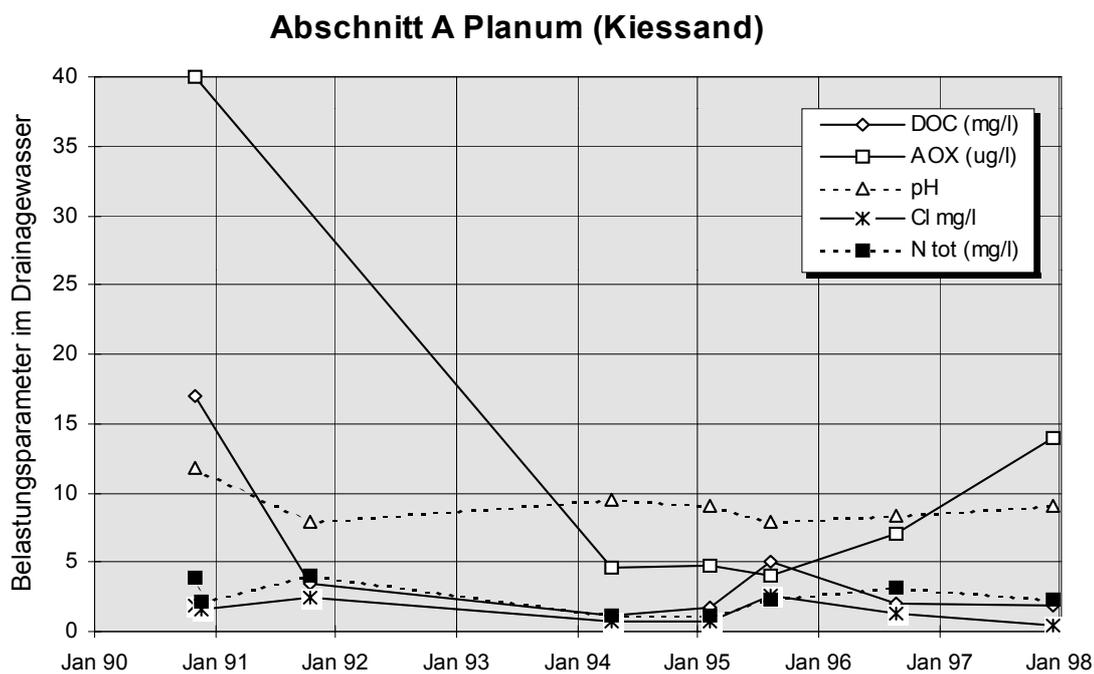


Abbildung 6: Abschnitt A<sub>Planum</sub>: Belastungsparameter im Drainagewasser

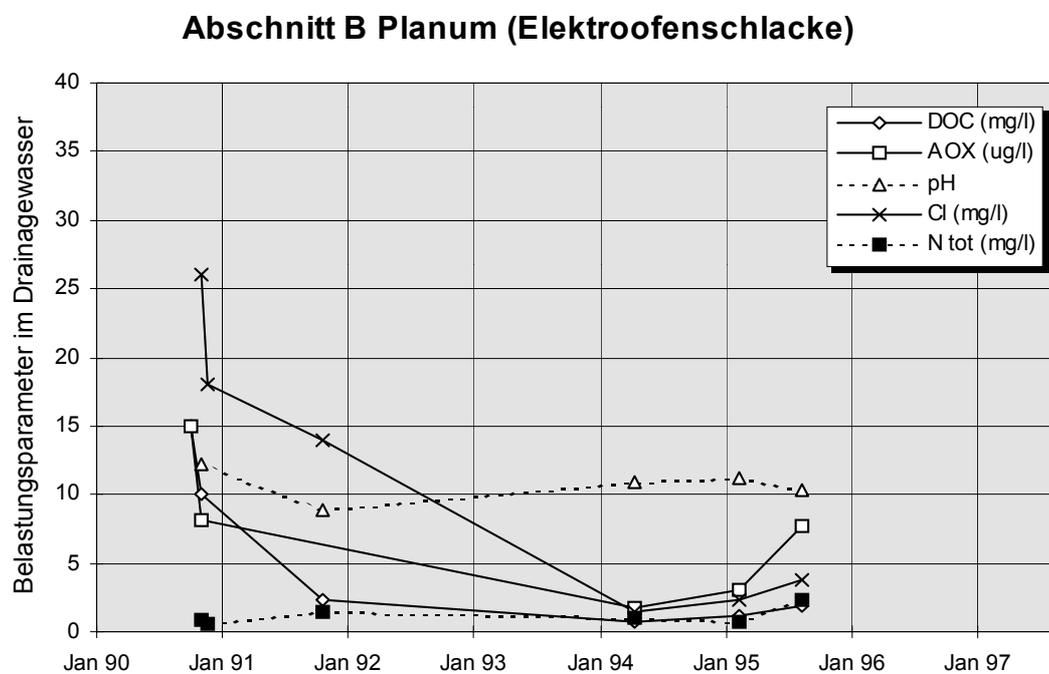


Abbildung 7: Abschnitt B<sub>Planum</sub>: Belastungsparameter im Drainagewasser

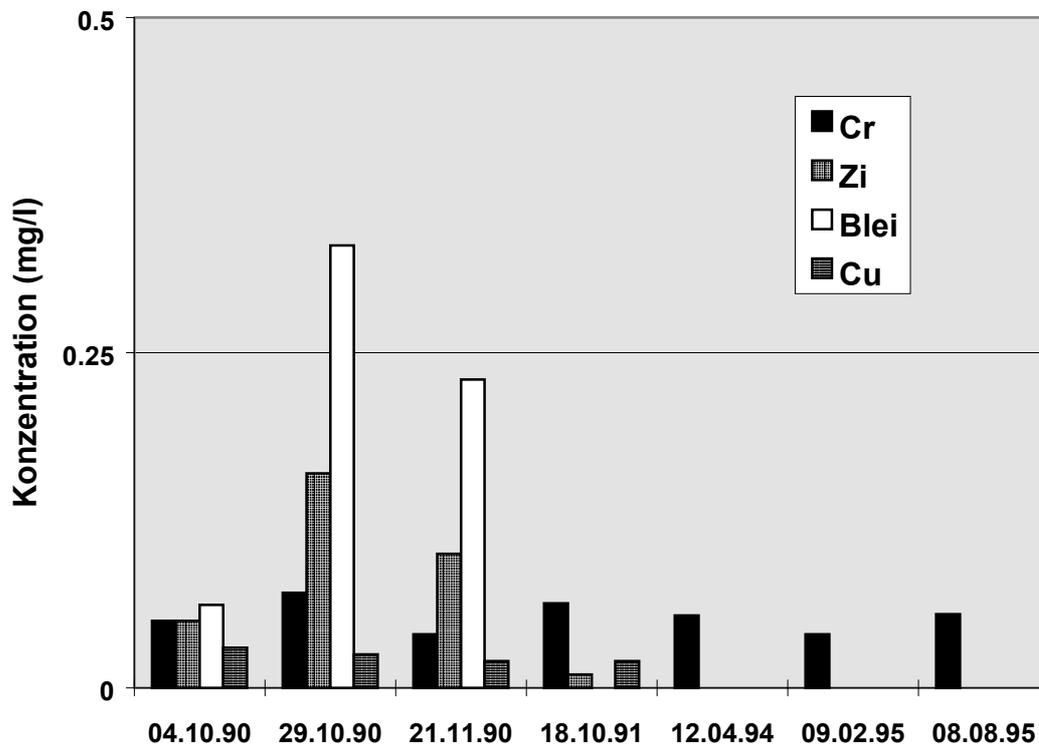


Abbildung 8: Schwermetallgehalte im Sickerwasser Abschnitt B (Elektroofenschlacke)

Auffallend sind jedoch die gegenüber der anderen Abschnitte etwas erhöhten DOC- und AOX-Werte aus dem Abschnitt A. Die Werte waren jedoch bereits kurz nach dem Einbau des Materials erhöht.

Die anfänglich hohen pH-Werte des Sickerwassers der Untertypen A (Kiessand) und B (EOS) sind bei A und z.T. auch bei B durch den Kontakt des Sickerwassers mit Betonteilen (z.B. Einbettung der Drainageröhre) bedingt.

### Schwermetalle

Die Belastung der Drainagewässer mit Schwermetallen ist bei den Abschnitten A, C, D und E sehr tief und liegt hier meist unter der Nachweisgrenze.

Die stark metallhaltige Elektroofenschlacke produziert erwartungsgemäss etwas stärkere Schwermetallbelastungen (Abb. 8). Die anfänglich relativ hohen Blei- und Zinkbelastungen gehen aber im Laufe der Zeit (zunehmender Wasserwert) unter die Nachweisgrenze zurück.

Der sehr hohe pH des **Elektroofenschlackeeluats** kann, neben den Einflüssen des Betons, mit dem **Hydratisieren von CaO** aus der EOS erklärt werden. Die ebenfalls Ca-reichen Melilith-Phasen in der EOS dürften aufgrund ihrer Silikatbasisstruktur bei diesen pH-Bedingungen kaum löslich sein. Weiter kann in bezug auf die Elektroofenschlacke die folgende Feststellung gemacht werden: An der Oberfläche (Luft) bildet sich auf dem EOS-Material eine **weisse Reaktionsschicht**. Dazu finden sich in den Drainagen und Lysimetern erhebliche Mengen von weissem, flockigem Material, welches die Drainageröhre zu versintern beginnt. Die röntgenographische

Analyse hat für dieses weisse Material **Calcit (CaCO<sub>3</sub>)** ergeben. Das Ca stammt vermutlich zu einem grossen Teil aus den CaO der EOS, das CO<sub>2</sub> aus dem Sickerwasser resp. der Luft. Bedingt durch diesen Materialaustrag wird die EOS "verkarstet", was die Zunahme der Durchlässigkeit für Sickerwässer im Laufe der Zeit z.T. erklären dürfte.

### 5.4 Das Temperaturverhalten des Gleisunterbaus

Jeweils während der Wintermonate wurden die Temperaturen im Gleiskörper gemessen und mit den Lufttemperaturen korreliert. Exemplarisch werden in Anhang 19 die Temperaturverlaufkurven in den einzelnen Abschnitten der Wintermonate 1996/1997 jeweils der Gangline der Lufttemperatur überlagert und dargestellt.

Tabelle 6 zeigt den Vergleich der Thermistoren gleicher Einbautiefe an zwei ausgewählten "Kältemaxima".

Tabelle 6: Vergleich der Thermistoren gleicher Einbautiefen: Gemessene Temperaturen an ausgewählten "Kältemaxima"

Thermistor	T3	T6	T7	T12	T2	T5	T8	T13	T1	T4	T11	T14	Luft-temp.
Abschnitt	E <sub>innen</sub>	E <sub>aussern</sub>	D	A	E <sub>innen</sub>	E <sub>aussern</sub>	D	A	E <sub>innen</sub>	E <sub>aussern</sub>	D	A	
Einbautiefe ab OKT (cm)	-43	-47	-47	-50	-66	-71	-64	-69	-85	-89	-89	-92	
T(°) 23.2.96	-0.3	-0.2	0.2	1.5	0.8	1.0	1.0	1.8	0.9	1.4	1.7	2.2	-5.9
T(°) 1.1.97	-0.7	-0.7	0.1	1.4	0.8	0.9	1.0	1.9	1.8	1.7	2.1	2.7	-8.0

Die Beobachtungen des Temperaturverlaufs in den verschiedenen Unterbautypen erlauben folgende Feststellungen:

- Die Unterbautypen unterscheiden sich wesentlich in ihrem Temperaturverhalten: **Kiessand zeigt eine gute Isolierfähigkeit**, welche deutlich besser als die von Asphalt ist.
- Das **Schotterbett** weist eine sehr gute **Isolationsfähigkeit** auf.
- Die festgestellten Temperaturgradienten **belegen ein dominierendes Eindringen der Kälte von oben**.

## 6. Folgerungen

### 6.1 Allgemeine Charakterisierung der Gleisentwässerung

Aus den vorliegenden Untersuchungen können allgemein gültige Charakteristiken der Gleisentwässerung abgeschätzt werden.

#### 6.1.1 Abflussverhalten

Die Auswertungen der **Lysimeter** zeigen, dass sich die Abflusskoeffizienten während der ersten zwei Jahre ab Inbetriebnahme der Versuchsstrecke deutlich erhöht haben. Gleichzeitig hat sich die Speicherkapazität halbiert. Nach den ersten zwei Betriebsjahren haben sich **die Abflusskoeffizienten** und **die Speicherfähigkeit stabilisiert**.

Im Gegensatz zu den mit den Lysimetern bestimmten Abflusskoeffizienten zeigen die Planumsdrainagen unrealistisch tiefe Abflüsse von ca. 4% des Niederschlags (Planum Abschnitt A). Als Ursache für diese niedrigen Koeffizienten sind Abflussverluste anzunehmen. Bei kleinen Abflüssen haben bereits kleine Undichtigkeiten in den Drainagen einen grossen Einfluss auf die Abflussmengen. Massgebend ist dabei die **Niederschlagsintensität**, also der Niederschlag pro Zeiteinheit. Bei hohen Niederschlägen während kurzer Zeit ist die Abflussrate am grössten. Für die Drainage des Planums A (Unterbautyp Kiessand) lässt sich herleiten, dass Wasserverluste im Bereich von ca. 0.06 l/min auftreten, was bei geringen Abflussraten Wasserverluste in der Drainage von ca. 75% der anfallenden Wassermengen ergibt.

Die **Abflusskoeffizienten** sind stark variabel in Abhängigkeit der **Verdunstung** und dem vor Beginn der Niederschläge vorhandenen **Sättigungsgrad** des Gleiskörpers. Generell lassen sich die Abflusskoeffizienten wie folgt abschätzen, wobei die eingangs diskutierte Zunahme innerhalb der ersten zwei Betriebsjahre auffallend ist.

Tabelle 7: Mittlere Abflusskoeffizienten und Speicherung für verschiedene Gleiskörper

Abschnitt, Unterbautyp	Mittlere Abflusskoeffizienten (% des Niederschlags)		Speicherung in Gleiskörper (m <sup>3</sup> /m' Gleis)	
	0-2 Betriebsjahre	> 2 Betriebsjahre	0-2 Betriebsjahre	> 2 Betriebsjahre
<b>A Kiessand</b>				
– Planie	10 - 65	30 - 75	0.15	0.05
– Planum	10 - 65	30 - 75		
<b>B EOS</b>				
– Planie	10 - 60	30 - 60	0.05	0.01
– Planum	10 - 60	80 - 100		
<b>C, D, E, OF, HMT, HMF</b>				
– Planie	70 - 100	80 - 100	0.01	0.01
– Planum	0	0		

### 6.1.2 Verdunstung

Entscheidende und am meisten variable Grösse ist die Verdunstung. Sie unterliegt aber in Abhängigkeit von meteorologischen Bedingungen wie Regenintensität, Regendauer und Exposition sehr grossen Schwankungen. In Tabelle 8 sind Durchschnittswerte angegeben, die bei anderen Witterungsbedingungen und Expositionen weit überschritten werden können.

Tabelle 8: Verdunstung aus Gleisen verschiedener Bauart

Abschnitt	Unterbau Ausbildung Planie	Mittlere Verdunstung
A	Kiessand	ca. 35% des Niederschlags
B	EOS	ca. 35% des Niederschlags
C, D, E	Oberflächenbehandlung (Bitumen), HMT, HMF	ca. 20% des Niederschlags

### 6.1.3 Langzeitverhalten im Bahnbetrieb

Nach einer Betriebsdauer von ca. zwei Jahren zeigten sich Veränderungen im Abflussverhalten der verschiedenen Unterbautypen:

- Die **Speicherfähigkeit** der verschiedenen Unterbautypen hat nach zwei Betriebsjahren abgenommen: Bereits Niederschlagsmengen von 3 mm führen bei allen Abschnitten zu einem Abfluss. Bei Inbetriebnahme der Anlage wurden in Abschnitt A bis 15 mm NS zurückgehalten, in der EOS (Abschnitt B, Planum) sogar bis 40 mm.
- Der in Abschnitt A als Unterbaumaterial verwendete Kiessand hat seine **Oberflächendichtigkeit** während der gesamten Untersuchungsperiode nicht verändert. Es wurden nur bei intensivem Regen Abflüsse auf der Planie beobachtet. Dasselbe Erkenntnis gilt für den Unterbau aus gewalzter Elektroofenschlacke im Abschnitt B. Die mit bituminösem Material abgedichteten **Planien der Abschnitte C - E** sind nach wie vor dicht und leiten das gesamte Sickerwasser ab.
- Das **Retentionsvermögen** der Unterbautypen Kiessand und EOS **nimmt** in den ersten zwei Betriebsjahren **ab**. Schneller eintretender und stärkerer Abfluss sind die Folge.
- In den Abschnitten A und B ist eine **deutliche Zunahme der Abflusskoeffizienten** erkennbar (siehe Tabelle 7).
- Die aus **Beregnungsversuchen** bestimmten Abflusskoeffizienten sind als extreme Maximalwerte zu betrachten.

## 6.2 Chemismus der Sickerwässer

- Die Sickerwässer aus den **Geisabschnitten A** (Kiessand) und **B** (EOS) sowie der über die Planie der Abschnitte C, D, E abfliessenden Meteorwässer **erfüllen** in Bezug auf den Schadstoffgehalt die **Anforderungen** an die Einleitung in ein Fliessgewässer.
- Die **EOS-Abwässer** sind durch einen **hohen pH** belastet. Dazu wird das Drainage- und Ableitungssystem durch den Gehalt an **Calcitschlamm** in Mitleidenschaft gezogen.

- Der anfänglich ebenfalls **zu hohe pH-Wert** des Sickerwassers aus **Abschnitt A** (Kiessand) nimmt mit zunehmendem Wasserwert ab.

### 6.3 Dichtigkeit der Drainagen

- Die Beobachtungen auf der Versuchsstrecke zeigen, dass **Drainagen** bei herkömmlicher Bauweise (Einbettung in Beton) **nicht absolut dicht gebaut werden können**. Insbesondere bei Störfällen können Schadstoffe über Leckstellen ins Grundwasser gelangen.
- In **Grundwasserschutzzonen** sollten deshalb neben einer Gleisabdichtung auch die **Drainagen zusätzlich abgedichtet** werden, was in den entsprechenden SBB-Reglementen vorgeschrieben wird.

## **7. Empfehlungen für Neubaustrecken**

Entwässerungsanlagen sind für einen Abflusskoeffizienten von ca. 0.6 - 0.8 zu bemessen, wobei mit einer Anlaufzeit von 1 - 2 Stunden gerechnet werden kann.

Bei der Frostberechnung kann das Schotterbett als isolierende Schicht miteinbezogen werden.

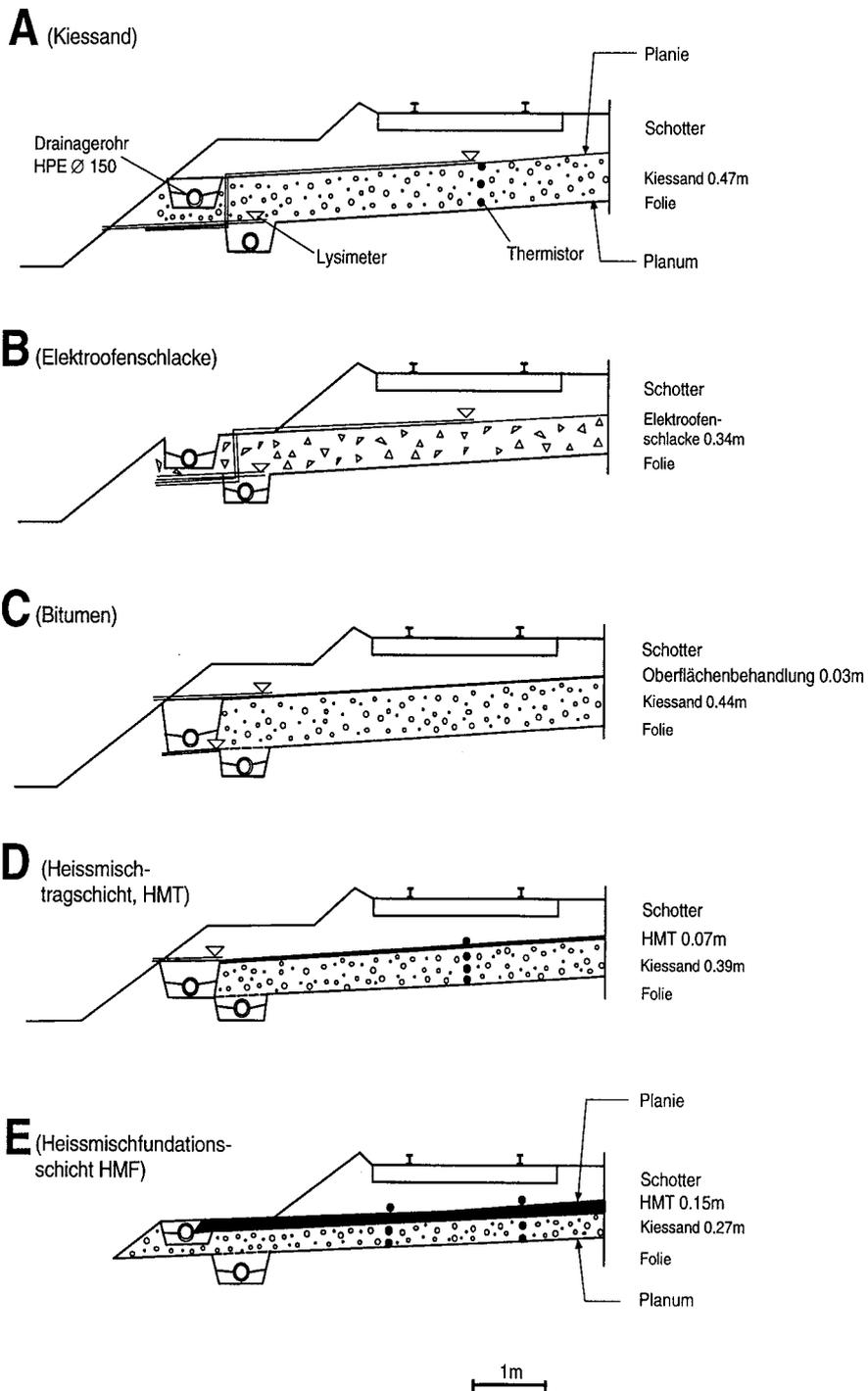
Aus Gewässerschutzgründen und zur Verhinderung von vorzeitiger Alterung wird die Abdichtung der Unterbauplanie empfohlen. Als Regelbauweise ist deshalb im Reglement SBB, R 211.1, Unterbau und Schotter, Ausgabe 1997, eine dichte Heissmischtragschicht mit einer Mindestdicke von 6 cm vorgesehen.

Im Bereich von Grundwasserschutz zonen gemäss Schutzzonenplan ist die Unterbauplanie mit einer dichten Heissmischtragschicht von mindestens 7 cm Dicke zu versehen. Die Entwässerungsgräben sind mit undurchlässigen Dichtungsbahnen auszukleiden.

## 8. Literatur

- Bericht GEOTEST 88212 vom 28.2.1989. Versuchsstrecke im Bahngleis, Untersuchung des hydraulischen Verhaltens, Untersuchung des Schadstoffhaushaltes
- Bericht GEOTEST 89099B vom 29.6.1990: SBB Versuchsstrecke Schüpfen. Versuchsprogramm 1990
- Bericht GEOTEST 89099 vom 15.11.1990: Schüpfen, Versuchsstrecke SBB. Zusammenstellung der Messdaten
- Bericht GEOTEST 89099 vom 15.11.1990: Schüpfen, Versuchsstrecke SBB. Fotodokumentation
- Bericht GEOTEST 89099 vom 25.4.1992: Schüpfen, Versuchsstrecke SBB. Untersuchungen Phase I
- Bericht GEOTEST 87043A vom 5.5.1990: Altschotter von Gleissanierungen der SBB. Probleme der Verwertung und der Entsorgung. Zusammenfassung der Abklärungen 1987 - 1989
- Bericht GEOTEST 90052 vom 26.2.1990: Schüpfen - Gsteig, Versuchsdamm. Geoelektrische Messungen
- Bericht GEOTEST 91212 vom 29.4.1992: Die Wiederverwertung und Entsorgung der Altschotter von Gleissanierungen
- Bericht GEOTEST 89099 vom 17.9.1992: Versuchsstrecke Schüpfen, Untersuchungen Phase II. Sitzung vom 16.10.1992
- Bericht GEOTEST 89099 vom 9.8.1994: Schüpfen, Versuchsstrecke SBB. Messperiode 1993/1994. Rohdaten
- Bericht GEOTEST 89099-.C vom 4. Mai 1995: Schüpfen, Versuchsstrecke SBB. Untersuchungen Phase II 1993 - 1995
- Bericht GEOTEST 89099.D vom 8. Februar 1996: Schüpfen, Versuchsstrecke SBB. Konzept für einen Freilandherbizidversuch mit Glyphosaten
- Bericht FAW vom 25.4.1992: Untersuchung über die Mobilität von Atrazin, Bromacil, Diuron und Glyphosaten in Kolonnen mit Bahnschotterunterbau
- Reglement SBB R 211.1, Unterbau und Schotter, Ausgabe 1997
- Bericht FAW vom 14.12.1994: Charakterisierung der Lysimeteranlagen der SBB-Versuchsanlage Schüpfen. Tracerversuch mit Kaliumbromid
- Bericht FAW vom Mai 1996 (Entwurf): Charakterisierung der Lysimeteranlagen der SBB-Versuchsanlage Schüpfen. Zweiter Tracer-Versuch mit Kaliumbromid

Anhang 1: SBB Versuchsstrecke Schüpfen Aufbau der Versuchsabschnitte



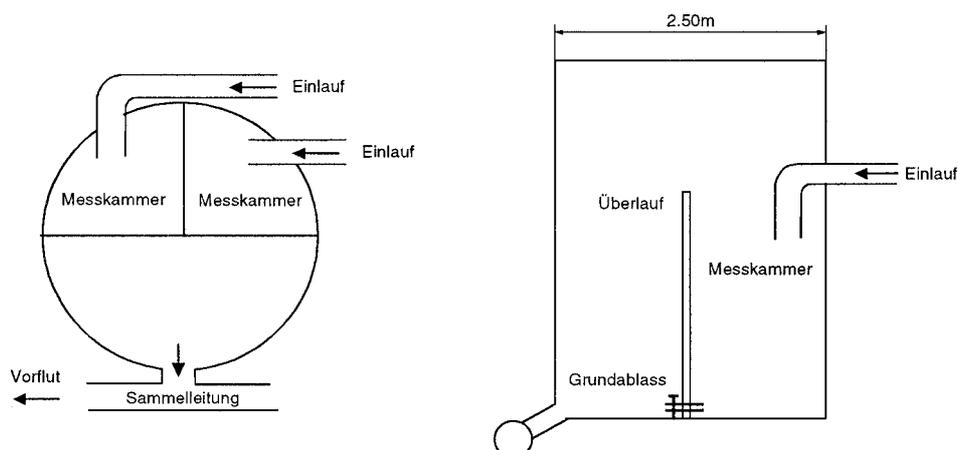
**Anhang 2: Materialeigenschaften des verwendeten Kiessands und der Elektroofenschlacke**

	<i>Kiessand</i>	<i>Elektroofenschlacke</i>
<b>Kornverteilung</b>		
Steine, Kies (Gew.-%)	43 - 65	84.0
Sand (Gew.-%)	20 - 43	12.7
Silt (Gew.-%)	1.1 - 2.2	2.2
Ton (Gew.-%)	0.2	0.1
Wassergehalt beim Einbau (%)	3.8	4.1
max. Wassergehalt (Sättigung, %)	—	9.2
Spezifisches Gewicht der Festsubstanz (g/cm <sup>3</sup> )	2.68	3.78
Raumgewicht feucht (g/cm <sup>3</sup> )	—	2.36
Raumgewicht trocken (g/cm <sup>3</sup> )	—	2.27
Porosität (%)	—	30.6
max. Verdichtung AASHO (t/m <sup>3</sup> )	1.97	2.29
opt. Wassergehalt (%)	8.6	9.0

**Anhang 3: Kenndaten der Planiematerialien**

	<i>Oberflächenbehandlung Abschnitt C</i>	<i>Heissmischtragschicht HMT (Abschnitt D)</i>	<i>Heissmischfundamentalschicht HMF (Abschnitt E)</i>
Schichtstärke (Mittel)	3 cm	7 cm	15 cm
Rohdichte		2.37 g/cm <sup>3</sup>	2.44 g/cm <sup>3</sup>
Porosität		4.5%	2.8%
Oberflächenbehandlung	Doppelte Oberflächenbehandlung Typ D2 gemäss SN 640 415		

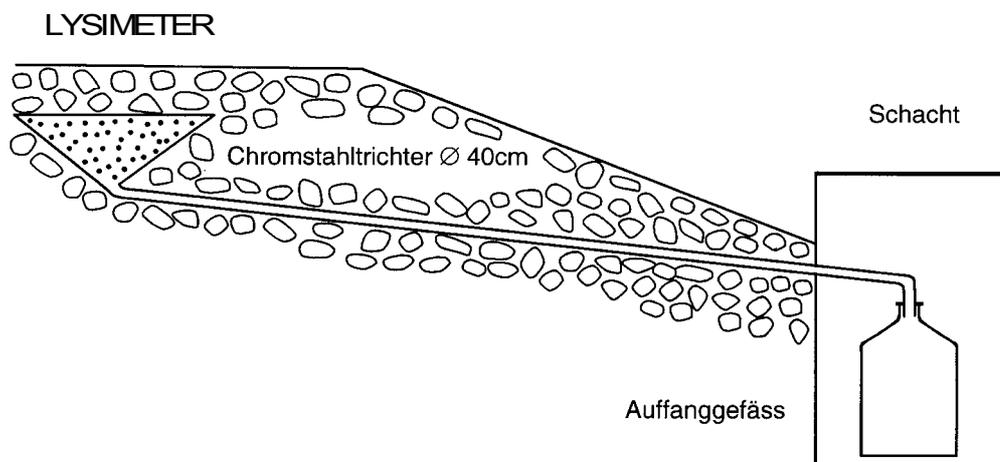
**Anhang 4: Schematische Skizze Messschacht**



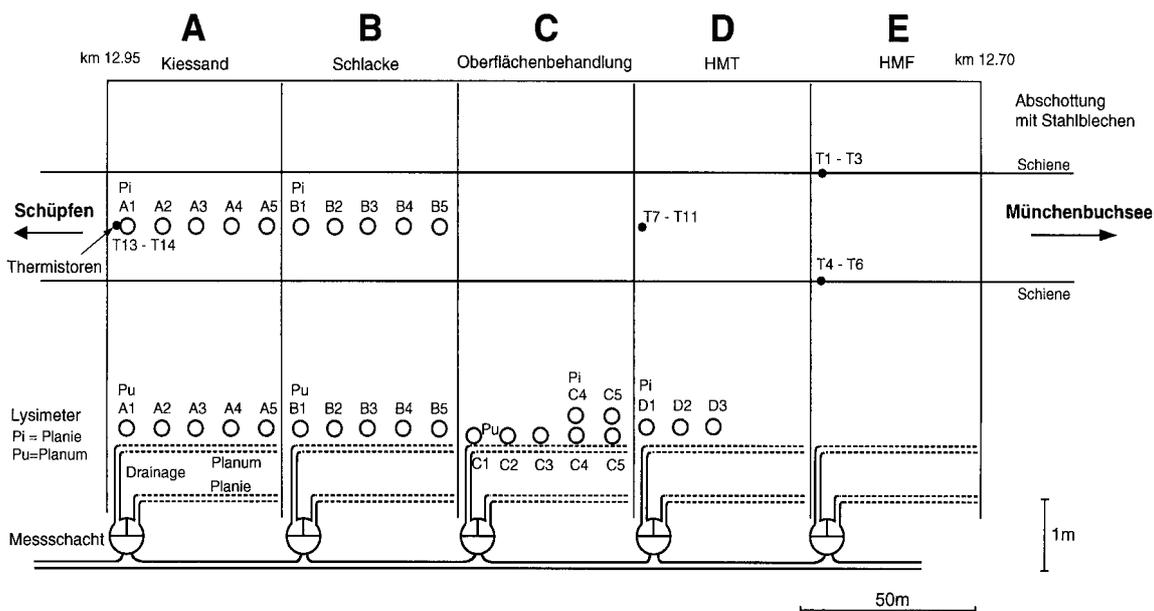
Anhang 5: Durch die Drainagen entwässerte Flächen und Volumina

Abschnitt	entwässerte Fläche (m <sup>2</sup> )		entwässerte Kubatur (m <sup>3</sup> )	
	Planum	Planie	Oberbau	Unterbau
A (Kiessand)	256.5	295.9	140.6	83.4
B (Schlacke)	255.8	299.3	85.3	78.0
C (Bitumen)	274.7	299.8	134.9	83.8
D (HMT)	255.8	292.2	230.0	76.7
E (HMF)	239.6	293.9	126.4	71.9

Anhang 6: Schematische Skizze Lysimeter



Anhang 7: Lageplan der Entwässerungssysteme



## Anhang 8: Witterungskennzahlen der Untersuchungsperiode

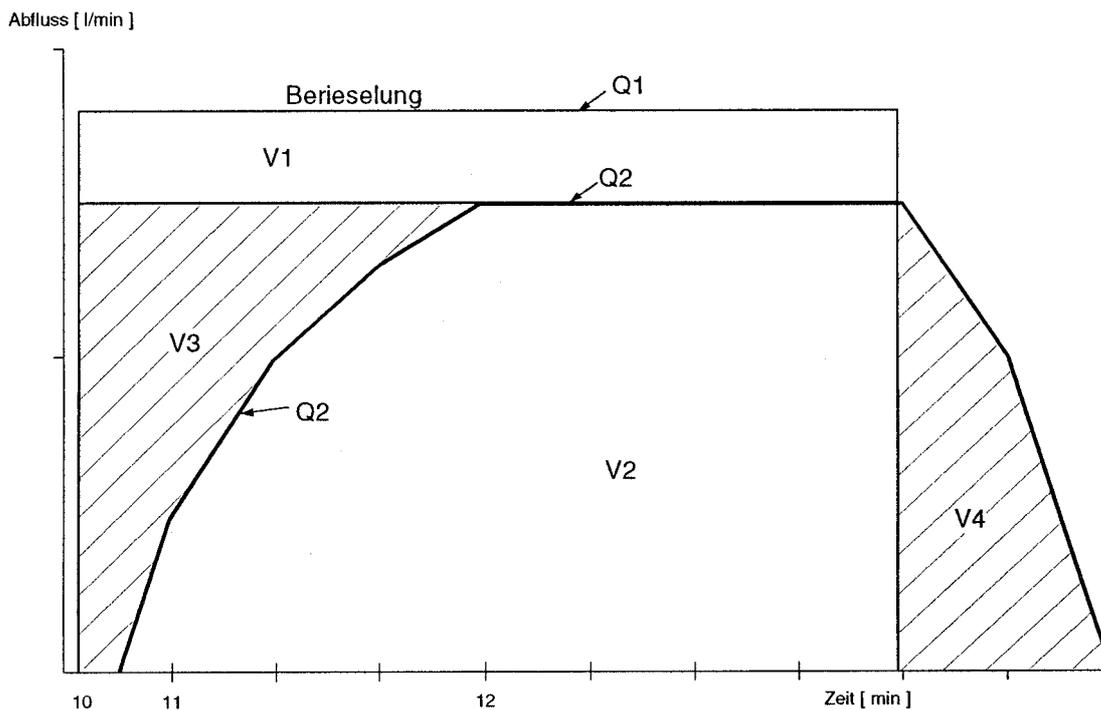
Monat	Niederschlagsmengen (mmNS)		NS in % des 60-jährigen Mittels	Temperatur Monatsmittel	Abweichung %	Monat	Niederschlagsmengen (mmNS)		NS in % des 60-jährigen Mittels	Temperatur Monatsmittel	Abweichung %
	Bern	Schüpfen					Bern	Bern			
Jan. 91	52	60	95	0.4	+1.9	Jan. 94	85		154	2.4	+3.9
Feb. 91	31		58	-1.6	-1.2	Feb. 94	30	38	57	2.3	+2.7
März 91	72	59	112	6.7	+3.1	März 94	59	37	93	8.9	+5.3
April 91	34	39	45	7.2	-0.1	April 94	118	73	155	6.7	-0.6
Mai 91	86	54	87	9.6	-2.3	Mai 94	178	97	182	13.2	+1.3
Juni 91	166		141	14.7	-0.5	Juni 94	81	64	69	16.5	+1.3
Juli 91	72		62	19.3	+2.3	Juli 94	38	37	33	21.0	+4.0
Aug. 91	11		9	19.3	+3.3	Aug. 94	108	107	94	19.5	+3.5
Sept. 91	94	93	99	16.0	+3.1	Sept. 94	154	145	162	13.5	+0.6
Okt. 91	57	46	76	8.0	+0.4	Okt. 94	95	100	126	9.4	+1.8
Nov. 91	135	140	190	3.6	+0.8	Nov. 94	40	32	56	7.2	+4.4
Dez. 91	53	62	82	-1.0	-0.5	Dez. 94	102	110	157	3.0	+3.5
<b>1991</b>	<b>868</b>		<b>87</b>	<b>8.5</b>	<b>-0.8</b>	<b>1994</b>	<b>1'087</b>		<b>109</b>	<b>10.3</b>	<b>+2.6</b>
Jan. 92	18	18	32	-2.2	-0.7	Jan. 95	149	176	271	-0.4	+1.1
Feb. 92	63	60	119	1.0	+1.4	Feb. 95	118	117	222	4.4	+4.8
März 92		87				März 95	92	98	144	3.5	-0.1
April 92	98	78	129	8.3	+1.0	April 95	56	22	74	8.7	+1.4
Mai 92	64	48	66	14.2	+2.3	Mai 95	189		193	12.5	+0.6
Juni 92	76		64	15.2	0	Juni 95	79	59	67	14.8	-0.4
Juli 92	119	114	102	18.4	+1.4	Juli 95	63	39	54	20.5	+3.5
Aug. 92	91	62	80	20.4	+4.4	Aug. 95	147	104	129	17.6	+1.6
Sept. 92	70		73	14.1	+1.2	Sept. 95	137	120	144	11.8	-1.1
Okt. 92	163		217	7.8	+0.2	Okt. 95	11	8	14	12.0	+4.4
Nov. 92	142		200	6.1	+3.3	Nov. 95	57	63	81	3.7	+0.9
Dez. 92	66	112	102	0.6	+1.1	Dez. 95	125	148	192	-0.1	+0.4
<b>1992</b>	<b>1'042</b>		<b>104</b>	<b>9.1</b>	<b>+1.4</b>	<b>1995</b>	<b>1'222</b>		<b>122</b>	<b>9.1</b>	<b>+1.4</b>
Jan. 93	19		35	2.4	+3.9	Jan. 96	20	15	37	0.1	+1.6
Feb. 93	8		14	-0.8	-0.4	Feb. 96	45	55	85	-0.5	-0.1
März 93	24		38	4.0	+0.4	März 96	34	24	54	3.2	-0.4
April 93	76		99	9.7	+2.4	April 96	51	17	67	9.0	+1.7
Mai 93	119		122	13.9	+2.0	Mai 96	127	(56)*	130	12.3	+0.4
Juni 93	141		119	16.5	+1.3	Juni 96	105	61	89	16.9	+1.7
Juli 93	158		136	17.1	+0.1	Juli 96	186	96	117	17.1	+0.1
Aug. 93	120		105	17.8	+1.8	Aug. 96	185	115	162	16.7	+0.7
Sept. 93	153		147	12.9	0.0	Sept. 96	48	36	50	10.9	-2.0
Okt. 93	95	96	127	7.7	+0.1	Okt. 96	102	78	136	9.3	+1.7
Nov. 93	27	12	37	1.9	+0.9	Nov. 96	147	151	207	4.3	+1.5
Dez. 93	124	121	190	3.6	+4.1	Dez. 96	53	44	82	-0.1	+0.4
<b>1993</b>	<b>1'041</b>		<b>104</b>	<b>8.9</b>	<b>+1.2</b>	<b>1996</b>	<b>1'052</b>	<b>(747)</b>	<b>105</b>	<b>8.3</b>	<b>+0.6</b>

\*) Revision Pluviograph

Anhang 9: Ergebnis der Beregnungsversuche

Abschnitt	Datum	Beregnung				Abfluss							
		Q1	V1	Dauer	Höhe	Drainage	Anlaufzeiten (min)		Abfluss		Abflusskoeffizient		
		(l/min)	(m <sup>3</sup> )	(h)	(mm)*		Beginn Abfluss	Abfluss stationär	V2 (m <sup>3</sup> )	Q2 (l/min)	V2/V1	Q2/Q1	
A Kiessand	10.10.90	59.5	25	7	28	Planum Planie	35 23	240 240	2.9 9.8	9.4 28.6	0.12 0.39	0.16 0.48	
B Schlacke	10.10.90	57	24	7	26.7	Planum Planie	27 —	220 —	13.1 —	36.6 —	0.55 —	0.64 —	
C Bitumen	9.10.9	29	7.0	4	7.7	Planum Planie	— 7	— 145	— 5.1	— 23.6	— 0.73	— 0.81	
D HMT	13.11.90	65	102	26	116	Planum Planie	— 7	— 365	— 74	— 48.2	— 0.71	— 0.74	
E HMF	13.11.90	40	62	26	70	Planum Planie	— 10	— 40	— 31	— 19.7	— 0.5	— 0.5	

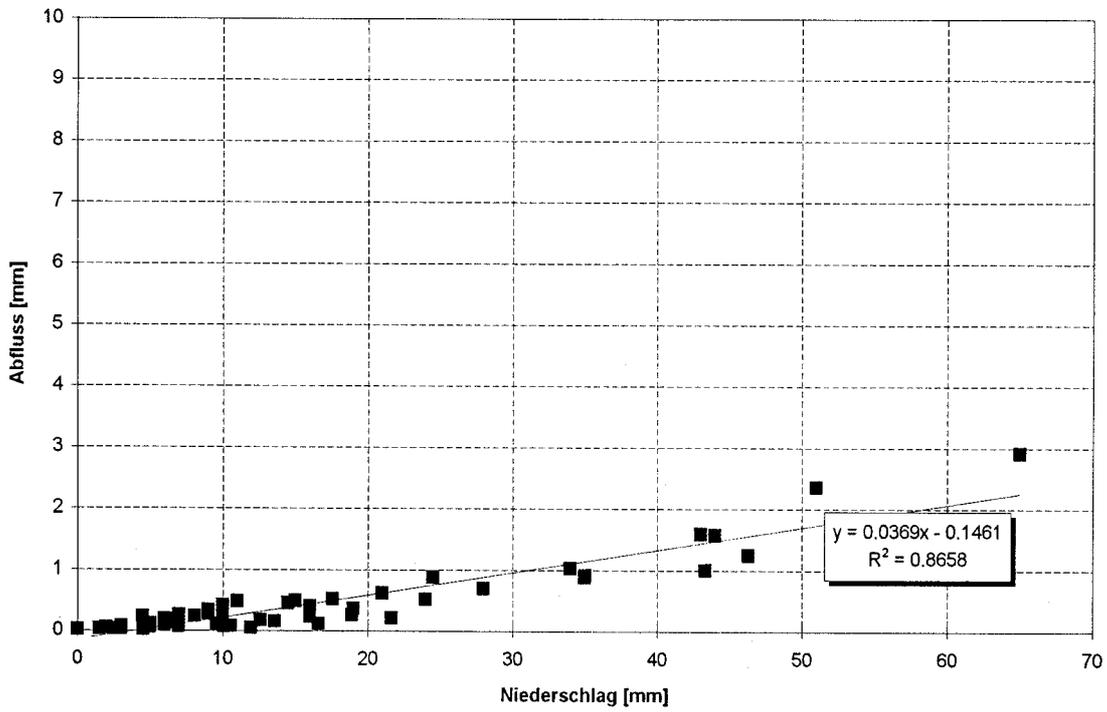
\* Bezogen auf eine Fläche von ca. 85 m<sup>2</sup>(= 1/3 Versuchsabschnitt)



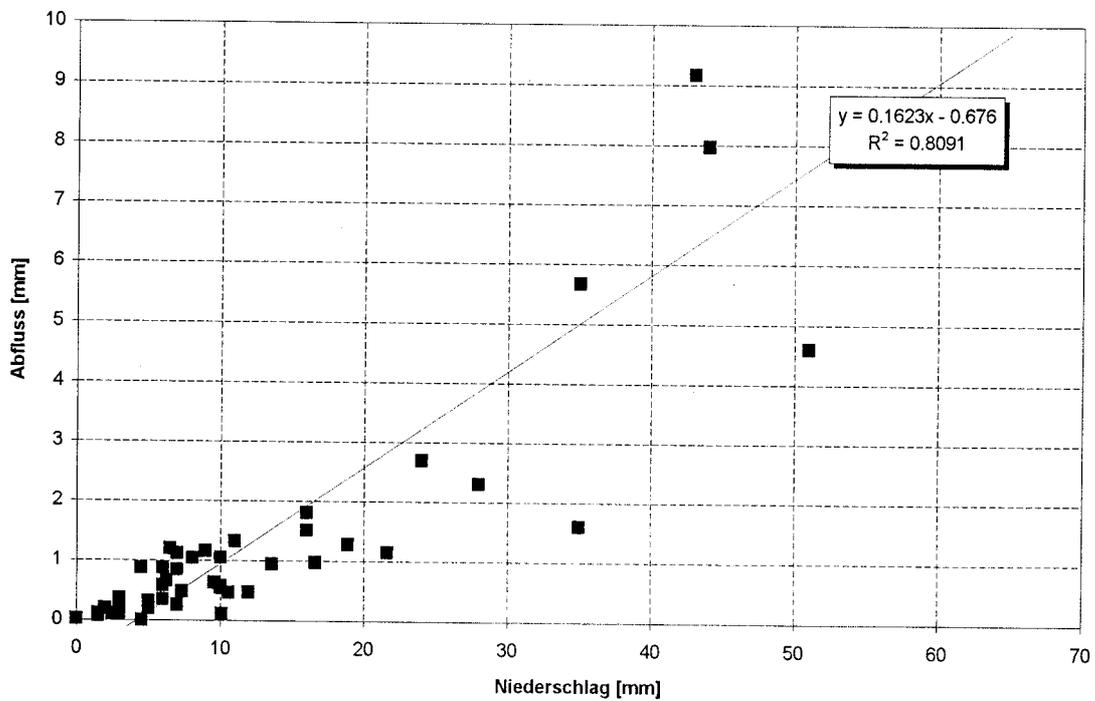
Legende:

- Q<sub>1</sub> = Beregnung in l/min
- Q<sub>2</sub> = Abfluss in l/min
- V<sub>1</sub> = Wassermenge Beregnung
- V<sub>2</sub> = Wassermenge Abfluss
- V<sub>3</sub> = Wassermenge Auffüllung Speicher
- V<sub>4</sub> = Wassermenge Teilentleerung Speicher

Anhang 10: Abfluss im Abschnitt APlanum (Drainage) in Abhängigkeit der Niederschlags

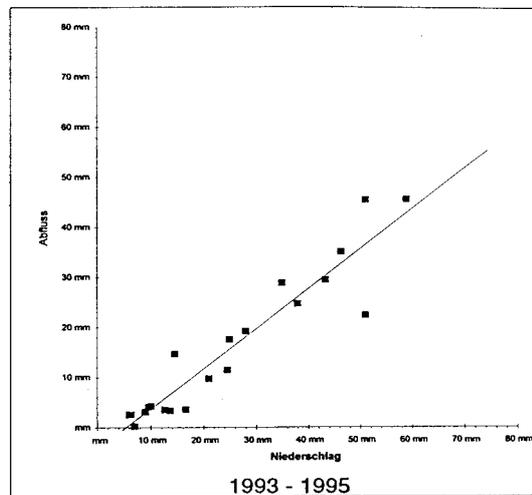
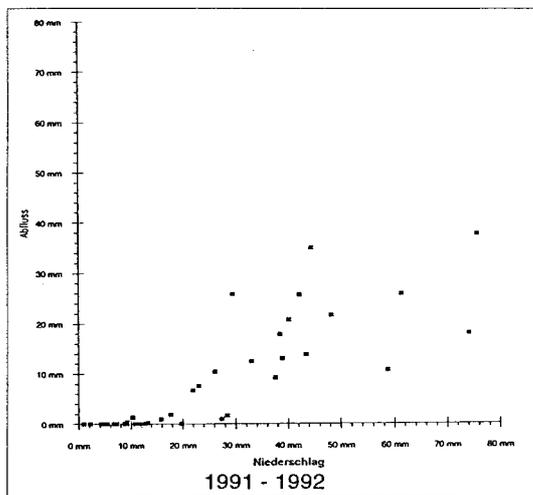


Anhang 11: Abfluss im Abschnitt BPlanum (Drainage) in Abhängigkeit des Niederschlags

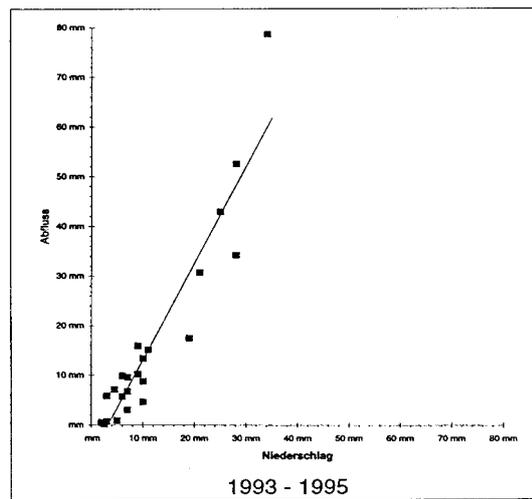
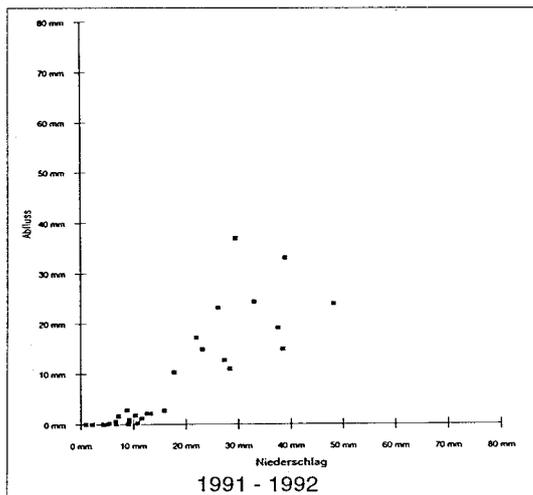


Anhang 12: Lysimeter: Niederschlagshöhen und Abfluss im Vergleich

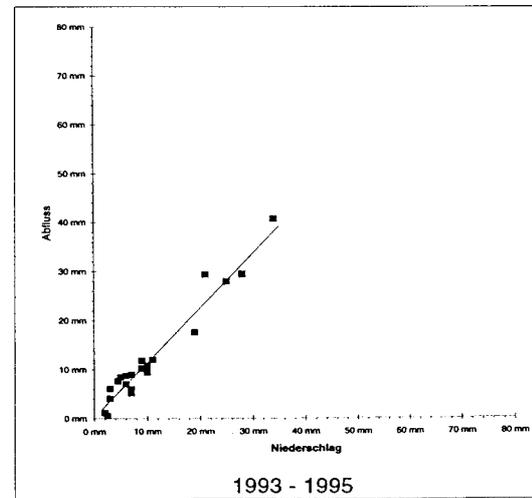
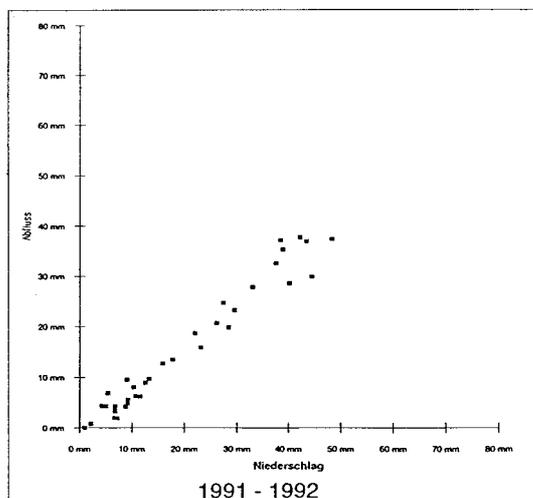
Abschnitt A (Kiessand) Planum, Lysimeter 1



Abschnitt B (Elektrofenschlacke) Planum, Lysimeter 2



Abschnitt D (HMT) Planie, Lysimeter 1



Anhang 13: Eluattest mit Kiessand und Elektroofenschlacke.  
Mittelwerte aus 24- und 48-Stunden-Messungen. Angabe in mg/l

<i>Substanz</i>	<i>Kiessand</i>	<i>EO-Schlacke</i>	<i>Anforderungen TVA an Inertstoff</i>
Ammonium	n.n.	n.n.	0.5
Nitrit	n.n.	<b>0.128</b>	0.1
Phosphat	0.04	0.08	1
DOC	0.7	0.9	20
Kohlenwasserstoff	n.n.	n.n.	0.01
Arsen	n.n.	n.n.	0.01
Blei	n.n.	n.n.	0.1
Cadmium	n.n.	0.002	0.01
Chrom (gesamt)	0.006	n.n.	0.2
Kupfer	n.n.	n.n.	0.2
Nickel	0.02	0.05	0.2
Quecksilber	n.n.	n.n.	0.005
Zink	0.07	<b>1.3</b>	1.0

Anhang 14: Metallgehalte in Kiessand und Elektroofenschlacke. Angabe in mg/kg

<i>Metall</i>	<i>Kiessand</i>	<i>EO-Schlacke</i>	<i>Richtwert TVA (Inertstoff)</i>
Blei	7.6	230	500
Cadmium	0.27	2.2	10
Kupfer	10	230	500
Nickel	27	123	500
Quecksilber	0.025	0.038	2
Zink	180	<b>1500</b>	1000

Anhang 15: Pflanzennährstoffe und Chlorid im Drainagewasser. Die fettgedruckten Zahlen überschreiten die Anforderungen der Verordnung über Abwassereinleitungen. Angaben in mg/l

	Datum	Abschnitt A Kiessand Planum	Abschnitt B EO-Schlacke Planum	Abschnitt C Bitumen Planie	Abschnitt D HMT Planie	Abschnitt E HMF Planie	An- forderungen VABw
<b>Chlorid</b>	4.10.90	-	25	0.7	< 0.5	< 0.5	mögl. niedrig
	29.10.90	1.9	26	0.5	0.9	< 0.5	
	21.11.90	1.6	18	0.5	-	< 0.5	
	18.10.91	2.5	14	14	-	-	
	12.4.94	0.7	1.5	-0.5	-0.5		
	9.2.95	0.7	2.4				
	8.8.95	2.6	3.8	0.97	-0.5	-0.5	
	22.8.96	1.3					
	12.12.97	< 0.5			< 0.5		
<b>Sulfat</b>	4.10.90	-	6.2	6.5	8.4	6.6	mögl. niedrig
	29.10.90	19	4	10	17	10	
	21.11.90	14	3.3	10	-	10	
	18.10.91	14	3.3	10	-	10	
	12.4.94						
	9.2.95						
	8.8.95						
	22.8.96						
	12.12.97	23			11		
<b>Phosphor</b>	4.10.90	-	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3
	29.10.90	< 0.01	< 0.01	0.04	< 0.01	< 0.01	
	21.11.90	< 0.01	< 0.01	< 0.01	-	< 0.01	
	18.10.91	0.02	< 0.01	0.03	-	-	
	12.4.94	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05		
	9.2.95	-0.05	-0.05				
	8.8.95	0.07	-0.05	0.06	-0.05	-0.05	
	22.8.96	< 0.05					
	12.12.97	< 0.05			< 0.05		
<b>Ammonium</b>	4.10.90	-	0.06	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mögl. niedrig
	29.10.90	2.9	0.02	0.05	0.04	0.04	
	21.11.90	1.2	< 0.01	< 0.01	-	< 0.01	
	18.10.91	0.06	0.02	< 0.01	-	-	
	12.4.94	0.06	0.03	0.02	0.05		
	9.2.95	0.04	-0.01				
	8.8.95	-0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	
	22.8.96	0.020					
	12.12.97	0.14			< 0.01		
<b>Nitrit</b>	4.10.90	-	<b>1.1</b>	0.06	0.07	0.08	1
	29.10.90	0.225	0.18	0.02	0.035	0.02	
	21.11.90	<b>1.6</b>	0.09	< 0.005	-	< 0.005	
	18.10.91	0.082	0.73	< 0.005	-	-	
	12.4.94	0.68	0.13	0.008	0.012		
	9.2.95	0.20	0.11				
	8.8.95	0.18	0.59	0.16	0.16	0.19	
	22.8.96	0.643					
	12.12.97	0.76			< 0.005		
<b>Nitrat</b>	4.10.90	-	1.5	0.9	1.3	1.1	mögl. niedrig
	29.10.90	5.8	3.8	1.5	2.9	1.5	
	21.11.90	3.5	2.6	1.2	-	1	
	18.10.91	18	5.1	6.5	-	-	
	12.4.94	3.9	4.4	4.8	5.0		
	9.2.95	5.2	3.1				
	8.8.95	10	9.6	12	8.2	9.7	
	22.8.96	13					
	12.12.97	7.4			6.2		

VABw. Verordnung über Abwassereinleitungen, Anforderungen an Einleitungen in ein Gewässer  
 < = unter Nachweisgrenze

\*\* Gesamtchrom

## Anhang 16: Schwermetallgehalte im Drainagewasser. Angaben in mg/l

	Datum	Abschnitt A Kiessand Planum	Abschnitt B EO-Schlacke Planum	Abschnitt C Bitumen Planie	Abschnitt D HMT Planie	Abschnitt E HMF Planie	An- forderungen VABw
<b>Arsen</b>	21.11.90	< 0.001	< 0.001	< 0.001	-	< 0.001	0.1
<b>Blei</b>	4.10.90	-	0.062	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.5
	29.10.90	< 0.001	0.33	0.01	< 0.001	0.008	
	21.11.90	< 0.001	0.23	0.002	-	0.009	
	18.10.91	< 0.001	< 0.001	< 0.001	-	-	
	12.4.94	- 0.005	- 0.005	0.008	0.007		
	9.2.95	- 0.005	- 0.005				
	8.8.95	- 0.005	- 0.005	- 0.005	- 0.005	- 0.005	
	22.8.96	< 0.005					
<b>Cadmium</b>	4.10.90	-	< 0.0001	< 0.001	< 0.0001	< 0.0001	0.1
	29.10.90	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	
	21.11.90	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	-	< 0.0001	
	12.4.94	- 0.001	- 0.001	- 0.001	- 0.001		
	9.2.95	- 0.001	- 0.001				
	8.8.95	- 0.001	- 0.001	- 0.001	- 0.001	- 0.001	
	22.8.96	< 0.001					
<b>Chrom**</b>	4.10.90	-	0.05	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.1*
	29.10.90	0.013	0.071	0.001	0.001	< 0.001	
	21.11.90	0.02	0.04	< 0.001	-	< 0.001	
	18.10.91	0.007	0.063	0.001	-	-	
	12.4.94	- 0.005	0.054	- 0.005	- 0.005		
	9.2.95	- 0.005	0.040				
	8.8.95	0.006	0.055	- 0.005	- 0.005	- 0.005	
	22.8.96	0.006					
<b>Kupfer</b>	4.10.90	-	0.03	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.5
	29.10.90	0.03	0.025	< 0.005	< 0.005	< 0.005	
	21.11.90	0.03	0.02	0.005	-	< 0.005	
	18.10.91	0.03	0.02	0.04	-	-	
	12.4.94	- 0.010	- 0.010	0.026	0.048		
	9.2.95	- 0.010	- 0.010				
	8.8.95	0.018	- 0.010	0.014	- 0.010	0.011	
	22.8.96	< 0.010					
	12.12.97	0.012			< 0.010		
<b>Nickel</b>	4.10.90	-	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2
	29.10.90	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	
	21.11.90	< 0.01	< 0.01	< 0.01	-	< 0.01	
	12.4.94						
	9.2.95						
	8.8.95						
	22.8.96						
<b>Zink</b>	4.10.90	-	0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2
	29.10.90	< 0.01	0.16	0.04	< 0.01	0.02	
	21.11.90	< 0.01	0.1	0.04	-	< 0.01	
	18.10.91	0.15	0.01	0.10			
	12.4.94	- 0.050	- 0.050	- 0.50	- 0.050		
	9.2.95	- 0.050	- 0.050				
	8.8.95	0.080	0.090	- 0.050	- 0.050	0.050	
	22.8.96	< 0.050					

VABw: Verordnung über Abwassereinleitungen, Anforderungen an Einleitungen in ein Gewässer

&lt; = unter Nachweisgrenze

\* für Cr-VI

\*\* Gesamtchrom

Anhang 17: Allgemeine Belastungsparameter und Schadstoffe im Drainagewasser. Die fettgedruckten Zahlen überschreiten die Anforderungen der Verordnung über Abwassereinleitungen. Angaben in mg/l

	Datum	Abschnitt A Kiessand Planum	Abschnitt B EO-Schlacke Planum	Abschnitt C Bitumen Planie	Abschnitt D HMT Planie	Abschnitt E HMF Planie	An- forderungen VABw
<b>DOC mg/l</b>	4.10.90	-	15	0.9	0.8	1.1	10/15
	29.10.90	<b>17</b>	10	1.5	1.1	1.1	
	21.11.90	14	11	0.8	-	0.8	
	18.10.91	3.5	2.3	2.1	-	-	
	12.4.94	1.2	0.74	0.83	0.62		
	9.2.95	1.7	1.1				
	8.8.95	5.0	1.9	3.1	2.2	2.0	
	22.8.96	2.0					
	12.12.97	1.8			0.89		
<b>AOX µg/l</b>	4.10.90	-	15	15	7	3.3	kantonal
	29.10.90	40	8.2	23	10	6.6	
	12.4.94	4.6	1.8	1.1	1.5		
	9.2.95	4.8	3.1				
	8.8.95	41	7.7	3.5	1.4	2.8	
	22.8.96	7.1					
	12.12.97	14			5.3		
<b>eLeitf. µS/cm</b>	29.10.90	1405	3300	142	181	160	6.5-8.5
	21.11.90	1732	3350	133	-	162	
	18.10.91	304	254	204	-	-	
	12.4.94	145	205	148	164		
	9.2.95	136	349				
	8.8.95	335	198	202	163	170	
	22.8.96	216					
	12.12.97	151			488		
<b>pH-Wert</b>	29.10.90	<b>11.79</b>	<b>12.19</b>	<b>9.96</b>	8.29	8.22	6.5-8.5*
	21.11.90	<b>11.95</b>	<b>12.27</b>	<b>8.9</b>	-	8.18	
	18.10.91	7.96	8.91	7.89	-	-	
	12.4.94	9.55	10.9	8.31	8.01		
	9.2.95	9.02	11.2				
	8.8.95	7.87	10.4	7.95	8.00	8.06	
	22.8.96	8.37					
	12.12.97	9.03			8.28		
<b>KW mg/l</b>	21.11.90	< 0.05	< 0.04	< 0.04	-	0.12	10
	18.10.91	< 0.05	< 0.04	< 0.04	-	0.12	
	12.4.94	0.02	0.04	0.03	0.02		
	9.2.95	- 0.02	- 0.02				
	8.8.95	- 0.02	- 0.02	- 0.02	- 0.02	0.02	
	22.8.96	< 0.02					
	12.12.97	< 0.02			< 0.02		
<b>Atrazin µg/l</b>	21.11.90	-	< 0.05	< 0.05	-	< 0.05	
	12.4.94	-	-	-	-		
	9.2.95	-					
	8.8.95						
	22.8.96						

VABw: Verordnung über Abwassereinleitungen, Anforderungen an Einleitungen in ein Gewässer

\* bei genügend Wasserführung des Vorfluters bis pH9

Anhang 18: Ganglinien der Gleiskörper-Temperaturen in den Abschnitten A, D und E der Wintermonate 1996 / 1997

