

Olaf Andler

Experimentelle Untersuchung der Abflußbildung mit natürlichen Tracern im
Einzugsgebiet der Brachtpe (Sauerland,NRW)



Abbildung 1.1: Blick auf das Einzugsgebiet der „Brachtpe“

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg i. Br., Februar 2002

Albert-Ludwigs-Universität-Freiburg i. Br.
Institut für Hydrologie

Olaf Andler

Experimentelle Untersuchung der Abflußbildung mit natürlichen Tracern im
Einzugsgebiet der Brachtpe (Sauerland,NRW)

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Koreferent:: Dr. Stefan Uhlenbrook

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg i. Br., Februar 2002

„Hoffnung ist der Regenbogen über dem herabstürzenden Bach des Lebens.“

Friedrich Nietzsche

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Zusammenfassung

Summary

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2	Untersuchungsansatz und angewandte Methodik	3
1.3	Betreuung	5
2	Grundlagen der Abflußbildung	6
2.1	Einführung	6
2.2	Prozesse der Abflußbildung	7
2.3	Fazit	10
3	Das Untersuchungsgebiet	11
3.1	Geographische Lage	11
3.2	Landschaftsgeschichte	11
3.3	Geologie des Einzugsgebietes	13
3.4	Ausbildung von Erzlagerstätten als geologische Besonderheit im EZG	13
3.5	Pedologie des Einzugsgebietes	14
3.6	Beschreibung und Bedeutung der Böden	15
3.6.1	Soliflukktiv entstanden Fließerden	15
3.6.2	Braunerden	16
3.6.3	Pseudogleye	17
3.6.4	Gleye und Naßgleye	18
3.7	Hydrogeologie	18
3.7.1	Grundwasserführung in Festgesteinen	18
3.7.2	Grundwasserführung in Lockergesteinen	19
3.7.3	Quellen	19
3.7.4	Einfluß der Vegetation auf den Trockenwetterabfluß	19
3.8	Hydroklimatische Verhältnisse	20
3.9	Fazit	21

4	Naturräumliche Beschreibung des Einzugsgebietes und seiner Teilräume	22
4.1	Das Einzugsgebiet der Brachtpe	22
4.2	Die Landnutzung	24
4.3	Beschreibung der Teilräume	24
4.3.1	Der Teilraum Hähnen	26
4.3.2	Der Teilraum Tilkhausen	28
4.3.3	Der Teilraum Silberkuhle	30
4.3.4	Der Teilraum Wälder	33
4.3.5	Zusammenfassung der Differenzierung der Teilräume	35
5	Experimenteller Teil	37
5.1	Aufbau des Messnetzes	37
5.1.1	Kurzbeschreibung der automatischen Probeentnahmeggeräte	39
5.1.2	Der Untersuchungszeitraum	40
6	Analysierte Wasserinhaltsstoffe und angewandte Methodik	42
6.1	Analysierte natürliche Tracer	42
6.1.1	Gelöstes Silikat	42
6.1.2	Hauptionen	43
6.2	Methodik der Ganglinienseparation	45
6.2.1	Methodik der Zweikomponententrennung mit natürlichen Tracern	45
6.3	Analytische Untersuchungsmethoden	46
7	Ergebnisse und Diskussion der experimentell gewonnenen Felddaten	49
7.1	Stichtagsbeprobung zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeiten und Abflußanteilen	49
7.2	Analyse des Starkregenereignisses am 19.7.2001	52
7.2.1	Analyse der Wasserstandsganglinie	52
7.2.2	Die Reaktion der Leitfähigkeiten	55
7.2.3	Die Reaktion der Silikatgehalte	57
7.2.4	Die Reaktionen der Kaliumgehalte	60
7.2.5	Die Reaktion der übrigen Hauptionen	61
7.2.6	Ergebnisse der Abflußkomponententrennung	64

7.2.7	Vergleich von Silikat- und O^{18} - Abflußkomponententrennung am EZG-Auslaß	64
7.2.8	Vergleich der Direktabflüsse der Teilräume	66
7.2.9	Die Ergebnisse der Tensiometermessungen für das Starkregenereignis am 19.7.2001	67
7.2.10	Beschreibung der Hangsegmente	68
7.2.11	Vergleich der Saugspannungsänderungen	71
7.2.12	Fazit	72
7.3	Analyse des Langzeitregens im Zeitraum zwischen 3.8.2001 und 11.8.2001	75
7.3.1	Vergleich der Wasserstände im Zeitraum des Langzeitregens	75
7.3.2	Die Reaktion der Leitfähigkeiten im Zeitraum des Langzeitregens	77
7.3.3	Die Reaktion der Silikatgehalte im Zeitraum des Langzeitregens	79
7.3.4	Die Reaktion der Kaliumgehalte im Zeitraum des Langzeitregens	81
7.3.5	Das Verhalten der übrigen Haptionen	83
7.3.6	Vergleich der protentualen Direktabflüsse	86
7.3.7	Vergleich der Saugspannungen	89
7.3.8	Zusammenhang zwischen Teilraum- und Gesamtgebietsreaktion	92
7.3.9	Fazit	93
8	Schlußfolgerungen	94
9	Literaturverzeichnis	100

Abbildungsverzeichnis:

1.1	Blick auf das EZG der Brachtpe	Titel
-----	--------------------------------	-------

1.2	Vorgehensweise bei der Erstellung der Diplomarbeit	5
2.1	Horton'scher Overlandflow	7
2.2	Sättigungsflächenabfluß	8
3.1	Geologie des Einzugsgebietes	12
3.2	Pedologie des Einzugsgebietes	14
4.1	Höhenverteilung und Teilraumbezeichnung	22
4.2	Landnutzung und Teilraumbezeichnung	23
4.3	Teilraum Hähnen mit Skilift	26
4.4	Abwassereinleitung	26
4.5	Teilraum Silberkuhle	30
4.6	Quellaustritt (Mundloch)	30
4.7	Helokrenenbereich und Sättigungsflächen	33
5.1	Automatisches Abflußentnahmegerät	37
5.2	Klimastation mit Niederschlags APEG	37
5.3	Standorte der APEG's und Niederschlagssonden	37
5.4	Der Untersuchungszeitraum	40
7.1	maximale und dominante Fließgeschwindigkeiten	50
7.2	Abflußmengen am 13.8.2001	51
7.3	Regression zwischen Flächen- und Abflußanteilen der Teilräume	51
7.4	Vergleich der Wasserstände am 19.7.2001	52
7.5	Verlauf der Leitfähigkeiten am 19.7.2001	55
7.6	Silikatgehalte während des Starkregens am 19.7.2001	57
7.7	Kaliumgehalte während des Starkregens am 19.7.2001	60
7.8	Berechnete Direktabflußanteile am EZG-Auslaß am 19.7.2001	64
7.9	Berechnete Direktabflußanteile an den Teilraumauslässen und dem Gesamtgebietsauslaß	66
7.10	Messhang mit Tensiometermeßfeldern	67
7.11	Saugspannungsveränderungen während des Starkregens am 19.7.2001	70
7.12	Wasserstandsvergleich im Zeitraum 3.8.2001 – 6.8.2001	75
7.13	Die Reaktion der Leitfähigkeiten im Zeitraum 3.8.2001 – 6.8.2001	77
7.14	Silikatkonzentrationen im Zeitraum 3.8.2001 – 6.8.2001	79
7.15	Kaliumkonzentrationen im Zeitraum 3.8.2001 – 6.8.2001	81
7.16	Sulfatkonzentrationen im Zeitraum 3.8.2001 – 6.8.2001	83
7.17	Prozentuale Direktabflüsse während des Niederschlages am 5.8.2001 auf Silikatbasis	86
7.18	Vergleich der Silikatgehalte unter verschiedenen hydrologischen Situationen	88
7.19	Vergleich der Saugspannungen im Zeitraum 3.8.2001- 11.8.2001	89
7.20	Vergleich der Saugspannungen im Zeitraum des Starkregens (19.7.2001)	89
7.21	Vergleich der kumulierten Silikatgehalte mit der Gesamtreaktion des EZG für das Niederschlagsereignis am 19.7.2001	92
8.1	Graphische Darstellung der dominanten Abflußbildungsprozesse im Einzugsgebiet	99

Tabellenverzeichnis:

3.1	Klimaelemente	20
-----	---------------	----

4.1	Einzugsgebietsparameter	23
4.2	Teilräume mit Flächenangaben	24
4.3	Waldanteile	24
4.4	Differenzierung der Teilräume	36
5.1	Parameteraufnahme während der Meßkampagne	38
7.1	Zeitdifferenzen zwischen Niederschlags- und Abflußpeaks	53
7.2	Vergleich der Kaliumgehalte	82
7.3	Infiltrationsraten und hydraulische Leitfähigkeiten bestimmende Faktoren	93

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die Abflußbildungsprozesse in einem kleinen Einzugsgebiet im Sauerland qualitativ zu beschreiben und ansatzweise zu quantifizieren. Im Vordergrund stand dabei die Frage, welche Prozesse den Abfluß des Einzugsgebietes dominieren. Neben der Identifizierung der vorherrschenden Abflußbildungsprozesse, sollte außerdem eine Unterteilung des Gesamtgebietes, in insgesamt vier Teileinzugsgebiete, Einblicke in die unterschiedlichen Reaktionen der Teilräume geben und Zusammenhänge mit den naturräumlichen Ausstattungen und Heterogenitäten der Teileinzugsgebiete aufzeigen. Dazu wurde eine kontinuierliche Messung der Wasserstände und der Ionengehalte am Gebietsauslaß des Gesamtgebietes sowie an den zuvor ausgewiesenen Teilräumen vorgenommen. Das Verhalten der natürlichen Tracer O^{18} , Silikat und der Haptionen wurde durch Beprobung des Abflusses während mehrerer im Untersuchungszeitraum aufgetretener Niederschlagsereignisse konvektiver und advektiver Entstehung analysiert und dokumentiert. Für die Abflußganglinien wurden mit Hilfe der Tracer Silikat und Deuterium Zweikomponententrennungen vorgenommen.

Zusätzlich wurde versucht, durch Beobachtungen während Feldbegehungen und der hydrochemischen Aufnahme der Gerinnelängsschnitte auf die dominierenden Abfussbildungsprozesse zu schließen und die hydrochemischen Komponenten des Abflusses ihren Herkunftsräumen zuzuordnen. Dabei hat sich gezeigt, daß pedologische und anthropogen verursachte Besonderheiten starke Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Abflusses haben, aber auch Landnutzung und vorherrschende Vegetation sich auf die Abflussbildung auswirken.

Aus den Ergebnissen der Zweikomponententrennungen konnte ein hoher Anteil an Ereigniswasser von bis zu 40 % in den Hochwasserabflüssen nachgewiesen werden, der hauptsächlich im Bereich von Sättigungsflächen und versiegelten Flächen generiert wurde. Die beobachteten Konzentrationsänderungen der geochemischen Tracer im Abfluß unterstützen diese Feststellung. In den Hochwasserabflüssen ließen die geogenen Tracer starke Verdünnungseffekte erkennen, während bei den aus oberflächennahen Schichten entstammenden Tracern Nitrat und Kalium Konzentrationsanreicherungen festgestellt wurden. Desweiteren konnte beobachtet werden, daß zwischen der Höhe der Direktabflüsse und der Gebietsvorfeuchte ein enger Zusammenhang besteht. Nach längeren Trockenphasen waren die Direktabflußanteile höher, als nach bereits erfolgter Auffeuchtung der Böden durch Vorregenereignisse.

Daraus kann auf den Sättigungsoberflächenabfluß als schnellen Abflußbildungsprozeß bei Hochwasser geschlossen werden. Geländebeobachtungen zeigten, daß Sättigungsflächen nicht nur im Bereich hoher Grundwasserstände entlang der Talauen, sondern auch pedologisch bedingt im Hangbereich zu finden sind. Hierzu zählen zum einen die waldbestandenen, im Bereich von vergleyten Böden befindlichen, Quellhorizonte, aber auch auf Pseudogleyen gelegene Nasswiesenbereiche. Im Untersuchungszeitraum ließen sie auf großen Bereichen eine Sättigung bis zur Geländeoberfläche erkennen.

Da der Hochwasserabfluß nicht ausschließlich durch oberflächennahe Abflußkomponenten bzw. Ereigniswasser erklärt werden kann (ca. 60% Anteil an indirekten Abflußkomponenten), müssen

fast ebenso schnell wirkende Abflußbildungsprozesse beteiligt sein, welche Wasser mit höheren Mineralgehalten aus den tieferen Boden- und Gesteinsschichten bzw. Vorereigniswasser mobilisieren. Als indirekte Herkunftsräume können überwiegend die Hochlagen (0°-6°) und Fließerden der Hanglagen angesehen werden, die vermutlich über Druckübertragungsmechanismen an der Hochwasserbildung beteiligt sind, hauptsächlich aber Interflow generieren, der durch Tensiometermessungen nachgewiesen werden konnte. Versiegelte Flächen (ca 9% der Gesamtfläche) führen zu ausgeprägtem Hortonschen Overlandflow, der ebenfalls für den raschen Wasseranstieg verantwortlich ist.

Eine Besonderheit stellt der Teilraum Silberkuhle dar, der infolge bergbaulicher Aktivitäten eine starke anthropogene Überformung erfahren hat. Das hier im Bereich ehemaliger Stollengänge austretende stark mineralisierte Wasser zeigt bei Niederschlägen einen raschen Anstieg der Schüttung. Hier erfolgt eine Vermischung aus Preevent- und Eventkomponenten, die durch Klüfte und Makroporen auf den Hochlagen infiltrieren und dem austretenden Grundwasser beigemischt werden. Hydrologisch für die Abflußbildung relevant erwiesen sich auch Drainagen im Bereich eines Skiliftes, sowie Entwässerungsgräben im Bereich, der auf Pseudogleyen gelegenen, Wiesenflächen. Leicht retinierend wirkten sich zur Fischzucht angelegte Teichanlagen aus. Abwasser- und Sickerwasserzuleitungen führten während der Untersuchung zu teils hohen Ionengehalten, die sich auf die hydrochemische Interpretation erschwerend auswirkten.

Allgemein konnten aufgrund der unterschiedlichen Landnutzung die schnellsten Gebietsreaktionen im Bereich der Wiesenflächen festgestellt werden, während in den bewaldeten Regionen eine eher verzögerte Abflußreaktion erfolgte. Dennoch hat sich bei einem fast ausschließlich bewaldeten Teilraum (Wälder) herausgestellt, daß die im Unterlauf befindlichen, nicht bewaldeten, Sättigungsflächen durch ihre schnelle Direktabflussbildung die Gesamtreaktion des Teilraumes stark überformten.

Als Schlußfolgerung der vorliegenden Arbeit ergibt sich, daß schnelle Abflußkomponenten den Verlauf einer Hochwasserwelle im Einzugsgebiet dominieren. Generell konnte eine sehr schnelle Reaktion der Abflüsse auf den Niederschlagseintrag verzeichnet werden. Schwankungen der Niederschlagsintensitäten machten sich innerhalb von 1-2 Stunden im Abfluß bemerkbar. Neben der schnellen Abflußreaktion konnte auch ein schneller Grundwasseranstieg im Bereich der Talauen beobachtet werden, der auf Druckübertragungsprozesse schließen lässt und ebenfalls dazu führt, daß ausgedrücktes Vorereigniswasser mit zum Abfluß beiträgt.

Summary

The aim of this diploma thesis was to describe and to attempt a quantification of runoff generation processes in a small catchment area in the Sauerland region located in NW Germany. The main focus lies on evaluating which type of processes actually dominate the runoff behaviour of this mesoscaled catchment area. In addition, the total catchment area was further subdivided into four subcatchment zones. This was done in order to obtain an idea of the different hydrological reactions and to show the interrelation between the physiography and heterogeneity of the different subcatchment zones. For this purpose, the changing water level and the ionic content were continuously monitored at the outlets of the subcatchment zones as well as at the outlet of the entire catchment area. During the period of one month, the natural tracers O^{18} , silica and the mayor ions of both the runoff-water and the water of several precipitation events (advective as well as convective), were sampled automatically. Subsequently, the data collected were analysed and documented. With the two tracers Silica and Deuterium, the hydrograph was subdivided into different event- and pre-event runoff components.

Based on additional field observations and the monitoring of the hydrochemistry of several longitudinal sections along fluvial channels, an attempt was made to evaluate the origin of the runoff waters. Obviously, there is a relation between pedological and man-made features and the composition of the runoff waters. Likewise, the type of land usage and the dominating vegetation also influence the runoff generation.

The results of the two-component-separation showed that peak discharges are composed of up to 40% of surface-related runoff components, mainly generated in saturated or sealed areas. This is supported by the dilution of the other geochemical tracers measured.

Obviously, there is a relation between the amount of direct runoff components and the hydraulic conductivity of the participated soils, which mainly depends of the soil moisture. After dry periods higher amounts of direct components could be observed compared to situations, where the soil had superior antecedent moisture contents.

Therefore, saturation surface runoff can be considered as the dominating process during flooding events. Field observations show that the saturated areas not only are at locations of high groundwater level or river basins but are also related to the pedology at hillslope position. This includes spring horizons in areas with soils like bug and stagnogley but also wetlands on pseudogley soils. During the study period, one could observe that large parts of this areas were saturated to such an extent that surface runoff occurred.

As peak discharges cannot exclusively be explained with surface-related runoff components, other fast runoff mechanisms with high mineral content must be considered as well. A high mineral content can be explained by solution processes in the lower soil horizons and the underlying bedrock and is characteristic for pre-event water. Source areas are predominantly highlands (0° - 6° slope) and quicksoils in slope regions that presumably generate interflow and participate in the flood generation through piston flow mechanisms. This interflow was monitored with tensiometers that measure the soil moisture tension.

During the recorded flood events all the previously named parameters could be measured or observed. However, in some cases local and diffuse waste water made it difficult to establish an

unequivocal origin. In general, after rain events, a very fast reaction of the hydrographs was recorded. Variations of precipitation intensities progressed visibly within 1-2 hours in the hydrographs. Strong dilution effects of the geochemical tracers in the flood drainage could be recognised, while tracers like Nitrate and Potassium originating from the upper soil horizons showed concentration enrichments.

Sealed areas (ca. 9% of the entire catchment area) deliver Hortonian overland flow that also accounts for the fast rising water level. A particular case is the location 'Silberkuhle' where mining activities altered the natural runoff behaviour. The water that flows through the mining galleries is strongly mineralised and precipitation rapidly results in enhanced flow. Here, pre-event water mixes with event water components, that infiltrate the highlands and flow through fissures and macro pores and finally reach the groundwater. Furthermore, the area adjacent to a ski lift is also of hydrological relevance because of its man-made drainage system. Likewise, the drainage of grasslands lying on pseudogley soils will influence the runoff. By contrast, fish farming ponds are expected to cause some retention. In some cases, the addition of waste water resulted in elevated ion concentrations. This made it difficult to arrive at an interpretation of the hydrochemistry.

Generally, the areas with the fastest reactions could be correlated with grassland areas while forested areas show a delayed runoff reaction. However, one almost exclusively forested subcatchment zone showed that parts of the lower non-forested grassland reach are characterised by fast saturation surface runoff that largely influences the overall reaction of this subcatchment zone's hydrograph.

In conclusion, fast drainage components dominate the course of a flood wave. The reaction of the catchment area on rainfall events showed that there is only a slight time delay.

Beside the fast drainage reaction, also the groundwater in the area of the valley meadows rose fast. Therefore it can be concluded that pressure transfer processes press out pre-event water.

Key words

Direct runoff components, saturation flow, hydrograph separation, subcatchment, ionic content off runoff, natural tracers, hydraulic conductivity

1. Einleitung

Die Erforschung der Mechanismen der Abflußbildung hat in den letzten Jahren zahlreiche neue Erkenntnisse erfahren; die klassische Betrachtung ausgehend von der recht groben Einteilung in Basis- und Direktabfluß wird heute durch den Nachweis vieler sich aufsummierender Einzelprozesse differenziert. Heute kann davon ausgegangen werden, daß dem eigentlichen Direktabfluß lange eine zu große Bedeutung beigemessen wurde und das vielmehr schon vor dem Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet gespeichertes Wasser, meist durch Druckübertragungsmechanismen, den Verlauf der Hochwasserwelle nachhaltig beeinflusst. Diese Einzelprozesse aber zu separieren, die steuernden Eingangsgrößen in der Mikroskala (Bodenhorizont) auf Meso- und Makroskala (also auf das gesamte Einzugsgebiet) zu übertragen stellt weiterhin eine der großen hydrologischen Herausforderungen dar.

In dem Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Tracerhydrologisch gestützte Ausweisung und Modellierung von Abflußkomponenten“ wird, in Kooperation mit anderen Universitäten, am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg versucht, mittels Tracermethoden die physikalischen Prozesse der Abflußbildung in verschiedenen Einzugsgebieten Deutschlands zu erforschen, zu vergleichen und sowohl zeitlich als auch räumlich aufzulösen. Damit soll die Basis geschaffen werden für eine verbesserte prozeßorientierte Modellierung und für ein fundierteres Verständnis der Stoffdynamik und des Stoffhaushaltes.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Ziel dieser experimentellen Diplomarbeit war es, das Einzugsgebiet einer ersten hydrologischen Untersuchung zu unterziehen und mit Hilfe von verschiedenen hydrologischen Ansätzen die vorherrschenden Abflußbildungsprozesse herauszuarbeiten. Mittels Tracermethoden, die Informationen zu Fließwegen, Herkunftsräumen, Verweilzeiten und Abflußkomponenten liefern, sollte versucht werden zur Entschlüsselung der Abflussbildung in dem von der Universität Bochum betreuten Einzugsgebiet im Sauerland (NRW) beizutragen und somit die Basis für eine prozessorientierte Modellierung im Einzugsgebiet der Brachtpe bereitzustellen. Zur Verbesserung des Prozessverständnisses bei der Abflussbildung eignete sich die sogenannte Abflusskomponententrennungen bei Einzelereignissen sowie über längere Perioden. Hierbei wurde versucht die Abflussganglinie aufgrund des Gehaltes an natürlichen Tracern (Umweltisotope und geochemische Tracer) in einzelne Abflusskomponenten zu separieren.

Die Prozesse bei der Abflussbildung im Einzugsgebiet sind häufig ungewiss, obschon aktuelle Forschungsarbeiten zu einem besseren Verständnis führten und mir bei der Ausarbeitung eine große Hilfe waren. Gerade die Dynamik der verschiedenen Oberflächen-, Grund- und Bodenwasserspeicher bei der Bildung von schnellen Abflusskomponenten ist, speziell am Hang, von vielen naturräumlichen Faktoren (Pedologie, Hangneigung, Vorfeuchte, etc.) beeinflusst und normalerweise nicht auf einen einzelnen Bildungsprozeß zu reduzieren. Der heutige Wissenstand zeigt, daß Wasser, welches vor dem Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet gespeichert war, eine große Bedeutung für die Abflußbildung hat. Im dem von uns untersuchten, überwiegend landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet der Brachtpe wurde innerhalb des letzten Jahres ein Hangsegment ausgehend von der Universität Bochum intensiv instrumentiert (Klimastation und Tensiometermessungen), um Abflussbildungsprozesse am Hang entschlüsseln zu können. Die hieraus gewonnenen Daten haben sich bei der Ausarbeitung der Diplomarbeit, sowie dem Verständnis der hier dominierenden Abflußbildungsprozesse, als äußerst hilfreich erwiesen. Um die Prozesskenntnisse aus diesen mikroskaligen Versuchplot auf das gesamte Einzugsgebiet übertragen zu können, sind jedoch zusätzliche Erkenntnisse über die Gebietseigenschaften und die daraus resultierenden Niederschlags- Abflußreaktionen notwendig. Hierzu zählte die Separierung des EZG in seine einzelnen Teilräume, deren Bedeutung aufgrund unterschiedlicher Charakteristikas in Bezug auf Landnutzung, Geologie und Pedologie zu untersuchen, um so die wichtigsten Wasserherkunftsräume verifizieren zu können und ihre Beteiligung an der Abflußbildung unter verschiedenen hydrologischen Situationen zu quantifizieren.

Die Dynamik und Varianz des Abflusses sowie die physikalischen, hydrochemischen und isotopischen Eigenschaften des Wassers werden durch die physiographischen Gebietseigenschaften bestimmt. So werden die hydrochemischen Eigenschaften des Abflusses insbesondere durch die Petrographie und Geologie des jeweiligen Gebietes festgelegt. Aber auch die vorherrschende Landnutzung, Veränderung der natürlichen Vegetation sowie wasserbauliche Maßnahmen (bspw. Drainagen) können dominierende Faktoren bei den Abflußbildungsprozessen sein. Dies führte für mich zu dem Entschluß einerseits die objektiv gewonnenen Daten der Abflußanalyse mit meinen eher subjektiven Beobachtungen bei zahlreichen Feldbegehungen zu verbinden, um so ein umfassenderes Bild zu erhalten. Gerade

der Einfluss der Landnutzung auf Abflussbildungsprozesse ist schwierig zu erfassen, da die Landnutzung oft an andere Merkmale (z.B. Hangneigung), welche ihrerseits Einfluss auf die Abflussbildung haben, gekoppelt ist.

1.2 Untersuchungsansatz und angewandte Methodik

Die Grundlage für die Untersuchung bildet der Konvergenzansatz. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, daß in dem am Einzugs- bzw. Teilgebietsauslaß konvergierenden Abfluß Informationen über die räumliche und zeitliche Verteilung des Wassers im Einzugsgebiet gespeichert sind. Je besser dieser Abfluß nach seiner Zusammensetzung aufgespalten werden kann, desto sicherer kann auf Vorgänge im jeweiligen Einzugsgebiet zurückgeschlossen werden (LEIBUNDGUT, CH., 1984).

Zur Bestimmung von Verweilzeiten und zur Identifizierung von Herkunftsräumen, woraus wiederum auf vorherrschende Abflußbildungsmechanismen geschlossen werden kann, eignen sich Abflußkomponententrennungen bei einzelnen Niederschlagsereignissen. Verwendung finden hierbei die Gehalte des Wassers an natürlichen Tracern, im besonderen an stabilen Umweltisotopen, Silikat und den Haptionen. Ergänzt durch Feldbeobachtungen sollten letztendlich die gewonnenen Erkenntnisse aus hydrometrischen Messungen, Komponententrennungen, Verhalten der geochemischen Tracer zusammengeführt werden, um die Abflußbildungsprozesse in ihrem zeitlichen und räumlichen Auftreten zu charakterisieren.

Wird also der Abfluß kontinuierlich und möglichst hochauflösend beprobt, kann über die hydrochemische Zusammensetzung des Abflusses, während und nach einem Niederschlagsereignis, der Anteil von direktbeitragenden Abflußkomponenten berechnet werden. Dadurch können auch Rückschlüsse auf die Herkunftsräume des Wassers gezogen werden und mit den Ergebnissen der Feldbegehungen verknüpft und verglichen werden.

Die Vorgehensweise zur Erstellung der vorliegenden Arbeit konzentrierte sich auf drei Teilbereiche:

1. Aufbau eines Meßnetzes, um so das Niederschlags- Abflußverhalten der vier aufgenommenen Teilräume erfassen zu können. So wurden ab Mitte Juli 2001 der EZG-Auslaß , sowie die einzelnen Teilräume mit automatischen Probeentnahmegeräten (kurz „APEG“), sowie Drucksonden ausgestattet und bis Mitte August in Betrieb genommen. Desweiteren wurden Niederschlagssonden aufgestellt und mittels künstlicher Tracer (Salzverdünnungsmethode) die Fließgeschwindigkeiten und Abflüsse der einzelnen Gerinne an einem Stichtag bestimmt. Dies diente der quantitativen Grundlage .

Zur qualitativen Aufnahme des EZG gehörten Feldbegehungen, eine grobe Untersuchung der vorherrschenden Botanik und der Pedologie, sowie die Erstellung von Längsschnitten entlang der Gerinne der einzelnen Teilräume mit Aufnahme von Ionengehalten, PH-Werten, DOC-Werten (Disolved organic carbon) und Leitfähigkeiten

an signifikanten Schlüsselstellen. Die Untersuchung der Teileinzugsgebiete und des Gesamtgebietes sollte Erkenntnisse bezüglich der Heterogenität der Abflussbildungsprozesse, zum einen im Hinblick auf eine unterschiedliche Landnutzung, zum anderen im Hinblick auf eine Skalenabhängigkeit ermöglichen.

2. Nach Abschluß der experimentellen Feldarbeit erfolgte die chemische Analyse der mittels APEG's aufgenommenen Wasserproben hinsichtlich der Ionen- und Silikatgehalte im hauseigenen chemischen Labor des Hydrologischen Institutes der Universität Freiburg. Die Analyse der ca. 1300 Proben umfasste einen Zeitraum von 3,5 Monaten. Die chemische Analyse der Isotopengehalte konnte mangels freier Ressourcen nur an einem ausgewählten Starkregenereignis stattfinden.
3. Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen, sowie den ersten Ergebnissen des Messhangs der AG Bochum, erfolgte die Analyse und Interpretation der Wasserinhaltsstoffe und die schriftliche Ausarbeitung der Diplomarbeit. Hierbei habe ich mich bemüht, die beobachtete naturräumliche Ausstattung des Einzugsgebietes mit den hydrochemischen Erkenntnissen zu verknüpfen .

Vorgabe:

- Einzugsgebiet „Husten“,
- Fläche: 3km²⇒ untere Mesoskala
- Fluss „Brachtpe“

I. Problemstellung: Erforschung der Abflussbildungsprozesse

II. Ansatz:

1. Naturräumliche Beschreibung

- Geologie
- Pedologie
- Landnutzung
- Einzugsgebietsparameter
- Feldbegehung

⇒ Digitalisierung in ArcView

2. Experimenteller Teil:

- Unterteilung des EZG in 4 Teilräume
- Aufbau des Messnetzes (Apeg's, Multisonden, Niederschlagsammler)
- Ereignisbeprobung
- Fließzeitenbestimmung
- Erstellung von Gerinnelängsschnitten

III. Synthese:

- Analyse der Niederschlags-Abfluß-Reaktionen
- Interpretation der natürlichen Tracergerhalte
- Ganglinienseparation
- Bestimmung der Herkunftsräume

Abbildung 1.2.: Vorgehensweise bei der Erstellung der Diplomarbeit

1.3 Betreuung

Die Arbeit ist in der Arbeitsgruppe "Abflussbildungsforschung und prozessnahe Modellierung" angesiedelt, deren Arbeitsgruppenleiter Dr. Stefan Uhlenbrook ist. Die experimentelle Arbeit im Untersuchungsgebiet wurde intensiv durch Peter Chiffard, Mitarbeiter der Bochumer Arbeitsgruppe von Prof. Dr. H. Zepp, unterstützt. Die Betreuung in Freiburg erfolgte durch den Diplomhydrologen Jens Didszun. An dieser Stelle meinen herzlichen Dank für die fachliche Hilfe, aber auch für die immer freundschaftliche Atmosphäre während unserer Zusammenarbeit.

2 Grundlagen der Abflußbildung

2.1 Einführung

Die Erforschung der Abflußbildung hat gerade in den letzten Jahrzehnten zu wesentlichen Erkenntnissen und Neuerungen in der Betrachtungsweise der Systemvorgänge geführt. DUNNE und BLACK (1970) betonten erstmals die Bedeutung von Sättigungsflächen bei der Bildung von schnellen Abflußkomponenten. FREEZE (1974) übertrug diese Erkenntnisse in einer räumlich differenzierten Sichtweise auf einzelne Einzugsgebiete und berücksichtigte dabei drei verschiedene Abflußbildungsmechanismen: ausgehend vom Sättigungsflächenabfluß in Feuchtgebieten und vom vereinzelt vorkommenden Landoberflächenabfluß betonte FREEZE zusätzlich die Bedeutung von unterirdisch abfließenden Komponenten („Subsurface Stormflow“). Ende der siebziger Jahre zeichneten sich zwei Richtungen der Forschungsansätze ab: Zum einen wurde vermehrt die räumliche Verteilung verschiedener Abflußbildungsgebiete erforscht, zum anderen wurden verstärkt die Zusammenhänge zwischen natürlichen Tracergehalten und Abflußbildungsprozessen untersucht. Hieraus entstand die Erkenntnis, daß der Anteil des direktbeitragenden Ereigniswasser bisher überschätzt wurde und das Vorereigniswasser, welches bereits im Einzugsgebiet gespeichert ist, einen entscheidenden Anteil am Hochwasserabfluß hat. Aus dieser wichtigen Erkenntnis wurden weitere Theorien (Groundwater Ridging, Pistonflow Effekt, etc.) abgeleitet und experimentell verifiziert, die den Beitrag des Vorereigniswassers interpretierten (UHLENBROOK S., LEIBUNDGUT CH., 1997). Ob und welcher Abflußbildungsprozess auf einer Teilfläche dominiert, hängt entscheidend von der Niederschlagsintensität, dem Relief, der Landnutzung, der Mikrotopographie und den bodenphysikalischen Eigenschaften ab. In einem Einzugsgebiet kommt es generell zu einer Kombination und Interaktion der Einzelprozesse. Im folgenden sollen die einzelnen Konzeptionen der Abflußbildungsprozesse, wie sie auf Teilflächen in einem reliefierten Einzugsgebiet vorkommen können, kurz erläutert werden. Eine ausführliche Darstellung der Prozesse findet sich bei UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997) oder BUTTLE (1994).

2.2 Prozesse der Abflußbildung

- Infiltration

Die Infiltration ist praktisch der Grundprozeß in vertikaler Richtung für die Abflußbildung bei Niederschlag. Die physikalischen Eigenschaften des Bodens, die sowohl in der Zeit als auch im Raum sehr stark variieren, bestimmen, wie schnell und wie tief das Niederschlagswasser in den Boden eindringt. Auf der Ebene der Mikroskala betrachtet ist der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate die wichtigste Steuergröße für die anschließend vorwiegend in lateraler Richtung ablaufenden Abflußbildungsprozesse. Die Infiltration von Wasser in den Boden kann über zwei Fließwege, die Bodenmatrix und die Makroporen, erfolgen. Dabei findet die Wasserbewegung in der Matrix als kapillarer Fluß in Mikro- und Mesoporen statt, der durch den Druckgradienten zustande kommt. Im Gegensatz dazu wird die Wasserbewegung in den Makroporen nur durch die Schwerkraft hervorgerufen. Als Makroporen werden dabei geometrisch definierte Strukturen im Boden wie z.B. Wurmlöcher, Wurzelgänge oder Risse bezeichnet (WEILER, 1997). Im Boden kann es zur Interaktion zwischen den beiden Fließwegen kommen. Wasser, das in die Makroporen infiltriert, wird seitlich in die Matrix weggeführt, ebenso kommt der umgekehrte Fall vor.

- HORTON'scher Oberflächenabfluß

Übertrifft die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate, die in ihrem zeitlichen Verlauf exponentiell abnimmt, so fließt das nicht infiltrierte Wasser (Infiltrationsüberschuß) je nach Geländegefälle lateral ab. Dabei kann es zu Schichtfließen kommen oder zum Abfließen in Mikrorinnsalen. Da auf Waldböden und bewirtschafteten Böden meistens eine Mikrotopographie vorhanden ist, findet nur auf kurzen Strecken Schichtfließen statt, das Wasser sammelt sich schnell in kleinen Rinnsalen. Auf der Oberfläche abfließendes Wasser kann, wenn auch zeitlich verzögert, an anderer Stelle in den Boden infiltrieren, wenn dort die Infiltrationsrate

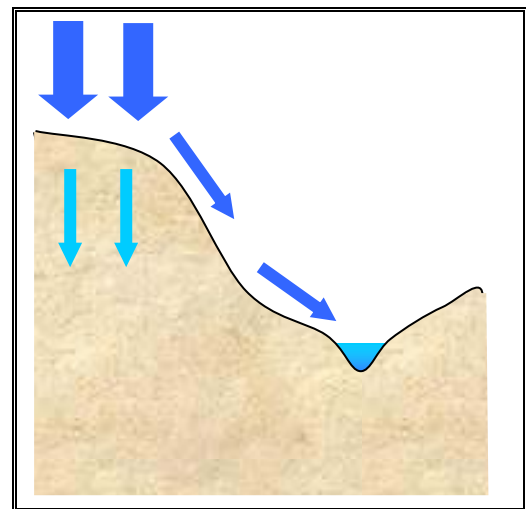


Abb.2.1: Horton'scher Overlandflow ausreichend groß ist, und unterirdisch weiterfließen. Die Relevanz des Prozesses der Oberflächenabflußbildung durch Infiltrationsüberschuß wurde in der Vergangenheit oft überschätzt, galt er doch häufig als einzige Ursache für schnelle Abflußkomponenten. In vielen neueren Untersuchungen in den gemäßigten Breiten konnte zumindest auf bewaldeten Standorten kein Landoberflächenabfluß nachgewiesen werden (z.B. HIBBERT & TROENDLE, 1987; PEARCE et al., 1986). Von großer Bedeutung ist der Oberflächenabfluß im Bereich von versiegelten Flächen (Straßen, Siedlungen, etc.) und kann bei direktem Zufluß in das Gewässer schnelle Abflußreaktionen auslösen.

- Sättigungsflächenabfluß

Als Abflußbildungsprozeß betrachtet handelt es sich hierbei primär um Oberflächenabfluß, der dadurch zustande kommt, daß Niederschlag direkt auf gesättigte bzw. aufgesättigte Böden fällt, deren Speicherkapazität erschöpft ist. Niederschlag, der direkt in das Gewässernetz fällt, wird ebenfalls dem Sättigungsflächenabfluß zugerechnet. Zusätzlich kann es auch vorkommen, daß *Return Flow* oder *Exfiltration* stattfindet, daß also Wasser, welches bereits vor oder während des Niederschlagsereignisses infiltriert war, wieder an die Erdoberfläche tritt.

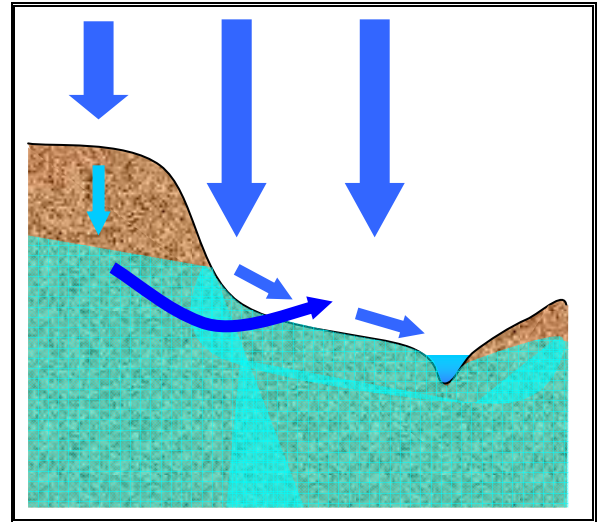


Abb.2.2: Sättigungsflächenabfluß

Ebenfalls denkbar ist, daß HORTON'scher Oberflächenabfluß auf den gesättigten Bereichen auftritt. Daraus wird ersichtlich, daß sich der Sättigungsflächenabfluß aus einer Mischung verschiedener Komponenten zusammensetzen kann, die wiederum das Ergebnis eines Zusammenwirkens verschiedener Abflußbildungsprozesse sind. In der Literatur wird der Begriff daher doppeldeutig verwendet, zum einen für einen Prozeß und zum anderen für eine Komponente, wobei es in der Realität sehr schwierig erscheint, beides voneinander zu trennen. Für den Beitrag zum Hochwasserabfluß sind vor allem gesättigte Bereiche von Bedeutung, die sich flußnah ausgebildet haben. Dies geschieht insbesondere bei konkaven Hangprofilen und ausgedehnten Talböden, wo es zu einer starken Konvergenz der Fließwege kommt (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997). In diesem Fall könnten die gesättigten Bereiche vereinfacht als räumliche Ausbreitung des Gerinnenetzes betrachtet werden - jedoch unter dem Vorbehalt, daß der Abflußbeiwert von Faktoren wie z.B. der Mikrotopographie und Niederschlagscharakteristik abhängt und daher nicht wie bei freien Wasseroberflächen gleich eins gesetzt werden kann. Besteht keine räumliche Verbindung der gesättigten Fläche zu einem Fließgewässer, so reinfiltriert gebildeter Sättigungsflächenabfluß hangabwärts in höher durchlässigen, nicht gesättigten Bereichen.

In der Literatur beschreiben zahlreiche Beispiele, wie sich gesättigte Bereiche während eines Niederschlagsereignisses flächenhaft ausbreiten und somit einen wesentlichen Beitrag zum Hochwasserabfluß leisten (z. B. DUNNE & BLACK, 1970; TANAKA et al., 1988). Dies entspricht dem Konzept der „variable source areas“ (DUNNE & BLACK, 1970). Jedoch gibt es auch Untersuchungen, in denen keine räumliche Ausdehnung der Sättigungsflächen beobachtet werden konnte (KIRNBAUER et al., 1996; GÜNTNER, 1997).

- Interflow in der Matrix und in Makroporen

Die Fließvorgänge in der Matrix können im gesättigten Bereich mit dem Gesetz von DARCY beschrieben werden und im ungesättigten Bereich mit der RICHARDS-Gleichung. Es werden meist nur geringe Fließgeschwindigkeiten erreicht, je nach Ausbildung des Potentialgradienten, weswegen dem Fluß in der Bodenmatrix bei der Bildung der schnellen Abflußkomponenten nur eine untergeordnete Rolle zugesprochen wird.

Beim lateralen Fluß in Makroporen können Fließgeschwindigkeiten im Bereich von mehreren cm/s auftreten. Eine horizontale Vernetzung der Makroporen über größere Distanzen ermöglicht es so eindringendem Niederschlagswasser, direkt zur Hochwasserbildung beizutragen (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT, 1997). Aufgrund der häufig festgestellten Tatsache, daß Wasser, welches vor dem Niederschlagsereignis bereits im Einzugsgebiet gespeichert war, den Hochwasserabfluß dominiert, wird deutlich, daß nicht nur Ereigniswasser am Makroporenfluß beteiligt sein kann. Es kommt auch hier zu einem Austausch mit Wasser, das zuvor in der Matrix gespeichert war. Dies kann in vorübergehend gesättigten Zonen geschehen, die sich bevorzugt auf dem Grenzbereich Boden-Gestein oder auf anthropogen und pedogen entstandenen Horizonten ausbilden. Dort kann auch der Makroporenanteil sehr hoch sein. Besonders stark ist der Makroporenfluß in geringmächtigen, gut durchlässigen Böden (PEARCE et al., 1986).

- Pistonflow-Effekt („Kolben-Fließen“)

Bei diesem Vorgang wird vorfluternahes Grundwasser durch Druckübertragung in der gesättigten Matrix und in Makroporen ins Gewässer ausgedrückt. Er ist vor allem in reliefiertem Gelände wirksam und bewirkt, daß hauptsächlich Vorereigniswasser zum Abfluß kommt. Der Druck entsteht dadurch, daß Niederschlagswasser an vorfluterfernen, höhergelegenen Orten infiltriert. Wenn das infiltrierte Wasser bis zur Grundwasseroberfläche vordringt, steigt das Grundwasser an, wodurch sich der Druck wegen der Gewichtskraft auf das darunterliegende Wasser erhöht. Über das Grundwasser überträgt sich so der Druck bis in vorfluternahe Bereiche. Es kann sich aber auch im Boden eine zeitweise gesättigte Zone ausbilden, die verhindert, daß eingeschlossene Bodenluft entweicht. Die Druckübertragung auf das darunterliegende Wasser findet dann über dieses Luftpölster statt (BERGMANN et al., 1996). Begünstigt wird der Pistonflow-Effekt durch homogene Böden (wegen der Ausbildung einer geschlossenen gesättigten Zone), geringe Flurabstände, mächtige Aquifere und vor allem durch konvexe Hänge, die in den Unterhängen am steilsten sind.

- Groundwater Ridging

Auch bei diesem Prozeß wird Grundwasser aus einem vorflutnahen Talaquifer mit geringem Flurabstand, das sich allerdings auch mit Bodenwasser vermischen kann, in den Vorfluter ausgedrückt. Dabei wird Niederschlag infiltriert und der vadoso Kapillarsaum wird zu phreatischem Grundwasser, wodurch sich die Grundwasseroberfläche überproportional zu sogenannten „Grundwasserbergen“ (Groundwater Ridges) aufwölbt.

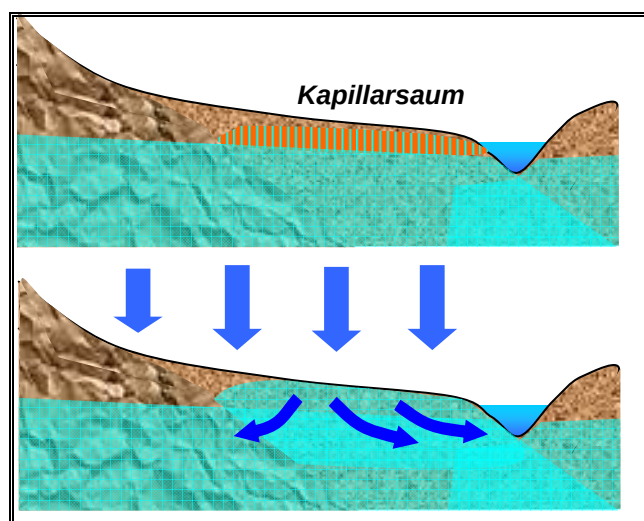


Abb.2.3.:Groundwater ridging

Der hydraulische Druck auf den Grundwasserkörper steigt, altes Wasser wird in den Vorfluter ausgedrückt. Der Effekt des Groundwater Ridging ist in feinkörnigen Böden besonders ausgeprägt, da sich dort ein sehr hoher Kapillarsaum ausbilden kann (BUTTLE, 1994); bei sandigen Substraten kommt es nicht zur Ausbildung eines bedeutenden Kapillarsaumes. Die Bedeutung des Prozesses ist auf größere Talaquifere beschränkt. Der Nachweis von Groundwaterridging erfordert genaue Kenntnisse über das Saugspannungsverhalten (pf-Werte) der Böden und ist nach Kenntnis des Autors erst einmal in Kanada nach einem Schneeschmelzereignis festgestellt worden. Im Einzugsgebiet der Brachtpe konnten schnelle Grundwasserreaktionen auf Niederschlagsereignisse festgestellt werden, aber eine eindeutige Zuordnung zum Groundwater Ridging Prozess nicht getroffen werden. Aus diesem Grund wird diesbezüglich von Grundwasserausdrücken aufgrund schneller Druckübertragungsmechanismen gesprochen.

2.3 Fazit

In diesem Kapitel wurden die verschiedenen Prozesse der Abflußbildung kurz umrissen. Schon bei der Beschreibung der einzelnen Prozesse wird deutlich, daß es beinahe unmöglich ist, diese isoliert voneinander zu betrachten. Vielmehr sind aufgrund der sich während eines Niederschlagsereignisses sowohl zeitlich als auch räumlich ständig ändernden hydraulischen Bedingungen die Prozesse eng miteinander verwoben. Aussagen über die Beteiligung verschiedener Herkunftsräume können durch die Interpretation von Ganglinien natürlicher Wasserinhaltsstoffe gemacht werden (GUTKNECHT, 1995).

3 Das Untersuchungsgebiet

3.1 Geographische Lage

Das Quellgebiet der „Brachtpe“ befindet sich im Bundesland Nordrhein-Westfalen, in der Region Sauerland, nördlich der Bundesautobahn A4, etwa 20 km westlich der Stadt Olpe (Bigge-Talsperre). Die im Einzugsgebiet gelegene Ortschaft „Husten“ hat die geographischen Koordinaten Breitengrad: 50° 59' 04" Nord und Längengrad: 7° 45' 22" Ost.

Die Region zählt zum nordwestlichen Teil des Rheinischen Schiefergebirges .

3.2 Landschaftsgeschichte (Paläogeographie)

Die im Paläozoikum entstandenen Ablagerungen im Sauerland sind überwiegend als Meeressedimente entstanden. Sie gehören zur Rheinischen Fazies, die durch tonig-sandige Schichten gekennzeichnet sind und Merkmale einer Entstehung in bewegtem Wasser aufweisen (SCHMIDT, H., 1926).

Vor ca. 400 Mio Jahre lag das heutige Oberbergische Land im nördlichen Randgebiet des Rheinischen Trog, einem Meeresbereich, der im Norden von dem kaledonisch konsolidierten Old-Red-Kontinent, im Süden von der Alemannisch-Böhmischen Insel (Zentralfrankreich, Oberrhein-Massiv, Böhmisches Massiv) begrenzt wurde. Von der Südküste des Nordkontinentes wurde Abtragungsmaterial in dieses relativ flache Meeresbecken geschüttet. Dabei wurde die Einschüttung des terrigenen Materials durch eine starke Absenkung im Raum des heutigen Siegerlandes ständig ausgeglichen. An der Wende Unter- zu Oberem setzte eine rege submarine Vulkantätigkeit ein, die zur Ablagerung von Hauptkeratophyr führte, der in Bereichen des Einzugsgebietes zu finden ist (HILDEN, H.D., 1972).

Die paläozoische Sedimentation endete erst im Oberkarbon mit einsetzender Gebirgsbildung (variskische). Die sandig-tonigen Sedimente wurden gefaltet, stiegen als Faltengebirge empor und wurden im Mesozoikum und anschließenden Neozoikum verwittert und abgetragen.

Im Alttertiär herrschte ein warmes Klima vor, das eine tiefgründige chemische Verwitterung der Sedimente begünstigte. Von den festen Gesteinen blieb ein tonig-schluffiger Verwitterungsrückstand, der stellenweise über 10 m mächtig werden konnte, übrig, so daß er lokal in Resten rezent erhalten blieb. Die chemische Verwitterung führte zu einer flächenhaften Einebnung, die das heutige Landschaftsbild noch maßgeblich beeinflusst .

Seit dem Jungtertiär nahm die chemische Verwitterung an Intensität ab. Da das Klima kühler wurde, gewannen allmählich mechanische Verwitterungsvorgänge ein größeres Gewicht, die dann besonders unter den Klimaschwankungen im Pleistozän ihre maximale Wirksamkeit besaßen. Gegenüber der flächenhaften Erniedrigung trat die Talbildung in den Vordergrund. Das heutige Gewässernetz war in seinen Grundzügen bereits im Pliozän (ca. 3,5 Mio Jahre zurück) angelegt (HILDEN, H.D., 1972).

Das endgültige Landschaftsbild formte sich im Laufe des Quartärs:

Mehrere Kalt- und Warmzeiten lösten einander ab. Während der Kaltzeiten herrschten im Oberbergischen Land periglaziale Verhältnisse. Es entstanden Fließerden und Lössanwehungen.

Die quartärzeitlichen Ablagerungen bestehen aus Lockersedimenten. Man unterscheidet pleistozäne, die vorwiegend vom Klima der Eiszeit geprägt sind, und holozäne, die unter Bedingungen entstanden sind, die den heutigen Verhältnissen ähneln.

Das Rheinische Schiefergebirge und damit auch das EZG war während des Pleistozäns frei vom Inlandeis, wenn auch lokale Vergletscherungen möglich gewesen sein können. Die pleistozänen Sedimente sind daher nicht durch das Eis abgelagert worden, sondern nur vom glazialen Klima im Vorfeld des Inlandeises beeinflusst (periglazial). Hinzu treten noch die fluvioglazialen Absätze der wasserreichen Flüsse. Aus den großen und vegetationsarmen Niederungen des Niederrheingebietes wurde Feinmaterial ausgeblasen und als Löss sedimentiert. Die tiefe Erosion der niederschlagsreichen Pleistozänzeit führte zu steilen Hängen, an denen größere Verwitterungs- und Schuttmassen ins Gleiten kamen und an günstigen Stellen wieder abgesetzt wurden (Solifluktionprozesse). Dieser Prozeß kann während der ganzen Quartärzeit vor sich gegangen sein und auch noch rezent fort dauern, doch sind diese Fließerden heute weitgehend durch die Vegetation festgelegt worden.

Die holozänen Sedimente sind von einem Klima geprägt, daß nicht wesentlich anders als das heutige war. Mit dem Ende der letzten Kaltzeit begann vor etwa 10 000 Jahren das Holozän, der heute noch andauernde jüngste geologische Zeitabschnitt. Die Seiten- und Tiefenerosion in den Tälern wird im Verhältnis zum Pleistozän wesentlich verlangsamt. Von den Bächen und Flüssen werden nunmehr mäandrierende Rinnen in die breiten eiszeitlichen Talböden gegraben. Durch Hochwässer kommt es zur Umlagerung der pleistozänen Schotter in der Nähe der Flußrinnen; über den pleistozänen Schottern in den Talboden wird feine Tontrübe als Auenlehm abgesetzt. An den Einmündungen kleiner Nebentäler in die Haupttäler entstehen kleine Schwemmkegel. Das gemäßigte Klima ermöglicht örtlich die Entstehung von Mooren. Nach der starken Erosion der pleistozänen Zeit wurden in den entstandenen Tälern Sedimente abgesetzt. Über diesen Sedimenten liegt in fast zusammenhängender Decke der Auenlehm (HILDEN, H.D., 1972).

Eine jüngste einschneidende Formung erfährt die Landschaft durch den Menschen

3.3 Geologie des Einzugsgebietes

Das Einzugsgebiet wird vorzugsweise aus Gesteinen des Mitteldevons aufgebaut (GRABERT, H.,1972). Es überwiegen klastische Sedimentgesteine. Vulkanogene Quarzkeratophyre besitzen nur eine geringe Verbreitung. Das Ausgangsgestein besteht aus glimmerreichen, sandigen Tonschiefern und Siltsteinen mit relativ feinkörnigen Sandsteinen.

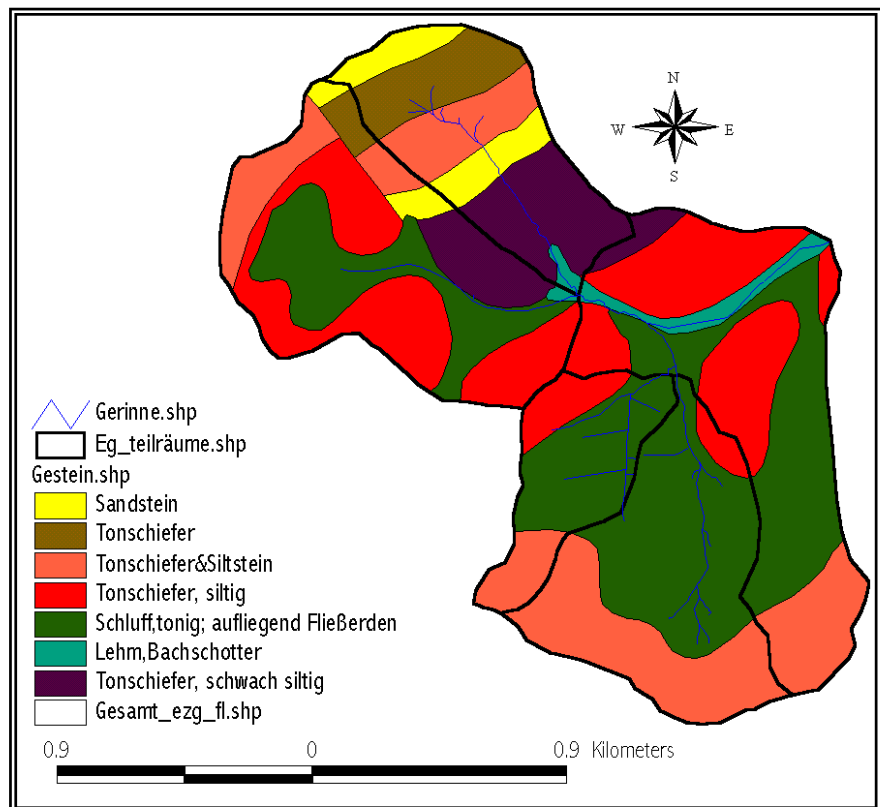


Abb.3.1: Geologie des Einzugsgebietes(Quelle: GLA , 1972)

Die klastischen Sedimente lassen sich nach ihrer Korngröße in eine Sandstein-Gruppe (Korngrößen $>0,06 \text{ mm } \varnothing$), eine Siltstein- (bzw. Siltschiefer-) Gruppe (Korngrößen $0,06\text{--}0,002 \text{ mm } \varnothing$) und eine Tonschiefer-Gruppe (Korngrößen $<0,002 \text{ mm } \varnothing$) untergliedern. Zwischen den einzelnen Gruppen gibt es alle Übergänge. Die paläozoischen Gesteine werden fast überall von einem Schleier aus Verwitterungsbildungen und Lehm überzogen (GRABERT,H.,1972). Bei den genannten Gesteinen handelt es sich aus hydrogeologischer Sicht um Kluftgrundwasserleiter mit mäßiger bis sehr geringer Wasserwegsamkeit bei mittleren Grundwasserspenden im Bereich von $1,5 - 3,5 \text{ l/s*km}^2$ (KAMP, H.,1970) .

3.4 Ausbildung von Erzlagerstätten als geologische Besonderheit im EZG

Die Erzlagerstätten im EZG sind ausschließlich hydrothermale Gänge und gehören zum Siegerländer Gangbezirk. Die Mineralisation der Erzgänge erfolgte im wesentlichen während der Gebirgsbildung in der Phase der Biegegleitfaltung mit Ausscheidungen von Quarz und Siderit. Die Ausscheidung von sulfidischen Erzen erfolgte im Anschluß, wobei die Bildung von Kupfer- und Bleierzen gegen Ende der Gangbildung stattfand. Häufig schließen sich die Gänge zu Gangzügen zusammen, in denen die einzelnen Gänge durch Spalten miteinander verbunden sein können.

Die Gänge beinhalten überwiegend Spateisenstein mit meist richtungsloser körniger Struktur, gelber bis hellbrauner Farbe und einem Mangangehalt, der bei etwa 5 % liegt (HILDEN,H.,1972). Die wichtigsten Erzlagerstätten im EZG (Teilraum Silberkuhle) sind

Bleierzgänge, die sich durch einen recht hohen Silbergehalt auszeichneten und in der Vergangenheit bergbaulich ausgebeutet wurden, was für die Abflußbildungsprozesse und die Hydrochemie relevant ist und in der Beschreibung der Teilräume genauer dargelegt wird.

3.5 Pedologie des Einzugsgebietes

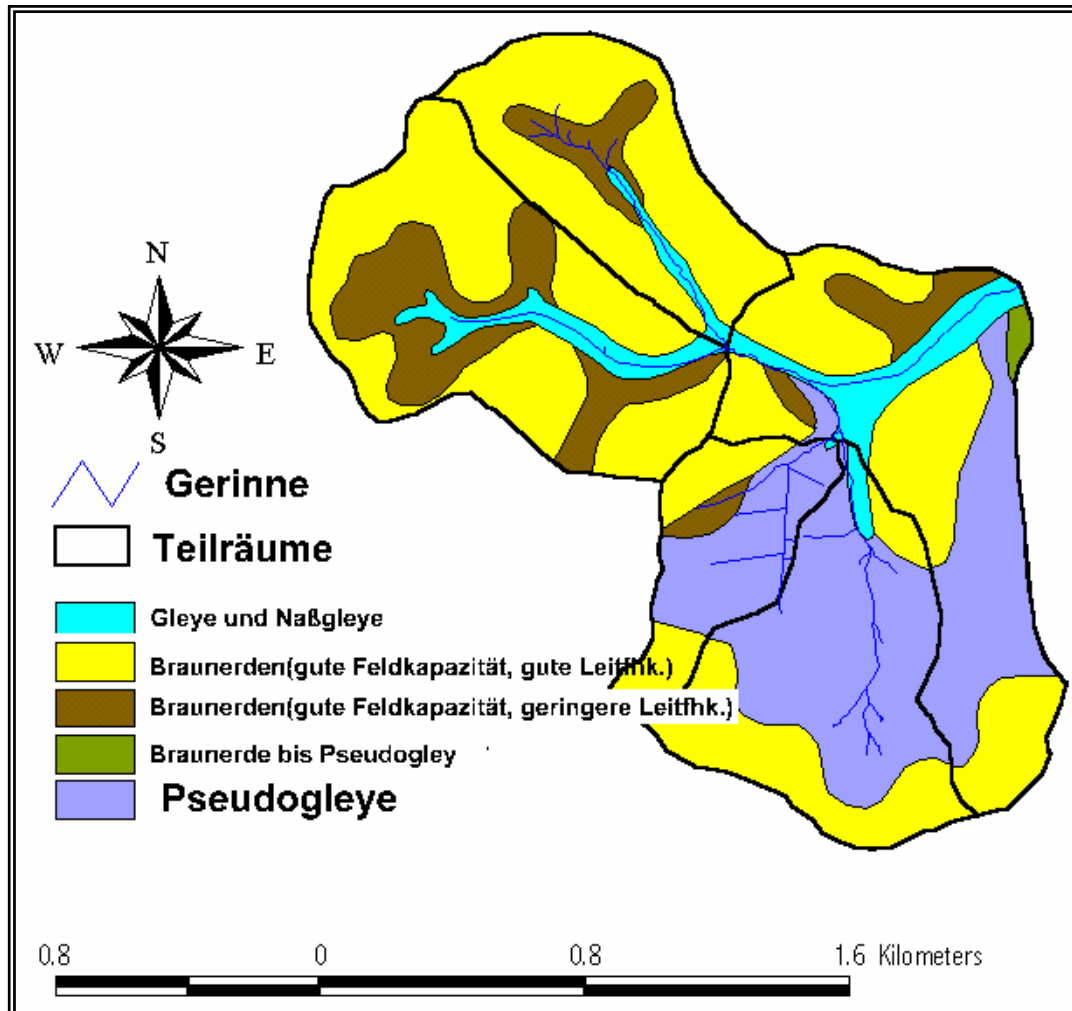


Abb.3.2.: Pedologie des EZG (Quelle: GLA,1972)

Das Einzugsgebiet wird von, aus paläozoischen Sedimentgesteinen entstandenen, Braunerden dominiert, die sich im Hangbereich sekundär aus den soliflukтив entstandenen Fließerden gebildet haben.

Im Pleistozän gebildete und durch Solifluktion verlagerte Fließerden und Hangschuttdecken sowie zum Hangfuß zunehmende Lössschleier bilden hier zunehmend das Ausgangsmaterial für die Bodenentwicklung (GRABERT,H.,1972).

Daraus resultiert eine Schichtenfolge im Bereich des Hangschuttes:

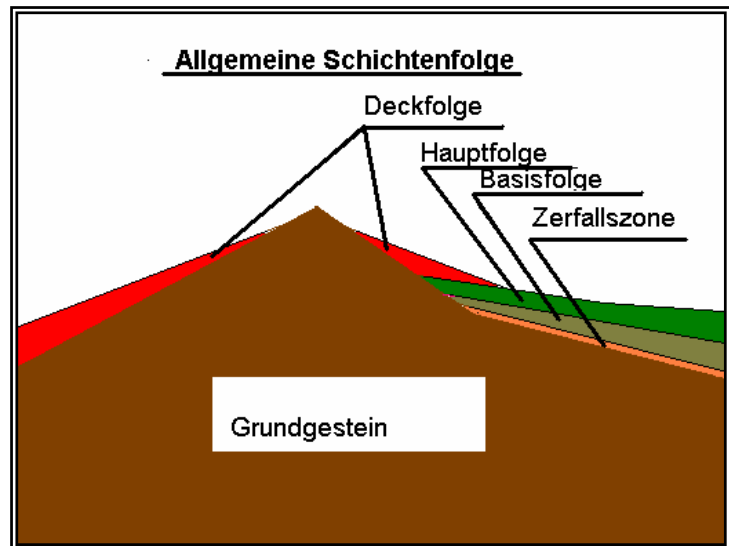
I. Deckfolge:
geringmächtige, skelettreiche aber
feinbodenarme, lockere Deckschicht
im Bereich von Felsdurchragungen

II. Hauptfolge: lockerer, im Oberhang
skelettreicher Frostschutt,
unregelmäßig gelagert, Feinerde mit
hohem hangabwärts zunehmenden
Schluffgehalt

III. Basisfolge: am Hang lateral
verlagerter, dichter in sich
Abb.3.3: allgemeine Schichtenfolge
geschichteter Schutt; Skelettanteil mit einheitlicher Körnung, entstanden durch Solifluktion;
häufig tonreicher als die Hauptfolge

IV. Zerfallszone: durch physikalische Verwitterung zergrustes Gestein, dessen Fragmente noch
im ursprünglichen Verband liegen und nicht lateral transportiert wurden

V. Grundgestein: örtlich anstehendes Grundgestein



Die durch die Solifluktion entstandene Schichtung ist für die Bodenentwicklung von großer Bedeutung, da regelmäßige Unterschiede im Porenvolumen und Mineralbestand entscheidend für die Bodenbildung sind, insbesondere auch nachhaltig die Verlagerung von Stoffen (Humus, Tonminerale, Schwermetalle) beeinflussen. Zudem führt der hohe Tongehalt häufig zu oberflächennahen Vernässungen.

3.6 Beschreibung und Bedeutung der Böden

3.6.1 solifluktiv entstandene Fließerden

Fließerden sind Lockersedimente, die sich in Hanglagen ($> 2^\circ$) auf gefrorenem Untergrund als wassergesättigte Masse bewegten (Kammeissolifluktion, Solifluktion in Periglazialzeiten). Sie entstanden bei Jahresmitteltemperaturen um -2°C in Permafrostgebieten (Pleistozän) mit Mächtigkeiten zwischen 1-4 m.

Im Einzugsgebiet können zwei Fließerden ausgeschieden werden, von denen die eine eine dichtere, die andere eine lockerere Lagerung aufweist. Sie lassen sich durch das sie zusammensetzende Material, durch die Lagerung und ihre Entstehung gegeneinander abgrenzen (GRABERT, H., 1972):

A.: Fließerde, dicht gelagert

Dichtgelagerten Fließerden befinden sich am Nordhang der Silberkuhle, die im Brachtper Tal zwischen Tillkausen und Iseringhausen fast den ganzen Hang bedecken. Sie bestehen aus einem tonigen gelbgrauen bis grauen Lehm, der mit gebleichtem Sandsteinschutt durchsetzt ist und stellen ein Gemisch von tertiärzeitlichen Bodenbildungen, jüngerem Verwitterungsschutt und umgelagertem Lößlehm dar. Vielfach sind sie vernäßt und werden daher trotz der teilweise flachen Hangneigung, aber auch wegen der schattenreichen Lage im Teilraum Tillkausen, meistens nur als Wiese oder Weide genutzt.

Das ausgedehnte Vorkommen im Tal der Brachtpe läßt möglicherweise einen Rückschluß auf das Alter jener Talbildung zu. Da die relativ leicht erodierbaren Fließerden noch weitgehend erhalten sind und zwar besonders im Oberlauf des Baches an der Wasserscheide, muß dieses flache Tal weitgehend vorher angelegt worden sein. Die jüngere, sich relativ kräftig einschneidende Erosion hat diese Fließerden erst vereinzelt angeschnitten. Beachtenswert ist, daß auf den der Sonne stärker ausgesetzten Südhängen (Teilräume Hähnen und Wälder) kaum noch größere Rutschmassen vorhanden sind; sie sind anscheinend infolge stärkerer Insolation rascher zu Tal geflossen und der Erosion anheim gefallen. Die dicht gelagerten Fließerden können bis 10 m mächtig werden; der Tongehalt kann derart zunehmen, daß das Material schlecht wasserdurchlässig wird und zu oberflächennahen Vernässungen (Übergang zu Pseudogleyen) führt (GRABERT, H., 1972).

B.: Fließerde, locker

Weitere, jedoch in ihrer Ausdehnung wesentlich kleinere Fließerdekörper finden sich überall an den Hängen der oft recht jungen Täler. Die Fließerden enthalten viele tonige, siltige und sandige Bestandteile, die zum überwiegenden Maße aus dem umgelagerten Lößlehm und dem Verwitterungsmaterial tonig-siltiger Gesteine kommen. In diese feinkörnigen Lockermassen ist bei dem Fließerdeprozeß (Hanggleitung) wenig verwitterter Gesteinszersatz aufgenommen worden, so daß die Fließerden aus einem grusig-steinigen Lehm bestehen. Diese Fließerden sind meist locker gelagert. Die rezente Vegetation hat diese Fließerden befestigt, so daß eine Hanggleitung heute kaum noch vorkommt; sie ist aber nicht ganz auszuschließen. Die Mächtigkeit jener Sedimente ist je nach der Hangneigung schwankend und beträgt selten mehr als 5 m.

3.6.2 Die Braunerden

Typische Braunerden (Horizontfolge Ah-Bv-C) sind dadurch gekennzeichnet, daß Tonminerale, Oxide und Hydroxide kaum verlagert werden. Im sauren Milieu kann allerdings schon ein schwacher Transport vom Ober- in den Unterboden einsetzen, jedoch fehlen in der Regel die typischen Bleich- und Einwaschungshorizonte der Podsole. So finden sich im Kuppenbereich wie in den oberen Hanglagen überwiegend flach- bis mittelgründige Braunerden, die unmittelbar darunter noch örtlich sehr mächtige Lehmschichten aufweisen und teilweise eine geringe Podsolierung erkennen lassen (GRABERT, H., 1972).

An den Oberhängen bildeten sich durch das leicht verwitterbare Gestein typische Lockerbraunerden aus Deckschutt.

Mit Beginn der umfangreichen Quellhorizonte setzt sich im wechselfeuchten Milieu eine zunehmende Pseudovergleyung ein.

Bei häufiger Durchschlammung des Oberbodens, aber deutlichem Wasserabfluss kann es außerdem zu einer Schluffverlagerung in tiefere Bereiche kommen.

Zu den Braunerden treten in wasserzügigen Hängen mit Geländedepressionen und entsprechenden Staukörpern Pseudogleye hinzu, in den höheren Lagen des Einzugsgebietes ebenfalls vergesellschaftet mit Stagnogleyen und Hangmoorbildungen.

Die Silberkuhle als höchste Erhebung des Einzugsgebietes (514m ü.NN) zeigt deutlich diese Bodenentwicklung. Die Übergänge von Braunerden zu Pseudogleyen sind im Untersuchungsgebiet fließend. Reine Braunerden beschränken sich in der Regel auf deutlich geneigte Hanglagen. Je flacher die Ausprägung der Hänge ist, desto stärker tritt die Pseudovergleyung in den Vordergrund.

Die Übergänge zu den Stagnogleyen sind jedoch abrupt. Die Flächen stagnierender Nässe beschränken sich auf Hangmulden unterhalb der gebietstypischen, breit gefächerten Quellhorizonte (Helokrenen) und gehen bei zunehmender Hangneigung und entsprechendem Wasserabfluß wieder in Pseudogleye bzw. Braunerden über.

In den ganzjährig durchnässten Bereichen der Stagnogleye ist bereits eine deutliche Torf- oder Anmoorstagnogleybildung zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Subtypen des Stagnogleyes, die durch Nasshumusauflagen von mehr als 10 cm und einem Humusgehalt im Oberboden von mehr als 15% Gewichtsprozent gekennzeichnet sind. Typisch für die Stagnogleye ist die graue Färbung der nassgebleichten Horizonte und eine feinschluffige Stauzone über einem tonigen, dichten, basenarmen Staukörper. Der Staukörper besteht hier aus soliflukktiv verlagerten und verdichteten Verwitterungsdecken (GRABERT, H., 1972).

3.6.3 Pseudogleye

Die Pseudogleye (Horizontfolge Ah-Sw-Sd-C) weisen eine klare Gliederung auf: der Stauwasserleiter (Leitfähigkeit: ca. 10 cm/d) verfügt häufig über einen positiven Wasserhaushalt, dessen Wasserbewegung aber vertikal durch Staukörper (verdichtete Solifluktsdecken mit Leitfähigkeiten von ca. 1 cm/d) und horizontal durch geringes Gefälle gehemmt ist und zu Staunässe führt (SCHEFFER/SCHACHSCHABEL, 1998).

Durch Staunässe geprägte Böden liegen meist außerhalb der Talauen in Flächen, in denen schwer durchlässige Schichten (Staukörper) die Versickerung des Niederschlags- und des periodisch auftretenden Hangwassers verzögern. Die dabei auftretende Bodenvernässung ist meist stark witterungsabhängig und kann deshalb in niederschlagsarmen Zeiten verschwinden. Starke zeitweilige Vernässungen zeigen die größeren Pseudogley-Vorkommen in den Teilräumen Tillkhausen und Silberkuhle.

3.6.4 Gleye und Naßgleye

Unter Gleyen und Naßgleyen (Profilaufbau A-Go-Gr oder A-Gr) werden Böden verstanden, in denen sich der jahreszeitlich meist nur wenig ändernde Grundwassereinfluß bis an die Oberfläche (A-Horizont) bemerkbar macht. Sie nehmen den Bereich der Bachstreifen ein. Naßgleye, in denen Grundwasser zwischen 0,1 - 0,4 m unter der Oberfläche steht, sind weit

verbreitet. Im oberen Profilbereich bestehen die jungen Talsedimente vorwiegend aus schluffigem Lehm, der örtlich etwas sandig sein kann. Demgegenüber ist ihr tieferer Teil - etwa ab 0,5 m unter Oberfläche - oft stark sandig und wird nur zurücktretend aus schluffigem Lehm gebildet (GRABERT, H., 1972).

Das Grünland der Talauen (Gleye und Naßgleye) leidet allgemein unter einem zu hohen Grundwasserstand, was auch die Pflanzengesellschaften, vor allem Binsen (*Juncus* sp.), anzeigen. Sofern nicht eine Regulierung der Vorflutverhältnisse vorgenommen wird, ist nur eine extensive Grünlandnutzung möglich.

3.7 Hydrogeologie

3.7.1 Grundwasserführung in festen Gesteinen

Die Gesteine des tieferen Untergrundes setzen sich aus wechselnden Anteilen von Tonmineralien, feinkörnigem Sand und Silt zusammen. Das feste Gestein besitzt kein nennenswertes Porenvolumen, vielmehr wird Grundwasser in Spalten, Klüften und Schichtfugen gespeichert und fortgeleitet (= Kluftgrundwasserleiter). Die Trennfugendurchlässigkeit und somit auch die Grundwassermenge hängen insbesondere von der tektonischen Zerrüttung und der petrographischen Ausbildung der Gesteine ab. Der Speicherraum für Grundwasser wird weiterhin von der Kluftlänge, der Kluftweite und Kluftdicke (Zahl pro Raumeinheit) bestimmt. Durchflußhemmende Beläge in Klufträumen aus toniger oder mineralischer Substanz beeinträchtigen die Wasserwegsamkeit. Schichtfugen sind je nach der Menge tonigen Materials des Gesteins mehr oder weniger wasserführend.

Die durchschnittliche Grundwasserspende beträgt zwischen 1,5 und 4 l/s *km² (v. KAMP, H., 1972).

Die Störungszonen des Gebirges weisen naturgemäß eine besonders hohe Kluftdicke mit einem großen Kluftraum auf und können auf das umliegende Gestein wie eine Drainage wirken. Ebenfalls gut wasserwegsam sind Erzgänge. In dem Erzrevier des Teilraumes Silberkuhle treten zahlreiche derartige Gänge auf, die, soweit die wirtschaftlichen Voraussetzungen gegeben waren, abgebaut sind. Durch diese alten Gruben wird das Gebiet stellenweise unterirdisch entwässert. Alte Stollen nehmen versickerndes Wasser auf und geben es mit hohen Fließgeschwindigkeiten durch das Mundloch wieder ab.

3.7.2 Grundwasserführung in Lockergesteinen

Lockergesteine besitzen im Gegensatz zu den festen Gesteinen einen wesentlichen Porenraum, in dem Grundwasser gespeichert und fortgeleitet werden kann. Die Wasserdurchlässigkeit (Porendurchlässigkeit) wird u. a. von der Korngrößenzusammensetzung und dem "nutzbaren Porenraum" bestimmt. Mit zunehmendem Gehalt an Ton und Lehm sinkt die Wasserdurchlässigkeit

In den Tälern der Brachtpe zeigen die Talausfüllungen eine stärkere Verlehmung und höhere Sand- und Siltanteile. Die Wasserdurchlässigkeit ist als gut zu bezeichnen. Die Täler der Teilräume sind mit stark verlehnten Gesteinsschutt und unregelmäßig eingelagerten Kies- und Sandlinsen ausgefüllt, die nur eine mäßige Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Auch in den Boden- und Verwitterungsschuttbildungen, die durchweg lehmig ausgebildet sind, reichert sich Grundwasser an. Diese Lockergesteine überziehen außerhalb der Täler die festen Gesteine mit einer geringmächtigen Decke. Aufgrund des hohen Anteils an feinstkörnigem Tonmaterial ist ihre Wasserdurchlässigkeit nur gering (v. KAMP,H., 1972).

3.7.3 Quellen

Aus den Lockergesteinen treten die meisten Quellen als Hangschuttquellen aus. Sie liegen am oberen Ende der Täler und speisen kleine Bäche oft aus mehreren Austritten. Stellenweise sind die einzelnen Quellen nicht festzustellen, sondern nur versumpfte Mulden, an deren unterem Ende der Bachlauf beginnt. Die zugehörigen Niederschlagsgebiete sind durchweg sehr klein. Die Schüttung der Quellen ist weitgehend vom Niederschlag und dem Speichervermögen der Lockergesteine abhängig. In hängigen Lagen ist mit einer geringen Grundwasserneubildung zu rechnen, da bei dem starken Relief Niederschlagswasser in großem Umfang oberflächenhaft abfließt(v. KAMP,H., 1972). In Trockenzeiten geht die Schüttung der Hangschuttquellen stark, teilweise bis zum Versiegen, zurück.

Neben Hangschuttquellen treten Quellen auf, die aus Störungen gespeist werden. Sie weisen oft eine höhere Schüttung auf und fließen auch noch nach längerer Trockenheit(v. KAMP,H., 1972). Allerdings sind beide Quelltypen im Gelände nicht immer zu unterscheiden.

3.7.4 Einfluß der Vegetation auf den Trockenwetterabfluß

Während der warmen Jahreszeit steigt der Wasserverbrauch der transpirierenden Vegetation gerade in den Nachmittagsstunden stark an. Durch diesen aufwärts gerichteten Potentialgradienten wird ein Teil des perkolierenden Niederschlages schon vor Erreichen des Grundwassers verbraucht. Deswegen ist die Tendenz des Trockenwetterabflusses vom Frühjahr zum Herbst bis zum Ende der Vegetationsperiode im allgemeinen fallend. Vor allem Niederschläge, die nach dem Ende der Vegetationsperiode fallen, füllen im Winter die Hohlräume des Festgesteins wieder mit Wasser auf.

Das im Sommer den Trockenwetterabfluß erzeugende Grundwasser wird teilweise von den Pflanzen verdunstet, die im Tal stehen. Dadurch zeigt der Abflußgang einen täglichen Rhythmus mit Minimas in den späten Nachmittagsstunden. Der Einfluß transpirierender Vegetation auf den Trockenwetterabfluß liegt also zum einen darin, daß Pflanzen die Grundwasserversickerung ins Festgestein behindern und zum zweiten die Pflanzen in Talnähe, deren Wurzeln an das Grundwasser reichen, von diesem im täglichen Rhythmus Wasser verbrauchen (KARREBERG,H.,1970).

3.8 Hydroklimatische Verhältnisse

Das Einzugsgebiet befindet sich innerhalb des nord-westdeutschen Klimabereiches. Die maritime Beeinflussung führt im Jahresverlauf zu kühlen Sommern und milden Wintern, das Wetter wird durch einen raschem Wechsel von durchziehenden Tief- und Hochdruckgebieten geprägt. Das Niederschlagsregime zeichnet sich durch ein Hauptmaxima im Dezember und Januar durch advektive Niederschläge und ein Nebenmaxima im Juli mit größtenteils konvektiven Niederschlagsereignissen aus.

3.1 Tabelle der Klimaelemente (Quelle: GLA 1972)

Klimaelemente	Werte	Periode
Mittl. Niederschlagshöhe mm/a	1250-1300	1931-1950
Mittl. Anteil der Schneemenge am Gesamtniederschlag in %	15-20	1931-1940
Mittl. Anzahl der Frosttage /a (t<0°C in 2m Höhe)	80-120	1881-1930
Mittl. Anzahl der Eistage /a (Tmax<0°C)	20-30	1881-1930
Mittl. Lufttemperatur/a in C°	7-8	1881-1930
Mittl. Lufttemperatur im Januar in C°	0-1	1881-1930
Mittl. Lufttemperatur im Juli in C°	15-16	1881-1930

Die Jahresmitteltemperatur schwankt zwischen 8,5 °C in Tallage und 7,5 °C auf den Höhen; die absoluten Jahresniederschläge liegen im Bereich zwischen 925 und 1407 mm. Die geringsten Niederschläge fallen in den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst. Eine Schneedecke bildet sich normalerweise Ende November/Anfang Dezember und verschwindet Ende März: die Schneedeckenzeit kann 60 bis 180 Tage umfassen (BRINKMANN,M.; MÜLLER-MINY,H. u.a. 1965). Aufgrund dieser doch lang anhaltenden Schneeperiode und der ausgeprägten Reliefgestaltung ist im Einzugsgebiet (genauer im Teilraum Hähnen) ein Skilift angelegt worden. Dieser wirkt sich, wie sich noch zeigen wird, aufgrund einer Hangdrainage auf die schnellen Abflußkomponenten aus.

Für den Zeitraum von 1931 - 1950 hat SCHNELL, K. (1955) einen mittleren jährlichen Niederschlag im Bereich des Einzugsgebietes von 1250 mm ermittelt. Nach Klimawerten

errechnete er eine mittlere jährliche Verdunstungshöhe zwischen 450 mm und 475 mm . Daraus ergibt sich eine mittlere jährliche Abflußspende (unter- und oberirdischer Abfluß) von 25 l/s*km² (800 mm/Jahr) .

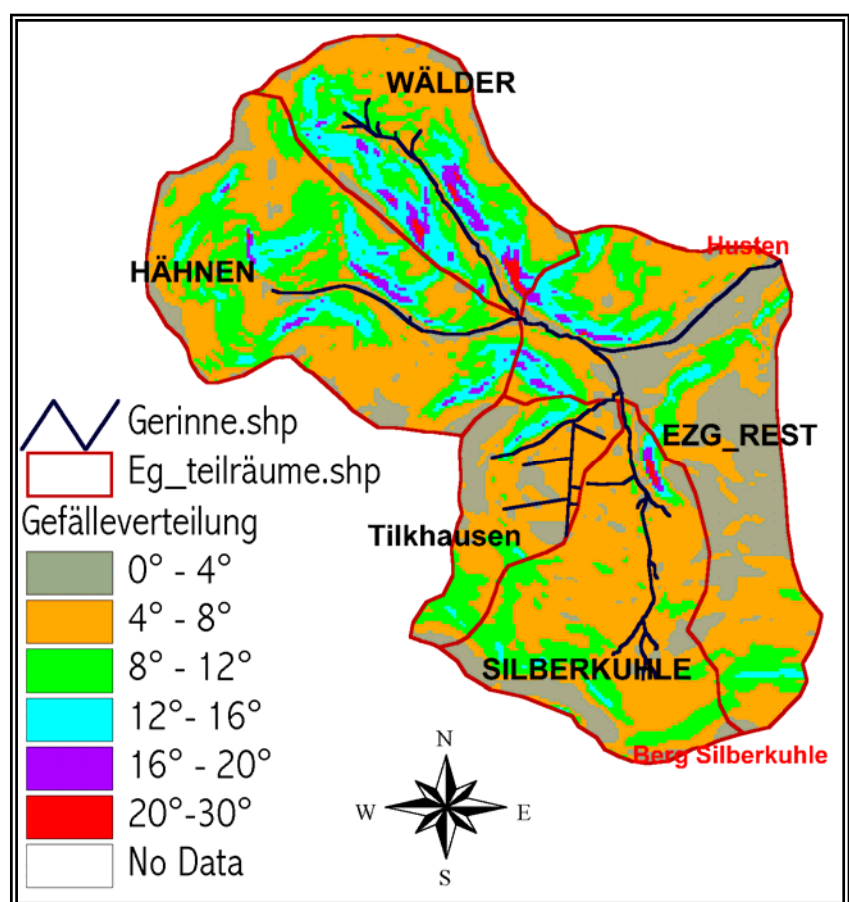
3.9 Fazit

Das Einzugsgebiet befindet sich im nordwestlichen Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Die Gesteine sind aus marinen Sedimenten im Paläozoikum entstanden. Periglazial haben sich im Bereich der Hänge Fließerden, mit hohen Ton- und Lehmantteilen, ausgebildet. Hier sind die, im Einzugsgebiet, dominierenden Braunerden mit Pseudo-, Stagno- und Anmoorgleyen vergesellschaftet, die Übergänge sind hierbei fließend. Im Bereich der Talauen befinden sich Gleye und Naßgleye, die auf ganzjährig hochstehende Grundwasserstände im Bereich der Bachstreifen deuten. Diese im Einzugsgebiet weitverbreiteten nässenden Bodenhorizonte sind nicht nur pedologisch , sondern auch durch hohe Niederschlagsmengen begründet. Bei mittleren jährlichen Niederschlagssummen von ca. 1250 mm, verdunsten ca. 450 mm pro Jahr. Dies führt zu einer mittleren jährlichen Abflußspende von ca. 800 mm bzw. 25 l/s*km². Hydrogeologisch sind die im EZG befindlichen Gesteine zu den Kluftgrundwasserleitern zu zählen. Die durchschnittliche Grundwasserspense beträgt zwischen 1,5 und 4 l/s*km². Höhere Abflußspenden sind im Bereich hydrothermal entstandener Erzgänge, die bergbaulich genutzt wurden und weitläufig verbunden sind, zu erwarten.

4 Naturräumliche Beschreibung des Einzugsgebietes und seiner Teilräume

4.1 Das Einzugsgebiet der „Brachtpe“

Das bearbeitete Einzugsgebiet, besser das zu untersuchende Quelleinzugsgebiet der Brachtpe, kann mit einer Fläche



von fast 3 km² der unteren hydrologischen Mesoskala (vgl. BECKER 1992) zugeordnet werden. Es weist eine maximale Höhendifferenz von 136 m zwischen dem Gebietsauslaß (Pegel Husten, 378 m NN) und dem höchsten Punkt, der Silberkuhle (514 m NN), auf. Die mittlere Höhe beträgt 443 m ü.NN. Das Relief hat ein mittleres Gefälle von 8 °, wobei ca. 37% der Fläche eine Hangneigung von mehr als 12° erreichen. Das Hauptgerinne verläuft von West nach Ost entsprechend dem allgemeinen Streichen, die einspeisenden Nebengerinne verlaufen annähernd senkrecht dazu (dendritisch).

Morphologisch kann das EZG in drei Haupteinheiten untergliedert werden:

- I. Kuppige Hochlagen mit relativ geringem Gefälle als Reste eines permischen bzw. tertiären Hochflächenreliefes
- II. Mittelsteile bis steile Hangbereiche mit einem durchschnittlichen Gefälle zwischen 4°-12°
- III. Bereiche der Talböden und Talauen.

Abb.4.1.: Höhenverteilung und Teilraumbezeichnung

Aus der in ArcView vorgenommenen Digitalisierung ergeben sich für das untersuchte Gebiet folgenden Einzugsgebietsparameter:

Tabelle 4.1.: Einzugsgebietsparameter

1. Fläche: 3,025 km²
2. Umfang: 8,251 km
3. Ausbildung des Fließsystemes :dendritisch
4. Gesamtgewässerlänge : 6,923 km
5. Gewässernetzdichte: 2,289 km/km² $\Rightarrow$ Entwässerung im Bereich 0,5-2,5 km/km² $\Rightarrow$ gut
6. Länge des EZG Le: 2,122 km
7. Formfaktor $R_f = A_e / L_e^2 = \underline{0,672}$
8. Streckungsfaktor $R_s = D_k(A_e) / L_e = 1,963 / 2,122 = \underline{0,925}$
9. Kreisförmigkeitsfaktor $R_k = A_e / A_k(U_e) = 3,025 / 5,418 = \underline{0,558}$
10. Reliefenergie: 514m (Silberkuhle) – 378 m (Husten) = 136 m
11. Hangneigung:
 - a) Südteil : 136m /1522m = 0,8936 $\Rightarrow$ ca. 9%
 - b) Nordostteil (Jugendherberge (501,7 m)) 124m/2000m = 0,062 $\Rightarrow$ ca. 6,2 %

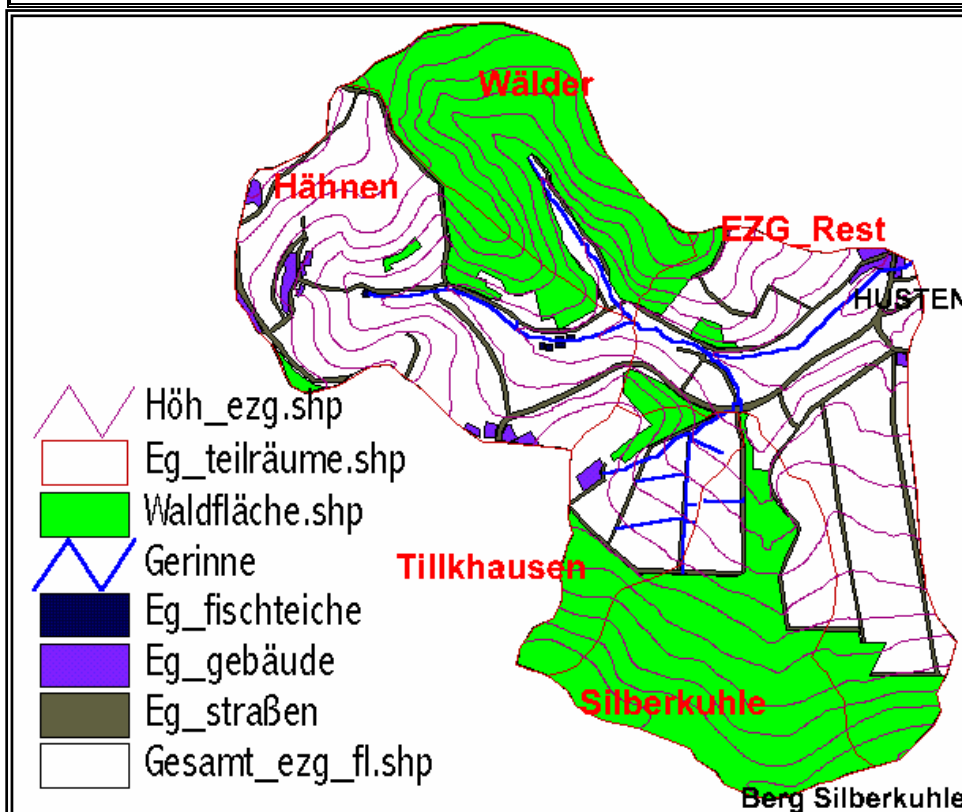


Abb.4.2.:Landnutzung und Teilraumbezeichnung

4.2 Die Landnutzung

Das EZG gehört zum oberbergischen Streusiedelgebiet und war ursprünglich reines Bauernland. Dieser Charakter hat sich weitgehend bis auf die heutige Zeit erhalten. Heute wird

ausschließlich Wald- und Weidewirtschaft betrieben. 58% der Einzugsgebietsfläche werden zur Wiesen- und Weidewirtschaft, 42% dagegen forstwirtschaftlich genutzt. Der einstmal bestehende Bergbau ist seit Beginn dieses Jahrhunderts eingestellt worden und hat kaum eine auf ihn basierende Industrie hinterlassen. Es wurde vorzugsweise Bleierz an den nördlichen Abhängen der Silberkuhle abgebaut, das dank seines relativ hohen Silbergehaltes eine besondere wirtschaftliche Bedeutung erlangt hat.

Tabelle 4.3.: Flächen- und Waldanteile des Einzugsgebietes

Nr.	Bezeichnung der Teilräume	Fläche in km ²	Flächenanteil am Gesamt-EZG in %	Waldanteil in km ²	Waldanteil in%
1	Silberkuhle	0,61	20,3	0,48	77,5
2	Hähnen	0,81	26,85	0,1	12
3	Wälder	0,48	15,91	0,45	92,7
4	Tilkhausen	0,28	9,47	0,1	36,3
5	Rest_Teilraum	0,83	27,47	0,15	17,6
6	Gesamtes Einzugsgebiet	3,03	100,00	1,3	42

4.3 Die Teilräume

Die Aufteilung des Gesamteinzugsgebietes in seine Teilräume wurde von Mitarbeitern der Universität Bochum schon vor Beginn meiner Diplomarbeit festgelegt. Die Aufteilung erfolgte nach dem eigentlichen Hauptvorfluter "Brachtpe", der im Teilraum Hähnen entspringt, sowie dreier einmündender Bachläufe und deren Teileinzugsgebieten.

Ein fünfter Teilraum, ohne eigentlichen Zufluß in den Hauptvorfluter im süd-östlichen Teil des Einzugsgebietes wurde nicht bemessen und wird hier als „EZG_Rest-Teilraum“ klassifiziert. Bei ersten Feldbegehungen ergab sich für das Gesamteinzugsgebiet ein recht homogener Eindruck bezüglich seiner Teilräume. Erste Unterschiede zeigten sich durch unterschiedliche Wald- und Wiesenanteile:

Es wird deutlich, daß sich die Teilräume „Silberkuhle“ und „Wälder“ bezüglich ihrer Waldanteile mit 78% bzw. 93 % deutlich von den übrigen Teilräumen abheben. Bei den Baumarten handelt es sich größtenteils um Fichtenmonokulturen, in den vernässten Bereichen wird rezent wieder auf ursprünglich ansässige Baumarten wie Birke, Buche und Eiche übergegangen. Die Quellbereiche, größtenteils Helokrenen, liegen innerhalb beider Teilräume in stark anmoorigen, vergleyten Waldbestand und variieren bezüglich ihrer Schüttung stark. Nur wenige dieser Quellen sind perennierend und allesamt stark vom Niederschlagsangebot abhängig. Bei den Wiesengeländen (Teilraum Hähnen und Tilkhausen) zeigte sich allgemein, besonders in Mittel- und Unterhangbereichen ein stark nässender oberer Bodenhorizont; dies auch nach längerer niederschlagsfreier Zeit: gerade in den Hufabdrücken der Kühe sowie in alten Fahrspuren sammelte sich Wasser, welches in den vergleyten Bereichen nur sehr langsam infiltrierte, aufgrund der hohen sommerlichen Temperaturen meist verdunstete. Auffallend war

ebenfalls, daß gerade im Auenbereich der anstehenden Gerinne, meist im ca. 5-10 m breiten Bachstreifen (Naßgleye) die Wiesen brachlagen, was darauf zurückzuführen ist, daß die schweren Landmaschinen in dem weichen Untergrund steckenbleiben würden. Zeigerpflanzen für ganzjährig nasse Bodenverhältnisse, waren Binsengräßer, die auch als Nitratzeiger fungierende Brennnessel, Hahnenfuß und Moose.

Aufgrund dieser ersten Beobachtungen bei Feldbegehungen, deren Eindruck sich bei einsetzenden Niederschlägen verstärkte, ergab sich die Vermutung, das hier Sättigungsfächenabfluß eine schnelle Abflußkomponente darstellt. Die Flächenanteile der Sättigungsflächen dominieren im Talbereich und setzten sich bei einsetzendem Niederschlag auf Unter- und Mittelhänge fort (variable source area). Verstärkt wird dies durch den stark ton- und lehmhaltigen Gehalt der oberen Bodenhorizonte, die zwar auf hohes Porenvolumen, aber geringe Infiltrations- und Leitfähigkeitsraten schließen lassen.

Auch die Verlagerung von Tonmineralen, die zur Entstehung von Staukörpern führen, sind gerade im Bereich der Pseudogleye in den Teilräumen Tillkhausen und Silberkuhle anzutreffen und führen zu anhaltender Staunässe. Bevor aber genauer auf mögliche Abflußbildungsprozesse eingegangen wird, folgt eine allgemeine Beschreibung der Teilräume sowie ihrer Besonderheiten. Die Beschreibung erfolgt jeweils vom Quellbereich ausgehend bis zum Teilgebietsauslaß und für jeden Teilraum getrennt. Ein besonderer Augenmerk liegt auf den anthropogenen Faktoren, die die natürlichen Eigenschaften der Teilräume stark verändern und sich Hydrochemie und Abflußbildungsprozesse auswirken.

4.3.1 Der Teilraum Hähnen

Allgemeine Beschreibung:
Der Teilraum Hähnen ist mit 0,8 km² der größte Teilraum des Einzugsgebietes. Mit einem Waldanteil von nur zwölf Prozent hat er den geringsten Baumbestand;



die weiträumigen Wiesenflächen werden zur Viehbewirtschaftung und Heugewinnung genutzt.; Brachflächen gibt es nur im Bereich der Bachstreifen. Zur weiteren Nutzung gehört ein Skilift,

Abb.4.3.:Teilraum Hähnen mit Skilift

der sich südwestlich der Jugendherberge befindet.

Die dort befindlichen Hangflächen wurden, um die winterliche Schneedecke länger erhalten zu können, drainiert, was zu schnellen Abflußkomponenten in diesem Hangbereich führt. Die sich in den Hanglagen befindlichen Quellen sind allesamt eingefasst und dienen als Brunnenstuben. Das in den Hanglagen abfließende Wasser wird in einem künstlich angelegten Feuerwehrteich gesammelt und in das eigentliche Gerinne eingespeist. Der Feuerwehrteich liegt am Talanfang und ist ebenfalls Fassung einer sich dort befindlichen Quelle. Ein sich im oberen Hangbereich befindlicher Bauernhof betreibt intensive Viehwirtschaft, und leitet einen Teil seines Abwassers direkt unterhalb

Abb.4.4.:Abwassereinleitung

des Feuerwehrteiches in das Gerinne.

Desweiteren befindet sich im Tal etwa 700 Meter unterhalb des Feuerwehrteiches eine Fischzuchtanlage, die aus 5 Einzelteichen besteht, die nur gering beschattet und stark eutrophiert sind. Somit ist der Teilraum Hähnen der am stärksten anthropogen beeinflusste, was sich an den höchsten im Einzugsgebiet gemessenen Leitfähigkeits-, DOC- und Nitratwerten zeigt.

Das Gerinne verläuft ausgehend von dem Feuerwehrteich entlang dem Talgrund und bildet den eigentlichen Ursprung der „Brachtpe“. Das Tal ist im oberen Bereich kerbförmig und weitet sich mit abnehmenden Gefälle.

Der Teilraum Hähnen besteht bodenkundlich aus Braunerden. Bei den durch Solifluktion entstandenen Fließerden kam es zur Durchmischung der Korngrößenfraktionen, so daß auch hier von einem schluffig bis lehmigen Oberboden ausgegangen werden kann, mit mittlerer bis geringer Wasserleitfähigkeit und Tendenz zu oberflächigen Vernässungen.

Besonderheiten im Teilraum Hähnen:

- Die Wiesen sind teilweise oberflächig vernässt, in den Hufabdrücken der Kühe sammelt sich Wasser: Dies deutet auf verlehnte obere Bodenhorizonte hin, eine geringe Bodeninfiltration und ein hohen Anteil an Sättigungsabfluß.
- Der geringe Silikatgehalt von nur 1,17 Milligramm pro Liter deutet auf einen oberflächennahen Abfluss im Hangeinzugsgebiet des Teiches hin (eventuell durch Drainage).
- Abwassereinleitung: unmittelbar unterhalb des Feuerwehrteiches wird Abwasser aus dem landwirtschaftlichen Betrieb ins Gerinne eingeleitet; das Wasser ist grünlichbraun, von üblem Geruch und die Sohle unterhalb des Zuflusses von Algent Teppichen bewachsen. Das Abwasser hat eine Leitfähigkeit von 315 uS/cm, einen Nitratgehalt von 44 mg/l, einen Chloridgehalt von 27 mg/l und einen DOC-Gehalt von 10,7 mg/l. Diese hohen Ionengehalte lassen vermuten, daß es sich hier um eine Stallkanalisation oder einen Überlauf eines Kläranlagenbehälters handelt. Dieser künstliche Zufluß verändert die aufgenommene Hydrochemie so stark, daß nicht mehr eindeutig auf geogene Quellen der Mineralisation im Teilraum Hähnen geschlossen werden kann.

- Fischzuchtanlage: Im Bereich der Talweitung durchfließt das Gerinne eine ca. 2 ha große mit Mischwald bestandene Teichanlage, bestehend aus fünf Teichen (2* ca 500 m², 3* ca 250 m² Fläche bei ca 1,5m Tiefe). Der größte Teil des Abflusses wird dem Bach entnommen, durch die kaskadenförmig angelegten Teiche geleitet und überschüssiges Wasser mittels Überlauf dem Gewässer zurückgeführt. Die Teiche sind sonnenbeschienen, stark eutrophiert und mit „Entengrütze“ belegt. Die Einschaltung dieser Teichanlage kann auf die Abflußbildung in Abhängigkeit der Teichwasserstände (Überlaufentwässerung) dämpfend wirken. Durch die längere Verweildauer des Wassers in den Teichen sowie der hohen Sonneneinstrahlung kommt es zur zusätzlichen Eutrophierung.

Zusammenfassung:

Der Teilraum „Hähnen“ wird charakterisiert durch den hohen Anteil seiner Wiesenflächen in Bereichen mit hoher Hangneigung, die schnell zum Abfluss beitragen. Abflußverschärfend kommen Drainageeinrichtungen im Bereich des Skiliftes hinzu, über deren Zustand und Verlauf keine näheren Angaben verfügbar waren.

Der Abfluß wird durch den Feuerwehrteich sowie die Fischzuchtanlage retiniert, dennoch reagiert der Teilraum als Ganzes unmittelbar auf ein Niederschlagsereignis, wie sich später noch zeigen wird.

Die intensive Nutzung des Teilraumes zeigt sich durch den hohen diffusen sowie punktuellen Nährstoffeintrag ins Gerinne.

Hähnen ist somit der am prägnantesten anthropogen geformte Teilraum des Gesamtgebietes.

4.3.2 Der Teilraum Tilkhausen

Allgemeine Beschreibung:

Der Teilraum Tilkhausen begrenzt das Einzugsgebiet im nord-westlichen Bereich und grenzt an den Teilraum Hähnen, sowie im östlichen Bereich an den Teilraum Silberkuhle. Tilkhausen ist mit seinen 0,3 km² Fläche der kleinste aller Teilräume und mit seinem geringen Waldanteil von ca. 30 % landschaftlich verwandt mit dem Teilraum Hähnen. Der Waldanteil befindet sich hauptsächlich im Bereich der Ausläufer der höchsten Erhebung im Einzugsgebiet, der Silberkuhle. 70 % der Fläche bestehen aus reinen „Naßwiesen“, die im Zeitraum meiner Feldstudien der Heuwirtschaft dienten. Das eigentliche Gerinne, entsteht aus zwei Bachläufen, die sich erst ca. 200 m vor dem Gebietsauslaß vereinigen und unterschiedliche Bereiche entwässern:

Ersterer beginnt unterhalb einer künstlichen Erdaufschüttung eines kleinen Industriebetriebes auf Höhe der Ortschaft Tilkhausen und ist geprägt durch hohe Leitfähigkeitswerte von 300 uS/cm und Nitrat-, Magnesium- und Calciumgehalte im Bereich zwischen 25 und 40 mg/l. Im Gegensatz hierzu steht ein sehr geringer DOC-Gehalt von <5 mg/l und ein Silikatgehalt von 2,3 mg/l. Vermutlich handelt es sich hierbei größtenteils um Sickerwasser aus der oben erwähnten Erdaufschüttung, welchem zusätzlich Abwässer des Betriebes beigemischt sind.

Der zweite Bachlauf entwässert hauptsächlich den Bereich der Nasswiesen, ein geringer Zufluß kommt aus dem höher gelegenen Waldstück, welches durch große Anmoorgleybereiche

gekennzeichnet ist. Die Nasswiesen sind von Entwässerungsgräben durchzogen, die im Gerinne münden. Die Hydrochemie dieses zweiten Bachlaufes steht im Kontrast zu Ersterem: Die Leitfähigkeit beträgt 65 uS/cm, der mittlere Ionengehalt bewegt sich zwischen 5 – 10 mg/l, der Silikatgehalt beträgt 1,8 mg/l. Dies läßt den Schluß zu, daß es sich hier entweder um erst kürzlich gefallenes Niederschlagswasser oder um Wasser aus mineralstoffarmen Bodenschichten handelt, denen während der intensiven Pflanzenwachstumsphase zusätzlich Nährstoffe entzogen wurden. Die Aufnahme der Längsschnitte erfolgte nach dreitägiger niederschlagsfreier Zeit, sodaß die erste Theorie verworfen werden kann. Das Gebiet der „Nasswiesen“ liegt im Bereich dichter Fließerdene, aus denen im Laufe der Zeit Pseudogleye (Klasse der Stauwasserböden, die durch gestautes Niederschlagswasser entstanden sind) gebildet wurden. Charakteristisch ist hier eine geringe Wasserleitfähigkeit des Staukörpers (Sd) im Bereich von <1cm/d, sowie eine Wasserleitfähigkeit von >10 cm/d im Bereich der Stauzone (Oberboden) (SCHEFFERER/SCHACHTSCHABEL,1998). Es wird ersichtlich, daß im Bereich dieser Flächen, das nutzbare Porenvolumen, in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Mächtigkeit der Stauzone, einer schnellen Sättigung unterliegt und zusätzlich auftretendes Ereigniswasser als Sättigungsflächenabfluß abgeführt wird. Andererseits erfolgt der Abfluß nach einem Niederschlagsereignis aus dem gesättigten Bereich der Stauzone (erhöhte Wasserleitfähigkeit) und ist entsprechend der Physiognomie des Bodenhorizontes nährstoffarm. Eine wesentliche Beteiligung von tieferem Grundwasser im Teilraum Tilkhausen ist nicht wahrscheinlich, da der Abfluß im Untersuchungszeitraum bereits nach 3- 4 tägiger Trockenheit trockenfiel. Dies lag mitunter auch daran, das das pflanzenverfügbare Wasser im Bereich der Stauzone der starken Transpiration der Pflanzendecke unterlag. Die Vegetation besteht hauptsächlich aus Flachwurzlern, aufgrund des hohen Ton- und Lehmgehaltes der oberen Bodenschichten ist der Fluss entlang von Makroporen lateral und vertikal begrenzt. Die Grabendränung dient wegen der starken Bindung des Wassers im Boden in erster Linie dem schnellen Ableiten von Ereigniswasser und wirkt sich abflussverschärfend aus.

Zusammenfassung:

- Der Abfluß, der am Gebietsauslaß mittels APEG beprobt wurde, besteht aus Wässern unterschiedlicher Herkunft: Ein Teil besteht aus anthropogen beeinflussten Sicker- und Abwasser aus dem Bereich der Ortschaft Tilkhausen, mit Leitfähigkeiten >300 uS/cm, während ein zweiter Bachlauf das eigentliche Nasswiesenareal und die darüber liegenden Anmoorgleye entwässert und sich bezüglich der Leitfähigkeit im Bereich von 60 uS/cm bewegt. Auch hier wird die Bestimmung von Herkunftsräumen, wie im Teilraum Hähnen, durch diffuse und punktuelle Zuleitungen erschwert.
- Am APEG-Standort, nach Vermischung der beiden Abflüsse, liegt eine Leitfähigkeit von 170 uS/cm vor, also liegt eine Mischung im Bereich von ca. 1:1,5 der beiden Teilabflüsse vor. Zu den Mischungsverhältnissen während Niederschlagsereignissen können keine Angaben gemacht werden.

- Die durch Pseudogleye bestimmte Pedologie des Teilraumes, sowie die damit übereinstimmende Hydrochemie des Gerinnelängsschnittes lassen auf potentiellen Sättigungsabfluß als dominierenden Abflußbildungsprozeß schließen. Eine Beteiligung von tiefem Grundwasser ist falls vorhanden, als gering anzusehen. Diese Aussage bezieht sich auf die räumlichen Gegebenheiten bis zum Standort des APEG's, der im Bereich oberhalb des Zusammenflusses mit dem Gerinne aus dem Teilraum „Silberkuhle“ errichtet wurde. Dieser Standort liegt im Übergangsbereich zwischen Mittel- und Unterhang.

4.3.3 Der Teilraum Silberkuhle

Allgemeine Beschreibung:

Der Teilraum Silberkuhle ist mit einem Flächenanteil von 20,3 % vom Ges.-EZG der zweitgrößte der untersuchten Teilräume und schließt sich an den Teilraum Tilkhausen an. Er ist zu 75,5 % bewaldet und beinhaltet den höchsten Punkt des EZG (Silberkuhle 514,1m). Der Teilraum erstreckt sich in nördlicher Richtung ausgehend von der Silberkuhle zum Hauptgerinne der Brachtpe hinab.

Besonders erwähnenswert ist die anthropogene Beeinflussung durch den dort erfolgten Bergbau. So sind die höhergelegenen Regionen durchsetzt von Stollen und bis zu 3 m tiefen Gräben, die hangabwärts verlaufen und rezent als Gerinneläufe agieren. Sie verlaufen entlang ehemals hydrothermal entstandener Erzgänge. Bei den heute verschütteten bzw.



Abb.4.5.: Blick auf den Teilraum Silberkuhle



eingebrochenen Stollen treten rotgefärbte, stark eisenhaltige Wässer aus, die aufgrund ihrer Hydrochemie dem Grundwasser entstammen.

Die Wälder bestehen größtenteils aus Fichtenbeständen, deren Zustand allerdings

Abb.4.6.: Quellaustritt (Mundloch)

aufgrund von Waldsterben, sowie der, durch die hohen Wasserstände hervorgerufenen, Pilzkrankheit „Rotfäule“ sehr schlecht ist. Ein weiterer Grund für den schlechten Zustand des Fichtenbestandes besteht in der Physiognomie der Fichte als Flachwurzler. Aufgrund des geringen Bodenhorizontes und des darunterliegenden Festgesteines kommt es bei Starkwind zu einer schnellen Entwurzelung der Fichten. Aus diesem Grund und aufgrund der Anfälligkeit zu Krankheiten wird in heutiger Zeit versucht, ursprüngliche Waldbestände in Form von Eichen- und Birkenkulturen neu zu kultivieren.

Die Quellbereiche werden dominiert von Anmoorgleyen und deren Botanik. Sie entwässern ohne klare, punktuelle Ortung in kleine Gerinne, die sich hangabwärts natürlich und durch anthropogene Eingriffe bündeln. Muldenspeicher (natürlich oder anthropogen (Erzabbau)) spenden ebenfalls oberflächlich abfließendes Wasser bei.

Der Oberboden ist nass und lehmig und neigt zur Vergleyung, d. h. das Wasser steht oberflächlich, der Boden zeigt eine, für Vergleyung typische, grauweiße Färbung.

Die Vegetation besteht in den als Helokrenen ausgebildeten Quellbereichen hauptsächlich aus Moosen, Farnen und Binsengrass inmitten eines lichten Fichtenbestandes. Die Hydrochemie der Quellen ist moortypisch :

Ein geringer PH-Wert von 5, sowie eine ebenfalls niedrige Leitfähigkeit von 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei gleichzeitig höchstem DOC-Gehalt im Gesamteinzugsgebiet (25 $\text{mg}/\text{l} \Rightarrow$ hoher Gehalt an nicht zersetzten Pflanzenresten) weisen deutlich auf saure, reduzierte Verhältnisse. Der Gehalt an Calcium und Magnesium ist der geringste aller Teilräume.

Das Wasser einzelner Quellbereiche sammelt sich zu einem Gerinne mit ca. 0,3 bis 0,5 m Breite. Die Sohle ist kiesig, das Wasser leicht bräunlich. Von hier fließt das Gerinne durch weitere Anmoorgleyebereiche auf einer Länge von ca. 300 Metern.

Daran anschließend beginnen die Muldengräben des Erzabbaues, denen das Gerinne folgt. Auffallend ist hier ein Quellaustritt aus einem verschütteten Stollen. Das Wasser, sowie die Sohle, sind die ersten ca. 20 m (aufgrund des hohen Eisengehaltes) intensiv orangefarben.

Das Gerinne verläuft weiterhin in ehemaligen Stollengräben und verbreitert sich sobald die Topographie es ermöglicht.

Es bilden sich Pools mit steiniger Sohle und dunklem, moorigem Belag. Im weiteren Verlauf des Gerinnes mündet ein weiterer Bachlauf ins Hauptgerinne, dessen Abflußmenge gleich bzw. größer der des Hauptgerinnes ist. Hier handelt es sich um einen weiteren Zufluß aus einem ehemaligen Silberstollen, der einstürzte und nun als Quelle fungiert und aus dem anstehenden Gestein entwässert.



Abb.4.7.: Erzganggräben

Wasser und Sohle sind noch ca. 100 m unterhalb orange gefärbt. Danach verliert das Wasser, wahrscheinlich aufgrund der Bindung des Eisens durch Huminchelate, sowie Eisen abbauender Pilze und Bakterien seine Färbung. Die von uns, aufgrund ihrer Färbung „Eisenquelle“ genannte Quelle, reagiert auf Niederschlagsereignisse sehr spontan, was darauf hindeutet, daß hier Wasser aus dem Grundwasserbereich durch Druckübertragung von höher gelegenen Bereichen schnell herausgedrückt wird. Desweiteren erscheint es wahrscheinlich, daß oberflächlich entlang von Klüften und Makroporen infiltriertes Ereigniswasser in den Stollengängen gesammelt wird, sich mit Grundwasser vermischt und als Returnflow am Mundloch wieder zu Tage tritt.

Im weiteren Verlauf durchfließt ein Teil des Abflusses drei beschattete und nicht mehr benutzte Fischteiche (nicht euthrophiert), die im Untersuchungszeitraum teilweise gefüllt waren. Die Teiche werden durch Entnahme aus den Gerinne gespeist (ca. 50% Entnahme) und entwässern mittels Überlaufen. In Höhe der Teiche kommt weiterer Zufluß aus einem, eigentlich dem Teilraum Tilkhausen zugehörigen, Wiesenbereich hinzu. Die Entwässerungsgräben sind in diesem Bereich so angelegt, daß eine eindeutige Zuordnung des Abflusses im Grenzbereich der beiden Teilräume nicht getroffen werden kann. Der Zufluß des Wiesenstückes liegt trocken, wird aber bei Niederschlagsereignissen durchflossen.

Zusammenfassung:

- Der Teilraum „Silberkuhle“ wird geprägt durch die im Bereich der Ausläufer der Silberkuhle gelegenen Helokrenen der Anmoorgleye und durch die Reokrenen im Bereich ehemaliger Stollengänge. Während das Quellwasser der Helokrenen „moorigen“ Charakter mit niedrigem PH-Wert und geringer Leitfähigkeit besitzt und eine eindeutige Ortung der Quellaustritte aufgrund der diffusen Zuläufe und geringen Austrittsmengen nicht möglich ist, entwässern die Stollengänge punktuell und mit hoher Schüttung und machen den Hauptteil des Abflusses aus. Leitfähigkeiten von 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, hohe Sulfat-, Magnesium- und Calciumgehalte, sowie die durch Eisen geprägte Farbe lassen auf Grundwasser mit längeren Verweilzeiten schließen. Die rasche Abflußzunahme bei einsetzendem Niederschlag der im Bereich von Erzgängen gelegenen Quellaustritte, läßt sich bezüglich der Abflussbildungsprozesse, wie folgt interpretieren:

A: Auf den Hochlagen, im Bereich der Erzabbaugruben (pedologisch noch nicht sperrende Braunerdebereiche) und innerhalb der Waldflächen, entlang von Klüften und Makroporen, infiltrierendes Wasser sammelt sich innerhalb der hydrothermalen Gänge und kommt als Returnflow wieder zum Vorschein.

B: Durch den in den Hanglagen auftretenden Pseudogley und seinen, als Sperrzonen fungierenden schlecht durchlässigen Bodenschichten, kommt es zu gespannten Grundwasserverhältnissen; dadurch kann auf den Hochflächen (Braunerdehorizonte) Wasser infiltrieren und so durch Druckübertragung schnell Vorerigniswasser aus den ehemaligen Stolleneingänge pressen ($\Rightarrow$ Piston Flow)

Sättigungsflächenabfluß konnte nur im Bereich der Anmoor- und Stagnogleye beobachtet werden, und spielt in diesem Teilraum eine untergeordnete Rolle. Auf den, in Gefällsrichtung ausgerichteten, Forststraßen bildete sich ein unmittelbar bei Niederschlagsbeginn einsetzender Horton`scher Overlandflow, der beim Starkregenereignis am 19.7.2001 zu Flutungen im Zentimeterbereich führte, große Sedimentfrachten mit sich führte und erst im Bereich des Unterhanges durch Dohlen dem Gerinne zugeführt wurde.

4.3.4 Der Teilraum Wälder

Allgemeine Beschreibung:

Der Teilraum Wälder ist mit 93% Waldbestand mit Ausnahme der Talbereiche komplett bewaldet. Nur auf den letzten ca. 500m bis zum Gebietsauslaß befinden sich Nasswiesen, die allerdings schon in den Bereich der Naßgleyhorizonte der Talauen übergehen.

Weite Areale des Gebietes sind mit ursprünglicher Mischwaldvegetation aufgeforstet, doch liegt auch hier noch der Hauptanteil bei den anfälligen Fichtenmonokulturen, die durch Windsturz und Pilzfäule geschädigt sind. Dennoch hat dieser Teilraum weitgehend den für diese Region ursprünglichen Zustand und die geringste anthropogene Überformung in Bezug auf die übrigen Teilräume erfahren.

Die Quellbereiche liegen im Bereich der Unterhänge, die Böden sind in diesem Bereich stark vergleyt, aber nicht „moorig“ wie im Bereich der Helokrenen im Teilraum „Silberkuhle“. Aber auch hier sind die einzelnen Quellaustritte diffus und abhängig von Vorfeuchte des Bodens und früheren Niederschlagsereignissen. Das Gerinne hat sich kerbförmig eingeschnitten und sammelt das Wasser aus den zahlreichen im Unterhang befindlichen Helokrenen.



Abb.4.7:Helokrenenbereich

Die Hydrochemie der Quellaustritte ist durch Leitfähigkeiten um 100 uS/cm und einem mittleren PH-Wert von 6,8 gekennzeichnet. Hervorzuheben ist auch der im Verhältnis zu den Quellbereichen der anderen Teilräume höchste Silikatgehalt von 3,3 mg/l, was auf längere Verweilzeiten im Untergrund schließen läßt. Bemerkenswert erscheint auch, daß sich die Quellen genau im Übergangsbereich der Gefällsminderung zwischen Hang und Tal befinden. In Verbindung mit dem Phänomen der starken Einkerbung des Gerinnes in den Talboden bis auf Höhe des anstehenden Gesteines kann es sich hierbei um ein Anschneiden grundwasserführender Schichten handeln; im Bereich dieser Schwächezonen sammelt sich hangabwärtsfließendes Wasser und tritt aus.



Abb.4.8.: Sättigungsflächen

Das Gerinne verläßt nach circa 500 m den schattenreichen Wald und fließt in den Bereich der Nasswiesen. Gerade beim Übergang in die Wiesenflächen sind die Bachstreifen so nässend, das ein tiefes Einsinken nicht vermieden werden kann; wir befinden uns hier im Bereich der Naßgleye, mit bis zur Geländeoberkante anstehendem Grundwasser. Dieser Bereich liegt brach, da eine Bearbeitung nicht möglich ist. Bei Durchfließen der Nasswiese macht sich eine deutliche Veränderung der Gewässerchemie bemerkbar: Der PH-Wert sinkt auf 6,3 und auch die Leitfähigkeit sinkt um 10-20 uS/cm.

Ein wenig mineralisierter Zufluß der verarmten Nasswiesenbereiche tritt hinzu. Die Wiesenbereiche sind durch wassergefüllte Muldenspeicher, wie Hufabdrücken und Fahrspuren, geprägt, zur Zeit meiner Feldbegehung sank ich oft knöcheltief in den verlehmtten Oberboden ein. Zeichen für geringe hydraulische Leitfähigkeitswerte, nahe der Oberfläche stehendes Grundwasser und dominierenden Sättigungsflächenabfluß.

Zusammenfassung:

Der Teilraum „Wälder“ läßt zwei unterschiedliche Wasserherkunftsräume vermuten:

A: Wasser, welches in den bewaldeten Hochlagen und Hangbereichen infiltriert und nach längerer Verweilzeit im Boden an den Quellen im Bereich des Unterhanges zu Tage tritt. Ob hier schnelle Abflußprozesse wie schneller Interflow oder Pistonflow auftreten, konnte durch die Feldbegehungen und Aufnahme der Längsschnitte nicht festgestellt werden.

B: Mit Übergang des Gerinnes in die sich öffnenden Talregionen verändert sich die Gewässerchemie und der Einfluß von Sättigungsflächen und hochstehendem Grundwasser macht sich in der Abnahme der Leitfähigkeiten und geogenen Ionengehalte sowie einer leichten Zunahme des Nitratgehaltes bemerkbar.

Im weiteren Verlauf des Gerinnes bis hin zur Mündung in die, dem Teilraum „Hähnen“ entstammende, Brachtpe kommt es zu einem leichten Anstieg der Leitfähigkeit, der Calcium-, Natrium und Sulfatgehalte. Diesem Phänomen könnte ein verstärkter Grundwasserzutritt geogener Herkunft zu Grunde liegen.

4.3.5 Zusammenfassung der Differenzierung der Teilräume

Die Abflußbildungsprozesse sind stark von der jeweiligen Pedologie beeinflusst. Gerade im Bereich der Hanglagen haben sich aus den, durch Solifluktion entstandenen, Fließerden im Laufe der Zeit Stagno-, Anmoor- und Pseudogleye gebildet. Aber auch im Bereich der Talauen sind durch ganzjährig hochstehende Grundwasserstände Naßgleyen entstanden. Ist die Infiltrationskapazität dieser Böden erschöpft, bildet sich Sättigungsflächenabfluß.

Ebenfalls leicht sättigende Böden sind die Wiesenbereiche (Teilraum Hähnen) der Braunerden mit hohen Lehm- und Tongehalten in Gebieten großer Hangneigung. Auch hier besteht die Tendenz zu Sättigungsflächenabfluß, allerdings nicht so ausgeprägt wie in den vergleyten Bodenbereichen.

Die Talbereiche aller Teilräume sind Wiesenflächen, die stark vernässt und vergleyt sind. Gerade im Bereich der unmittelbaren Talauen gehen sie in Naßgleybereiche über (Quelle: GLA, 1970). Unter Berücksichtigung der hier vorhandenen hohen Grundwasserstände bilden sich hier Sättigungsflächen aus. Desweiteren kann innerhalb der Hochlagen (und innerhalb der waldbestandenen Hanglagen) infiltriertes Wasser durch Druckübertragung eine Abflußerhöhung bewirken.

Im Bereich des Teilraumes „Silberkuhle“ zeigt sich an den Mundlöchern ehemaliger Stollengänge eine unmittelbare Reaktion auf einsetzenden Niederschlag. Dies kann durch entlang von Schwächezonen schnell infiltrierendem Ereigniswasser erklärt werden (Return Flow), aber auch durch Piston Flow Prozesse bei gering durchlässigen Deckschichten im Hangbereich und schnell infiltrierendem Niederschlag im Bereich der Hochflächen. Sehr wahrscheinlich ist eine Überlagerung beider Prozesse.

Im Teilraum Wälder erfolgt ebenfalls eine unmittelbar einsetzende Abflußreaktion, deren Deutung aber nicht offensichtlich ist. Möglich wäre eine Überlagerung verschiedener Prozesse; unmittelbar abflußbildend sind die Nasswiesen im Unterlauf des Gerinnes. Hier kann Sättigungsabfluß unmittelbar dem Gerinne zugeführt werden, auch Pistonflow durch in Hang- und Hochlagen infiltriertes Ereigniswasser scheint wahrscheinlich. Zeitlich verzögert werden die Quellaustritte innerhalb der Waldbestände entwässern.

Durch diffuse und punktuelle Abwassereinleitungen wird die regional bestimmte Gewässerchemie anthropogen stark verändert (speziell in den Teilräumen Hähnen und Tilkhausen).

Die Teichanlagen in den Teilräumen Hähnen und Silberkuhle wirken in Abhängigkeit der Teichwasserstände (Entwässerung durch Überläufe) retinierend, was ebenfalls die Interpretation der Hochwasserwellen erschwert.

Tabelle 4.4 : Differenzierung der Teilräume

Teilraum:	Silberkuhle	Wälder	Hähnen	Tilkhausen
dominante Vegetation:	Wald	Wald Unterlauf: Nasswiese	Wiese	Wiese Oberlauf: Wald
Quellen:	Oberhang: Helokrenen, Anmoorgleye Mittelhang:Reokrenen (künstl., Bergbau)	Helokrenen	Gefasst: Brunnenstuben, Teich	Oberhang: Helokrenen auf Anmoorgleyen
petrograph.und geologische Besonderh.:	Pseudogleye mit Sperrkörper +Stauzone Hydrothermal entstandene Erzgänge	Ausgeprägte Sättigungsflächen im Unterlauf	Braunerden, hohes Gefälle, Vernässung	Pseudogleye mit Sperrkörper+ Stauzone
anthropogene Besonderh.:	Bergbau, Stollengänge als Quellaustritte, Fischteiche-Retention	(Steinbrüche)	Drainage des Skiliftes, Abwasser-einleitung, Fischteiche	Abwasser- und Sickerwasser-einleitung

Bei Starkregen beobachtete Abflussbildungsprozesse:	-Overlandflow auf Wegen -schneller Interflow im Bereich Mull,Streu -Returnflow bei Stollenausgängen	-ausgeprägter Sättigungsabfluss im Nasswiesenbereich -rasche Zunahme der Helokrenen - Interflow im Bereich Streu, Mull	Sättigungsflächenabfluß -variable source areas -rasche Zunahme von Abwasser- und Sickerwasserzufluß
---	---	--	--

5

Experimenteller Teil

5.1

Aufbau des Messnetzes



Abb.5.1:Automatisches
Abflußentnahmegerät



Abb.5.2: Klimastation mit N-APEG

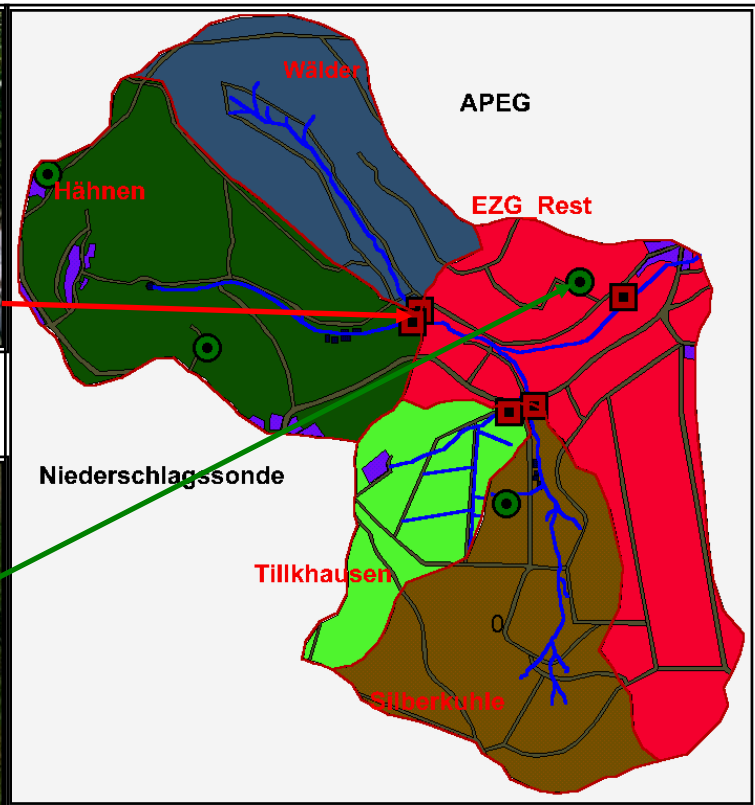


Abb.5.3: Standorte der APEG's und Niederschlagssonden

Der experimentelle Teil meiner Diplomarbeit startete mit der Aufstellung der diversen Meßgeräte. Die Standorte der Beprobung und die daraus resultierenden Teilräume des Einzugsgebietes ergaben sich aus den Zusammenflüssen der einzelnen perennierenden Bachläufe. Kurz vor dem Einmünden in das Gerinne nächsthöherer Ordnung wurde ein Automatisches Probeentnahmegerät (siehe Abbildung 5.3:rote Quadrate), sowie eine Multidrucksonde zur Aufzeichnung von Wasserstand, Leitfähigkeit und Temperatur installiert. Desweiteren wurde ein automatisches Probeentnahmegerät am Einzugsgebietsauslaß postiert. Hier befindet sich zusätzlich eine Drucksonde der Universität Bochum, sowie ein, vom Ruhrverband betriebenes, Wehr (mit pneumatischem Wasserstandsgeber). Ziel dieser Versuchsanordnung war es, zum einen die Reaktion des Gesamtgebietes qualitativ und quantitativ erfassen zu können, zum anderen die gebietsspezifischen Anteile der Teilräume des Gesamtgebietes herkunftsbezogen qualitativ aufzunehmen.

Um die Eingangsgröße des Niederschlages detailliert erfassen zu können (zu Beginn der Diplomarbeit war eine isotopische verweilzeitorientierte Auswertung geplant, die aber aufgrund zu großer Auslastung des Massenspektrometers des hydrometrischen Labores scheiterte), wurden an verschiedenen Stellen unterschiedlicher Höhenstufen Niederschlagssonden (siehe Abb. 5.3: grüne Kreise) installiert. Hierzu zählten ein digitaler Pluviograph, 1 automatisches Niederschlagsprobeentnahmegerät mit integriertem Datenlogger,

sowie 4 Niederschlagssammler (2 nach Hellmann, 2 Marke „Eigenbau“). Desweiteren durfte ich freundlicherweise auf sämtliche Daten der von der Universität Bochum betriebenen Klimastation zurückgreifen und auch die an einem Messhang erfassten Tensiometermessungen und Grundwasserstandsmessungen in meine Diplomarbeit integrieren. Auch an dieser Stelle meinen besonderen Dank an Peter Chiffard, dem Mitarbeiter aus Bochum.

Tab. 5.1.: Parameteraufnahme während Meßkampagne vom 15.07. - 16.08.2001

Messorte	Aufgenommene Parameter	Beprobungsintervall	Meßgerät
Teilräume - Hähnen - Wälder - Silberkuhle - Tilkhausen	- Wasserstand - LF, Temp. - Silikat, - Kationen - Anionen	10 min. 10 Minuten 1-6 h 1-6 h 1-6 h	Multisonde Multisonde APEG APEG APEG
Einzugsgebiets- auslaß	- Wasserstand - Silikat, - Kationen - Anionen - Abfluß(fehlerhaft)	10 min. 1-6 h 1-6 h 1-6 h 15 min	Drucksonde APEG APEG APEG P-Q-Beziehung
Niederschlag	- Menge - Ionen - $\delta^{18}\text{O}$	-Niederschlags- sonden(mm/10min.) -Niederschlagssammler (mm) -N-Apeg (mm/Zeitraum)	Hellmann Pluviograph Niederschlags- sammler N-Apeg
Gerinnelängs- schnitte	- LF,Temp - PH-Werte - Ionen - DOC	3 komplette Aufnahmen an mehreren Stellen zwischen Quelle und Mündung	-portable Feldgeräte -Probenahmen
Messhang der Universität Bochum	- Klimastation - Saugspannung - Grundwasser- stand	- mm/10 min -10 min. an Ober-, Mittel- , Unterhang und Aue	- Pluviograph - Tensiometer in versch. Tiefen

5.1.1 Kurzbeschreibung der automatischen Probeentnahmegерäte:

Die Automatischen Probeentnahmegерäte (kurz „APEG“) haben sich für die kontinuierliche

Entnahme von Wasserproben als äußerst praktisch und zuverlässig erwiesen.

Ein APEG besteht aus einer tragbaren Feldkiste, die wasserdicht ist und die komplette Aperatur enthält. Mittels einer Pumpe und eines im Gerinne postierten Saugschlauches wird Wasser aus dem Gerinne gesaugt und mittels Verteilerventilen in eine von insgesamt 42 Probefläschchen (a 100 ml) gefüllt. Die Probefläschchen befinden sich in einem elektrisch beweglichen Karusell, welches sich nach jeder Probenahme um eine Position weiterbewegt. Nach jeder Probenahme wird das System gepült, um Rückstände der vorherigen Probenahme zu beseitigen. Das Gerät wird mittels einer Zeitschaltuhr gesteuert, wodurch Messintervalle im Bereich zwischen 15 min. bis zu 24 h programmierbar sind. Die Energieeinspeisung erfolgt über einen sich im Gerät befindlichen Akku, der genügend Reserven für einen einmonatigen Betrieb birgt. Dennoch sollten die Probefläschchen in täglichem Rythmus zumindest verschlossen werden, da gerade bei hohen Temperaturen eine Verdunstung aus den Flaschen vermieden werden sollte.

Das automatische Probeentnahmegerät zur Niederschlagsbeprobung (kurz N-Apeg) entspricht im Grundaufbau dem des Abfluß-Apeg. Allerdings sind zur Niederschlagserfassung folgenden Veränderungen vorgeommen worden:

Die Aufnahme des Niederschlages erfolgt über einen auf dem Deckel des Gerätes postierten normierten Trichter. Das Gerät ist so programmiert, daß jeweils die einem mm- Niederschlag entsprechende Menge, in eine Probeflasche abgefüllt wird. Hierbei zeichnet ein Datenlogger die Menge des gesammelten Niederschlages pro Zeiteinheit auf, so daß eine Zuordnung der Proben zum Zeitpunkt des gefallenen Niederschlages möglich ist. Dies ist gerade bei der Auswertung verweilzeitorientierter Isotopenanalysen hilfreich, da die Isotopengehalte nicht gemittelt (bulk-mean), sondern zeitlich aufgelöst (incremental-mean) berechnet werden können.

5.1.2 Der Untersuchungszeitraum

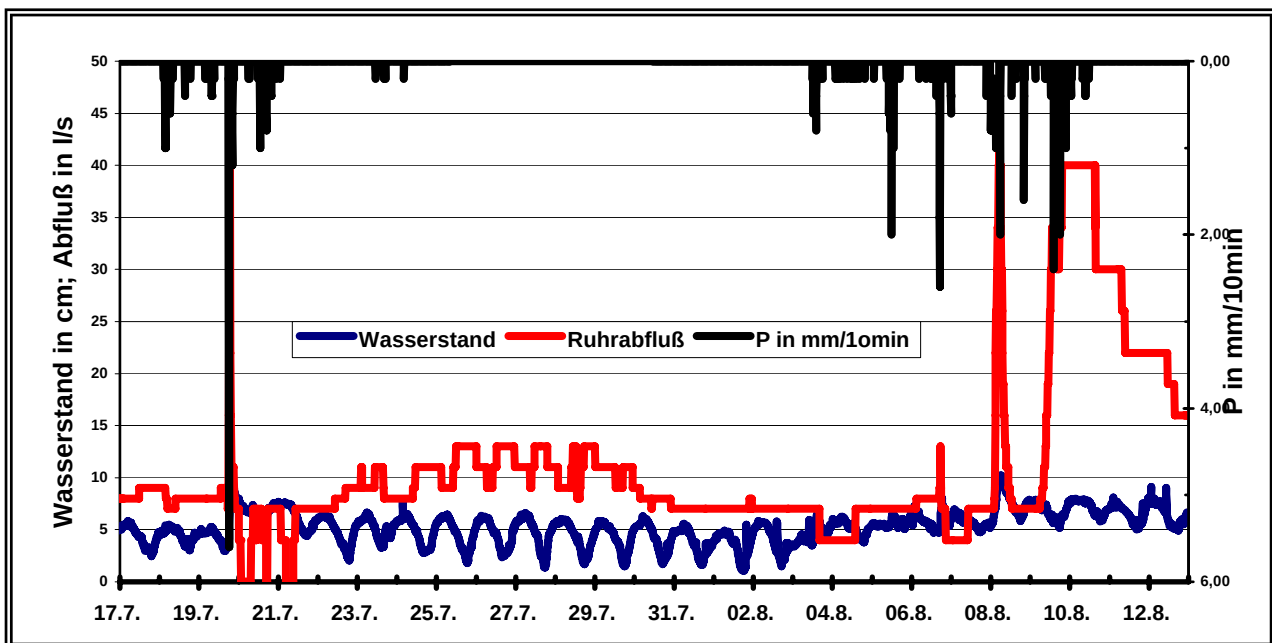


Abb.5.4 : Der Untersuchungszeitraum

Die Messkampagne startete am 16. Juli 2001 und erstreckte sich über annähernd einen Monat bis zum 13. August 2001. In der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraumes kam es am 19.7.2001 gegen 18:00 Uhr zu einem konvektiv entstandenen Starkregenereignis (Gewitter mit zeitweiligem Hagel) mit Niederschlagsintensitäten von bis zu 6 mm / 10 min. und einer Gesamtniederschlagsmenge von ca. 13 mm. Im folgenden Zeitraum entstand in den Nachmittagsstunden eine tägliche Konvektivbewölkung, leider kam es aber zu keinen hydrologisch relevanten Niederschlagsereignissen. Aus diesem Grund beendete ich Ende Juli meine Feldarbeit vor Ort, da die Wettervorhersagen für die erste Augustwoche stabile Wetterverhältnisse und Trockenheit vorhersagten. Peter Chiffard war freundlicherweise bereit, bei wieder einsetzenden Niederschlagsereignissen, die vor Ort gebliebenen Apeg's in Betrieb zu setzen (auch dafür meinen herzlichen Dank). So konnten wir in der ersten Augushälfte einen ausgeprägten Langzeitregen, advektiven Ursprunges, mit maximalen Niederschlagsintensitäten von ca. 2 mm/10min in der Zeit zwischen 4. und 11. August erfassen. Auf diese beiden Niederschlagsereignisse wird sich die folgende Auswertung konzentrieren. Der experimentelle Teil der Diplomarbeit endete am 13. August mit dem Abbau der Meßinstrumente und einer Stichtagsbeprobung zur Bestimmung von Fließzeiten und Abflüssen der Teilräume sowie des Gesamteinzugsgebietes.

In Abbildung 5.4 sind der Untersuchungszeitraum, die Niederschlagsintensitäten, sowie der Wasserstand und der Abfluß (aufgenommen vom Wehrbetreiber Ruhrverband) am Einzugsgebietsauslaß aufgezeichnet. Es wird deutlich, daß die Abflußdaten nicht mit den Wasserstandsdaten übereinstimmen und gerade im Bereich des Starkregenereignisses vom 19.7. der Abfluß gegen 0 l/s tendiert. Dies lag nach Auskunft des Ruhrverbandes an einem Defekt des pneumatischen Wasserstandsgeber mit der Konsequenz, daß eine quantitative Ausarbeitung für

mich nicht möglich war und daher hier nur eine qualitative, prozentuale Auswertung erfolgen konnte. Eine Regression zwischen Wasserstandsdaten der Drucksonde und der fehlerhaften Abflußganglinie war aufgrund des nicht geometrischen Gerinnequerschnittes nicht hilfreich. Interessant erscheint mir auch in dieser Abbildung auf die täglichen, periodischen Wasserstandsschwankungen zu verweisen, die sich in gleicher Ausprägung auch beim Grundwasserstand finden lassen. Hierbei handelt es sich um Wasserstandsminimas in den Nachmittagsstunden, die durch die verstärkte Transpiration der Vegetationsdecke gerade im Bereich der Talauen hervorgerufen werden. Dies verringert zum einen die Perkolation von Ereigniswasser ins Grundwasser, desweiteren kommt es durch die verstärkte Wasserentnahme der Pflanzen zu einer Absenkung des Grundwasserstandes, was sich mit nur geringer Verzögerung durch einen reduzierten Abfluß bemerkbar macht. *Karrenberg* , der in dieser Region im Zusammenhang mit dem Bigge-Talsperrenbau Wasserhöfigkeiten untersuchte, spricht in diesem Zusammenhang humorvoll von „Nachmittagsdepressionen“ der Brachtpe!

6 Analyisierte Wasserinhaltsstoffe und Methodik

Vor der eigentlichen Auswertung der Meßergebnisse werden im folgenden Kapitel kurz die analysierten Wasserinhaltsstoffe, sowie die Analysemethoden vorgestellt.

6.1 Analysierte natürliche Tracer

6.1.1 Gelöstes Silikat

Das Verhalten des Tracers Silikat ist, wie das Verhalten aller geogenen Tracer, gekennzeichnet durch dessen Wechselwirkungen mit anorganischen und organischen Bestandteilen der ungesättigten und gesättigten Zone. Die daraus resultierenden Konzentrationen im Abfluß lassen Schlüsse über Herkunftsräume und Fließwege zu (WELS et al., 1991b).

Für die herkunftsraumorientierte Ganglinienseparation ist die Kenntnis der Quellen des Silikats notwendig. In wässriger Lösung liegt gelöstes Silikat in Form der Ortho-Kieselsäure H_4SiO_4 , einer schwachen Säure, vor. Sie stammt in erster Linie aus der Verwitterung der primären Silikate (Feldspäte, Glimmer, Pyroxene, Amphibole und Olivine). Die Oxide des Siliziums sind dagegen wegen der hohen Bindungskräfte im Ionengitter sehr verwitterungsbeständig. Die Silikatverwitterung nimmt mit sinkendem pH-Wert (bedeutend für die niedrigen pH-Werte im Bereich der Anmmorgleye) und steigender Temperatur zu (SCHACHTSCHABEL et al., 1998). Protonenlieferant für die Hydrolyse bzw. Protolyse der Silikate sind vor allem die Kohlensäure und organische Säuren. Die entstehenden Verwitterungsprodukte werden durch Pflanzenaufnahme und Transport mit der fließenden Bodenlösung ständig abgeführt. Zum Teil entstehen auch sekundäre Minerale (Tonminerale, Oxide, Hydroxide) und in humusreichen Bodenhorizonten bilden sich gut- bis schwerlösliche Eisen- bzw. Aluminiumkomplexverbindungen. Es findet also keine Gleichgewichtseinstellung mit der Bodenlösung statt, weshalb die Silikatverwitterung ständig fortschreitet. Da diese teilweise sehr langsam verläuft, ist insbesondere die Kontaktzeit des Wassers zu den silikatischen Mineralen für den Lösungsinhalt des Wassers ausschlaggebend.

Die Ganglinienseparation mit gelöstem Silikat dient der Trennung des Gesamtabflusses in eine Komponente, die der Oberfläche und den oberflächennahen Schichten entstammt, und in eine Komponente, die aus tieferen Bereichen der ungesättigten und gesättigten Zone kommt. In zahlreichen Untersuchungen wird die oberflächliche Komponente der Ereigniswasserkomponente aus der Separation mit Isotopen gleichgesetzt, da davon ausgegangen wird, daß die Kontaktzeit des Wassers mit der mineralischen Phase gering ist (z.B. HOOPER & SHOEMAKER, 1986; LAUDON & SLAYMAKER, 1997). Die aus tieferen Bereichen stammende Komponente entspricht dann der Vorereigniskomponente, bei der die Kontaktzeit größer ist und die deswegen auch eine höhere Silikatkonzentration aufweist. Der Vergleich der Ergebnisse macht jedoch den Unterschied zwischen verweilzeitorientierter und herkunftsraumorientierter Komponententrennung deutlich. So kann z.B. oberflächennahes Bodenwasser der ungesättigten Zone mobilisiert werden, das sich mit gelöstem Silikat anreichern konnte. Dies führt dann zu einer Unterschätzung der oberflächennahen Komponente. Wegen der unklaren Lösungsgeschwindigkeit ist die Festlegung der Konzentrationen der beiden Komponenten bei der Komponententrennung mit Silikat problematisch. Außerdem ist die Annahme, daß die Konzentrationen im Verlauf des Ereignisses konstant sind, fragwürdig, da Silikat nicht als

konservativer Tracer anzusehen ist. Es unterliegt im Boden sowohl der Adsorption als auch der Desorption (SCHACHTSCHABEL et al., 1998). Für die Festlegung des Silikatgehaltes der Abflußkomponente aus dem tieferen Bereich bietet es sich an, die Konzentration des Basisabflusses vor Ereignisbeginn zu übernehmen (HOOPER & SHOEMAKER, 1986).

6.1.2 Die Haptionen

Die Haptionen zählen mit Ausnahme von Chlorid zu den nicht konservativen Tracern, da sie an biogeochemischen Stoffkreisläufen beteiligt sind. Daher besitzen sie zahlreiche Quellen und Senken, die im einzelnen nur schwer auszumachen sind. Sie werden in z.T. nicht unerheblichen Mengen über atmosphärische Depositionen eingetragen (ARMBRUSTER, 1998). Vielfältige geochemische Prozesse (Redox-Reaktionen, Ausfällungen, Adsorption- bzw. Auswaschungsvorgänge in Abhängigkeit von pH-Werten) spielen gerade im Bereich der vernässten Bereiche (Stagno- und Anmoorgleye, Pseudogleye) und im Bereich der hydrothermale Gänge im Einzugsgebiet eine entscheidende Rolle. Dennoch können über ihr Verhalten (Verdünnung oder Anreicherung im Abfluß während eines Niederschlags-Abflußereignisses) Aussagen zu den zum Abfluß beitragenden Herkunftsräumen gemacht werden, falls eine Zuordnung zu den Quellen der natürlichen Tracern gemacht werden kann. Im vorliegenden Fall wurde diese Zuordnung gerade durch anthropogene Zuleitungen von Ab- und Sickerwasser enorm erschwert.

Chlorid (Cl^-) wird in Böden nur zu sehr geringen Anteilen adsorbiert, was an der negativen Ladung, dem geringen Ionenradius und der hohen Löslichkeit liegt. Eine geogene Quelle stellen die tonreichen marinen Sedimentgesteine dar, die bis zu 3% Chlorid enthalten können. In Böden werden Chloride bei pH-Werten > 5 nur zu sehr geringe Anteile adsorbiert. Mit abnehmenden pH-Werten steigt die Chloridadsorption vor allem bei eisenoxidreichen Böden, was bedingt auf die Teilräume Silberkuhle und Tilkhausen zutrifft. Weitere Chloridquellen im Untersuchungsgebiet sind Düngereinsatz mit Kali, der Niederschlag und in geringem Maße der Streusalzeinsatz im Winter.

Nitrat (NO_3^-) ist ein Bestandteil des Stickstoffkreislaufs. Es unterliegt im Ökosystem vielfältigen biochemischen Umwandlungsprozessen, was seinen Gebrauch als Tracer stark einschränkt. Jedoch kann eine erhöhte Nitratkonzentration im Abfluß auf eine Beteiligung oberflächennaher Komponenten hindeuten. Da in den Teilräumen Hähnen und Tilkhausen punktuell Abwässer mit sehr hohen Nitratgehalten eingespeist werden, kann zwischen natürlichen und anthropogenen Herkunftsräumen nur bedingt unterschieden werden. Allerdings können diese Einspeisungen auch als künstliche Tracer interpretiert werden und bei einer Quantifizierung im Bereich der Einleitungen beispielsweise zur Berechnung von Fließzeiten und Abflüssen bei Hochwasser- und Niedrigwasserereignissen genutzt werden.

Sulfate (SO_4^{2-}) entstehen geogen durch die Verwitterung (Oxidation) von Sulfiden (Fe, Zn, Pb, Cu, Hg, Ni, Ag, u.a.). SO_4^{2-} kann durch Oxidation von schwefelhaltigen Mineralen

(z.B. Pyrit [FeS_2]) in Lösung gehen. Für den Sulfataustrag sind ebenso wie beim Stickstoff ökosysteminterne Umsätze entscheidend. Eine bedeutende Quelle im Einzugsgebiet sind die hydrothermalen Gänge im Teilraum Silberkuhle.

Kalium (K^+) hat seine natürlichen Quellen hauptsächlich in der Verwitterung der Kalifeldspäte und Glimmer. Es ist ein wichtiger Pflanzennährstoff und wird dem Boden häufig durch Düngung zugeführt. Im Bereich des Mineralbodens unterliegt Kalium der spezifischen Adsorption durch Tonminerale (Kaliumfixierung). Maximale Konzentrationen mobilen Kaliums finden sich im humosen Oberboden, wo die Kaliumfixierung von untergeordneter Bedeutung ist (SCHACHTSCHABEL et al., 1998). Daher weist es auf oberflächennahe Abfluß-bildungsprozesse hin.

Natrium (Na^+) stammt hauptsächlich aus der Verwitterung der Natronfeldspäte und spielt als Nährstoff für Pflanzen eine untergeordnete Rolle. Wegen seiner geringen Eintauschstärke ist es nur schwach gebunden und wird daher leicht ausgewaschen. Die höchsten Natriumgehalte treten in der Schlufffraktion der Böden auf, in der Natrium vor allem an Feldspäte gebunden ist.

Calcium (Ca^{2+}) entstammt vorwiegend der Verwitterung von Plagioklasen, Amphibolen und Pyroxenen bzw. aus Calcit-, Dolomit- und Gipssteinen. Eine weitere Quelle ist die Düngung, sowie die Kalkung von versauerten Waldböden. Calcium besitzt eine hohe Eintauschstärke und wird daher von den Austauschern im Boden stark gebunden. Herkunftsraumbezogen weist es normalerweise auf geogene Abflußkomponenten.

Magnesium (Mg^{2+}) besitzt ebenfalls eine hohe Eintauschstärke und ist essentielles Makro-nährelement aller Lebewesen. Es wird freigesetzt bei der Verwitterung von Silikaten, im besonderen von Amphibolen, Pyroxenen, Olivinen, Biotiten und einigen Tonmineralien, wie Chloriten und Vermiculiten. Wie beim Calcium wird es geogen gedeutet.

DOC (dissolved organic carbon), beschreibt den Gehalt an gelöstem organischen Kohlenstoff als Sammelbegriff verschiedener gelöster organischer Substanzen. Es ist Indiz für humose Anteile im Abfluß und Anzeiger für die Trophie eines Gewässers. Bei Anmoorgleyen liegen im EZG die höchsten DOC-Werte, da hier aufgrund der reduzierten Bedingungen und niedrigen pH-Werte die Autolyse und der mikrobielle Abbau organischer Substanz sehr langsam ablaufen.

Die **elektrische Leitfähigkeit** eines Wassers ist eine Funktion seiner Ionenkonzentration. Sie ergibt sich aus dem reziproken Wert des elektrischen Widerstands. Die Leitfähigkeit ist temperaturabhängig, daher wird sie auf 25 °C bezogen, die Angabe erfolgt in $\mu\text{S}/\text{cm}$. Da die Leitfähigkeit ein Summenparameter aller im Wasser gelösten Ionen ist, kann durch Multiplikation des gemessenen Wertes mit 0,8 der Gesamtsalzgehalt in mg/l ungefähr ermittelt werden (MÜLLER, 1995).

6.2 Methodik der Ganglinienseparation

Als Ganglinienseparation wird im allgemeinen die Aufgliederung der Ganglinie des Gesamtabflusses in die Ganglinien der einzelnen Komponenten bezeichnet. Diese Abflußkomponenten unterscheiden sich in ihren Herkunftsräumen, den Fließwegen durch das Einzugsgebiet, ihren Verweilzeiten in diesem und damit auch in ihrer Dynamik und Beschaffenheit (DYCK & PESCHKE, 1995).

6.2.1 Methodik der Zwei-Komponenten-Trennung mit natürlichen Tracern

Auf Tracer gestützte Ganglinienseparationen basieren auf zwei Massenerhaltungsgleichungen, zum einen der des Wassers und zum anderen der des Tracers (SKLASH & FARVOLDEN, 1979). Setzt sich eine Ganglinie aus den Komponenten (a) und (b) zusammen, so ergibt sich folgendes lineares Gleichungssystem:

$$Q_{\text{ges}} = Q_{K(a)} + Q_{K(b)} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

$$Q_{\text{ges}} \cdot C_{\text{ges}} = Q_{K(a)} \cdot C_{K(a)} + Q_{K(b)} \cdot C_{K(b)} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Q_{ges} = Gesamtabfluß

$Q_{K(a)}$ = Abflußkomponente (a)

$Q_{K(b)}$ = Abflußkomponente (b)

C = entsprechende Tracerkonzentrationen der jeweiligen Komponente

Zur Berechnung des Anteils einer der beiden Abflußkomponenten am Gesamtabfluß läßt sich dieses Gleichungssystem lösen, wenn die Tracerkonzentrationen und der Gesamtabfluß bekannt sind.

$$\frac{Q_{K(a)}}{Q_{\text{ges}}} = \frac{(C_{\text{ges}} - C_{K(b)})}{(C_{K(a)} - C_{K(b)})} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Diese Beschreibung des Anteils von Abflußkomponenten mit Gleichung 6.3 entspricht einer Modellvorstellung, für deren erfolgreiche Anwendung einige wesentliche Voraussetzungen erfüllt sein müssen (BUTTLE, 1994; UHLENBROOK, 1999):

- (1) Die Tracerkonzentrationen der beiden Abflußkomponenten unterscheiden sich signifikant voneinander.
- (2) Es gibt keine zusätzlichen Komponenten, es sei denn die Zusammensetzung entspricht einer der Komponenten.
- (3) Die Tracerkonzentrationen bleiben während der Beobachtung im gesamten untersuchten System konstant, bzw. eine räumliche oder zeitliche Variabilität kann entsprechend berücksichtigt werden. Damit ist auch verbunden, daß die Tracer sich konservativ verhalten, d.h. sie sind chemisch inert, unterliegen keiner Retardation und es gibt keine unbekannten Quellen und Senken im System.
- (4) Das System befindet sich im stetigen Fließgleichgewicht, d.h. während der Beobachtung finden im System keine Speicheränderungen statt.

6.3 Analytische Untersuchungsmethoden

Die analytischen Untersuchungen erfolgten im Labor des Instituts für Hydrologie. In insgesamt 3 Durchgängen wurden ca. 1300 Proben auf Anionen, Kationen und Silikat untersucht. Desweiteren wurden für ausgewählte Ereignisse Isotopenbestimmungen durchgeführt. Die analytische Untersuchung nahm insgesamt 3 ½ Monate in Anspruch.

Anionen und Kationen

Die Bestimmung der Konzentrationen der Kationen Na^+ , K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} und der Anionen Cl^- , NO_3^- und SO_4^{2-} erfolgte mittels Ionenaustauschchromatographie. Die Messungen wurden mit einem DIONEX DX 500 Chromatographen durchgeführt.

Für jeden Meßdurchgang (in der Regel ca. 100 Proben) wurde eine neue Eichreihe mit 10 Standardlösungen im zu erwartenden Konzentrationsbereich von 0,5 -30 mg/l erstellt. Jede Probe wurde aufgrund der großen Probenanzahl nur einmal gemessen. Wurden Ausreißer erkannt, erfolgte ein nochmaliges Messen der Probe. Eine statistische Behandlung der Meßergebnisse zur Bestimmung des Meßfehlers wurde nicht durchgeführt. Jedoch wurde bei jedem Meßdurchgang die Güte der Eichkurve überprüft und die einzelnen Chromatogramme der Messungen visuell auf Unstimmigkeiten kontrolliert. In jeden Meßdurchgang wurden wiederholt Standardlösungen und Probenwiederholungen einbezogen. Überschlägig kann die dabei beobachtete maximale Abweichung mit ca. 6 % angegeben werden, die mittlere Abweichung liegt bei ungefähr 1-2 %.

Gelöstes Silikat

Die Analyse erfolgte nach dem DEV DIN 38405 D 21 photometrisch mit dem MILTON ROY SPECTRONIC 2001 PLUS Photometer. Dabei wurde zunächst ein Probevolumen von 12,5 ml mit demselben Volumen an destilliertem Wasser verdünnt. Die Verdünnung war notwendig, da die im Gerät eingebaute Meßküvette sich nur für Konzentrationen bis maximal 4 mg Si/l eignet.

Anschließend wurde 1 ml Ammoniumheptamolybdat zugegeben, wodurch das gelöste Silikat in einen gelben Molybdato- Kieselsäure-Komplex überführt wurde. Nach einer Reaktionszeit von 5 min wurde zur Maskierung von Phosphationen, die den quantitativen Nachweis stören, 1 ml Oxalsäure zugegeben. Eine Minute später erfolgte durch die Zugabe eines Milliliters 4-Methylamino-Phenolsulfat (Photorex) die Reduktion des Komplexes, wodurch sich eine blaue Kolloidlösung von Mischoxiden bildete. Es wurde eine Reaktionszeit von 15 weiteren Minuten abgewartet und die Probe danach bei einer Wellenlänge von 820 nm photometrisch ausgewertet. Über eine zuvor gemessene und im Gerät abgespeicherte Eichgerade, die aus der Messung von 8 Standardlösungen (2-8 mgSi/l) erstellt wurde, wurde dann die Siliziumkonzentration in [mgSi/l] bestimmt.

Bei jedem Meßdurchgang wurden 6 Proben nacheinander in der vorgeschriebenen Zeit durchgemessen. Um verlässliche Ergebnisse zu erhalten wurden zu Beginn jedes Meßdurchgangs zwei Standards mitgemessen. Dieselben Standards wurden am Ende nochmals gemessen, um abschätzen zu können, wie stark die Reaktion während der Zeit des Messens

weitergelaufen war. Aus diesen Messungen der Standards wurde eine mittlere Fehlerabweichung von $\pm 0,05 \text{ mgSi/l}$ abgeleitet.

Stabile Isotope

Die Bestimmung der Konzentrationen des stabilen Sauerstoffisotops ^{18}O und des stabilen Wasserstoffisotops Deuterium (^2H) erfolgte mit dem Massenspektrometer DELTA S FINNIGAN MAT. Dabei mußten die Isotope der kondensierten Phase zunächst in ein für die massenspektrometrische Messung geeignetes Gas überführt werden. Der Isotopengehalt wurde dann mit diesem Meßgas gegen einen internen Standard bestimmt.

Für die Deuteriumbestimmung der Wasserproben wurde dabei das Wasser quantitativ in einem Reaktionsofen über Chrom bei einer Temperatur von 900°C reduziert und der entstehende Wasserstoff als Meßgas verwendet. Mit dem oben genannten Gerät konnten Serien à 26 Proben plus 4 Standards gemessen werden. Verwendet wurde 1 ml Probevolumen, welches aus den Beprobungsflaschen nach vorherigem Schütteln mit einer Pipette in kleine Glasfläschchen umgefüllt wurde.

Für die ^{18}O Bestimmung wurde in der Equilibriereinheit des Meßgeräts ein Isotopenaustausch des Sauerstoffs des Probenwassers mit CO_2 bis zur Gleichgewichtseinstellung durchgeführt. Das CO_2 diente dann als Meßgas. Ein Meßserie bestand aus 20 Proben (Probevolumen 5 ml) und 4 Standards.

Als Maß für den Isotopengehalt wird die relative Differenz des Isotopenverhältnisses der Probe gegenüber dem Isotopenverhältnis eines Standards angegeben, verwendet wird hierbei der sogenannte δ -Wert (MOSER & RAUERT, 1980).

$$\delta^{18}\text{O} \text{ bzw. } \delta^2\text{H} = \frac{R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} \cdot 1000 \text{ ‰} \quad (\text{Gl. 6.4})$$

R_{Probe} = Isotopenverhältnis der zu untersuchenden Probe

R_{Standard} = Isotopenverhältnis im Standard

Als Bezugsstandard diente der international in der Isotopenanalytik gebräuchliche V-SMOW (Vienna standard mean ocean water) mit $R_{\text{Standard}} = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = (2005,20 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$ und $R_{\text{Standard}} = ^2\text{H}/^1\text{H} = (155,76 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$. Der Fehler bei der Deuteriumbestimmung beträgt $\pm 1 \text{ ‰}$ und bei der ^{18}O Bestimmung $\pm 0,2 \text{ ‰}$.

7 Ergebnisse und Diskussion der gewonnenen Felddaten

7.1 Stichtagsbeprobung zur Bestimmung von Fließzeiten und Abflußanteilen

Obwohl die Stichtagsbeprobung zur Bestimmung von Fließzeiten und Abflüssen erst am Ende der Messkampagne (13.8.2001) von Jens Didszun und mir durchgeführt wurde, erscheint mir diese Datenerhebung am Beginn der experimentellen Auswertung gut platziert, da hier Informationen zu Fließgeschwindigkeiten und Abflußanteilen einen guten Einblick in das Abflußverhalten des EZG und seiner Teilräume bieten.

Da die einzelnen Teilräume nicht mit Wehren ausgestattet sind, der Abfluß turbulent erfolgte und eine dichte Vegetation den Zugang zum Bachlauf erschwerte, bot sich zur Bestimmung der Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten die Verdünnungsmethode mittels künstlicher Tracer (hier NaCl,(Kochsalz)) an.

Hierbei wird dem fließenden Wasser an einer Einspeisestelle ein Markierstoff momentan zugesetzt und dessen Verdünnung nach Durchlaufen einer bestimmten Messstrecke bestimmt.

Falls gewährleistet ist, daß die eingespeiste Tracermenge vollständig durchmischt ist, ist die Verdünnung dem Durchfluß des Gewässers proportional.

Diese Integrationsmethode mit momentaner Einspeisung (Dirac-Impuls) führt zu folgender mathematischer Auflösung:

$Q = \frac{m}{\int (c(t) - c_0) dt}$	m zugegebene Tracermenge [kg] $c(t)$ Konzentration während der Messung c_0 Hintergrundkonzentration Q Durchfluss (Gl.7.1)
--------------------------------------	--

Meßtechnisch erfolgt die Aufnahme der NaCl-Konzentrationen über die Leitfähigkeit. Dank der Entwicklung eines „Abflußmeßkoffers“ durch Emil Blattmann (technischer Mitarbeiter des hydrologischen Institutes) kann die Bestimmung des Abflusses vor Ort erfolgen. Hierzu erfasst der Meßkoffer, der laufabwärts so postiert wird, daß eine gute Durchmischung des Tracers gewährleistet werden kann, fortlaufend die Änderung der Leitfähigkeit. Die Verdünnung wird mittels einer zuvor erstellten Eichung ermittelt und direkt in den Abfluß umgerechnet.

Zur Bestimmung der Fließzeiten wurde ebenfalls NaCl momentan in das Gerinne zugeführt und flußabwärts mittels Multidrucksonden die Leitfähigkeitsänderung kontinuierlich aufgezeichnet.

Nach Bestimmung der Fließstrecke (ArcView) konnten so maximale und dominante Fließgeschwindigkeiten berechnet werden.

Am Messtag (13.8.) war der Langzeitregen bereits 2 niederschlagsfreie Tage zurückliegend. Dennoch war ein leicht erhöhter Basisabfluß festzustellen. Im Teilraum Tilkhausen war der Abfluß im Gerinne so geringfügig, daß eine Fließzeitenbestimmung nicht durchgeführt wurde. In den übrigen Teilräumen wurden übereinstimmend maximale Fließgeschwindigkeiten von 0,08 m/s berechnet. Die dominanten Fließgeschwindigkeiten liegen geringfügig darunter. Nur im Bereich des Gerinneabschnittes vor dem EZG-Auslass, nach Vereinigung aller Einzelbäche, kommt es zu signifikant höheren Fließgeschwindigkeiten um 0,17 m/s. Hier zeigt sich ein, auch im Bereich der Brugga (Dreisamtal, Freiburg) bekanntes, Phänomen: Nicht in erster Linie die Hangneigung, sondern die Gerinnemorphologie (Rauhigkeit) wirkt sich auf die Fließgeschwindigkeiten aus. Während im Bereich nahe des EZG-Auslasses das Gerinne weitgehend frei von Störungen verläuft, sind die Bäche der Teilräume durch natürliche Wehre (Äste, Steine, Schotter und Blattlaub) verbaut und bilden trotz größerem Gefälle Gumpen, was zu den geringeren Fließgeschwindigkeiten führte.

Die Abflußmessung ergab eine enge Korrelation zwischen Abflußanteilen und Teilraumgröße ($R^2 = 0,98$). Auch die Summation der Abflüsse der Teilräume ergab exakt die gemessene Abflußmenge am Einzugsgebietsauslaß (12 l/s) wieder. Allerdings erscheint es doch fragwürdig, daß auf einem ca. 500 m langen Gerinneabschnitt weder Abfluß hinzukommt, noch verlorenght.

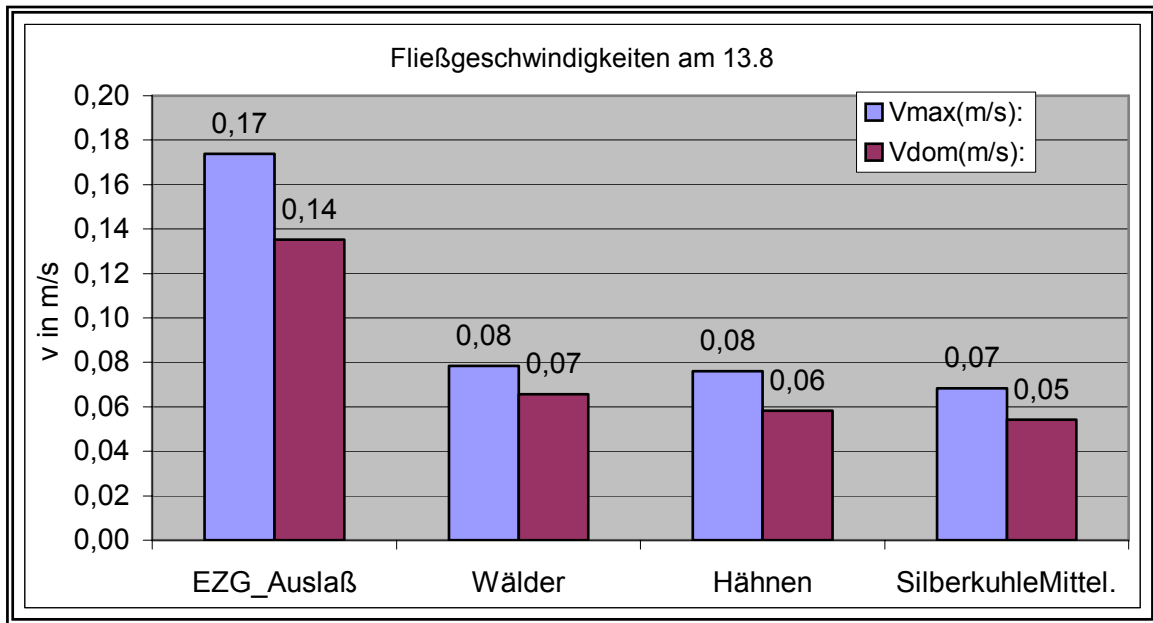
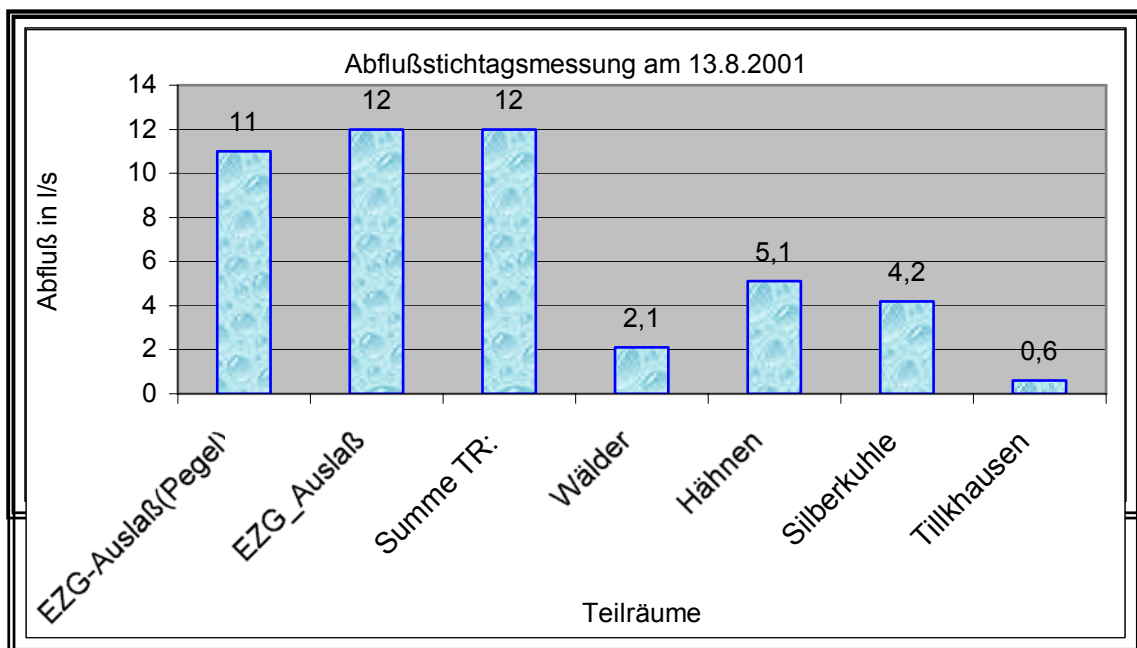


Abb.7.1: maximale und dominante Fließgeschwindigkeiten

Abb.7.2: Abflüsse am 13.8.2001



7.2 Analyse des Starkregenereignisses am 19.7.2001

7.2.1 Analyse der Wasserstandsganglinien

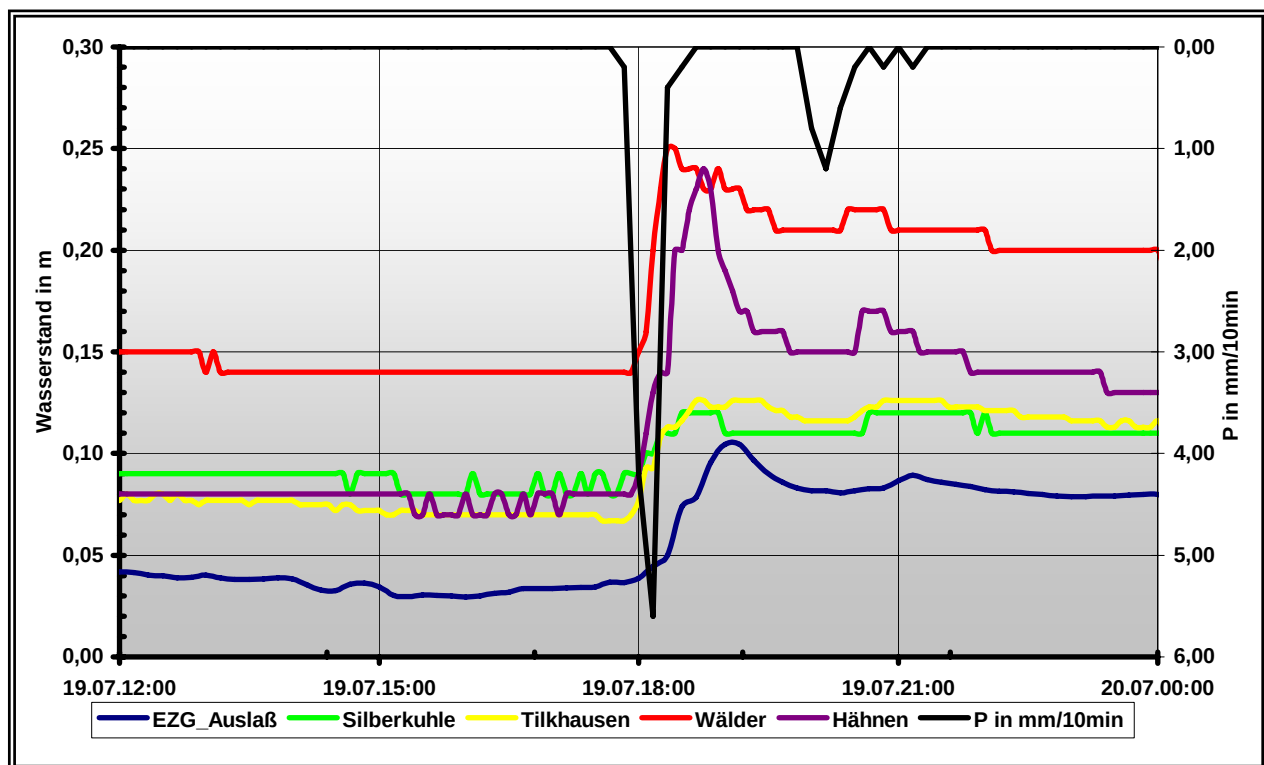


Abb.7.4: Vergleich der Wasserstände am 19.7.2001

Vor der Interpretation der Wasserstände muß die Wertigkeit dieser Aussagen kritisch betrachtet werden. Die Reaktion des Wasserstandes kann nur in Relation zum aufgenommenen geometrischen Querschnitt gesehen werden, d.h. ein objektiver Vergleich darf nur gezogen werden, falls die Querschnitte der Gerinne relativ homogen sind. Da wir die Postierung der Drucksonden nach diesem Kriterium gewählt haben und auch die Tracerinterpretationen zu annähernd gleichen Ergebnissen führten, erschien mir ein qualitativer Vergleich der Wasserstände als Einführung in den analytischen Teil meiner Diplomarbeit für geeignet:

Zu sehen sind die Wasserstände der 4 Teilräume, sowie der Wasserstand am EZG-Auslaß. Desweiteren ist die Niederschlagsintensität auf der rechten Größenachse eingezeichnet. Insgesamt zeigt sich eine spontane Wasserstandserhöhung mit nur kurzen Reaktionszeiten ($< 1\text{h}$). Dies wird insbesondere beim Vergleich der Zeitdifferenz zwischen Niederschlags- und Wasserstandspeak deutlich:

Tabelle 7.1: Zeitdifferenz zwischen Niederschlags- und Abflußpeak

Teilraum:	EZG-Auslass	Hähnen	Tilkhausen	Silberkuhle	Wälder
Zeitdifferenz Pmax_WSmax	50min	35min	30min	20min	15min
Entfernung: Quelle-Apeg Zusammenfluß- Apeg	ca. 720m	ca. 870m	ca. 550m	ca. 960m	ca. 610m
(v max) gem. am 13.8.2001	0,17 m/s	0,08 m/s	Fällt trocken!	0,07 m/s	0,08 m/s
Theoret. Fließzeit	4300 min	10900 min	----	13700 min	7600 min
Abflußanteile gem. am 13.8	100% 12 l/s	42,5% 5,1 l/s	5% 0,6 l/s	35% 4,2 l/s	17,5 % 2,1 l/s

Der Teilraum Wälder reagiert auf den einsetzenden Niederschlag am spontansten mit einer Zeitverzögerung zwischen Niederschlags- und Abflußpeak von nur 15 min. Auch die übrigen Teilräume reagieren kurzfristig innerhalb einem Zeitraum zwischen 20min und 50 min.

Im Wasserstandsanstieg sind deutliche Unterschiede festzustellen:

Während der größte Anstieg im Teilraum Hähnen, gefolgt vom Teilraum Wälder, zu verzeichnen ist, reagieren die Teilräume Silberkuhle und Tilkhausen mit geringeren Anstiegen.

Auch in der Form des Wasserstandsrückganges werden Unterschiede deutlich:

Der Teilraum Hähnen reagiert, trotz Retention durch die Fischteiche, mit raschem Anstieg, kurzem Peak und ebenso schnellem Wasserstandsrückgang. Auch bei dem folgenden kleinen Niederschlagsereignis reagiert der Teilraum deutlich und kurzfristig.

In den übrigen Teilräumen verläuft das Tailing des Wasserstandsrückganges gedämpft, in den Teilräumen Silberkuhle und Tilkhausen ist dies am deutlichsten zu sehen.

In Tabelle 7.1 sind neben den Reaktionszeiten auch die Entfernungen zwischen Quellgebiet und Apeg –Standort, sowie die maximalen Fließgeschwindigkeiten und Abflußanteile (in Trockenzeiten) eingetragen. Sie wurden bei einer Stichtagsmessung am Ende der Messkampagne (13.8.2001) durch momentane Salzeinspeisung ermittelt. Dadurch ergeben sich theoretische Fließzeiten von Quelle zu Teilraumauslaß im Bereich von mehreren Tagen in Trockenzeiten. Es wird ersichtlich, daß eine erhöhte Quellschüttung für die kurzen Reaktionszeiten nicht in Betracht kommt, sondern vielmehr schnelle Abflußbildungsprozesse für die kurzfristige Gebietsantwort verantwortlich zu sein scheinen. Dazu zählen die Sättigungsflächen im unmittelbaren Umfeld des Bachstreifens, sowie die sich daran anschließenden potentiellen Sättigungsflächen; desweiteren versiegelte Flächen im EZG, die ca. 9% Fläche beinhalten. Als anthropogene Ursache im Teilraum Hähnen kommt die Drainage des Skiliftes hinzu. Das sich in diesem Teilraum die Retention der Weiher nicht bemerkbar macht, liegt wohl an dem allgemein hohen Wasserstand der Teiche, sowie ihrem direktbeitragenden Anteil an Sättigungsflächen: Die Fischzuchtanlagen waren im Meßzeitraum, im Gegensatz zu den Anlagen im Teilraum Silberkuhle, komplett gefüllt, so das zusätzliches Wasser mittels Überläufen direkt in den Bachlauf zurückgegeben wurde.

Die Ganglinie des Wasserstands am EZG-Auslaß kann als kumulierte Funktion der Teilräume gedeutet werden.

Die deutliche Reaktion der Wasserstände auf das kleine Nachregenereignis zeigt, daß sich im Bereich der Sättigungsflächen die Infiltrationskapazität der Böden weitgehend erschöpft hat und auch geringe Niederschlagsmengen Direktabfluß generieren. Das erhöhte Wasserstandsniveau nach Beendigung des Niederschlagsereignisses deutet auf einen verstärkten Zufluß von Grundwasser, also einem erhöhten Beitrag an Vorereigniswasser am Abflußgeschehen.

7.2.2 Die Reaktion der Leitfähigkeiten

Wie schon erwähnt, ist die elektrische Leitfähigkeit von Wasser eine Funktion seiner Ionenkonzentration. Sie ergibt sich aus dem reziproken Wert des elektrischen Widerstands und kann erste Hinweise zu den Verdünnungserscheinungen durch gering mineralisiertes Ereigniswasser und den dominanten Herkunftsräumen geben:

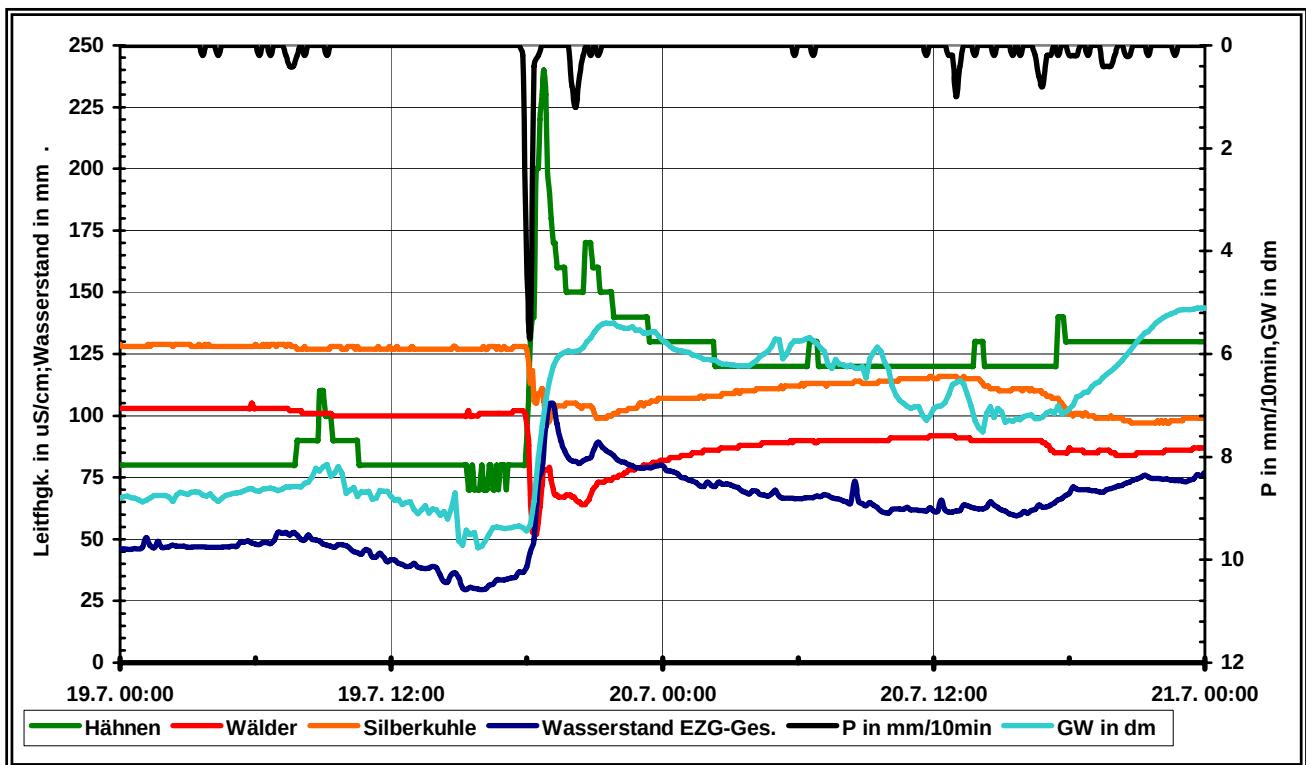


Abb.7.5 : Verlauf der Leitfähigkeiten und des Grundwasserstandes am 19.7.2001

In Abbildung 7.5 sind auf der linken Größenachse die Leitfähigkeiten in uS/cm sowie der Wasserstand am EZG-Auslaß (in mm), auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensität, sowie der Grundwasserstand im Bereich des Einzugsgebietsauslaß eingetragen. Die Leitfähigkeiten an EZG-Auslaß und im Teilraum Tillkhausen sind nicht vorhanden, da es sich dort um einfache Drucksonden handelte, die die Leitfähigkeiten nicht erfassen konnten.

Allgemein kann davon ausgegangen werden, daß bei einsetzendem Niederschlag eine Mischung zwischen hoch mineralisiertem Basisabfluß und gering mineralisiertem Ereigniswasser erfolgt und

diese zu einer Abnahme der Leitfähigkeiten führt: Dieser Vorgang ist an den Leitfähigkeitsverläufen in den Teilräumen Wälder und Silberkuhle deutlich zu erkennen. Im Gegensatz dazu steht der Verlauf im Teilraum Hähnen. Hier kommt es zu einem immensen Anstieg von 80 uS/cm auf knapp 250 uS/cm! Eine Erklärung für diesen Anstieg kann nur in anthropogenen, hochmineralisierten Abwassereinleitungen bestehen. Hier handelt es sich um die schon erwähnte Abwassereinleitung unterhalb des Viehbetriebes Hähnen. Bei der Aufnahme der Gerinnelängsschnitte wurden Leitfähigkeiten von weit über 300 uS/cm gemessen, es besteht die Vermutung, daß es sich hierbei um Überläufe von Becken einer Hauskläranlage handelt. Eine weitere Möglichkeit besteht im Drainagenetz im Bereich des Skiliftes: Schon im Drainagenetz vorhandenes mineralisiertes Wasser wird durch Pistonfloweffekte schnell ausgedrückt, allerdings kann bei einem Preevent-Wert von 75 uS/cm davon ausgegangen werden, daß es sich dabei nur um eine Randerscheinung handelt.

Im Teilraum Wälder ist ein deutlicher Abfall der Leitfähigkeiten von 100 uS/cm (Basisabfluß) auf Werte im Bereich von 50 uS/cm zu erkennen. Daran anschließend erfolgt ein Anstieg auf ca. 80 uS/cm, der als verstärktes Ausdrücken von mineralisiertem preevent water bzw. als verstärkter Zulauf aus den Quellbereichen interpretiert werden kann. Schon hier zeigt sich, daß zu Beginn des Niederschlagsereignis die Sättigungsflächen im nicht bewaldeten Unterlauf des Teilraumes unmittelbar zum Abfluß beitragen und die Waldflächen erst verzögert (Interzeption, tieferstehendes Grundwasser) reagieren.

Im Teilraum Silberkuhle kommt es nur zu einer relativ geringen Leitfähigkeitsabnahme von ca. 25 uS/cm. Wie schon erwähnt tragen hier die Quellaustritte der ehemaligen Stollengänge einen Großteil des Gesamtabflusses bei. Ihre Schüttung nahm während des Starkregens kurzfristig stark zu, während sich die rote Färbung des Wassers nur geringfügig änderte. Es ist davon auszugehen, daß es hier zu Pistonfloweffekten sowie zu Mischung von Basisabfluß und Ereigniswasser kommt, so daß die Abnahme der Leitfähigkeiten nicht ausgeprägt ist.

Interessant ist die spontane Reaktion des Grundwasserstandes am EZG-Auslaß, der in Relation zum Wasserstandsanstieg am EZG-Auslaß sowie zum Anstieg der Leitfähigkeit im Teilraum Wälder nahezu synchron verläuft, allerdings wird der Grundwasserstandspeak erst ca. 2h später erreicht. Die Vermutung liegt nahe, daß durch Pistonflow (schnelle Druckübertragung durch Grundwasseranstieg und laterale Flüsse im Hangsegment) verstärkt Preevent-Anteile mobilisiert werden.

7.2.3 Die Reaktion der Silikatgehalte

Silikat, als geogener Tracer, entstammt in höheren Konzentrationen vorwiegend Wässern, die längere Zeit im Untergrund verweilt haben und unterliegt bei Eintrag von Ereigniswasser Verdünnungserscheinungen. Allerdings sind die Anreicherungen von Silikat im Grundwasser von vielen Faktoren, wie Geochemie, Ph-Werten, Temperatur, etc. abhängig, so daß es auch bei, schnellem Interflow unterliegenden, Ereigniswasser zu schnellen Silikataufnahmen kommen kann. Bei der anschließenden Abflußkomponententrennung auf Silikatbasis wird daher von einem Silikatgehalt von 0,3 mg/l in der Direktabflußkomponente ausgegangen. Dieser Wert ist empirisch festgelegt und aus anderen Forschungsarbeiten übernommen worden.

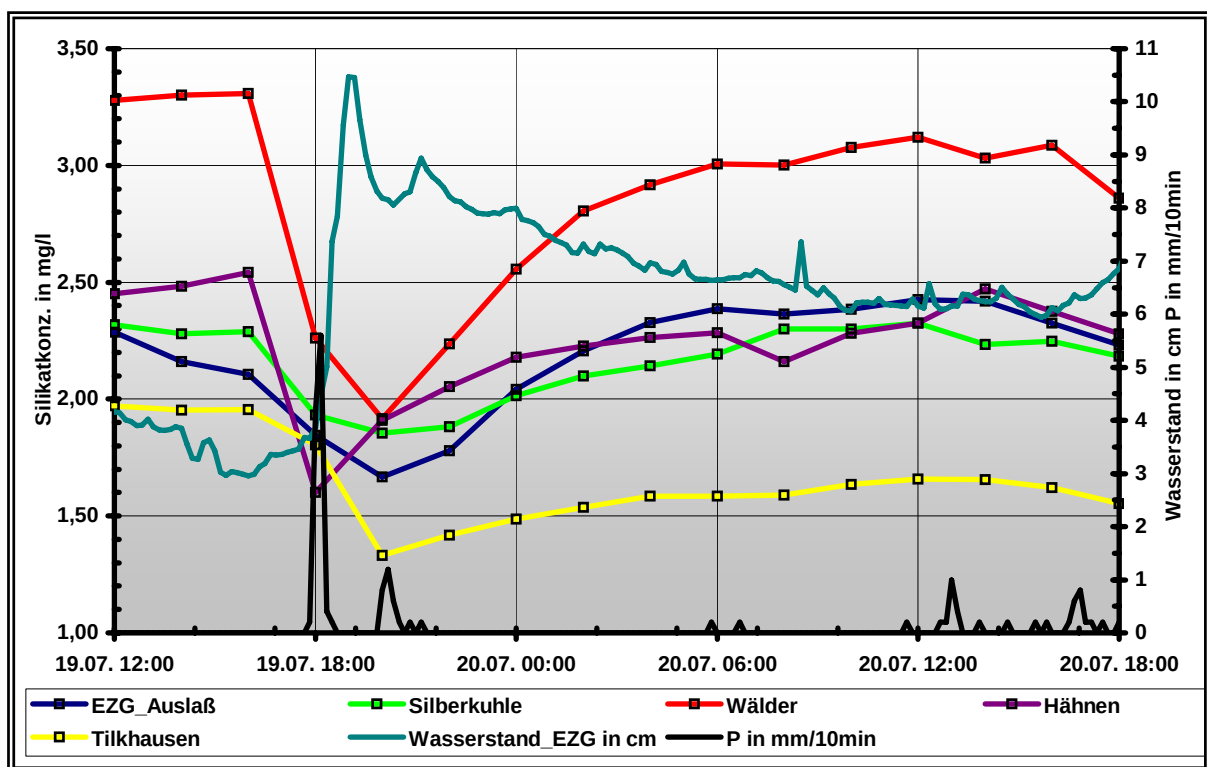


Abb.7.6: Silikatgehalte während des Starkregenereignisses am 19.7.2001

Die Aufnahme der Proben (Apeg) erfolgte während des Starkregenereignisses in zweistündigem Rhythmus, was zur Folge hat, daß die absoluten Peaks sehr wahrscheinlich außerhalb der Beprobung erfolgten. Dies bedingt eine relative Unschärfe innerhalb der Ganglinien des Tracerverlaufes sowie bei der Berechnung der Abflußkomponententrennung, dennoch kann die Reaktion mit Ausnahme der Absolutwerte gut und differenziert betrachtet werden.

In Abb.7.6 sind auf der linken Größenachse die Silikatgehalte in mg/l, auf der rechten Größenachse der Wasserstand am EZG-Auslaß und die Niederschlagsintensität abgebildet. Schon vor Beginn des Niederschlagsereignisses ist die Differenzierung der Teilräume aufgrund ihrer unterschiedlichen Preevent-Silikatgehalte erwähnenswert:

Der Teilraum Wälder hat die höchsten Silikatgehalte (ca. 3,3 mg/l) des Basisabflusses, während die Teilräume Hähnen und Silberkuhle Silikatgehalte im Bereich zwischen 2,3 und 2,5 mg/l aufweisen. Die geringsten Gehalte finden sich im Teilraum Tilkhausen (< 2mg/l). Dort wird der Hauptteil des Abflusses in Wiesenbereichen auf Pseudogleyen gebildet, in denen sich auf Sperrkörpern aufliegende Stauzonen befinden. Diese vom Untergrund abgetrennten Bodenzonen sind geprägt von Auswaschungseffekten, der gesamte Teilraum fällt nach 3-4 niederschlagsfreien Tagen trocken. Daher besteht die Annahme, daß der hier gebildete Abfluß in erster Linie aus dem Bereich der Stauzonen entstammt (potentielle Sättigungsflächen) und ein direkter Zusammenhang zu tieferen Grundwasser nicht oder nur zu geringen Anteilen besteht. Im Gegensatz dazu stehen die hohen Gehalte des Basisabflusses im Teilraum Wälder: Es könnte ein Indiz für lange Verweilzeiten im Untergrund sein und zeigt, daß der Abfluß dort in Trockenzeiten aus tiefliegenden Grundwasserbereichen generiert wird.

Mit Beginn des Niederschlagsereignisses kommt es in allen Teilräumen zur Abnahme der Silikatgehalte, allerdings unterscheidet sich die Form der Ganglinien :

Der signifikanteste Abfall erfolgt im Teilraum Wälder. Hier wird zu Beginn des Ereignisses Sättigungsflächenabfluß im Bereich der Nasswiesen des Unterlaufes gebildet, der nicht oder nur gering silikathaltig ist und den Silikatgehalt von 3,3 mg/l auf weniger als 1,8 mg/l verdünnt. Der Wiederanstieg erfolgt zügig und innerhalb von 18 h bis annähernd auf Preevent- Niveau. Es wird also zunehmend höher mineralisierter Abfluß gebildet, entweder aus dem Quellbereich oder, wie schon bei den Leitfähigkeiten beschrieben, durch verstärktes Ausdrücken von bereits vor dem Niederschlagsereignis gespeichertem Vorereigniswasser.

Die spontanste Reaktion zeigt wiederum der Teilraum Hähnen. Allerdings täuscht hier der graphische Verlauf eine Reaktion schon vor Beginn des Ereignisses vor. Dies liegt, wie schon erwähnt an der groben Auflösung; der Punkt des absoluten Minimas wird sich kurz nach dem Niederschlagspeak befinden, wurde aber aufgrund der 2-stündigen Probenahme nicht erfasst. Abfall und anschließender Wiederanstieg der Silikatgehalte sind in ihrer Form ähnlich der des Teilraumes Wälder, auch die zugrundeliegenden Prozesse sind verwandt: Zuerst erfolgt die Aufsättigung der Sättigungsflächen und daraus resultierender Ereigniswasserabfluß, bevor sich ein verstärkter Zufluß von Grundwasserabfluß bemerkbar macht.

Der Teilraum Tilkhausen reagiert mit einem etwas verzögerten Abfall der Silikatgehalte und einem nur schwachen Wiederanstieg. Dies liegt an dem schon erwähnten Bildungsraum des dominanten Abflusses. Die Stauzonen der Pseudogleye reagieren aufgrund der zugrundeliegenden Sperrzone wie eine potentielle Sättigungsfläche: Der Wasserstand des „aufgesetzten“ Grundwasserkörpers steigt durch die eindringende Feuchtefront an und es kommt zu Oberflächenabfluß und schnellem Interflow. Aufgrund der geringen Mineralisation der ausgewaschenen Stauzonenbereiche erfolgt der Wiederanstieg der Silikatgehalte nur zögerlich und erreicht erst nach ca. 3 Tagen seinen Ausgangszustand wieder.

Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Teilräumen stehen die Reaktionen des Teilraumes Silberkuhle sowie des EZG-Auslasses:

Hier erfolgt das Absinken der Silikatgehalte nur gering, die Ganglinien haben eine eher gedämpfte Form. Andererseits steigen die Konzentrationen recht kurzfristig wieder auf das Ausgangsniveau bzw. sogar darüber. Inwieweit die Reaktion am EZG-Auslaß autochthon oder durch den Teilraum Silberkuhle allochthon bedingt ist, kann aufgrund der fehlenden Quantifizierung nicht eindeutig geklärt werden. Allerdings lässt sich die Reaktion am Gebietsauslaß bei allen analysierten Ionen als eine kumulierte Funktion aus den Teilräumen beschreiben. Dennoch kann es sein, daß gerade im Bereich der Talauen verstärkt Grundwasser ausgedrückt wird; die Ursache dafür liegt in schnell perkolierenden und druckaufbauendem Ereigniswasser im Bereich der Hochlagen und Hänge, sowie in der Grundwassererhöhung im unmittelbaren Bereich des Bachstreifens.

Im Teilraum Silberkuhle jedoch ist die Form der Ganglinie eindeutiger zu interpretieren: Sättigungsflächenabfluß erfolgt hier nur im Bereich der Anmoor- und Stagnogleye und dies in nur kleinem Umfang. Der größte Abflußanteil entstammt aus den Mundlöchern ehemaliger Stollen, die den hydrothermalen Erzgängen folgen und weiträumig vernetzt sind. Hier kann entlang von bergbaulichen Schwächezonen perkolierendes Niederschlagswasser rasch in den hydrothermalen Gängen gesammelt werden, sich mit hochangereichertem Grundwasser mischen und als Returnflow den Mundlöcher entspringen. Desweiteren kann dieses perkolierende Ereigniswasser innerhalb der Gangsysteme druckaufbauend wirken und verstärkt Grundwasser ausdrücken.

Ein anthropogener Grund für die gedämpfte Form der Silikatganglinie kann auch durch die Retention durch die teils leeren Fischteiche bestehen.

7.2.4 Die Reaktion der Kaliumgehalte

Kalium (K^+) unterliegt im Bereich des Mineralbodens der spezifischen Adsorption durch Tonminerale (Kaliumfixierung). Maximale Konzentrationen mobilen Kaliums finden sich im humosen Oberboden (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998) aufgrund seiner Funktion als wichtiger Pflanzennährstoff (Kreislauf Pflanze – Humus- Pflanze) und wird dem Boden häufig durch Düngung zugeführt. So verhalten sich die Kaliumkonzentrationen reziprok zu den Silikatverdünnungserscheinungen – es kommt zu Konzentrationszunahmen. Die Konzentrationsmaximas liegen etwa 1 Stunde zeitversetzt zur Abflußspitze. Es ist anzunehmen, daß die hohen Kaliumkonzentrationen aus dem Abfluß von oberflächennahen Schichten stammen, in denen es zur Mobilisierung von kaliumreichen Bodenwasser durch kaliumarmes, infiltrierendes Niederschlagswasser kommt (UHLENBROOK, S., 1999).

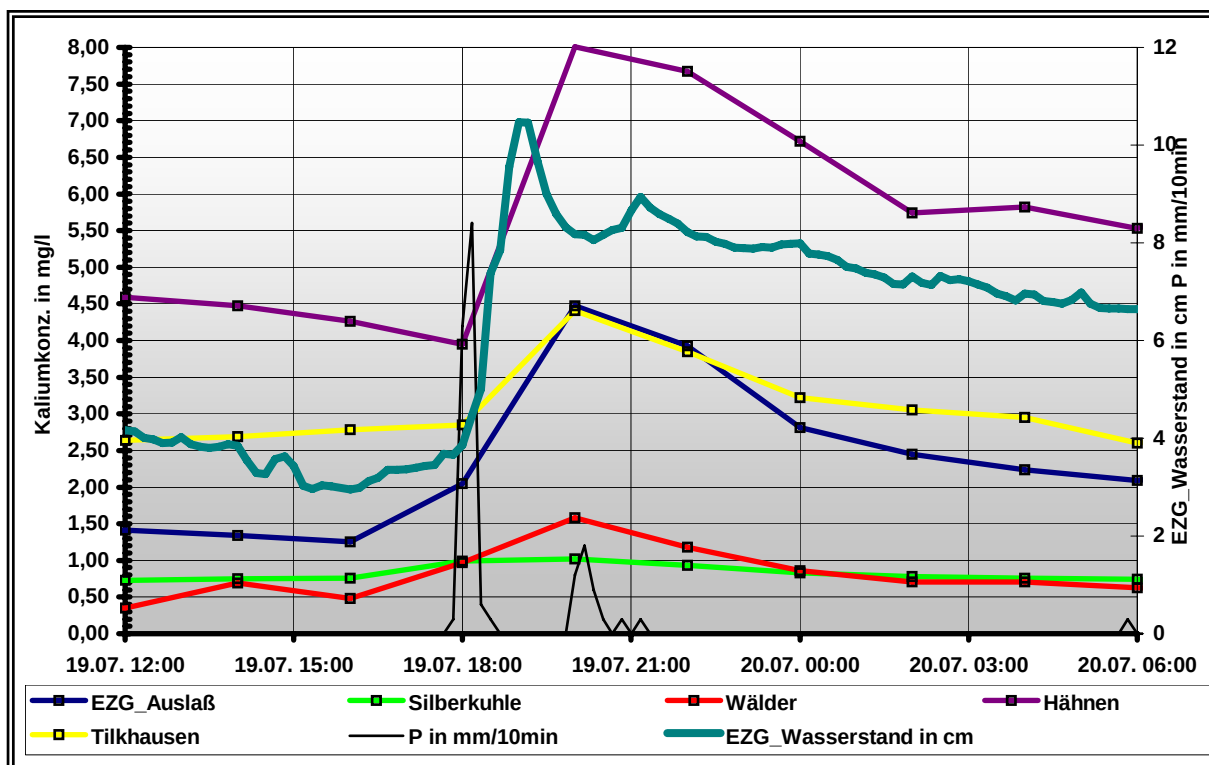


Abb.7.7: Kaliumgehalte während des Starkregenereignisses am 19.7.2001

In Abbildung 7.7 sind die Veränderung der Kaliumgehalte, während des Starkregenereignisses, dargestellt. Auf der linken Größenachse sind die Kaliumkonzentrationen in mg/l, auf der rechten Größenachse der Wasserstand am EZG_Auslaß sowie die Niederschlagsintensität, aufgetragen. Auch in dieser Abbildung erscheint es wahrscheinlich, daß die absoluten Konzentrationspeaks sich im Bereich zwischen Niederschlags- und Abflußspitze befinden. Es zeigt sich, daß alle Teilräume mit Konzentrationszunahmen reagieren, die jedoch in Art und Umfang deutliche Unterschiede erkennen lassen: Die größten Zunahmen finden sich in den Bereichen Hähnen und Tilkhausen, also den Teilräumen mit fast ausschließlicher

Wiesenbewirtschaftung. Allerdings ist im Teilraum Hähnen wiederum der starke Anstieg durch punktuelle Abwassereinleitung zumindest teilweise verursacht.; eine weitere anthropogene Möglichkeit besteht durch das Drainagenetz im Bereich des Skiliftes, innerhalb dessen Ereigniswasser aus oberflächennahen Schichten gesammelt und schnell dem Abfluß zugeleitet werden kann.

Im Gegensatz dazu stehen die bewaldeten Teilräume Silberkuhle und Wälder; hier sind die Konzentrationszunahmen nur schwach ausgeprägt.

Wie schon eingangs erwähnt wird Kalium vorzugsweise in oberflächennahen Schichten mobilisiert. Auch die Verlagerung der Konzentrationsmaximas in den Bereich hinter das Abflußmaxima, deuten daraufhin, daß hier in erster Linie schneller Interflow sowie Returnflow für die Konzentrationszunahmen verantwortlich sind. Es handelt sich also um Ereigniswasser, welches infiltriert und gerade in Bereichen hoher Hangneigung lateral und oberflächennah abfließt und in Bereichen geringerer hydraulischer Leitfähigkeiten wieder zutage treten kann. Dieses Phänomen ist im Bereich des locker geschichteten, humosen Oberbodens in wiesenbewachsenen Hangbereichen ausgeprägt und im Bereich des mit Tensiometern ausgestatteten Messhanges nachgewiesen (hierzu später mehr).

7.2.5 Die Reaktionen der übrigen Hauptionen

Alle natürlichen Tracer ausführlich und graphisch zu interpretieren würde den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen. Da sich die charakteristischsten Tracerverhalten bei Silikat, als geogenem Tracer, und Kalium, als Tracer aus oberflächennahen Schichten, in Bezug auf Verdünnungs- bzw. Anreicherungserscheinungen zeigen ließen, sollen hier nur die wichtigsten Konzentrationsverhalten der übrigen natürlichen Tracer für das Starkregenereignis am 19.7.2001 beschrieben werden:

Chlorid (Cl⁻): Die Reaktion der Chloridkonzentration zeigt deutliche und spontane Verdünnungserscheinungen, am ausgeprägtesten ist dies im Teilraum Hähnen zu beobachten. Auch der Teilraum Tilkhausen reagiert mit einer deutlichen Chloridabnahme im Bereich von 50% des Preevent-Gehaltes, im Gegensatz zum Bereich Hähnen aber ist der Preevent-Gehalt erst nach 4 Tagen wieder erreicht. Anders reagieren die bewaldeten Teilräume Silberkuhle und Wälder. Sie zeichnen sich durch die geringsten Chloridkonzentrationen und ebenfalls durch minimale Verdünnungserscheinungen aus, reagieren jedoch auch spontan auf das Niederschlagsereignis. Auch hier zeigen sich also Unterschiede in Bezug auf die dominanten Vegetationsformen. Die hohen Preevent-Gehalte in den Bereichen Hähnen und Tilkhausen können mehrere Ursachen haben. Hierzu zählt zum einen die Düngung, speziell durch Kali, aber auch Abwassereinleitungen und Salzstreu im Winter können diese hohen Werte verursachen (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998). Bei den Gerinzelängsschnitten zeigen sich Chloridkonzentrationen von 27 mg/l im Bereich der Abwassereinleitung in Hähnen, sowie ein Gehalt von 12,5 mg/l im Bereich des Zuflusses aus dem Bereich der Ortschaft Tilkhausen. Da sich aber deutliche Verdünnungserscheinungen zeigen, muß Chlorid hier eher geogener Herkunft sein. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL weisen tonreichen, marin entstandenen Sedimentgesteinen Chloridgehalte von bis zu 3% zu. Desweiteren kann es bei abnehmenden pH-

Werten zur Chloridabsorption in eisenoxidreichen Böden kommen. Beide Voraussetzungen sind im EZG gegeben. Die ausgeprägten Verdünnungserscheinungen weisen hier also im Gegensatz zu den bewaldeten Bereichen auf einen hohen Anteil von direktbeitragenden Abflußkomponenten in den Teilräumen Hähnen und Tilkhausen hin.

Sulfat(SO_4^{2-}): Ebenfalls deutliche Verdünnungserscheinungen zeigt der Verlauf der Sulfatkonzentrationen. Die Konzentrationsabnahmen liegen in allen Teilräumen zwischen 40%-60%, der Wiederanstieg verläuft rasch im Zeitraum von 12-18 h und bis auf Ausnahme von Tilkhausen wird der Preevent-Gehalt wieder erreicht. Die höchsten Preevent-Gehalte finden sich in den geologisch verwandten Teilräumen Tilkhausen und Silberkuhle, der geringste im Bereich Hähnen. Die Sulfatkonzentrationsabnahmen weisen auch hier auf eine hohe zum Direktabfluß beitragende Abflußkomponente hin.

Calcium(Ca^{2+}): Auch das Verhalten der Calciumkonzentrationen weist durch Verdünnungserscheinungen von knapp 50% auf einen hohen Anteil an Direktabfluß in den Wiesenstandorten Hähnen und Tilkhausen hin; der Teilraum Silberkuhle hat die geringste Konzentrationsabnahme und ein insgesamt gedämpftes Verhalten. Die Reaktion des Teilraumes Wälder zeigt eine Calciumabnahme im Bereich von knapp 40%, hier liegt der Hauptumsatzraum des Direktabflusses im Bereich der Nasswiesen des Unterlaufes.

Magnesium(Mg^{2+}): Mit Ausnahme des Teilraumes Silberkuhle zeigt der Verlauf der Magnesiumkonzentrationen nur geringe Verdünnungserscheinungen und ebenfalls geringe Preevent-Gehalte. Nur im Bereich Silberkuhle kommt es zu Konzentrationsabnahmen im Bereich von 25% und hohen Magnesiumkonzentrationen im Basisabfluß. Grund hierfür sind die hohen Magnesiumgehalte im Bereich der Quellaustritte der Stollengänge.

Nitrat(NO_3^-): Der Vergleich der Nitratganglinien zeigt gegensätzliche Verhaltensmuster: Im Teilraum Hähnen kommt es nach kurzzeitigem Abfall der Nitratkonzentration zu einer Anreicherung im Abfluß, die auch für ein Ansteigen der Konzentration am EZG-Auslaß verantwortlich zu sein scheint. Hauptgrund hierfür ist wiederum die punktuelle Abwassereinleitung des landwirtschaftlichen Betriebes Hähnen mit aufgenommenen Nitratgehalten von über 44 mg/l. Betrachtet man dies als Einspeisung eines künstlichen Tracers, so ergibt sich durch die Zeitdifferenz zwischen Minimum und Maximum des Nitratgehaltes von 2 Stunden und einer Entfernung zwischen punktueller Einleitung und Apeg-Standort von 870 m eine maximale Fließgeschwindigkeit von ca. 0,13 m/s. Bei einer v_{max} von 0,08 m/s in Trockenzeiten entspricht dies einer Geschwindigkeitszunahme von etwa 40% während des Niederschlagsereignisses. Da diese Berechnung stark fehlerbehaftet ist, ist unstreitbar, allerdings erscheint mir bei Kenntnis von zusätzlichen Einträgen in den Abfluß eine weitere Analysemöglichkeit gegeben. Der Teilraum Tilkhausen zeigt eine mehrere Tage andauernde Abnahme der Nitratkonzentration, die auf Auswaschungseffekte deuten läßt, während es im Teilraum Wälder zu einer geringen Abnahme und anschließendem Wiederanstieg kommt, der nach ca. 8h seinen Ausgangswert erreicht. Nur der Teilraum Silberkuhle reagiert mit einem kurzfristigen Anstieg der Nitratkonzentration, allerdings auf einem Preevent- Niveau von kleiner 2 mg/l Nitrat. Insgesamt

lassen die Nitratgehaltsänderungen keine Schlüsse auf das Niederschlags- Abflußverhalten zu, allein die Auswaschungseffekte im Teilraum Tillkhausen sind deutlich zu erkennen.

Natrium(Na^+): Die Natriumkonzentrationen zeigen ebenfalls unterschiedliche Verhalten innerhalb der Teilräume. Während es in den Teilräumen Hähnen und Tillkhausen zu Konzentrationsabnahmen kommt, zeigen die Teilräume Wälder und Silberkuhle keine Veränderung der Natriumgehalte. Im Teilraum Hähnen wird nach etwa 12 h der Ausgangswert wieder erreicht und überschritten, im Gegensatz dazu zeigt sich im Teilraum Tillkhausen wiederum durch Auswaschung eine langanhaltende fallende Tendenz der Natriumgehalte. Die unterschiedlichen Reaktionen der Teilräume könnten durch die verschiedenen Vegetationsformen erklärt werden, allerdings zeigen die Gerinnelängsschnitte, das auch hier Abwasser- und Sickerwassereinleitungen mit Natriumgehalten von 15 mg/l in Hähnen und ca. 10 mg/l in Tillkhausen Einfluß auf den Ganglinienverlauf haben.

7.2.6 Ergebnisse der Abflußkomponententrennung

Bei den vorgenommenen Zwei-Komponentenseparationen wurde für den EZG-Auslaß eine verweilzeitorientierte Abflußkomponententrennung mit ^{18}O für das Starkregenereignis

durchgeführt. Alle anderen Zwei-Komponentenseparationen sind mittels der geogenen Tracer herkunftsraumorientiert erstellt worden. Da die durch Silikat, Chlorid, Magnesium und Calcium berechneten Direktabflußanteile zu gleichen Ergebnissen führten, wird hier ausschließlich auf die Silikatberechnungen eingegangen.

7.2.7 Vergleich von Silikat- und ^{18}O - Abflußkomponententrennung am EZG-Auslaß

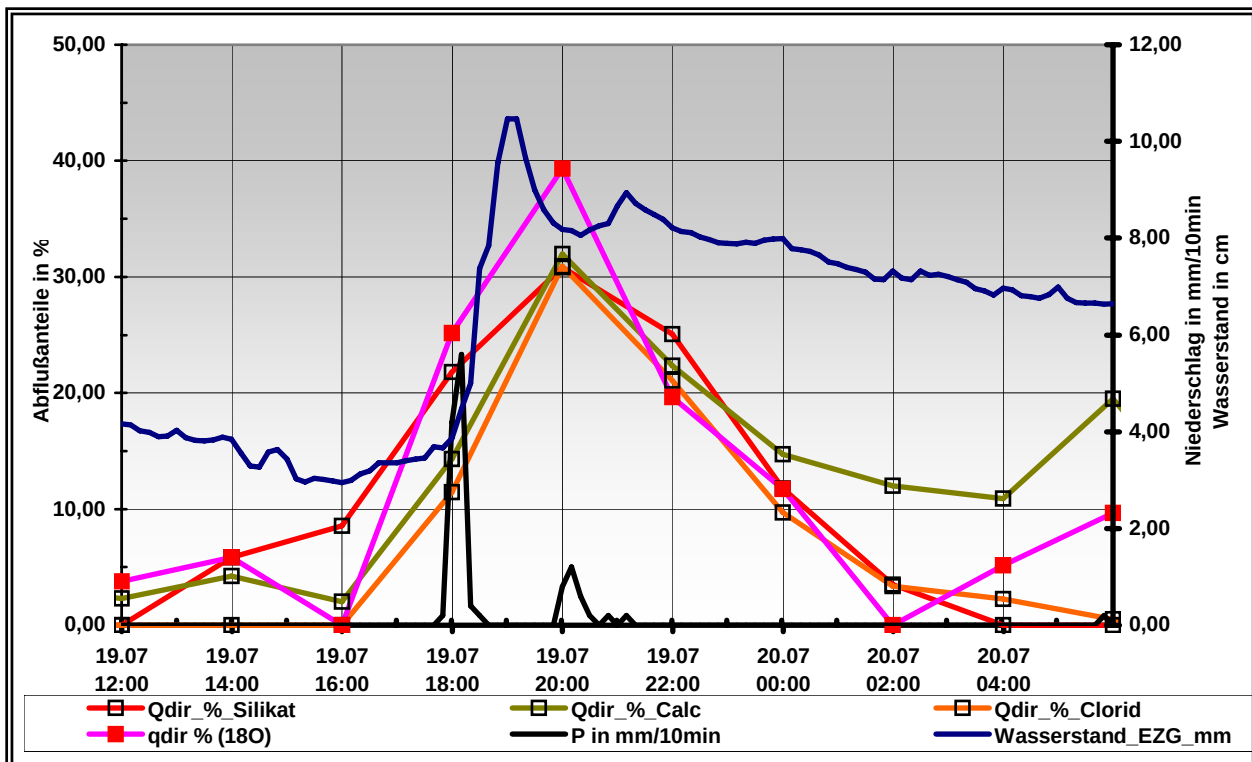


Abb.7.8: Berechnete Direktabflußanteile am EZG-Auslaß am 19.7.2001

In Abbildung 7.8 sind auf der linken Größenachse die prozentualen Abflußanteile, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensität in mm/10min sowie der Wasserstand am EZG-Auslaß, aufgetragen. Auch hier muß erwähnt werden, daß aufgrund der 2- stündigen Probenahme der Eindruck entstehen kann, daß der größte Direktabfluß mit zeitlicher Verzögerung zum Wasserstandspeak erfolgte. Dies liegt an der Tatsache, daß die größten Direktabflüsse meßtechnisch nicht erfasst wurden und im Bereich des Wasserstandpeaks liegen. So liegt der, in der Graphik dargestellte, Peak bereits auf dem abfallenden Teil des realen Direktabflusses. Die Angaben der Direktabflüsse erfolgen in prozentualer Darstellung, da aufgrund der fehlerhaften Abflußdaten eine Quantifizierung nicht möglich war.

Zu Beginn des Niederschlagsereignisses steigt der Anteil des Direktabflußanteiles bei ^{18}O und Silikat sprunghaft auf Werte von 25% bzw. 23% an. Bei Erreichen der Wasserstandsspitze kann davon ausgegangen werden, daß der Direktabfluß Werte im Bereich größer 40 % erreicht haben dürfte, bevor er bei der, um 20:00 Uhr erfolgten, Probennahme wieder auf einen Anteil im Bereich zwischen >30 % bei der herkunftsraumorientierten, und < 40 % bei der verweilzeitorientierten, Komponentenseparation erreicht. 6-8 Stunden nach dem Starkregenereignis geht der Anteil des

Direktabflusses wieder gegen Null , allerdings ist hier der Wasserstand noch immer um ca. 4cm höher , als vor dem Niederschlagsereignis. Dies kann durch einen erhöhten Basisabfluß erklärt werden, der durch Druckübertragungsmechanismen und ein verstärktes Ausdrücken von Grundwasser interpretiert werden kann. Geht man von maximalen Direktabflußanteilen im Bereich der Wasserstandsspitze von > 40 % aus, so muß in Anbetracht der kurzen Niederschlags-Abflußreaktion (< 1h) der größte Teil des Direktabflusses durch unmittelbar an die Bachläufe angrenzende Sättigungsflächen, desweiteren durch Horton'schen Overlandflow auf den versiegelten Flächen (9% der Gesamtfläche) generiert worden sein.

Zwischen verweilzeitorientierter und herkunftsraumorientierter Komponententrennung zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Das die Berechnung mittels geogener Tracer zu geringeren Anteilen führt, kann daran liegen, daß oberflächlich abfließendes Niederschlagswasser rasch geogene Depositionen mit sich führt und es so zu Ionenanreicherung kommen kann.

7.2.8 Vergleich der Direktabflüsse zwischen den Teilräumen

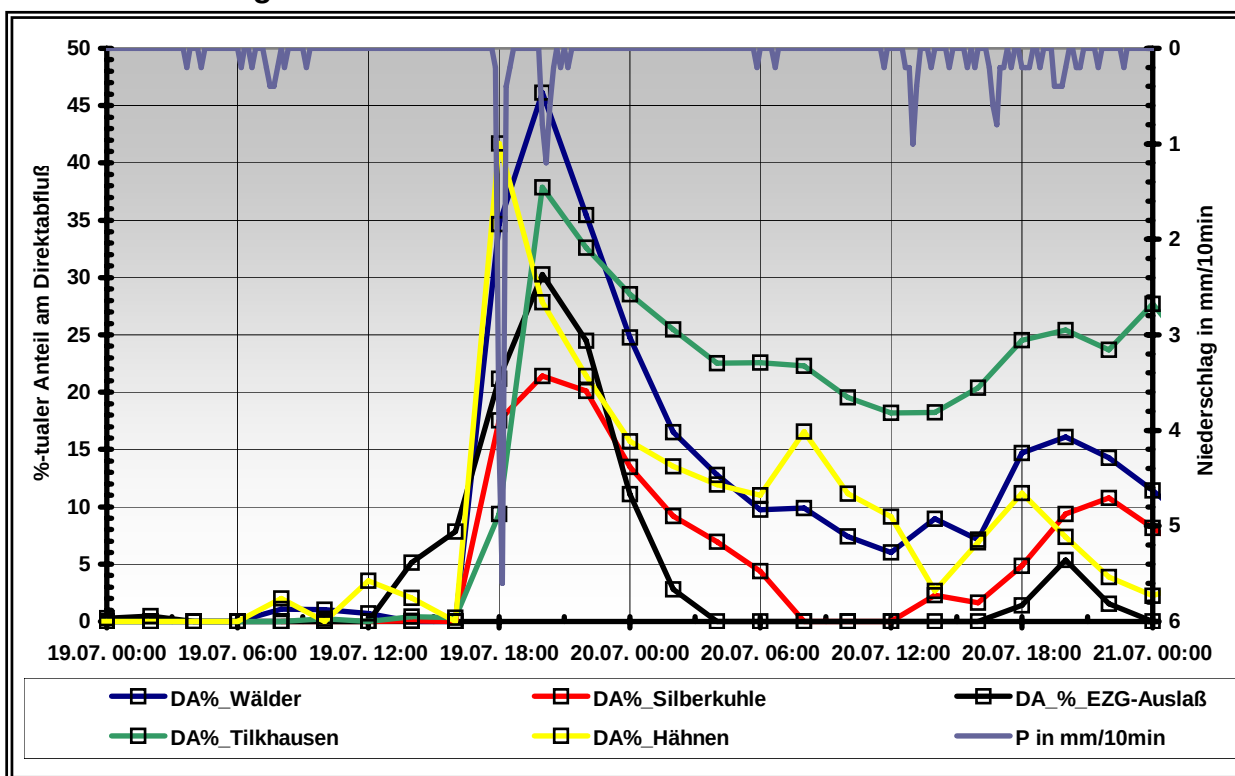


Abb.7.9: Berechnete Direktabflußanteile an den Teilraumauslässen und dem Gesamtgebietsauslaß

Die Abbildung 7.9 zeigt die auf Silikatbasis berechneten Direktabflußanteile der Teilräume und des Gesamtgebietes. Da eine quantitative Auswertung über die Wasserstände nicht möglich ist, sind auf der linken Größenachse die prozentualen Direktabflußanteile, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensität in mm/10min aufgetragen.

Auffällig ist wiederum die rasche Direktabfluß beitragende Gebietsantwort aller Teilräume. Die größten Ereigniswasser-Anteile sind bereits innerhalb einer Stunde zu verzeichnen, der Teilraum Hähnen dominiert mit dem steilsten Anstieg. Wie sich bei der Stichtagsbemessung der Abflüsse gezeigt hat, sind die Abflußanteile eng mit der Teilraumgröße korreliert, so daß auch während des Hochwasserereignis davon ausgegangen werden kann, daß aus dem Teilraum Hähnen die größten Abflußanteile entstammen, obwohl der Anteil der reinen Sättigungsflächen in diesem Raum als eher kleinräumig zu bezeichnen ist. Ein wichtiger Aspekt ist das Drainagenetz, zu dem allerdings keine genaueren Informationen vorliegen.

Mehr als 45 % Ereigniswasser sind am Abfluß im Teilraum Wälder beteiligt, Herkunftsraum sind die mit nur 7% Flächenanteil relativ kleinflächigen, nicht bewaldeten Sättigungsflächen des Unterlaufes. Es wird deutlich, daß bei hohen Niederschlagsintensitäten kleine Gebietsflächen, die direkt zum Abfluß beitragen, die Gesamtreaktion des Teilraumes überformen und sich prägnant auswirken können.

Der Teilraum Tillkhausen reagiert ebenfalls kurzfristig mit einem Ereigniswasseranteil von > 35 %. Das langsame Abfallen des direkt beitragenden Abflußanteiles ist charakteristisch für diesen Teilraum: Die Pedologie der Wiesenflächen wird durch Pseudogleye bestimmt. Allgemein sind diese Bereiche aufgrund von Auswaschungs- und Umlagerungseffekten als Nährstoff- und Mineralarm einzuordnen. Aufgrund der geringen Leitfähigkeiten der, die Stauzonen begrenzenden, Sperrschicht kann infiltrierendes Niederschlagswasser nach Aufsättigung nur lateral abfließen, geringe Ionengehalte des Bodens lassen nur eine langsame Ionenanreicherung zu. Dies könnte die langanhaltenden Direktabflußanteile erklären, wobei es sich hier nicht um ausschließlich oberflächlich abfließendes Wasser handeln muß, sondern durchaus auch bereits infiltrierte Wässer beteiligt sein können.

Der Teilraum Silberkuhle hat die geringsten Direktabflußanteile zu verzeichnen. Hier fällt die Gebietsantwort gedämpft aus, der absolute Anteil der Direktkomponente beträgt ca. 20%. Inwiefern dieses Verhalten durch die Retention der Teichanlagen oder der raschen Durchmischung von perkoliertem Niederschlag mit ionenreichem Grundwasser innerhalb der Stollengänge begründet ist, kann nicht geklärt werden. Wahrscheinlich kommt es aber zu einer Beteiligung beider Prozesse.

7.2.9 Die Ergebnisse der Tensiometermessungen für das Starkregenereignis am 19.7.2001

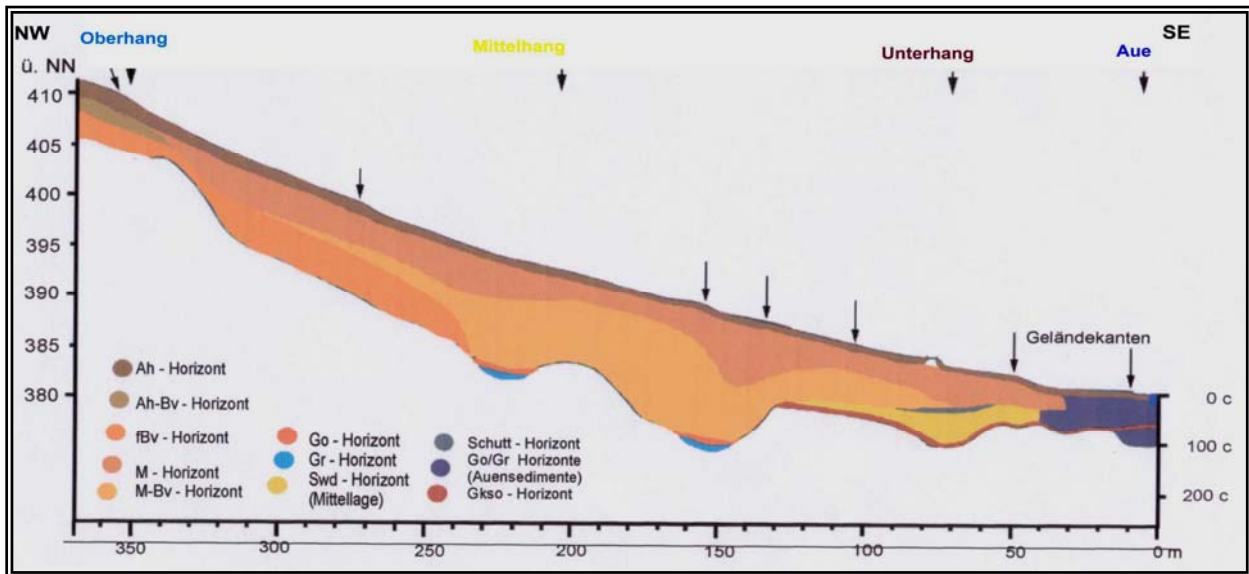


Abb.7.10: Messhang mit Tensiometermessfeldern

Der mit Tensiometern ausgestattete Messhang wird von Mitarbeitern der Universität Bochum betrieben und befindet sich auf Höhe des EZG-Auslasses. In den Bereichen Oberhang, Mittelhang, Unterhang und Aue sind Tensiometer in verschiedenen Tiefen installiert.

7.2.10 Beschreibung der Hangsegmente

a) Tensiometerstation Oberhang:

Der Oberhang befindet sich im Bereich periglazialer Deckschichten, die mitteldevonischen, sandigen Tonschiefern aufliegen. Die Pedologie besteht aus anthropogen überprägten Braunerden, heutige Nutzungsform ist Wiesen- und Weidenbewirtschaftung, die mittlere Neigung beträgt 12° . Bis in 60 cm Tiefe dominiert mittelgrusiger, sandig-lehmiger Schluff, der in tieferen Horizonten in schwach tonigen Schluff (~ 120 cm) und danach (> 120 cm) in die Gesteinsfraktion der Zersatzzone übergeht. Besonderheiten sind verdichtete Pflugsohlen im Bereich von 40 cm Tiefe, Wurmgänge (Makroporen) in den Bodenschichten bis 70 cm Tiefe, sowie Anzeichen von Staunässe („Roststreifen“) im Bereich der Basislage.

b) Tensiometerstation Mittelhang:

Im Bereich der muldenförmigen Hangrinne liegen ebenfalls periglaziale Deckschichten auf mitteldevonischem sandigen Tonschiefer. Die mittlere Neigung beträgt 6° , die Böden bestehen aus Kolluvisol und werden als Wiesen bewirtschaftet. Die Böden bestehen aus

tonigem Schluff mit einem Skelettgehalt von ca. 30% , der sich bis in Tiefen von 185 cm erstreckt. Im Gegensatz zum Oberhangbereich ist die Anzahl an Makroporen als gering einzustufen.

c) Tensiometerstation Unterhang:

Der Hangfuß (Neigung 1-2°) besteht ebenfalls aus Kolluvisol, ist aber im Gegensatz zu den Hangbereichen heterogener aufgebaut: Bis in Tiefen von ca. 95 cm prägt grusiges, toniges und schluffiges Kolluvium mit feinen bis mittleren Porengrößen den Bodenhorizont; daran anschließend erstreckt sich bis in Tiefen von 110 cm eine sandig-lehmige Schuttlage mit hohem Skelettgehalt (35%) und mittlerer bis grober Porengröße.

Unterhalb dieser Lage befindet sich in Tiefen zwischen 110cm und 160cm eine schluffig-tonige Mittellage, die geringmächtigen Mangan- und Eisenkonkretionen aufliegt, unter denen sich gespanntes Grundwasser befindet. Die Mittellage weist mit hoher Substratfeuchte und rostfarbenen Oxidations- und Reduktionsmerkmalen auf zumindest zeitweilige Grundwasserbeeinflussung hin.

In Tiefen >-160cm geht die Bodenform in fein- bis grobgrusigen , schluffig und lehmigen Sand über, innerhalb dessen keine Gefügestruktur nachgewiesen wurde.

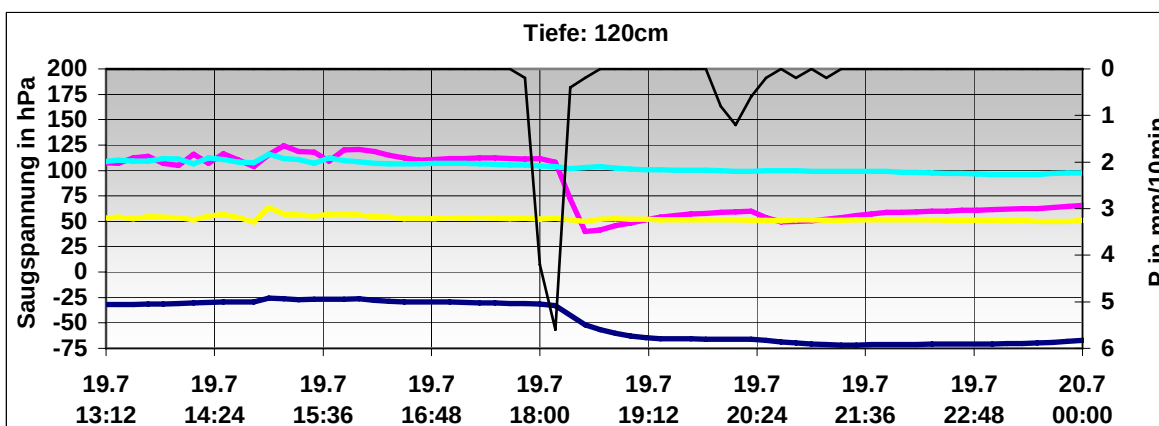
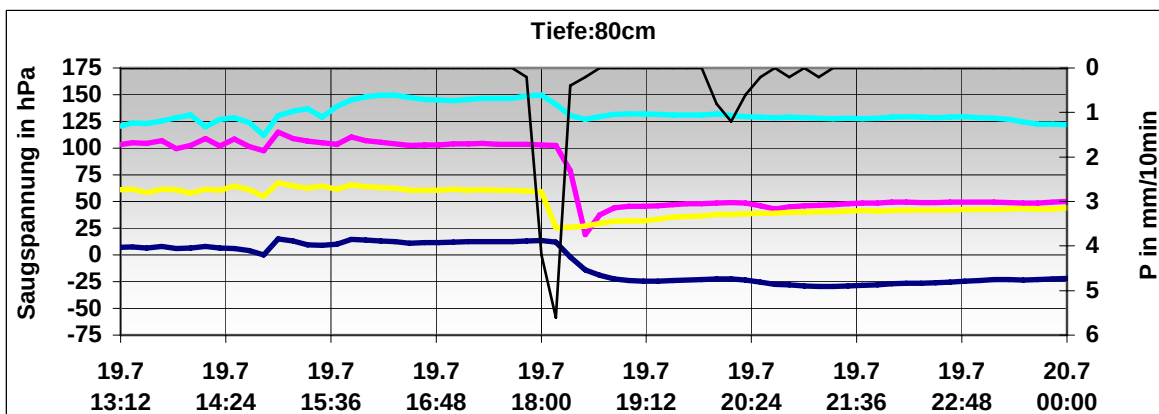
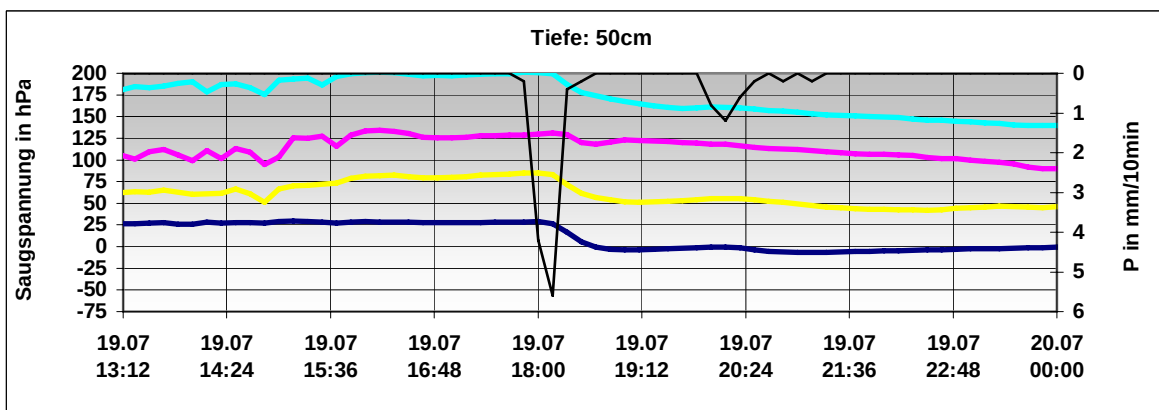
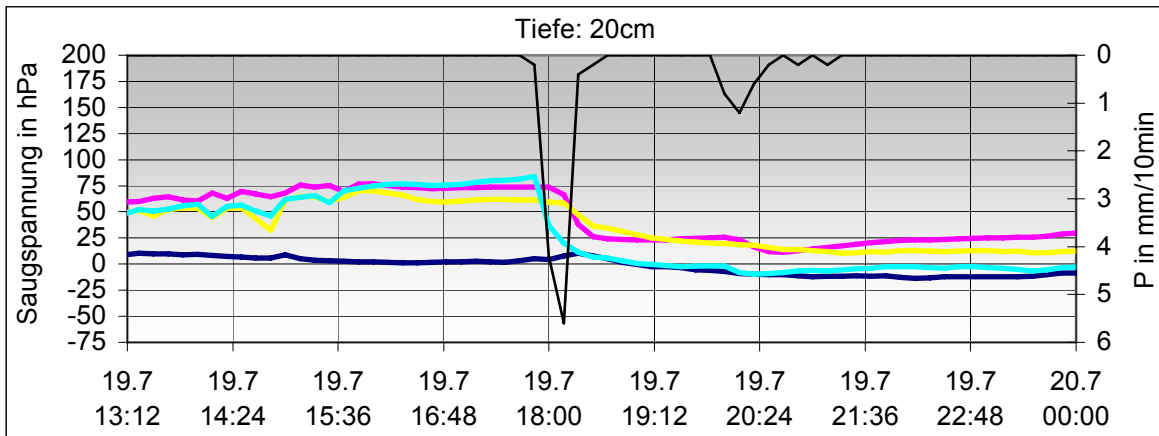
d) Der Auenbereich (0° Neigung) ist aus Auengeröll und holozänen Talablagerungen entstanden. Es handelt sich um Brauneisengleye mit Mangan- und Eisenkonkretionen, die auf Auswaschungs- und Umlagerungsprozesse durch hohe Grundwasserstände beruhen. Bis in Tiefen von ca. 30 cm dominiert steiniges, tonig-schluffiges Aufschüttungsmaterial mit meist kantengerundeten Steinfractionen (fluvial). Daran anschließend befinden sich Auensedimente verschiedener Korngrößenfraktionen (toniger Schluff, schwach sandiger Lehm, schluffiger Ton) und mit Konkretionsanteilen von ca. 5-10%.

In einer Tiefe von ca. 1m gehen die Auensedimente in einen Bereich über, der aus Auen- bzw. Hangschuttgeröll besteht und Skelletanteile bis 38% besitzt.

Inwieweit der bodenkundliche Aufbau des Messhangs Repräsentanz für die Pedologie des übrigen EZG besitzt, kann hier nicht beantwortet werden. Es scheint jedoch wahrscheinlich, daß im Bereich der Braunerden vergleichbare Verhältnisse angetroffen werden können. Die Beobachtung der Saugspannungsänderungen mittels Tensiometermeßfeldern erscheint mir hervorragend geeignet um genauere Erkenntnisse über die Abflußbildungsprozesse während unterschiedlicher hydrologischer Situationen zu erzielen.

Legende: — Aue; — Unterhang; — Mittelhang; — Oberhang

Abb.7.11: Saugspannungsveränderungen während des Starkregens am 19.7.



7.2.11

Vergleich der Saugspannungsänderungen

Die in Abbildung 7.11 zu sehenden Verläufe der Saugspannung beziehen sich wiederum auf das Starkregenereignis am 19.7.2001. In den 4 Diagrammen sind für jeweils verschiedene Tiefen auf der linken Größenachse die Saugspannungsveränderungen in hPa und auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensitäten in mm/10 min aufgetragen. Die farbigen Ganglinien beziehen sich auf die in Abb.7.10 eingezeichneten Tensiometerstationen Oberhang, Mittelhang, Unterhang und Auenbereich.

In Diagramm 1. zeigt sich, daß es im Oberbodenbereich bis 20cm Tiefe zu einem schnellen Vordringen der Feuchtefront kommt und gerade im Bereich des Oberhanges schon zu Beginn des Niederschlages eine schnelle Sättigung erfolgt. Auch im Mittel- und Unterhangsegment kommt es im Verlauf des Starkregens zu annähernder Sättigung, während im Auenbereich (Sättigungsflächen) der Grundwasserstand auch vor dem einsetzenden Regen nahe der Geländeoberkante stand.

Ein anderes Bild zeigt sich in Diagramm 2. , welches die Saugspannungen in 50 cm Tiefe aufzeigt: Mit Ausnahme der Auen wird in keinem Hangsegment eine vollständige Sättigung erreicht, die Feuchtefront kann hier nur langsam vordringen, es entsteht der Eindruck das es sich hier um eine Zone verminderter Leitfähigkeit handelt.

In 80 cm Tiefe (Diagramm 3.) können wiederum verstärkte Wasserumsätze gezeigt werden. Gerade im Bereich des Unterhanges (bedingt auch im Mittelhangsegment) kommt es zu einem raschen Auffeuchten der Bodenhorizonte. Im Auenbereich nimmt die Saugspannung negative Werte an. Das nutzbare Porenvolumen ist hier vollständig gesättigt , die negativen Saugspannungen weisen auf auflagernde Wasserschichten hin(ein hPa (-) entspricht ca. 1cm Wasserhöhe über dem Tensiometer).

Auch in 120 cm Tiefe zeigt sich ein schnelles Auffeuchten im Bereich des Unterhangsegmentes, im Auenbereich kommt es zum Ansteigen des Grundwasserstandes. In den Bereichen des Ober- und Mittelhanges werden die Bodenschichten in 120 cm Tiefe vom Niederschlag nicht berührt.

Zusammenfassung:

Kurzfristige Saugspannungsabfälle bis in den Bereich vollständiger Wassersättigung können im Bereich des gesamten Messhanges bis in Tiefen von etwa 20 cm festgestellt werden. Gerade im Oberhangsegment kommt es zu leicht übersättigten Verhältnissen, es besteht die Möglichkeit von Sättigungsflächenabfluß, was bei einer Hangneigung von 12° zu schnellen Abflußreaktionen führen kann. Allerdings kann oberflächlich abfließendes Wasser in Segmenten geringerer Neigung (Mittelhang 6°Gefälle) und Bodenvorfeuchte wieder infiltrieren, sodaß ein durchgehender Oberflächenabfluß bis ins Gerinne nicht wahrscheinlich erscheint. Dennoch zeigt sich anhand der schnellen Sättigung der oberen 20 cm Bodenschichten, daß bei den lateralen Fließprozessen durchaus schneller Zwischenabfluß zu erwarten ist.

In Tiefen von 50 cm zeigt sich ein nur geringes Vordringen der Feuchtefront. Ob dies anthropogen durch das Vorhandensein einer Pflugsohle oder pedologisch bedingt ist, und inwieweit dieses Verhalten mit Ausnahme der Pseudogleye im übrigen Einzugsgebiet auch zu beobachten ist , kann hier nicht gesagt werden.

Im Mittel- und Unterhangsegment zeigt sich eine rasche Zunahme der Bodenfeuchte in 80 cm Tiefe, während im Oberhangsegment nur geringe Saugspannungsabfälle zu verzeichnen sind. Dieses Verhalten kann zwei mögliche Ursachen haben:

A: Die Bodenstruktur ändert sich hier insofern, daß über Bypassflow (bspw. Makroporen) Wasser der oberen Bodenschichten punktuell in tiefere Bereiche perkolieren kann und daher im Tensiometerbereich um 50 cm Tiefe nicht erfasst wird.

B: Durch das, auf die (potentiellen)Sättigungsflächen im Bereich zwischen Unterhang und Aue, fallende Niederschlagswasser und oberflächlich aus dem Hangbereich abfließendes Wasser, kommt es zu einer schnellen Erhöhung der Grundwasserstände im Auenbereich, was zu einer Erhöhung des Grundwasserstandes auch im Bereich des Unterhanges führen könnte.

Auch in 120 cm Tiefe zeigt sich die größte Veränderung der Bodenfeuchte im Bereich des Unterhanges. Es kommt zu einem kurzfristigen Saugspannungsabfall von mehr als 50hPa , jedoch nicht zu vollständiger Sättigung . Ich vermute eine Ausbildung eines Grundwasserberges im unmittelbarem Auenbereich (den ich aufgrund fehlender pf-Beziehungen jedoch nicht nachweisen kann), der die rasche Auffeuchtung der tiefer gelegenen Bodenhorizonte des Unterhanges (Neigung 1-2°) bedingt.

Der Auenbereich zeigt pedologisch (Naßgley) wie meßtechnisch (Grundwasserstände) ganzjährig hohe Grundwasserstände und kann als Sättigungsflächenregion ausgewiesen werden. Wie schon erwähnt, scheint der Effekt des Groundwaterripping möglich, kann jedoch nicht begründet werden.

7.2.12 Fazit

Während des konvektiv entstandenen Starkregenereignisses am 19.7.2001 konnte eine schnelle Gesamtgebietsreaktion in weniger als eine Stunde beobachtet werden. Fließzeitenbestimmungen haben gezeigt, daß, mit Ausnahme des Teilraumes Silberkuhle, erhöhte Quellschüttungen diese spontane Niederschlags-Abflußreaktion nicht verursacht haben können. Vielmehr deuten die Verdünnungserscheinungen der geogenen Tracer auf einen hohen unmittelbar einsetzenden Anteil an Ereigniswasser hin. Direktabflußanteile von über 40 % weisen hier auf die direkt mit den Bachläufen verbundenen Sättigungsflächen als dominante Herkunftsräume hin. Desweiteren sind versiegelte Flächen, mit 9 % Anteil an der Gesamtfläche, an der Bildung der Hochwasserwelle beteiligt, was durch Beobachtungen (Horton'scher Overlandflow) während des Niederschlagsereignisses bestätigt werden konnte.

Ein kleines, etwa 2 Stunden nach dem Starkregen einsetzendes, Nachregenereignis war im Verlauf der Wasserstände deutlich zu erkennen, was darauf schließen läßt, daß die Direktabfluß generierenden Böden auch Stunden nach dem Starkregen noch vollständige Sättigung aufwiesen und den Niederschlag direkt in die Bachläufe ableiteten.

Nach Rückgang der Direktabflüsse zeigten sich generell noch erhöhte Wasserstände, was auf eine Beteiligung „indirekter“ Abflußkomponenten deutet. Gerade im Verlauf der Leitfähigkeit im

Teilraum Wälder zeigte sich nach spontanem Leitfähigkeitsrückgang ein kurzfrister Anstieg der Ionenkonzentration. Fast simultan kommt es am Einzugsgebietsauslaß zu einem starken Anstieg des Grundwasserstandes. Daraus ergibt sich die Vermutung, daß verstärkt Grundwasser indirekt an der Abflußbildung beteiligt ist. Zum einen kann vorfluterfern gefallenes Wasser durch Druckübertragung eine Mobilisierung von Wasser der gesättigten Zone der Sättigungsflächen bewirken (Piston-Flow). Zum anderen kann Niederschlagswasser in vorfluternahen Bereichen eine rasche Aufsättigung bewirken und durch die auflastende Gewichtskraft Wasser in den Vorfluter ausdrücken.

Die Tensiometermessungen im Bereich der Aue zeigten bereits eine halbe Stunde nach einsetzendem Niederschlag deutliche Übersättigung. Die Vermutung, daß hier Groundwaterripping Effekte zu einem verstärkten Ausdrücken von Vorereigniswasser führen, liegt nahe, kann aber aufgrund fehlender Feldkapazitätsinformationen nicht belegt werden. Im Bereich des Messhanges wiesen die obersten 20 cm des Bodenhorizontes schnell eine vollständige Sättigung auf. Parallel dazu kam es im Abfluß aller Teilräume (speziell aber im Bereich der Wiesenstandorte) zu einem signifikanten Anstieg der Kaliumkonzentrationen. Erweisen sich die Ergebnisse im Bereich des Messhanges als repräsentant für die Wiesenbereiche auf Braunerde in Hanglage, so wird hier gerade im Bodenhorizont bis 20 cm Tiefe schneller Interflow und bei vollständiger Sättigung Returnflow generiert.

Interessant erscheint die schnelle Gebietsreaktion des Teilraumes Wälder. Hier hat sich gezeigt, daß die im Unterlauf gelegenen Sättigungsflächen, mit nur 7% Flächenanteil am sonst komplett bewaldeten Teilraum, die Zusammensetzung des Abflusses wesentlich prägen und für den hohen Anteil an Direktabflußkomponenten verantwortlich sind.

Obwohl im Teilraum Hähnen echte Sättigungsflächen nur geringe Flächenanteile einnehmen, ist der Anteil an Direktabfluß hoch. Inwieweit hier das Drainagenetz im Bereich des Skiliftes abflußverschärfend wirkt, bzw. die bei den Feldbegehungen beobachteten stark vernässten Bereiche der Braunerden Sättigungsflächenabfluß bilden, kann hier, auch aufgrund dem hohen Anteil an Abwassereinleitungen, nicht geklärt werden.

Die Retentionswirkung der Teichanlagen hat sich auf die Abflußreaktionen nicht bzw. nur gering ausgewirkt.

Der Teilraum Tillkhausen reagiert ebenfalls kurzfristig mit einem Ereigniswasseranteil von > 35 %. Das langsame Abfallen des direkt beitragenden Abflußanteiles ist charakteristisch für diesen Teilraum: Die Pedologie der Wiesenflächen wird durch Pseudogleye bestimmt, die systematisch in Stauzone und darunterliegender Sperrschicht unterteilt werden können. Durch eine recht geringe Aufnahmekapazität der Stauzonenbereiche wirken diese im Bereich des Mittelhanges gelegenen Nasswiesenbereich wie (potentielle) Sättigungsflächen. Auswaschungseffekte wirken sich auf die nur langsamen Wiederanstiege der geogenen Tracergehalte aus. Die dort befindlichen Entwässerungsgräben wirken sich abflußverschärfend aus. Auch in diesem Teilraum erschweren anthropogene Abwassereinleitungen die hydrochemische Interpretation.

Der Teilraum Silberkuhle weicht in seinen Reaktionen deutlich von dem Verhalten der übrigen Teilräume ab: Er zeigt ein insgesamt gedämpftes Verhalten und die geringsten Direktabflüsse des Gesamtgebietes. Dies liegt zum einen an dem geringen Anteil direkt mit dem Gerinne verbundener Sättigungsflächen in Kombination mit der Interzeptionswirkung des Waldbestandes, zum anderen an der bergbaulichen Überformung des Teilraumes. Die Quellschüttung im Bereich ehemaliger Stollengänge zeigte eine deutliche und spontane Zunahmereaktion auf das Starkregenereignis. Hier können zwei Abflußbildungsprozesse vermutet werden:

Im Bereich der Hochlagen, entlang von bergbaulich entstandenen Schwächezonen, schnell perkolierendes Ereigniswasser sammelt sich den vernetzten hydrothermalen Gängen und führt durch Druckübertragung (Piston Flow), begünstigt durch die sperrende Wirkung der aufliegenden Pseudogleye, zu einer raschen Zunahme der Quellschüttung im Bereich der Mundlöcher ehemaliger Stollengänge. Desweiteren kommt es zu einer Vermischung mit mineralisiertem Gangwasser und zu Returnflow im Bereich der Quellaustritte.

Die Reaktionen am Einzugsgebietsauslaß sind in erster Linie durch die Abflußzusammensetzungen der Teilräume bestimmt. Gemäß der engen Korrelation zwischen Abflußmengen und Teilraumgrößen lassen sich auch am Gesamtgebietsauslaß die spezifischen Wasserinhaltsstoffe sowie Abflußreaktionen der einzelnen Teilräume wiedererkennen. In der Reihenfolge Hähnen, Silberkuhle, Wälder und Tilkhausen wird die Zusammensetzung und Reaktion des Abfluß am Gebietsauslaß bestimmt. Dennoch hat sich gerade im Bereich des Messhanges gezeigt, daß hier in nicht unerheblichen Mengen Abflußbildung vorhanden ist.

7.3 Analyse des Langzeitregens im Zeitraum zwischen 3.8.2001 und 11.8.2001

Um die Reaktionen des EZG unter verschiedenen hydrologischen Situationen zu untersuchen, habe ich für den zweiten Teil der Auswertung speziell das advektiv entstandene Niederschlagsereignis (5.8., 12:00 Uhr) aus der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraumes gewählt. Hier hat bereits ein im Zeitraum zwischen 3.8. und 4.8. gefallener Niederschlag für erhöhte Bodenvorfeuchten gesorgt, desweiteren liegt bei diesem Ereignis die maximale Niederschlagsintensität bei $< 2 \text{ mm}/10\text{min}$, das Ereignis erstreckt sich aber über einen Zeitraum von 5h und der gefallene Niederschlag beträgt ca. 8mm.

Es handelt sich also, sowohl die Gebietseigenschaften als auch das eigentliche Ereignis betreffend, um unterschiedliche Systemeingangskomponenten; die Frage ist, welche Abflußbildungsprozesse hier dominieren.

Während des vorangehenden Regenereignisses sind ca. 9 mm Niederschlag innerhalb von 36 h gefallen, so daß hier bereits eine Aufsättigung der Böden erfolgte, Ereigniswasser in tiefere Bodenschichten infiltrieren konnte und im Gegensatz zum Starkregenereignis am 19.7. die Dynamik des Niederschlag – Abfluß- Systemes bereits vor dem untersuchten Niederschlagsereignis einsetzte.

Aufgrund der geringeren Niederschlagsintensitäten und des bereits entstandenen Direktabflusses werden Verdünnungs- und Anreicherungskonzentrationen der Hauptionen geringer ausfallen, allerdings kann der Anteil der Direktabflüsse aufgrund erhöhter Vorsättigung der Böden doch bedeutend sein.

7.3.1 Vergleich der Wasserstände im Zeitraum zwischen 3.8.2001 und 6.8.2001

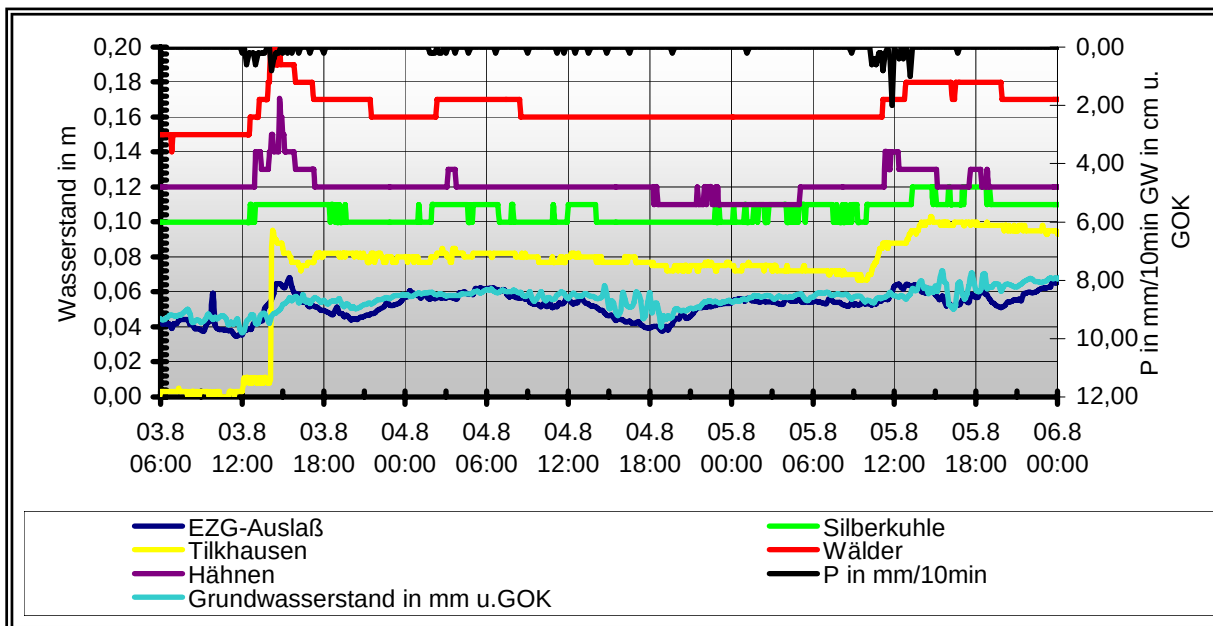


Abb.7.12: Wasserstandsvergleich im Zeitraum 3.8. – 6.8.2001

In Abbildung 7.12 ist die Reaktion der Wasserstände auf den am 3.8.2001 um 12:00 Uhr einsetzenden Advektivniederschlag zu sehen. Auf der linken Größenachse sind die

Wasserstände in m, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensitäten, sowie der Grundwasserstand (in cm unter GOK) am EZG- Auslaß aufgetragen.

Mit Niederschlagsbeginn am 3.8.2001 setzt nach mehr als einer niederschlagsfreien Woche die erste, über einen Zeitraum von 6h anhaltende, längere Regenperiode ein. In diesem ersten Zeitraum fallen 6 mm Niederschlag bei Niederschlagsintensitäten $< 1\text{mm}/10\text{min}$. Trotz diesem nur geringen Inputes ist die Reaktion der Teilräume, mit Ausnahme des Bereiches Silberkuhle, spontan. Im Bereich der größten Niederschlagsintensität kommt es mit nur geringer Verzögerung zu den größten Abflüssen. Deutlich zu sehen ist, daß der Teilraum Tilkhausen in der niederschlagsfreien Zeit trockenfiel und am 3.8. mit einer Wasserstandszunahme von fast 10 cm auf das Ereignis reagiert. Scheinbar reichten die ersten 2 mm (l/m^2) aus, um direktabflußbeitragende Flächen zu aktivieren.

Am EZG-Auslaß erreicht der Wasserstand 1,5 h nach dem Zeitpunkt der maximalen Niederschlagsintensität seinen Höchststand, das Grundwasser reagiert mit 2- stündiger Verzögerung wiederum sehr schnell.

Nur der Teilraum Silberkuhle reagiert mit geringer, gedämpfter Reaktion. Ob dies an der Retention der Teichanlagen liegt, oder daran, daß die Sättigungsflächen (Anmoor- und Stagnogleye) nicht unmittelbar mit dem Hauptgerinne verbunden sind, kann hier nicht geklärt werden.

Im Anschluß an dieses erste Ereignis fällt in einem 1,5- tägigen Zeitraum nur geringer Niederschlag mit einer Gesamtmenge von etwa 3,5 mm. Dennoch scheint diese kleine Menge auszureichen, um die Abflüsse der Teilräume auf relativ konstanten Niveau zu halten. Bei den Ganglinien von Grund- und Wasserstand im Bereich des EZG-Auslasses zeichnen sich die täglichen Wasserstandsminimas in den späten Nachmittagsstunden, aufgrund verstärkter Pflanzentranspiration, ab.

Am 5.8, um 8:00 Uhr morgens, setzt wieder verstärkter Niederschlag ein. Die Reaktionen der Teilräume sind, im Gegensatz zum Ereignis geringeren Umfanges am 3.8., verzögert und mit geringeren Wasserstandmaximas. Ausgeprägte Wasserstandspeaks sind nur im Teilraum Hähnen ansatzweise zu erkennen, der Teilraum Tilkhausen reagiert mit stufenförmig ansteigendem Abfluß. Scheinbar ist der Anteil des Sättigungsflächenabflusses trotz höherer Niederschlagsintensitäten (im Vergleich zum Ereignis am 3.8.) geringer, das EZG reagiert deutlich zurückhaltender. Eine Interpretation dieser unterschiedlichen Gebietsreaktionen, speziell bezogen auf die geringere direkte Abflußbildung trotz höherer Niederschläge (am 5.8.2001) ist aufgrund der vielen Einflußfaktoren schwierig. Es kann vermutet werden, daß die Infiltrationsraten der Böden nicht konstant bleiben, sondern von ereignisabhängigen und – unabhängigen Faktoren beeinflußt werden (SCHIFFLER, 1992): Zu den ereignisabhängigen Einflußfaktoren (Niederschlag, Böden, Vegetation) zählen die sättigungsabhängige Veränderung der Wasserleitfähigkeit, Anfangswassergehalt und –spannung, Niederschlagsintensität, die zeitliche Abfolge der Niederschlägen, die Energie der Regentropfen (Splash-Effekt), die Verkrustung und Verschlämmung der Oberböden, das Quellen und Schrumpfen der Böden, Einschlüsse und Strömung von Bodenluft, die Hysterese der Bodenkennlinien und mehr. All diese Faktoren können dazu führen, daß nach Trockenphasen die Infiltrationskapazität der Böden geringer ist, als nach erfolgter Auffeuchtung durch Vorregenereignisse. Im vorliegenden Fall kam es durch die Vorregenereignisse zu einer bereits

einsetzenden Infiltration des Niederschlages, was dazu führte, daß sich mit zunehmender Sättigung auch die hydraulischen Leitfähigkeiten erhöhten (BAUMGARTNER/LIEBSCHER,1996). Dies könnte ein Grund dafür sein, daß nach längeren Trockenphase geringere Bodenvorfeuchten in Kombination mit geringeren Leitfähigkeiten zu einem schnellen Übersteigen der Infiltrationsraten führen, während nach einer bereits erfolgten Aufsättigung der Böden Niederschläge leichter bis mittlerer Niederschlagsintensität, aufgrund erhöhter hydraulischer Leitfähigkeiten der Böden, schneller in die Bodenmatrix infiltrieren können.

7.3.2 Die Reaktion der Leitfähigkeiten im Zeitraum zwischen 3.8.2001 und 6.8.2001

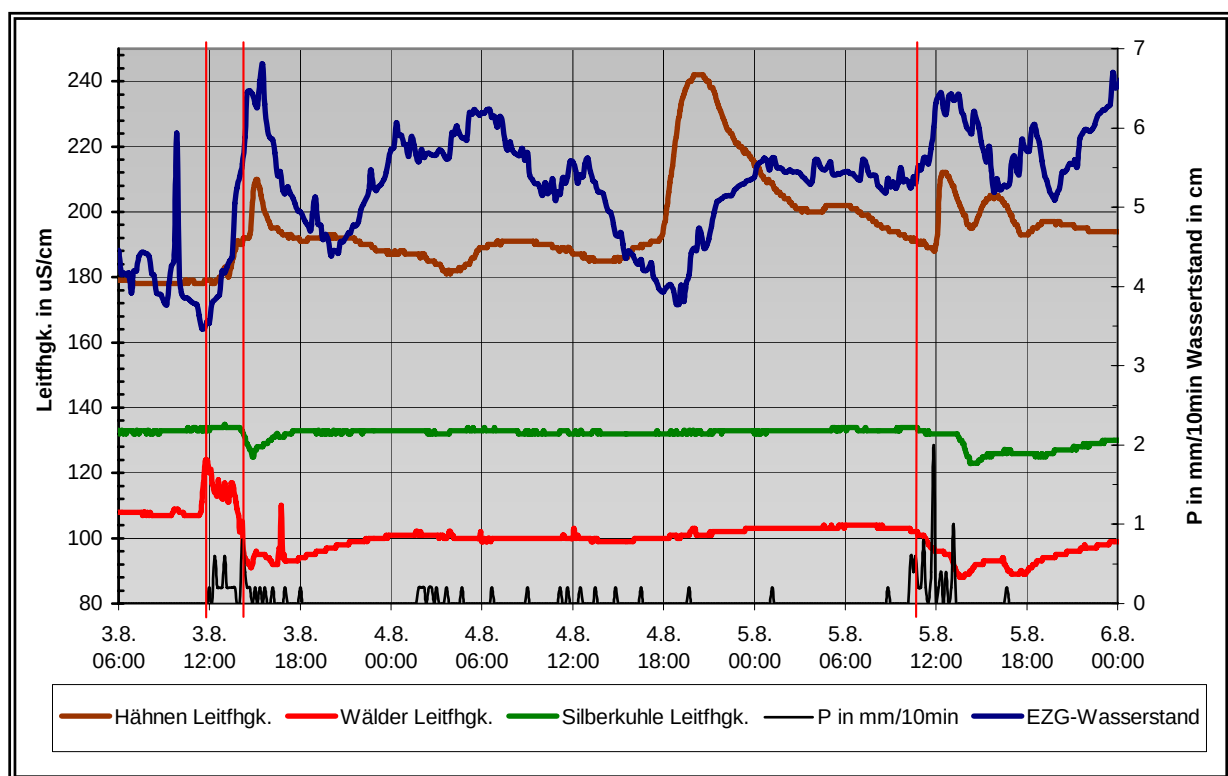


Abb.7.13:Die Reaktion der Leitfähigkeiten

In Abbildung 7.13 sind auf der linken Größenachse die Leitfähigkeiten in uS/cm, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensität und der Wasserstand am EZG-Auslaß eingezeichnet. Im Teilraum Tilkhausen und am EZG-Auslaß konnten meßtechnisch keine Leitfähigkeiten aufgenommen werden.

Wiederum paradox reagiert der Teilraum Hähnen: Zu Erwarten ist eine allgemeine Abnahme der Leitfähigkeit bei Zufluß von ionenarmen Ereigniswasser. Das Gegenteil ist der Fall: mit einsetzendem Niederschlag beginnt am 3.8. die Leitfähigkeit von schon erhöhten Basisabflußwerten von 180 uS/cm auf 210 uS/cm anzusteigen. Auch am Abend des 4.8. setzt eine spontane Erhöhung der Leitfähigkeit bis in Bereiche >240 uS/cm ein, die nur durch anthropogene Beeinflußung (Abwasser) erklärt werden kann.

Der Teilraum Wälder reagiert mit einem Anstieg von 10 uS/cm auf den einsetzenden Niederschlag am 3.8, fällt zunächst leicht und bei steigender Niederschlagsintensität abrupt auf Werte um 90 uS/cm ab. Danach kommt es zu einem kurzfristigen Anstieg der Leitfähigkeiten auf Werte um 110 uS/cm, was, wie beim Starkregenereignis am 19.7, als Zeichen für ein verstärktes Ausdrücken von Grundwasser gedeutet werden kann. Insgesamt zeigt sich ein differenziertes Verhalten: Das Ansteigen der Leitfähigkeit zu Beginn kann dadurch ausgelöst worden sein, daß anfangs Stoffe, wie Trockendepositionen (lockere Erdauflagen, Staub, etc.) oberflächlich dem Gerinne zugeführt wurden, was zu erhöhten Leitfähigkeiten im Abfluß führte.

Während der niederschlagsarmen Zeit zwischen 3.8 und 4.8 kommt es zu einer leichten Erhöhung der Leitfähigkeiten (verstärkte Beteiligung von Grundwasser), bis bei einsetzendem Niederschlag am Morgen des 5.8. die Leitfähigkeit langsam auf 90 uS/cm abfällt, das Minima aber erst nach Beendigung des Ereignisses erreicht wird. Deutlich zu erkennen ist, daß der kleine Nachregen am Nachmittag des 5.8. wieder zu einer Leitfähigkeitsverminderung führt, deren Verlauf der des vorangegangenen Langzeitregens gleicht. Die Böden in Gerinneumgebung sind bereits so gesättigt, daß auch geringe Niederschlagsmengen zu Direktabfluß führen.

Der Teilraum Silberkuhle reagiert nur geringfügig auf die Niederschlagsereignisse mit kleinen Niederschlagsintensitäten. Es kommt zu Leitfähigkeitsabnahmen im Bereich von 10 uS/cm, die am 3.8. mit maximaler Niederschlagsintensität und am 5.8. erst zum Ende des 4- stündigen Niederschlages einsetzen. So ist im Teilraum Silberkuhle der Direktabfluß beitragende Flächenanteil, unter der Voraussetzung, daß sich die Retentionswirkung der Teiche nicht zu sehr auf das Abflußverhalten auswirkt, als gering einzustufen.

7.3.3 Die Reaktion der Silikatgehalte im Zeitraum des Langzeitregens

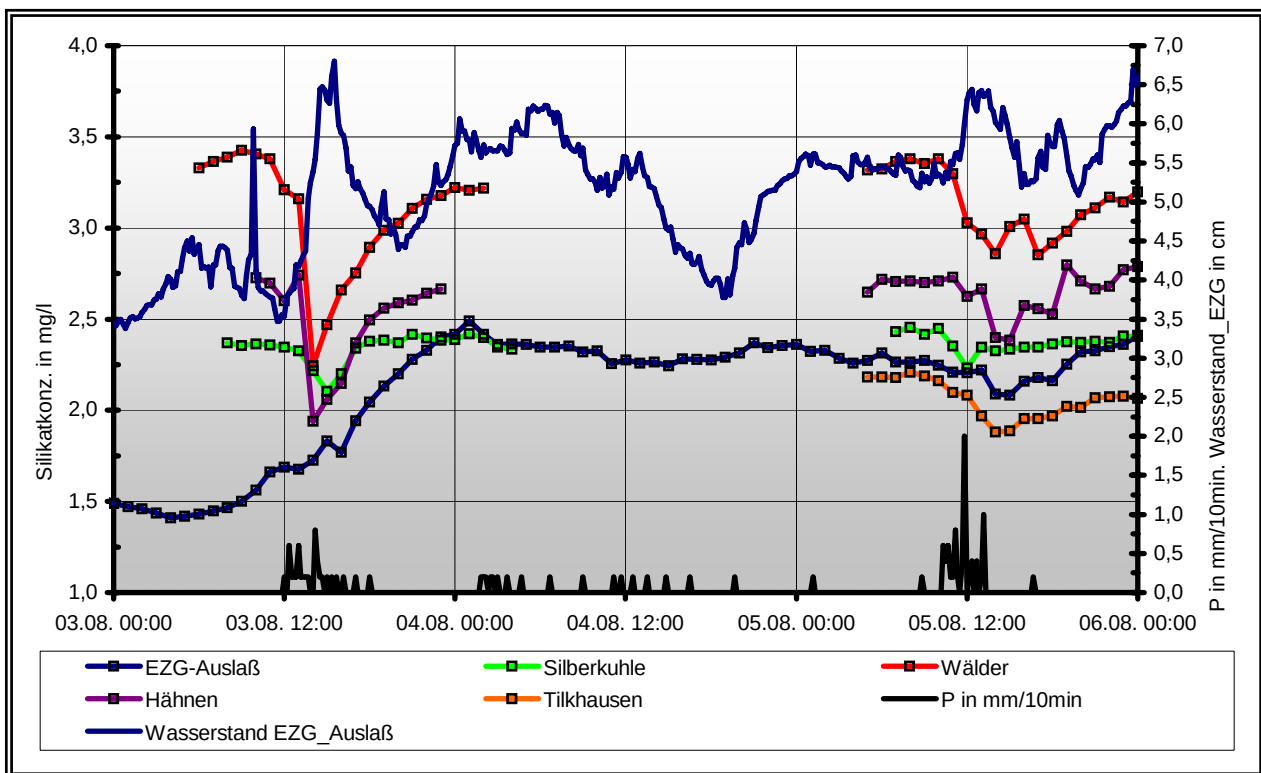


Abb.7.14: Silikatkonzentrationen im Zeitraum 3.8.2001 – 6.8.2001

In Abbildung 7.14 sind die Silikatgehalte der Teilräume und des EZG-Auslasses zu sehen, auf der linken Größenachse sind die Silikatgehalte in mg/l, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensitäten in mm/10min und der Wasserstand am EZG-Auslaß eingezeichnet. Nachdem im Zeitraum Ende Juli / Anfang August kein Niederschlag im EZG gefallen ist, waren die Automatischen Probeentnahmegeräte in dieser Zeit nicht in Betrieb, sondern wurden erst wieder mit einsetzendem Regen aktiviert. Auffallend sind die sehr niedrigen Silikatgehalte am EZG-Auslaß zu Beginn der Aufzeichnung. Erst nach dem Niederschlagsereignis am 3.8. steigen die Konzentrationen wieder in Bereiche größer 2mg/l, was in etwa der Basisabflußkomponente entspricht. Was diese niedrigen Silikatkonzentrationen zu Beginn der zweiten Messperiode verursacht hat, kann nicht beantwortet werden; die übrigen geogenen Tracer (Calcium, Magnesium, Sulfat) verhalten sich bezüglich ihrer Basisgehalte in diesem Zeitraum konservativ. Das Verhalten der Silikatgehalte, mit beginnendem Niederschlag am 3.8., ist vergleichbar zum Starkregenereignis am 19.7. Es kommt zu kurzfristigen, signifikanten Verdünnungserscheinungen mit raschem Abfall der Silikatgehalte in den Teilräumen Wälder und Hähnen. Interessant erscheint, daß deutliche Konzentrationsabnahmen in den Bereich erhöhter Niederschlagsintensität fallen, während in Zeiten mit leichten Niederschlagsintensitäten, aber einer im Verhältnis größeren Niederschlagsmenge, nur geringfügige Konzentrationsabnahmen zu verzeichnen sind. Es kann daher vermutet werden, daß nach längeren Trockenzeiten ein relativ enger Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Abflußanteil der Sättigungsflächen besteht, der durch die jeweiligen Infiltrationsraten der Böden bestimmt wird.

Mit verstärkt einsetzendem Niederschlag am 5.8. zeigt sich nun ein anderes Verhalten der Silikate: Trotz höherer Niederschlagsintensitäten und mehr gefallenem Niederschlag sind die Verdünnungserscheinungen geringer als zu Beginn der Regenperiode am 3.8. Zwar sind in allen Teilräumen Verdünnungserscheinungen nachweisbar, die Amplitude der Konzentrationsänderung aber ist um bis zu 50% kleiner. Desweiteren zeigt sich, daß die absoluten Konzentrationsminimas erst 2-3 Stunden nach höchster Niederschlagsintensität erreicht werden. Vermutlich sind nach längeren Trockenphasen die oberen Bodenschichten ausgetrocknet, einsetzender Niederschlag löst Lockermaterialien, Bypässe werden verschlämmt und bis sich Matrixfluß einstellt, müssen Bodenkrusten aufgefeuchtet und Bodenluft verdrängt werden. Nach Vorregenereignissen haben sich bereits bevorzugte Fließwege ausgebildet, die hydraulische Leitfähigkeit der Böden ist aufgrund der Vorsättigung größer, so daß mehr Niederschlagswasser infiltrieren kann.

7.3.4 Die Reaktion der Kaliumgehalte im Zeitraum des Langzeitregens

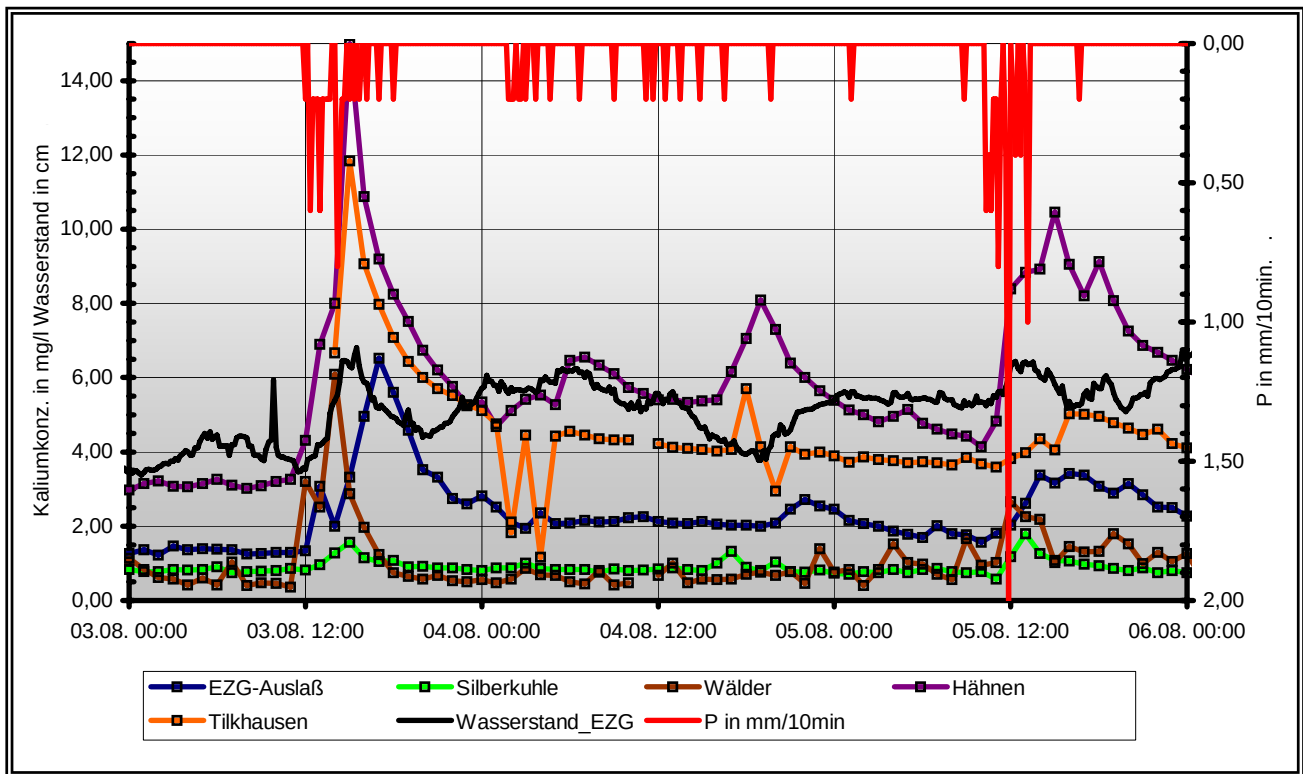


Abb.: Kaliumkonzentrationen im Zeitraum 3.8. – 6.8.

In Abbildung 7.15 sind die Kaliumkonzentrationen der Abflüsse der Teilräume und des EZG-Auslasses zu sehen: Auf der linken Größenachse sind die Kaliumgehalte in mg/l und der Wasserstand am EZG-Auslaß, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensitäten in mm/10 min., beziffert.

Kalium, dessen Herkunftsraum die oberflächennahen Bodenschichten sind, zeigt deutliche Konzentrationsanreicherungen im Abfluß. Mit Ausnahme des Teilraumes Silberkuhle kommt es in allen anderen Teilgebieten zu Beginn der Niederschlagsperiode (3.8. 12:00 Uhr) zu einer starken Konzentrationszunahme der Kaliumgehalte. Schon zu Beginn des Niederschlages steigen die Konzentrationen im Abfluß an und erreichen innerhalb 1- 2 Stunden nach höchster Niederschlagsintensität ihre größten Gehalte im Abfluß. Diese kurzfristige Reaktion deutet auf schnelle Abflußbildung im Bereich der oberflächennahen Bodenschichten.

Einschränkend muß jedoch gesagt werden, daß durch Abwassereinleitungen (siehe 7.3.2 Leitfähigkeiten) in den Teilräumen Hähnen und Tilkhausen Kalium, zumindest zeitweise, anthropogen dem Gewässer zugeführt wird.

Am EZG-Auslaß zeigt sich ein erster Kaliumpeak schon während des Niederschlages, die maximalen Kaliumgehalte werden aber erst 2 Stunden später erreicht. Während hier der erste kleinere Anstieg auf den unmittelbaren Zufluß der, dem Unterlauf der Brachtpe angrenzenden, Gewässerrandstreifen, sowie der beteiligten Sättigungsflächen, zugeordnet werden kann, scheint sich der größere Anstieg der Kaliumgehalte aus den Zuflüssen der Teilräume zusammenzusetzen.

Im weiteren zeitlichen Verlauf zeigt sich in den Abendstunden des 4.8.2001 ein deutlicher Kaliumgehaltsanstieg im Teilraum Hähnen, der mit dem Anstieg der Leitfähigkeit (siehe St. 88) zusammenfällt. Diese Zunahme, die sich 2 Stunden später auch am EZG-Auslaß andeutet, scheint niederschlagsunabhängig anthropogen beeinflusst zu sein.

Mit wieder verstärkt einsetzendem Regen am 5.8 zeigt sich ein differenziertes Gebietsverhalten: Trotz höherer Niederschlagsintensitäten und mehr gefallenem Niederschlag ist der Anstieg der Kaliumgehalte geringer und zeitlich verzögert. Während am 3.8. die Konzentrationszunahmen kurzfristig anstiegen und danach ebenso schnell wieder abfielen, zeigt sich am 5.8 eine verhaltenere Reaktion. Mit Ausnahme der Teilräume Wälder und Silberkuhle werden die maximalen Kaliumgehalte im Abfluß erst nach 3-4 Stunden erreicht, die Konzentrationsanreicherungen fallen (mit Ausnahme des Teilraumes Silberkuhle) geringer aus:

Tabelle 7.2: multiplikative Kaliumanreicherung im Vergleich Vorereignisgehalt zu Ereignisgehalt

Teilraum:	1.Niederschlagsereignis 3.8.2001 Kaliumanreicherung im Vergleich zum Basisgehalt	2. Niederschlagsereignis 5.8.2001 Kaliumanreicherung im Vergleich zum Basisgehalt
Wälder	* Faktor 12	* Faktor 2,5
Hähnen	* Faktor 5	* Faktor 2,5
Tilkhausen	* Faktor 3	* Faktor 1,4
Silberkuhle	* Faktor 2	* Faktor 2,5
EZG-Auslaß	* Faktor 2	* Faktor 1,5

Es zeigt sich allgemein, daß der Niederschlag am 3.8. nach einwöchiger Trockenzeit zu stärkeren Kaliumanreicherungen im Abfluß führt als am 5.8.

Diese unterschiedlichen Gebietsreaktionen können mehrere Gründe haben:

- A. Da die Kaliumfixierung im Oberboden nur von untergeordneter Bedeutung ist (Scheffer/Schachtschabel,1999), können Auswaschungseffekte dazu geführt haben, daß während des Regenereignisses am 5.8. nur noch geringere Gehalte an mobilem Kalium in den beteiligten Bodenschichten verfügbar waren. Dagegen könnte aber sprechen, daß sich die Kaliumgehalte des Basisabflusses im Zeitraum zwischen 3.8. und 5.8. nicht wesentlich reduziert haben.
- B. Im Vergleich zum Ereignis am 3.8., zeigt sich am 5.8. ein allgemein unterschiedliches Abflußverhalten. Ereigniswasser infiltriert nach bereits erfolgter Aufweitung der Böden verstärkt, der Anteil an direktabfließendem Ereigniswasser ist trotz höherer Niederschlagsmengen und –intensitäten geringer.

7.3.5

Das Verhalten der übrigen Hauptionen

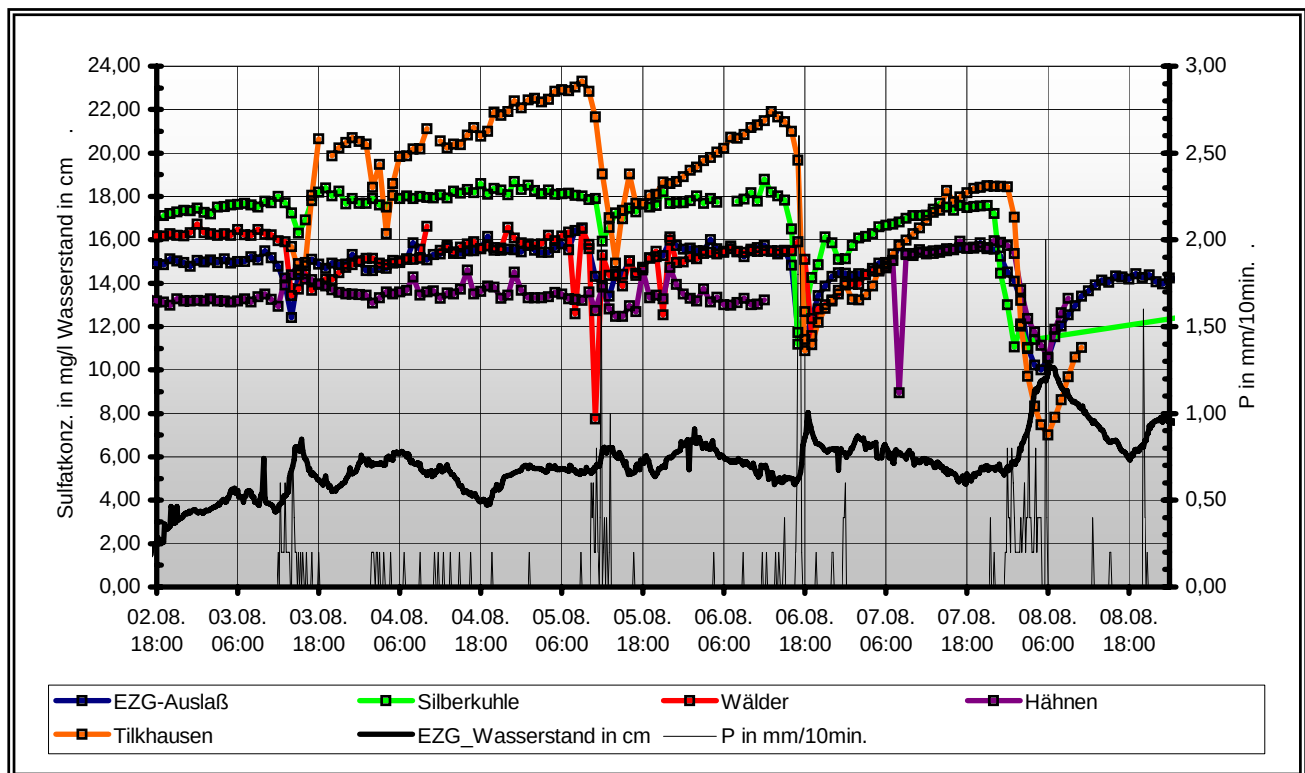


Abb.7.16 : Sulfatkonzentration im Zeitraum 2.8. bis 8.8.

Sulfat (SO_4^{2-}): Ein interessantes Verhalten, insbesondere im Teilraum Tilkhausen, zeigt der geogene Tracer Sulfat. Im Gegensatz zu den übrigen Tracern zeigen sich hier auch nach Vorregenereignissen Verdünnungserscheinungen (besonders in den Zeiträumen 5.8 12:00 Uhr und 6.8 18:00 Uhr), die in ihrem Ausmaß größer sind, als die zu Beginn des Langzeitregens am 3.8.. Gerade im Teilraum Tilkhausen kommt es zu abrupten Sulfatabnahmen und im Anschluß zu annähernd linear verlaufenden Konzentrationszunahmen.

Auch im Teilraum Silberkuhle, pedologisch ähnlich dem Teilraum Tilkhausen, zeigen sich deutliche Konzentrationsabnahmen (besonders im Bereich des Niederschlages am 6.8.). Die höchsten Sulfatgehalte stammen aus den Quellaustritten der Stollengänge, in den Bereichen der Helokrenen der Anmoorgleye sind die Sulfatgehalte vernachlässigbar. Da alle übrigen Tracer im Teilraum Silberkuhle auf nur geringe Beiträge an Direktabfluß schließen lassen, zeigt sich hier ein Indiz für die Vermischung von Basisabfluß mit ionenarmen Ereigniswasser im Bereich der hydrothermalen Gänge. Hydrologisch deutet dies auf Returnflow, also Ereigniswasser, welches im Bereich der Hochlagen entlang von bergbaulichen Grubengängen schnell in die Stollensysteme perkolierte und an den Mundlöchern wieder austritt. Die spontanen Sulfatreaktionen zeigen, daß das sonst gedämpft wirkende Verhalten in Bezug auf die übrigen Hauptionen nicht in größerem Umfang durch die Retentionswirkung der Teiche begründet ist.

Der Teilraum Wälder zeigt ebenfalls eine stärkere Verdünnung am 5.8 als zu Beginn des Niederschlages am 3.8.. Im Gegensatz dazu steht der Teilraum Hähnen: Hier kommt es am 3.8.

und 5.8. zu Konzentrationsanreicherungen und erst im Bereich des Regens am 8.8. (Niederschlag mit allgemein höherer Intensität) zu Verdünnungserscheinungen.

Magnesium (Mg^{2+}): Die Magnesiumkonzentrationen verhalten sich im zweiten Untersuchungszeitraum ähnlich denen der Silikatkonzentrationen. Es kommt zu starken Verdünnungserscheinungen zu Beginn des Langzeitregens und zu geringen Abnahmen im Bereich des Niederschlages am 5.8.. Ausnahme ist der Teilraum Wälder, indem bei den ohnehin geringsten Magnesiumgehalten (ca. 3mg/l) innerhalb des Gesamtgebietes nur minimale Verdünnungserscheinungen auftreten. Die höchsten Magnesiumgehalte treten im Teilraum Silberkuhle auf, eine Konzentrationsabnahme von 9 mg/l auf 5,5 mg/l erfolgt am 6.8. um 18:00 Uhr bei einer Niederschlagsintensität von 2,5 mm/10min.

Chlorid (Cl^-): Bei den Chloridgehalten kommt es während der Niederschläge am 3.8., 5.8. und 6.8. in den Teilräumen Hähnen und Tilkhausen zu Konzentrationsabnahmen, die mit ca. 1-stündiger Verzögerung den höchsten Niederschlagsintensitäten folgen. Im Teilraum Tilkhausen zeigt sich wiederum eine ständige Abnahme der Basisgehalte. Im Teilraum Silberkuhle kommt es nur zu minimalen Verdünnungserscheinungen, bei ohnehin geringen Basisgehalten um die 4mg/l.

Besonders verhält sich der Teilraum Wälder: Hier kommt es bei Basisgehalten im Bereich von 4,5 bis 6mg/l zu Konzentrationsanreicherungen, mit leichten Zunahmen am 3.8. und 5.8. im Bereich von 1,5 mg/l und am 6.8. um 18:00 Uhr mit zweistündiger Verzögerung zu einer Chloridanreicherung von über 3 mg/l. Chlorid kann in diesem Teilraum nicht durch Düngung oder Streusalzeinsatz bedingt sein, sondern stammt eher aus geogenen Bereichen mit hohen Tonmineralgehalten, was auf tiefere Bodenschichten schließen läßt. Die Konzentrationsanreicherung von Chlorid kann hier durch ein verstärktes Ausdrücken von Basisabfluß begründet sein, ob diese Verhalten allerdings aus auf den Hochlagen perkolierem Ereigniswasser oder aus raschen Grundwasseränderungen im Bereich der Sättigungsflächen resultiert kann nicht beantwortet werden.

Calcium (Ca^{2+}): Der Verlauf der Calciumgehalte zeigt unterschiedliche Gebietsreaktionen auf. Während in den Teilräumen Silberkuhle und Wälder nur recht geringe Verdünnungserscheinungen sichtbar wurden, aber ein abnehmender Trend der Basisgehalte sichtbar wurde, verhält sich der Teilraum Hähnen indifferent. Zu Beginn der Niederschlagsperiode am 3.8. zeigt sich eine Konzentrationsabnahme, die mit dem Zeitpunkt höchster Niederschlagsintensität zusammenfällt, danach zeigen sich allerdings Konzentrationsanreicherungen bei den folgenden stärkeren Niederschlägen am 5.8 und 6.8. Der Teilraum Tilkhausen reagiert auf das Niederschlagsereignis am 3.8. mit einer Konzentrationszunahme von 19mg/l auf 33 mg/l, was eventuell auf zufließendes Sickerwasser aus dem Bereich der Erdaufschüttungen im Siedlungsbereich zurückgeführt werden kann. Auf anschließende Regenereignisse reagiert der Teilraum mit Konzentrationsabnahmen.

Nitrat (NO^{3+}): Die Nitratgehalte verhalten sich indifferent innerhalb der einzelnen Teilräume:
Im Bereich Tilkhausen kommt es zu Konzentrationsabnahmen während Niederschlägen und innerhalb der niederschlagsarmen Phasen zeigt sich eine ständige Abnahme der Basisnitratgehalte. Es zeigen sich somit Auswaschungseffekte innerhalb der Stauzonenbereiche der, auf Pseudogley gelegenen, Wiesenstandorten, die den Hauptumsatzraum der Abflußbildung in diesem Teilraum bilden.

Die Teilräume Hähnen und Wälder reagieren mit Nitratanreicherungen im Abfluß; wie beim Kaliumverhalten, deutet dies auf erhöhte Umsätze im Bereich des Oberbodens und der darunterliegenden Bodenhorizonte. Anthropogen beeinflusst zeigt sich eine abnorme Nitratanreicherung im niederschlagsarmen Zeitraum (4.8. 18:00Uhr) im Teilraum Hähnen. Hier kommt es zu einem plötzlichen Nitratanstieg von 13 mg/l auf 55 mg/l, ohne Niederschlagshintergrund. Ich vermute, daß im Betrieb Hähnen in dieser Zeit die Stallungen gespült wurden und Abwasser durch die Einleitung ins Gerinne gelangen konnte. Geringste Basisnitratgehalte (2 mg/l) zeigen sich im Teilraum Silberkuhle, es kommt auch hier zu leichten Konzentrationsanreicherungen.

7.3.6 Vergleich der prozentualen Direktabflüsse

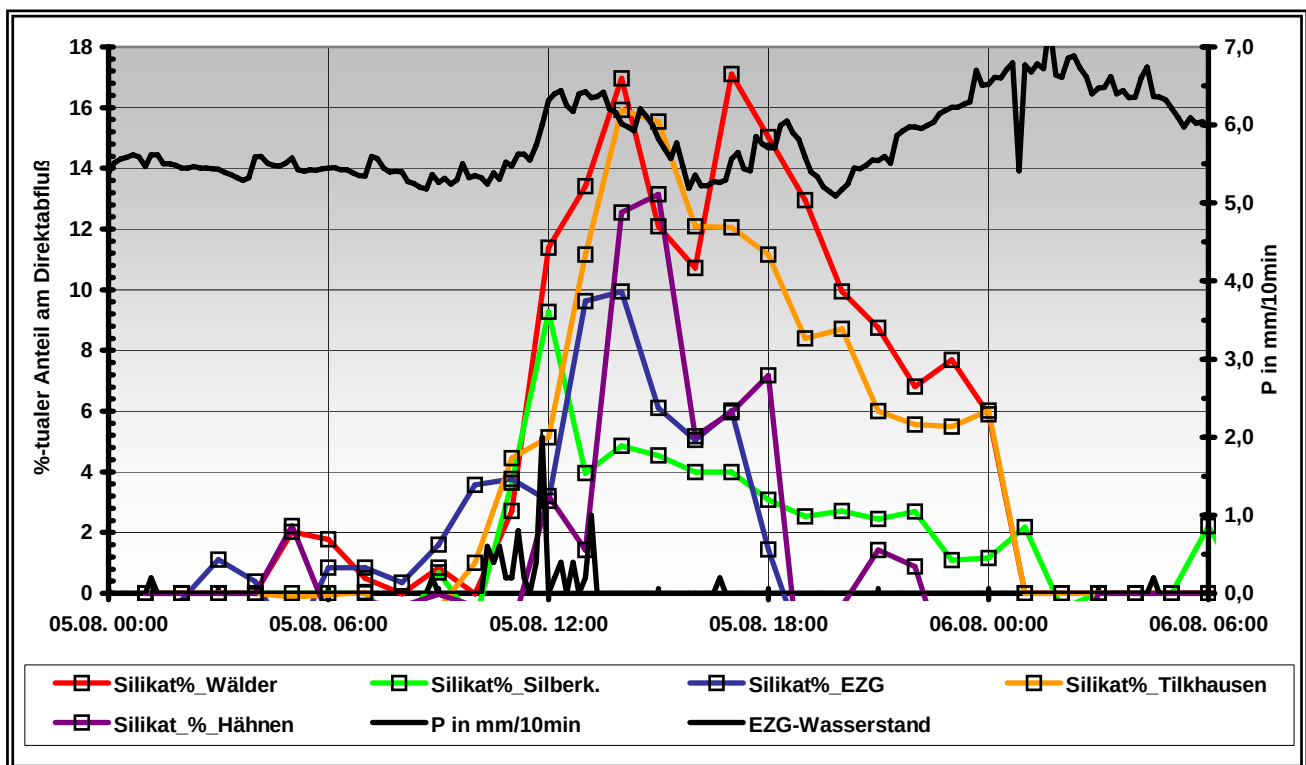


Abb.7.17: prozentuale Direktabflüsse während des Niederschlages am 5.8. auf Silikatbasis

In Abbildung 7.17 sind die prozentualen Direktabflüsse während des Niederschlages am 5.8 zu sehen. Auf der linken Größenachse sind die Direktabflußanteile in Prozent, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensitäten in mm/10min und der Wasserstand am EZG-Auslaß in cm, aufgetragen. Die Berechnung der Direktabflüsse erfolgte über eine Zwei-Komponententrennung auf Silikatbasis. Die hier angegebenen Anteile beruhen auf einer einstündigen Probennahme, so daß im Gegensatz zur Beprobung des Starkregenereignisses vom 19.7 eine gute Auflösung zugrunde liegt.

Der zweite Untersuchungszeitraum wurde eingeleitet durch das Niederschlagsereignis am 3.8.. Hier kam es, trotz einer Niederschlagsmenge von nur 8 mm und einer maximalen Niederschlagsintensität von 1 mm/10min, zu einer vergleichbaren Reaktion wie beim Starkregenereignis des 19.7.: Zum Zeitpunkt höchster Niederschlagsintensität erreichten die Teilräume Wälder, Hähnen und mit einstündiger Verzögerung der Teilraum Tilkhausen Direktabflußanteile im Bereich von 35 %. Dies führte dann wiederum mit einstündiger Verzögerung zu einem Direktabflußanteil von 25% am EZG-Auslaß. Die dortige Abnahme des direkt beitragenden Abflußanteiles ist auf die nur geringen Direktabflußanteile aus dem Teilraum Silberkuhle zurückzuführen. Hier lag der maximale Anteil von unmittelbar eingetragennem Ereigniswasser bei 10%.

Der in Abbildung 7.17 dargestellte Zeitraum, während des Niederschlages am 5.8., zeigt nun geringere Direktabflußanteile trotz höherer Niederschlagsintensitäten und Mengen:

Strukturell dominieren zwar wieder die Teilräume Wälder, Tilkhausen und Hähnen, aber die Anteile der Direktabflüsse bewegen sich nun in einem Bereich zwischen 13% und 17%. Der Teilraum Wälder reagiert wiederum mit spontaner Gebietsantwort, danach fallen die Direktabflußanteile auf ca. 10 % ab, bevor ein leichter Nachregen (0,2 mm !!) den Anteil an Ereigniswasser wieder ansteigen läßt. Hier zeigt sich also nochmals, daß das eigentliche Niederschlagsereignis schon zu Beginn zu einer vollständigen Aufsättigung der Böden im Bereich des Bachlaufes geführt hat, die Wasseraufnahmekapazität erschöpft ist und auch kleine Niederschlagsmengen zu Oberflächenabfluß in diesen Bereichen führen.

Ein ähnliches, aber nicht so ausgeprägtes, Verhalten zeigt auch der Teilraum Hähnen, bei dem es ebenfalls zu einem Ansteigen der Direktabflußanteile aufgrund des Nachregens kommt.

Die Reaktion des EZG_Auslasses zeigt ebenfalls ein nochmaliges Ansteigen der direktbeitragenden Abflußanteile aufgrund des Nachregens, was aber primär auf die Abflüsse aus den Teilräumen Wälder und Hähnen zurückgeführt werden kann.

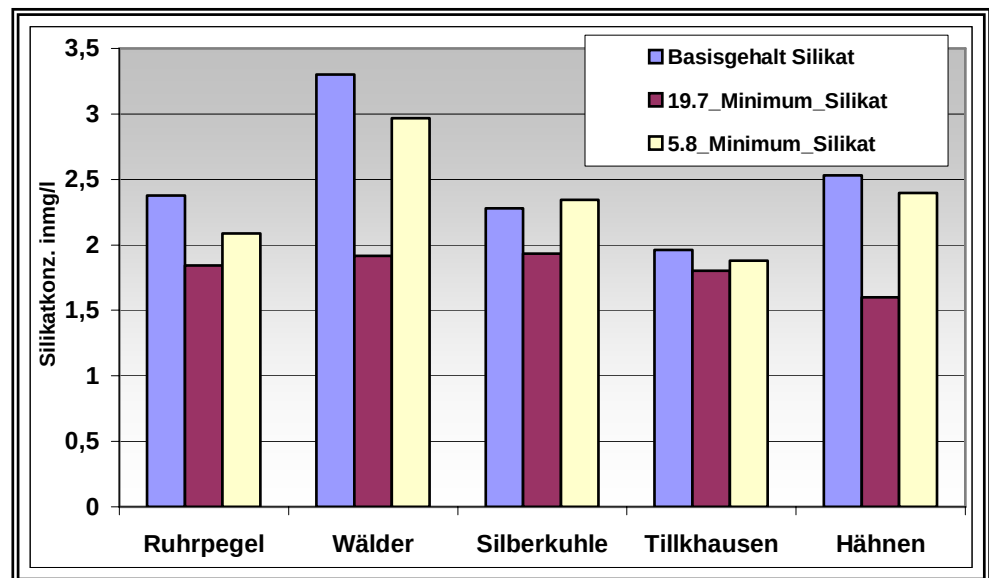
Im Bereich Tilkhausen kommt es ebenfalls zu einem schnellen Ansteigen der Direktabflußanteile mit maximalen Anteilen von 16%, interessant erscheint hier das stufenförmig abfallende Gangliniensegment. Eine ähnliche Form findet sich bei der Betrachtung des Niederschlagsereignisses wieder, auch hier ein Indiz für die erschöpfte Wasseraufnahmekapazität der Stauzonengebiete der Pseudogleye.

Der Teilraum Silberkuhle zeigt eine spontane Anstiegsreaktion zu Beginn des Niederschlagsereignis mit Maximalanteilen von 9% Direktabfluß, anschließend folgt ein recht kontinuierliches Abfallen der Ganglinie, bis nach 14 h wieder Basisabfluß dominiert.

Im Bereich der Teichanlagen gibt es eine Überleitung eines Entwässerungsgrabens aus dem Nasswiesenbereich des Teilraumes Tilkhausen, der direkt in den Bachlauf des Teilraumes Silberkuhle einleitet. Es besteht die Möglichkeit, daß dieser Zufluß einen Beitrag zu den Direktabflußanteilen des Gebietes der Silberkuhle leistet. Doch auch mit diesem allochthonen Abflußanteil ist der Gesamtbeitrag des Direktabflusses in diesem Teilraum auf geringerem Niveau.

Zwecks besserer Vergleichbarkeit der beiden untersuchten Niederschlags-Abflussreaktionen sind in Abb.7.18 die mittleren Silikatbasisgehalte in Trockenphasen, sowie die geringsten Silikatgehalte während der Niederschlagsereignisse am 19.7 und 5.8 in Bezug auf die Teilraumanworten aufgetragen. Auf der Größenachse sind die Silikatgehalte für die drei verschiedenen hydrologischen Situationen, auf der Rechtsachse die Teilräume eingezeichnet. Sichtbar werden hier zum einen die unterschiedlichen Silikatbasisgehalte zwischen den Teilräumen, zum anderen die großen Konzentrationsabnahmen während des Starkregenereignisses im Vergleich zum Langzeitregen am 5.8.

Die höchsten Silikatgehalte und auch größten Konzentrationsabnahmen während des Starkregenereignisses zeigen sich in den nördlich der Brachtpe gelegenen Teilräumen Wälder und Hähnen. Die Teilräume Silberkuhle und



Tilkhausen, südlich der Brachtpe

Abb.7.18: Vergleich der Silikatgehalte

postiert, zeigen geringere Grundgehalte sowie geringere Verdünnungserscheinungen auf. Diese räumlichen Unterschiede scheinen auf geologischen Heterogenitäten innerhalb des Einzugsgebietes zu beruhen. Insgesamt fällt auf, daß es, mit Ausnahme des Teilraumes Tilkhausen, im übrigen Einzugsgebiet zu schnellen Silikatwiederanreicherungen kommt, gerade im Bereich Silberkuhle liegt der minimale Silikatgehalt am 5.8 sogar leicht über dem mittleren Basisgehalt. Hier liegt sicherlich die bergbauliche „Drainage“ der Gesteinsschichten zugrunde, die für insgesamt hohe Anteile an mineralreichem Abfluß aus diesem Teilraum sorgt. Auch der Teilraum Wälder hat hohe Anteile an geogenen Bestandteilen des Basisabflusses, allerdings kommt es hier durch die ausgeprägten Sättigungsflächen im Bereich des Unterlaufes zu starken Verdünnungserscheinungen, die die Gesamtantwort des Teilraumes deutlich überformen.

Nur geringe Differenzen zeigt der Teilraum Tilkhausen, was auf die allgemeine Mineralarmut der Pseudogleybereiche schließen läßt. Die Mineralanreicherung verläuft hier deutlich langsamer, der Hauptanteil des Abflusses entstammt in erster Linie aus den aufgesetzten Stauzonenbereichen.

7.3.7 Vergleich der Saugspannungen

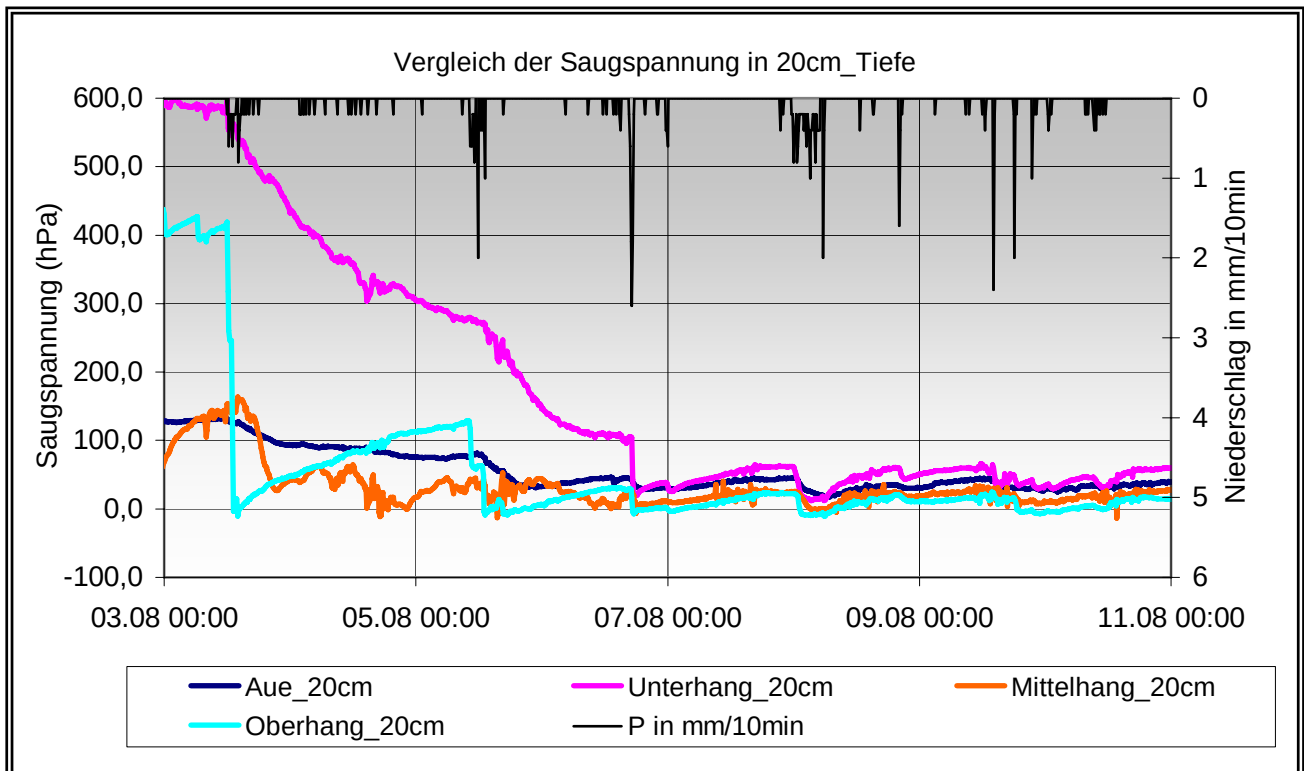


Abb.7.19: Vergleich der Saugspannungen(Messhang) in 20cm Tiefe während des Langzeitregens (3.8 bis 11.8)

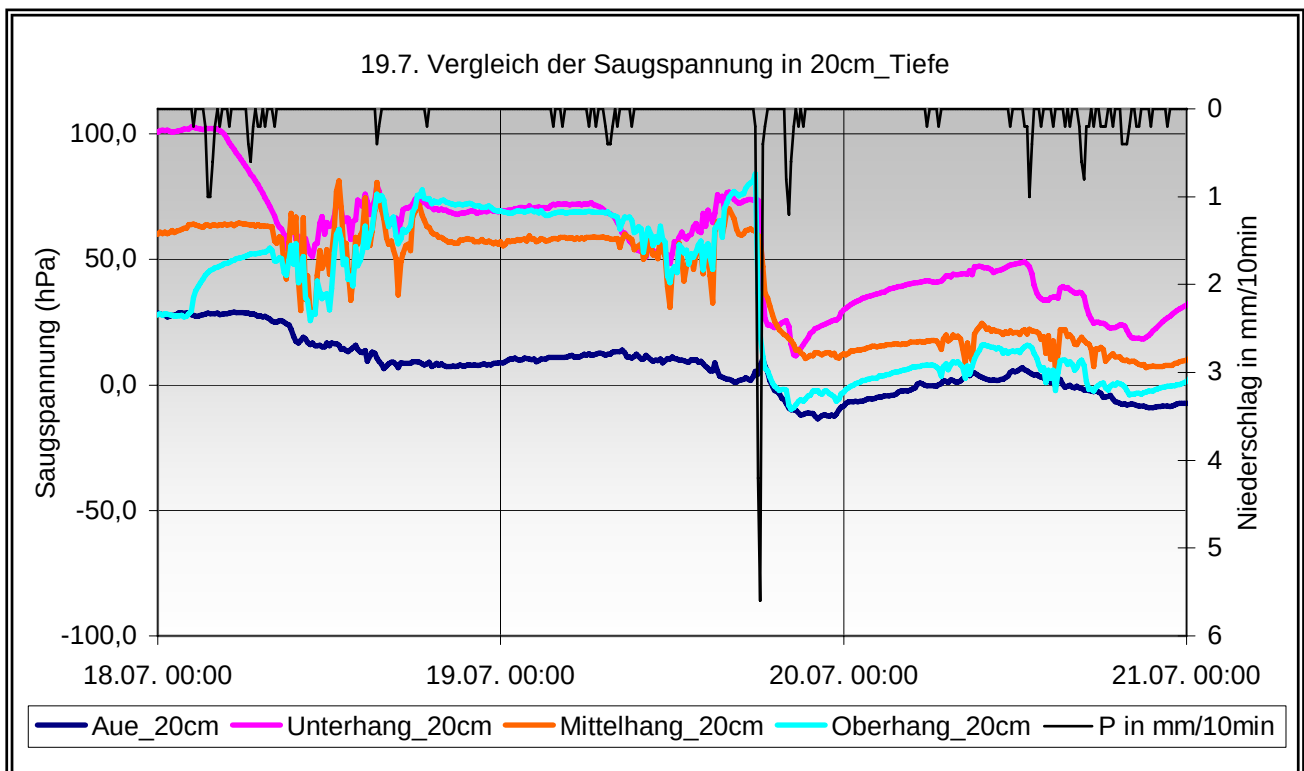


Abb.7.20: Vergleich der Saugspannungen (Messhang) in 20cm Tiefe während des Starkregens am 19.7.2001

In den Abbildungen 7.19 und 7.20 sind die Saugspannungskurven der Tensiometermessungen im Bereich des Messhanges für die untersuchten Niederschläge am 5.8., sowie am 19.7., für den Umsatzraum bis 20 cm Tiefe zu sehen. Da während des Langzeitregens nur geringe Saugspannungsänderungen in den Tiefen 50 cm, 80 cm und 120 cm auftraten, wird auf die Darstellung hier verzichtet und zum besseren Vergleich die Abbildung der Saugspannungsverläufe in 20 cm Tiefe, während des Starkregens am 19.7. aufgeführt. Auf der linken Größenachse sind die Saugspannungen in hPa, auf der rechten Größenachse die Niederschlagsintensitäten in mm/10min aufgetragen.

In Abbildung 7.19 zeigt sich, daß mit beginnendem Niederschlag am 3.8. die Reaktionen der Hangsegmente unterschiedlich sind. Auffallend ist die spontan einsetzende Aufsättigung im Bereich des Oberhanges innerhalb einer Stunde nach Niederschlagsbeginn. Die fehlerfreie Funktion der Tensiometer vorausgesetzt, zeigt sich hier eine so rasche Aufsättigung der oberen Bodenschichten (vergleichbar mit der Reaktion am 19.7.), daß hier zusätzlich zum Matrixfluß Makroporenfluß bzw. Bypass Flow für die rasch vordringende Feuchtefront verantwortlich sein müssen. Zu Makroporen zählen alle Poren, in denen die Wasserbewegung ohne Einfluß von Kapillarkräften erfolgt, was ungefähr ab 2 mm Durchmesser der Fall ist. Makroporen können durch absterbende Pflanzenwurzeln oder durch Bodenfauna (Würmer, Wühlmäuse, etc.) entstanden sein, aber gerade bei feinkörnigen Böden können diese auch durch Schrumpfung aufgrund abnehmender Bodenfeuchte bedingt sein (ZIUDEMA, P., 1985). Besonders stark ist der Makroporenabfluß in geringmächtigen, gut durchlässigen Böden steiler Hänge (PEARCE A..J. et al., 1986). In den aufgenommenen Bodenprofilen des Oberhanges sind Röhren bis in Tiefen von 70cm aufgeführt.

Im Bereich des Oberhanges kommt es also schon zu Beginn des Langzeitregens zu vollständiger Sättigung; im Zeitraum bis zum 5.8. steigt die Saugspannung auf 100 hPa und fällt mit zunehmendem Niederschlag wieder in Bereiche mit vollständiger Sättigung. Auch im Bereich des Mittelhanges kommt es mit 26 -ständiger Verzögerung ebenfalls zu vollständiger Sättigung, die sich dann ebenfalls über die gesamte Regenperiode fortpflanzt. Eine fast linear zunehmende, sukzessive Auffeuchtung der Bodenschichten bis 20 cm Tiefe zeigt sich im Bereich des Unterhanges. Hier zeigten sich im Vorfeld die größten Austrocknungserscheinungen mit Saugspannungswerten von über 600 hPa. Eine vollständige Wassersättigung wird erst drei Tage nach Niederschlagsbeginn, durch ein Regenereignis am Abend des 6.8 mit Niederschlagsintensitäten von über 2,5mm/10 min erreicht. Die Reaktion des Unterhanges zeigt, gerade im Vergleich zum Starkregen am 19.7., ein deutlich unterschiedliches Verhaltensmuster: Beim Starkregenereignis kommt es zu einem plötzlichen Niederschlagseintrag mit Niederschlagsintensitäten bis zu 6mm/10min nach einer längeren Trockenphase. Eingeschwemmtes und ausgetrocknetes Feinmaterial kann zur Bildung einer Oberflächenkruste (ZIUDEMA, P., 1985) geführt haben, sodaß die natürliche Infiltrationsrate des Oberbodens während der Trockenphase reduziert wurde und mit einsetzendem Niederschlagsbeginn die Infiltrationsrate des Bodens überschritten wurde. Das so kurzfristig oberflächlich abfließende Ereigniswasser konzentriert sich auf Mikrorinnale und kann durch Makroporen schnell in tiefere Bodenschichten gelangen. Durch den negativen Potentialgradienten zwischen Bodenmatrix und Makroporen kann nun eine schnelle Auffeuchtung entlang der Makroporen erfolgen und auch in tieferen Schichten zu einer

schnelleren Aufsättigung führen (GUTKNECHT,D. 1996b; UHLENBROOK S., LEIBUNDGUT CH.,1997).

Bei geringeren Niederschlagsintensitäten, wie im Zeitraum des Langzeitregens, kommt es zu keinem Oberflächenabfluß im Bereich der Hänge, so daß die Infiltration über die Bodenmatrix entlang des Potentialgradienten erfolgt und sich theoretisch eine Feuchtefront (GREEN/AMPT,1911) in Abhängigkeit von hydraulischer Leitfähigkeit, der auffüllbaren Porosität und der Saugspannung an der Feuchtefront ausbreitet (DYCK S., PESCHKE G., 1995). Dieser langsam fortschreitenden Aufsättigung entspricht die Saugspannungskurve im Bereich des Unterhanges.

Im Bereich der Aue zeigt sich ebenfalls eine langsam fortschreitende Auffeuchtung , allerdings werden vollständig gesättigte Verhältnisse laut Graphik nicht erreicht, was auch die geringeren Direktabflüsse im Bereich des Langzeitregens erklärt.

7.38 Zusammenhang zwischen Teilraum- und Gesamtgebietsreaktion

Das Verhalten der Ionengehalte am EZG_Auslass zeigt sich insgesamt neutral und wird allgemein durch die dominanten Reaktionen der Teilräume bedingt. Multipliziert man die, während der Abflußstichtagsmessung am 13.8.2001 aufgenommenen, Abflussanteile der Teilräume am Gesamtabfluß mit den fortlaufenden Silikatgehalten der jeweiligen Teilräume, folgt die Summation der mit den Abflußanteilen multiplizierten Silikatkonzentrationen der Teilräume den Silikatgehalten am EZG-Auslaß mit guter Übereinstimmung. In Abbildung 7.21 wird deutlich, daß es nach Vereinigung aller Teilraumgerinne auf den letzten ca. 600 m zu keiner signifikanten Überformung der Gebietsantwort mehr kommt. Der Abbildung zugrunde liegt die fortlaufende Multiplikation der Silikatgehalte der einzelnen Teilräume mit den am 13.8 aufgenommenen prozentualen Abflussanteilen der einzelnen Teilgebiete. Diese auf den Abfluß bezogenen Mengenangaben der einzelnen Teilräume wurden summiert und mit dem Abfluß_Silikatgehalt am EZG-Auslaß verglichen, was auch in Bezug auf die übrigen Hauptionen zu guten Übereinstimmungen führte.

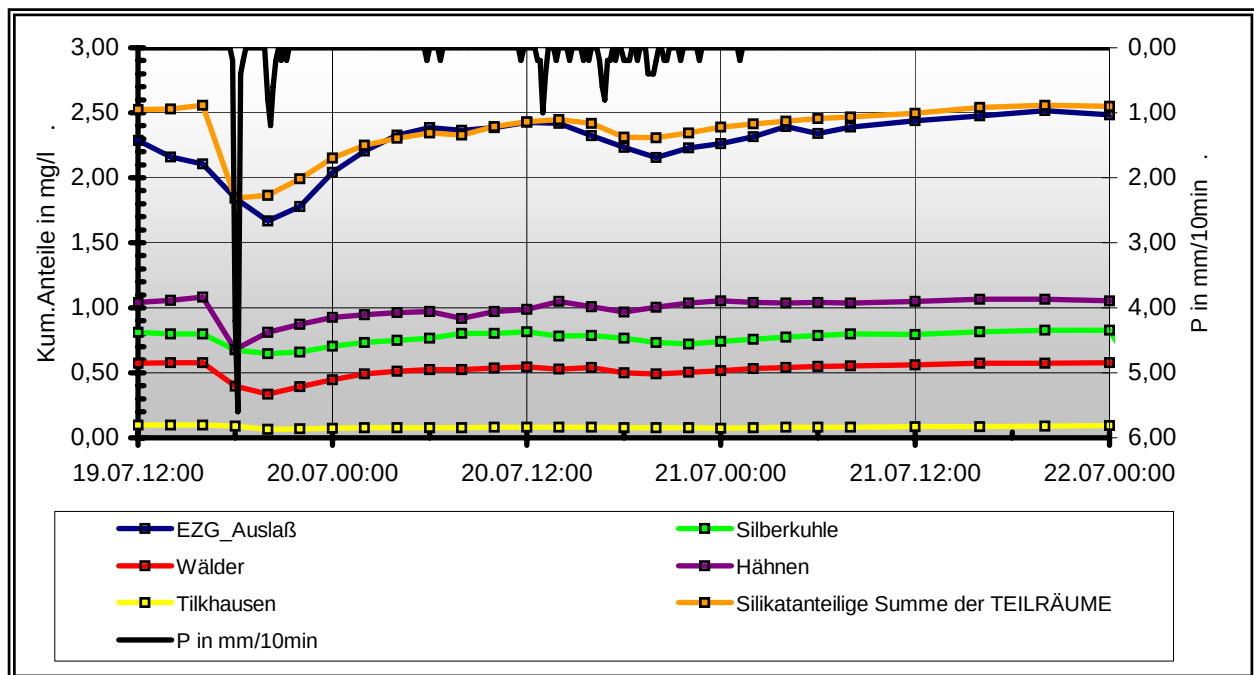


Abb.7.21: Vergleich der kumulierten Silikatgehalte mit der Gesamtantwort des EZG für den Zeitraum zwischen 19.7.2001 und 22.7.2001

Insgesamt kommt es zu einer größeren berechneten Silikatmenge am EZG-Auslaß als real nachgewiesen. Dies kann daran liegen, daß die direktabflußbeitragenden Sättigungsflächen auf den letzten 600m zu einer weiteren Verdünnung beitragen.

Allgemein kann festgestellt werden, daß sich die Abflußmengen mit einsetzendem Niederschlag proportional erhöhen, die Abflußanteile der Teilräume, die eng mit den Flächenanteilen korreliert sind ($R^2 = 0,97$), aber weitgehend gleich bleiben.

7.39 Fazit

Das zweite untersuchte advektiv entstandene Niederschlagsereignis im Zeitraum zwischen 3.8.2001 und 11.8.2001 hat gezeigt, daß der Umfang der direktbeitragenden Abflußkomponenten insbesondere von der sättigungsabhängigen Veränderung der Wasserleitfähigkeit der beteiligten Böden abhängt. Während zu Beginn der Niederschlagsperiode, nach einwöchiger Trocken- und Hitzeperiode, geringe Niederschlagsmengen und –intensitäten ausreichten, um Direktabflußanteile im Bereich um 35% zu generieren, kam es bei dem untersuchten Niederschlag am 5.8. trotz erhöhter Regenmengen und –intensitäten nur noch zu Direktabflußanteilen <18%. Hier wird deutlich, daß die Prozesse des Bodenwasserhaushaltes entscheidend von ereignisabhängigen und -unabhängigen Faktoren geprägt werden und Infiltrationsraten sowie hydraulische Leitfähigkeiten nicht konstant sind, sondern je nach Begleitumständen unterschiedlich Werte annehmen können, was sich gerade auf die Trennung zwischen direkt und indirekt abfließenden Ereigniswasser auswirkt. Wie bei den Abflußbildungsprozessen erweist es sich schwierig Einzelprozesse separiert zu betrachten, da es zu einer Vielzahl an Überlagerungen kommen kann. In Tabelle 7.2 sind wichtige Faktoren, die sich auf Infiltrationsraten und Leitfähigkeiten auswirken können, benannt:

Tabelle 7.3: Infiltrationsraten und hydraulische Leitfähigkeiten bestimmende Faktoren

Ereignisabhängige Faktoren (Niederschlag, Böden, Vegetation)	Ereignisunabhängige Faktoren (Böden und Topographie)
- Anfangswassergehalt - Anfangswasserspannung - Niederschlagsintensität - Zeitl. Abfolge der Niederschläge - Energie der Regentropfen - Verkrustung und Verschlammung - Quellen und Schrumpfen - Bodenluft(Einschlüsse und Strömung - Hysterese der Bodenkennlinien - Bodennutzung - Bewuchs und Wachstumsstadium - Etc.	- Bodentextur - Bodenstruktur - Porengrößenverteilung - Gesamtporenvolumen - Mächtigkeit der Humusaufgabe - Humusgehalt - Schichtung des Bodens - Verdichtungsintensität - Wasserspannungskurve - Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit - Hangneigung - Etc.

8 **Schlußfolgerungen**

Ziel dieser Diplomarbeit war es mittels experimenteller Untersuchungen auf die Abflußbildungsprozesse im Quelleinzugsgebiet der Brachtpe zu schließen. Dazu wurden die Wasserstände der Teileinzugsgebiete sowie des Gesamtgebietes im Untersuchungszeitraum kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich wurden am Gesamtgebietsauslaß und an den Teilraumausläßen in hoher zeitlicher Auflösung Wasserproben entnommen und auf ihrer Gehalte an natürlichen Tracern untersucht. Durch Feldbegehungen und die hydrochemische Aufnahme und Beschreibung der Gerinnelängsschnitte wurde versucht auf Herkunftsräume zu schließen und Heterogenitäten innerhalb des Einzugsgebietes aufzuzeigen. Dabei hat sich gezeigt, daß erst durch die Synthese aller Ergebnisse detailliertere Aussagen über das Abflußbildungsgeschehen möglich waren. Wie komplex hierbei die Überlagerung verschiedener Einzelprozesse sein kann, hat sich gerade bei der Interpretation der natürlichen Tracergehalte gezeigt. Neben der starken Beeinflussung durch hochmineralisierte Abwassereinleitungen, zeigte es sich, daß gerade menschliche Eingriffe in das Abflußgeschehen zu wesentlichen Veränderungen der natürlichen Abflußreaktionen und hydrochemischen Zusammensetzungen der Wasserinhaltsstoffe geführt haben. Hierzu zählen insbesondere die unterschiedlichen Landnutzungen, die bergbauliche Überformung des Teilraumes Silberkuhle, die Hangdrainagen und Entwässerungsgräben sowie die Teichanlagen.

Desweiteren hat sich gezeigt, daß gerade die Pedologie des Einzugsgebietes einen bedeutenden Einfluß auf Umfang und Zusammensetzung der Abflüsse hat. Neben der wichtigen Bedeutung der vergleyten Bodentypen für Quellhorizonte und direktbeitragende Abflußkomponenten, konnte festgestellt werden, daß gerade Faktoren wie Bodenvorfeuchte, sättigungsabhängige Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeiten, Verschlämmung und Verkrustung der oberen Bodenschichten zu signifikanten Veränderungen der Abflußzusammensetzung führen können.

Als Schlußfolgerung der vorliegenden Arbeit ergibt sich, daß schnelle Abflußkomponenten den Verlauf einer Hochwasserwelle im Einzugsgebiet der Brachtpe dominieren. Die Gebietsantwort auf ein Niederschlagsereignis erfolgt im gesamten Einzugsgebiet mit nur geringer Zeitverzögerung.

Aus den Ergebnissen der Zweikomponententrennung konnte ein hoher Anteil an Ereigniswasser von bis zu 40% in den Hochwasserabflüssen nachgewiesen werden, der hauptsächlich im Bereich von, den Bachläufen angrenzenden, Sättigungsflächen und versiegelten Flächen (Straßen, Siedlungsbereiche) generiert wurden. Geländebeobachtungen zeigten, daß Sättigungsflächen nicht nur im Bereich hoher Grundwasserstände entlang der Talauen, sondern auch pedologisch bedingt im Hangbereich zu finden sind. Hierzu zählen zum einen die, sich auf Anmoor- und Stagnogley befindlichen, waldbestandenen Quellhorizonte, aber auch auf Pseudogleyen gelegene Nasswiesenbereiche. Im Untersuchungszeitraum ließen sie auf großen Bereichen eine weitestgehende Sättigung bis zur Geländeoberfläche erkennen. Desweiteren konnte während der Feldbegehungen beobachtet werden, daß es in Bereichen großer Hangneigung auch auf wiesenbewachsenen Braunerden zu oberflächlichen Vernässung kam, die durch hohe Ton- und Lehmgehalte begünstigt wurden.

Die Auswertung der hydrochemischen Zusammensetzung der Hochwasserabflüsse zeigte starke Anreicherungen an Tracern aus oberflächennahen Bodenschichten, insbesondere der Kalium- und Nitratfraktionen. Die schnelle Anreicherung dieser Ionen im Abfluß deutet auf oberflächennah abfließendes Wasser aus dem Bereich der Sättigungsflächen hin, allerdings scheint nicht ausgeschlossen, daß auch schneller Interflow und Returnflow aus den angrenzenden Hangbereichen beteiligt sein kann.

In diese Richtung deutet auch die Auswertung der Tensiometerdaten im Bereich des Messhanges: Die schnelle Aufsättigung der oberen Bodenschichten gerade im Bereich des Oberhanges weist auf laterale Fließprozesse hin, bei denen schneller Interflow, sowie in Bereichen geringerer hydraulischer Leitfähigkeiten, Returnflow generiert werden kann. Zudem konnte anhand der Saugspannungsveränderungen beobachtet werden, daß es bei hohen Niederschlagsintensitäten sowie nach längeren Trockenphasen zu schnellen Aufweichungen in tiefer gelegenen Bodenhorizonten kam. Eine Erklärung hierfür wäre, daß aufgrund geringer Infiltrationsraten zu Beginn eines Niederschlages sich Oberflächenabfluß entlang von Mikrorinnsalen konzentriert und bevorzugt entlang von Makroporen infiltriert. In diesen kann der Abfluß turbulent lateral und vertikal erfolgen und das infiltrierende Ereigniswasser aufgrund hoher Potentialgradienten die Bodenmatrix tieferer Schichten aufweichen.

Bei der Auswertung des advektiv entstandenen Niederschlages in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraumes hat sich gezeigt, daß der Umfang der direktbeitragenden Abflußkomponenten unter anderem von der sättigungsabhängigen Veränderung der Wasserleitfähigkeit der beteiligten Böden abhängt. Nach längeren Trockenphasen reichten bereits geringe Niederschlagsmengen und – intensitäten aus, um hohe Direktabflußanteile zu generieren. Direktabflußfördernd dürften sich auch bodenspezifische Faktoren wie Verschlammung, Verkrustung sowie das Vorhandensein von Bodenluft nach längerer Trockenheit ausgewirkt haben. Im Gegensatz dazu konnte beobachtet werden, daß trotz höherer Niederschlagsmengen und – intensitäten, nach bereits erfolgten Vorereignissen, die maximalen Direktabflußanteile nur noch 15-20% erreichten. Es scheinen sich in dieser hydrologischen Situation bereits Fließwege ausgebildet zu haben, sättigende Bodenverhältnisse zu erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten geführt haben, so daß Ereigniswasser besser infiltrieren konnte. Allerdings hat sich auch gezeigt, daß höhere Niederschlagsintensitäten im Bereich größer 2,5 mm/10 min zu einem Wiederanstieg der Direktabflußanteile führen können. Anthropogene Drainageeinrichtungen im Bereich eines Skiliftes, sowie Entwässerungsgräben im Bereich der, auf Pseudogley gelegenen, Wiesenareale haben ebenfalls Einfluß auf die schnelle Gebietsreaktion.

Da der Hochwasserabfluß nicht ausschließlich durch oberflächennahe Abflußkomponenten bzw. Ereigniswasser erklärt werden kann (ca. 60 % Anteil an Basisabfluß), müssen ebenfalls schnell wirkende Abflußbildungsprozesse beteiligt sein, welche Wasser mit höheren Mineralgehalten (Vorereigniswasser) aus tieferen Boden- und Gesteinsschichten mobilisieren. Dies konnte durch rasche Grundwasseranstiege und Saugspannungsabfälle im Bereich der Auen, den erhöhten Wasserständen nach Rückgang der Direktabflußanteile, sowie durch den raschen Wiederanstieg der geogenen Tracergehalte im Abfluß gezeigt werden. Wahrscheinliche Ursachen für ein verstärktes Ausdrücken von Grundwasser sind

Druckübertragungsmechanismen. Zum einen kann vorfluterfern gefallenes Wasser (im Bereich der Hochlagen und Hangbereiche) durch Druckübertragung (Piston Flow) eine Mobilisierung von Wasser der gesättigten Zone der, an die Bachläufe angrenzenden, Sättigungsflächen bewirken. Zum anderen kann Niederschlagswasser in vorfluternahen Bereichen (Gewässerrandstreifen) eine rasche Aufsättigung bewirken und durch die auflastende Gewichtskraft Wasser in den Vorfluter ausdrücken.

Bei der Betrachtung der Teilräume konnten deutliche Differenzierungen bezüglich der Abflußherkunftsräume und Gebietsreaktionen getroffen werden. Die Abflußbildungsprozesse sind innerhalb der Teileinzugsgebiete stark von der jeweiligen Pedologie, Vegetation und anthropogenen Veränderungen beeinflusst:

Der, von Weide- und Wiesenwirtschaft dominierte, Teilraum Hähnen bildet den größten Anteil am Gesamtabfluß des EZG. Im Untersuchungszeitraum waren die Niederschlags-Abflußreaktionen spontan, was in Anbetracht mehrerer retinierender Teichanlagen, die einen beträchtlichen Anteil des Abflusses ableiteten, verwunderte. Allerdings waren diese während der Untersuchung gefüllt, so daß eingeleitetes Wasser durch Überläufe schnell wieder ins Gerinne zurückgeleitet wurde. Zusätzlich können sich die Teiche mit einem Abflußbeiwert $=1$ sogar, als „Sättigungsflächen“, abflußfördernd ausgewirkt haben.

Die intensive Nutzung des Teilraumes zeigt sich durch den hohen diffusen sowie punktuellen Nährstoffeintrag ins Gerinne. Gerade die Abwassereinleitung aus dem landwirtschaftlichen Betrieb Hähnen führte während der beobachteten Niederschlagsereignisse durch verstärkten Zufluß zu einer massiven Überformung der Hydrochemie, was sich unter anderem in Leitfähigkeitserhöhungen bis zu 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ äußerte. Im Gegensatz dazu stehen die geringen Leitfähigkeitswerte (ca. 75 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und Gehalte an geogenen Tracern oberhalb dieser Einleitung. Abflussverschärfend wirkte sich die Drainage im Bereich des Skiliftes aus, die oberflächennahe Bodenschichten entwässert, um einem zu schnellen Abschmelzen der Schneedecke im Frühjahr entgegenzuwirken.

Hähnen ist somit der am prägnantesten anthropogen geformte Teilraum des Gesamtgebietes.

Der Teilraum Tilkhausen ließ zwei unterschiedliche Abflußherkunftsräume erkennen: Der Hauptanteil des Abflusses wird oberflächennah im Bereich der, auf Pseudogley gelegenen, Nasswiesenareale, sowie in geringem Umfang im Bereich von waldbestandenen Anmoorgleyen, gebildet. Pseudogleye können in ihrem pedologischen Aufbau in durch Sperrkörper begrenzte Stauzonen untergliedert werden. Diese zeigten bei den Feldbegehungen deutliche Anzeichen potentieller Sättigungsflächen. Gerade nach dem Starkregenereignis waren Grasmatten durch Oberflächenabfluß umgeknickt, die oberen Bodenschichten noch einen Tag später auf weiten Flächen gesättigt.

Die starke Bedeutung der Stauzonenbereiche zeigte sich auch in der hydrochemischen Analyse des Abflusses. Gerade die langsamen Wiederanreicherungen bezüglich der Hauptionen ließen auf Auswaschungseffekte im Bereich der Stauzonen schließen. Desweiteren fiel der Teilraum nach drei bis vier niederschlagsfreien Tagen trocken, eine Abflußbeteiligung tieferer Grundwasserbereiche scheint daher nur geringe Bedeutung zu haben.

Entwässerungsgräben innerhalb der Wiesenflächen fördern die schnelle Abflußbildung.

Der zweite Abflußherkunftsraum liegt im Bereich der Ortschaft Tilkhausen und zeigt ein komplett anderes hydrochemisches Profil. Wie im Teilraum Hähnen deuten extrem hohe Leitfähigkeitswerte und Tracergehalte auf Abwassereinleitungen und Sickerwasserzufluß aus Erdaufschüttungen.

Nach Vereinigung der beiden Bachläufe zeigt sich am Teilraumauslaß eine Mischung zwischen dem gering mineralisiertem Abfluß der Nasswiesenbereiche und dem anthropogen überformten Zufluß aus dem Gebiet der Ortschaft.

Eine Sonderstellung innerhalb des Einzugsgebietes nimmt der Teilraum Silberkuhle ein. Dieses bewaldete Teileinzugsgebiet wurde aufgrund von Vorkommen an Bleierzen bergbaulich erschlossen, was sich auf die Abflußherkunftsräume stark auswirkt. Neben der eher untergeordnet zu sehenden Abflußbildung im Bereich von auf Anmoor- und Stagnogleyen gelegenen Quellhorizonten, wird der größte Abflußanteil durch Quellaustritte aus ehemaligen Stollengängen gebildet. Dieses Wasser ist hoch mineralisiert und zeigt bei Niederschlägen spontane Schüttungszunahmen. In der geologischen Beschreibung zeigt sich, daß die hydrothermal entstandenen Gänge vernetzt sind, so daß im Bereich der Hochlagen und Hänge, entlang von bergbaulich entstandenen Schwächzonen, schnell perkolierendes Niederschlagswasser zu Pistonflow und Returnflow Effekten führen kann. Dadurch kam es nur zu geringen Ereigniswasseranteilen in diesem Teilraum, da vermutlich eine rasche Durchmischung mit hochmineralisiertem Grundwasser erfolgte. Dennoch trägt das Gebiet aufgrund seiner Größe und seinem Abflußanteil bedeutend zum Gesamtabfluß des Einzugsgebietes bei.

Der Teilraum Wälder ist der wohl der ursprünglichste aller Teilräume und sollte aufgrund des hohen Waldanteiles (Interzeption und entlang von Makroporen schnell infiltrierendem Ereigniswasser) eine eher zurückhaltende Gebietsreaktion zeigen. Das Gegenteil ist der Fall, was auf die mit nur 7% Flächenanteil im Bereich des Unterlaufes befindlichen Sättigungsflächen zurückzuführen ist.

Die Abflußreaktion setzte unmittelbar auf die Niederschlagsereignisse ein, die Konzentrationsabnahmen der geogenen Tracer waren beträchtlich. Bei Betrachtung der Leitfähigkeiten zeigte sich nach anfänglicher starker Ionenkonzentrationsabnahme ein spontaner kurzzeitiger Wiederanstieg, der vermuten läßt, daß es durch Druckübertragung zu einer raschen Beteiligung an Vorereigniswasser kommt.

Die Reaktionen am Einzugsgebietsauslaß sind in erster Linie durch die Abflußzusammensetzungen der Teilräume bestimmt. Auch die Abflußmenge am Gebietsauslaß ergab sich innerhalb der Stichtagsbeprobung durch Addition der Teilabflüsse. Gemäß der engen Korrelation zwischen Abflußmengen und Teilraumgrößen lassen sich auch am Gebietsauslaß die spezifischen Wasserinhaltsstoffe sowie Abflußreaktionen der einzelnen Teilräume wiedererkennen. In der Reihenfolge Hähnen, Silberkuhle, Wälder und Tilkhausen wird die Zusammensetzung und Reaktion des Abflusses am Gebietsauslaß bestimmt, wobei Sättigungsflächenabfluß im Bereich des Unterlaufes zu einer leichten Verdünnung der Wasserinhaltsstoffe führt.

Abschließend soll versucht werden die Wertigkeit dieser Diplomarbeit einzuschätzen. Für mich als Autor bestand sicherlich die größte Bereicherung darin, in einem ersten Versuch theoretisches Wissen praktisch umgesetzt und Erfahrungen im Umgang mit hydrologischen Fragestellungen gesammelt zu haben. Dabei hat sich schnell gezeigt, daß eine unumstößliche Beweisführung in hydrologischer Hinsicht nicht realisierbar war, sondern in erster Linie Indizien gesammelt wurden, die auf bestimmte Vorgänge schließen lassen. Gerade in Hinblick auf die Kürze des Untersuchungszeitraumes und die fehlende Quantifizierung der Abflüsse besteht auch weiterhin großer Forschungsbedarf in diesem doch so kleinen Einzugsgebiet. Streng genommen beziehen sich die gewonnen Erkenntnisse nur auf den Zeitraum der experimentellen Feldarbeit.

Interessant wären sicherlich auch Untersuchungen im Zeitraum der Schneeschmelze, nach Füllung der Grundwasserspeicher, in Bezug auf Reaktionen und Umfang der Sättigungsflächen. Desweiteren wäre es interessant mittels künstlicher Markierversuche einen genaueren Einblick in die lateralen Fließprozesse in Hanglagen zu bekommen. Hier bietet sich der mit Tensiometern ausgestattete Messhang an.

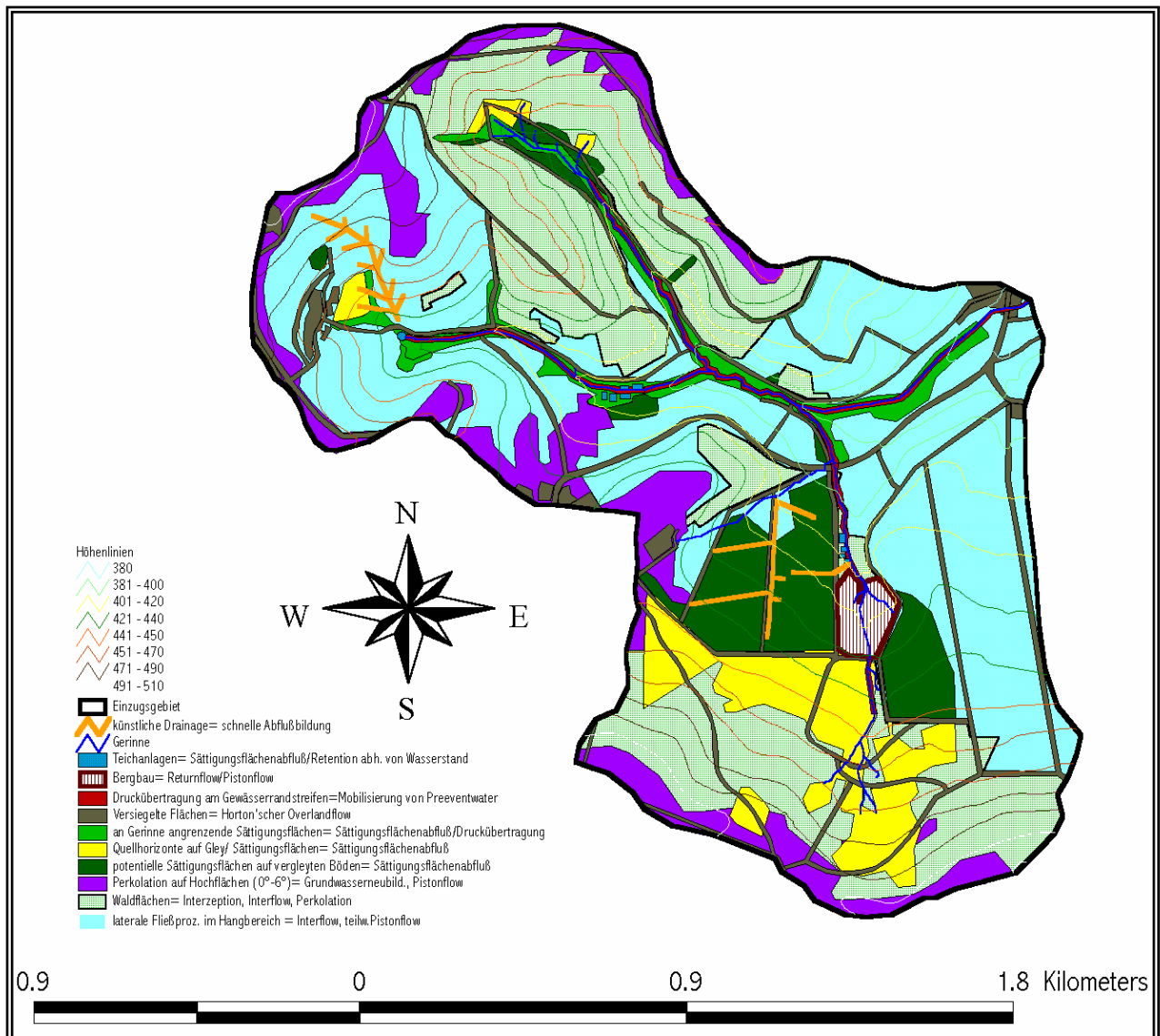
Auch die hydrothermalen Gänge im Bereich des Teilraumes Silberkuhle bieten weiteren Forschungsbedarf. Gerade durch quantitative und qualitative Schüttungsaufnahmen im Bereich der Mundlöcher, sowie der Analyse der isotopischen Zusammensetzung der Quellschüttung (speziell während und nach Niederschlagsereignissen) könnte Aufschluß über die vermuteten Piston- und Returnfloweffekte geben. Auch die Eingabe künstlicher Tracer entlang der bergbaulichen Schwächezonen im Bereich der Hochlagen könnte aufschlußreich sein. Um den Einfluß der Landnutzung auf die Abflußbildungsprozesse genauer abschätzen zu können, würde es sich anbieten, einen dem wiesenbestandenen Messhang vergleichbaren bewaldeten Hangbereich ebenfalls mit Tensiometerstationen auszustatten.

Aus ökologischer und hydrologischer (leichtere Interpretation der Hydrochemie) Sicht sollte versucht werden, die punktuellen Abwassereinleitungen einzustellen bzw. zumindest vor Einleitung in den Vorfluter biologische Klärbecken zwischenschalten.

Die Abbildung 8.1 zeigt einen graphischen Überblick über die beobachteten Herkunftsräume der Abflüsse während des Untersuchungszeitraumes. Gerade in der graphischen Darstellung erweist es sich schwierig, sich überlagernde Einzelprozesse differenziert darzustellen und räumlich zu unterteilen. Gerade im Bereich der Sättigungsflächen hat sich gezeigt, daß eine eindeutige Zuordnung nicht möglich ist, da hier einerseits mehrere Abflußbildungsprozesse möglich sind, andererseits aber auch aufgrund der zeitlichen Reaktionen differenziert werden muß. So können im Bereich der an die Bachläufe angrenzenden Sättigungsflächen auch durch Druckübertragungsmechanismen verstärkt Preevent Komponenten mobilisiert werden. Desweiteren muß innerhalb der Sättigungsflächen unterschieden werden, welche Bereiche direkte Verbindung zum Vorfluter haben, bzw. durch Hangbereiche vom Gerinne getrennt sind, innerhalb derer Ereigniswasser wieder versickern kann.

So soll die Graphik in erster Linie versuchen, eine räumliche Vorstellung von den vermuteten Abflußbildungsprozessen einschließlich ihrer Herkunftsräume zu geben, aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Abb. 8.1: Schematisierte Darstellung der Abflußbildungsprozesse, wie sie im Einzugsgebiet auftreten können.



9 Literaturverzeichnis

- ARMBRUSTER, V. (1998): Zeitliche Dynamik der Wasser- und Elementflüsse in Waldökosystemen. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 38, 301 S.
- BAUMGARTNER, A.; LIEBSCHER, H.J. (1996) : Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 673 S.
- BERGMANN, H.; FRANK, J.; HARUM, T.; PAPESCH, W.; RANK, D.; RICHTIG, G.; ZOJER, H. (1996): Abflußkomponenten und Speichereigenschaften - Konzeptionen und Auswertemethoden. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 48, ½, 27- 45.
- BRINKMANN, M.; MÜLLER-MINY, H. (1965): Der oberbergische Kreis, Regierungsbezirk Köln.; Landkreise Nordrhein- Westfalens, Bonn
- BRONSERT, A. (1994): Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen; Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 46, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe
- BUTTLE, J.M. (1994): Isotope hydrograph separation and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. Progress in Physical Geography, 18, 1, 16-41.
- DIDSZUN, J. (2000): Abflußbildung an Hängen. Diplomarbeit Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
- DUNNE, T. ; BLACK, R.D. (1970): An experimental investigation of runoff production in permeable soils;. Water Resources Research, 6, 478- 490.
- DYCK, S.; PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin, 536 S.
- FEGER, K. H. (1993): Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 31, 237 S.
- FREY, M. (1999): Tracerhydrologische Untersuchungen im Brugga Einzugsgebiet: Gase, Silikat und stabile Isotope. Diplomarbeit Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
- FREEZE, R. A. (1974): Streamflow generation; Rev. Geophys. Space Phys.,12, 627- 647.
- GRABERT, H.; HILDEN, H. D. (1972): Erläuterungen zu Blatt 5012 Eckenhausen: Geologisches Landesamt Nordrhein- Westfalen; Krefeld
- GRABERT, H. (1970): Geologische Karte von Nordrhein- Westfalen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt 4912 Drolshagen; Geologisches Landesamt Nordrhein- Westfalen; Krefeld
- GREEN, W. H.; AMPT G. A. (1911): Studies of soil physics 1. The flow of air and water through soils. ; Journal of Agricul.Sc. 4
- GÜNTHER, A.; UHLENBROOK, S.; SEIBERT, J.;LEIBUNDGUT, CH.(1997): Estimation of saturation excess overland flow areas – comparison of topographic index calculation with field mapping; Landschaftsökologie und Umweltforschung, Heft 25

GUTKNECHT, D. (1996): Abflußentstehung an Hängen - Beobachtungen und Konzeptionen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 48, 5/6, 134- 144.

HANGEN, E. (1997): Tracerhydrologische Untersuchung zur Abflußbildung im Conventwald-Einzugsgebiet; Diplomarbeit Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

HIBBERT, A.R. ; TROENDLE C.A. (1987): Streamflow generation by variable source area. In: Swank, W.T. & D.A. Crossley Jr. (ed.): Forest hydrology and ecology at Coweeta. Ecological Studies 66, Springer Verlag, 111- 127.

HOOPER, R.P. ; SHOEMAKER, C.A. (1986): Comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. Water Resources Research, 22 ,10, 1444- 1454.

KAMP, H. (1970): Hydrogeologie. In H.GRABERT, Geologische Karte von Nordrhein- Westfalen 1:25000; Krefeld

KARRENBURG, H.; WEYER, K. U. (1970): Beziehungen zwischen geologischen Verhältnissen und Trockenwetterabfluß in kleinen Einzugsgebieten des Rheinischen Schiefergebirges; Sonderheft Hydrogeologie, Hannover

KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 519 S.

KENNEDY, V.C. (1971): Silica variations in stream water with time and discharge. Advances in Chemistry Series, 106, 94-130.

KIRNBAUER, R.; PIRKL, H.; HAAS, P.; STEIDL, H. (1996): Abflußmechanismen - Beobachtung und Modellierung. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 48, 1/2, 15- 26.

LAUDON, H.; SLAYMAKER, O. (1997): Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example. Journal of Hydrology, 201, 82- 101.

LEIBUNDGUT, CH. (1984): Zur Erfassung hydrologischer Meßwerte und deren Übertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. Geomethodica 9, Veröffentlichung des 9. Basler Geomethodischen Colloquiums, 141-170.

LEIBUNDGUT, CH.; LINDENLAUB, M.; MEHLHORN, J. (1996): Tracerhydrologische Ansätze in der Niederschlags- Abflußmodellierung, IHI- Schriften, Zittau, 2, 247- 255,

MCDONNELL, J. J.; BONELL, M.; STEWART, M.K.; PEARCE, A. J. (1990): Deuterium variations in storm rainfall: implications for stream hydrograph separation. Water Resources Research, 26, 3, 455- 458.

MCDONNELL, J. J.; STEWART, M.K.; OWENS, I.F. (1991): Effect of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response. Water Resources Research, 27, 12, 3065- 3073.

MOSER, H. ; RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 400 S.

MÜLLER, H.E. (1995): Laborseminar Hydrologie - Hydrochemische Untersuchungen und Datenauswertung. Selbstverlag der Universität Freiburg, 28 S.

PEARCE, A. J.; STEWART, M.K.; SKLASH, M. J. (1986): Storm runoff generation in humid headquarter catchments. 1. Where does the water come from?; Water Resources Research, 22, 8, 1263- 1273.

RUTENBERG, E. (1998): Raumgliederung aufgrund der dominanten Abflußbildungsprozesse im Bruggagebiet. Diplomarbeit Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K.H. ; SCHWERTMANN, A. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 494 S.

SCHIFFLER, G. R. (1992): Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen. Mitt. D. Inst. F. Hydrologie und Wasserwirtschaft, Univ. Karlsruhe

SCHMIDT, H. (1926): Schwellen- und Beckenfazies im ostrheinischen Paläozoikum; Z. deutsch. Geol. Ges. ;Berlin

SCHNELL, K. (1955): Gewässerkundliche Karten von Nordrhein- Westfalen; Min. f. Ern./Landw./Forst, Düsseldorf

SIEDER, M. (2000): Experimentelle Untersuchung der Abflußbildung auf Sättigungsflächen; Diplomarbeit Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

SKLASH, M.G.; FARVOLDEN, R.N.(1979): The role of groundwater in storm runoff; Journal of Hydrology; 43, 45- 65.

TANAKA, T.; YASUHARA, M.; SAKAI, H.; MARUI, A. (1988): The Hachioji experimental basin study - storm runoff processes and the mechanism of it's generation. Journal of Hydrology, 102, 139- 164.

UHLENBROOK, S.;LEIBUNDGUT, CH. (1997): Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. Wasser und Boden, 49, 9, 13- 22.

UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 10, 201 S.

WEILER, M. (1997): Untersuchung zur Abflußbildung an Hängen mit Tracerversuchen und numerischer Modellierung der Wasserbewegung. Diplomarbeit Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

WELS, C.; CORNETT, R. J.; LAZERTE, B. D. (1991b): Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers. Journal of Hydrology, 122, 253-274.

WELS, C.; TAYLOR, C. H.; CORNETT, R. J.; LAZERTE, B. D. (1991a): Streamflow generation in a headwater basin on the precambrian shield. Hydrological Processes, 5, 185-199.

ZIUDEMA, P., (1985): Hydraulik der Abflußbildung während Starkniederschlägen; Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich

Kartengrundlagen (vom Autor verändert und ergänzt in ARCVIEW)

LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (1997): Topographische Karte, 5012 Reichshof, 1:25000

WIRTH, W.: Bodenkarte, 5012 Eckenhausen, GLA NRW

HILDEN, H.D. : Karte der Steine und Erden, 5012 Eckenhausen, GLA NRW

KAMP, H.: Karte der Grundwasserführung, 5012 Eckenhausen, GLA NRW

UNIVERSITÄT BOCHUM: Digitales Höhenmodell (ArcInfo) des EZG

UNIVERSITÄT BOCHUM: Bodenkarte des EZG

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß die Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, den 4. Februar 2002

Olaf Andler