

**Hohlraumdetektion im Umfeld
von Kanalrohren mit Hilfe
von γ - γ -Messungen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften an der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der
Universität Karlsruhe
genehmigte

DISSERTATION

von
Claus Heske
aus
Stuttgart

2004

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Mai 2004
Referent: Prof. Dr. H. Hötzl
Korreferent: Prof. Dr. H. Wilhelm

KURZFASSUNG

Besonders bei undichten Kanälen die im Grundwasser oder im Grundwasserschwankungsbereich liegen, löst die Grundwasserinfiltration häufig Suffosions- und Erosionsvorgänge aus, die zur Verlagerung der nichtbindigen Lockergesteine und zum Eintrag der Sedimente in den Kanal führen. Die dadurch entstehenden Hohlräume im Umfeld des Kanals und die Veränderungen der Tragfähigkeit des Rohraufagers führen sowohl zu Muffenversätzen, Rissbildungen und Rohrbrüchen als auch zu Senkungen und Setzungen des Bodens und infolge dessen zu Fahrbahneinbrüchen und Gebäudeschäden.

Undichte Kanäle stellen eine Gefährdung der Schutzgüter Boden und Grundwasser dar, deshalb sind die Kanalnetzbetreiber in der Bundesrepublik Deutschland gesetzlich zur Inspektion, Wartung und Instandhaltung der Kanäle verpflichtet. Das zur Zeit gängige Verfahren für die Inspektion ist die optische Erfassung des Zustandes. Da von den ca. 450.000 km öffentlicher Kanalisation fast 90% nicht begehbar sind (ATV 2001), erfolgt ihre Inspektion mittels einer Kamerabefahrung mit Videoaufzeichnung. Mit einer Kamerabefahrung kann jedoch nur der optische Zustand des Kanalinneren beurteilt werden, Veränderungen der Rohrbettung, oder die Entstehung von Hohlräumen im Umfeld der Kanalrohre können nicht erkannt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Messverfahren zur Detektion von Hohlräumen im Umfeld von Kanalrohren entwickelt. Hierzu wurde eine γ - γ -Sonde, bekannt aus der Bohrlochgeophysik zur Dichtebestimmung der durchteuften Gesteine, für den Einsatz in Kanal adaptiert und die Möglichkeit überprüft, die Hohlräume im Umfeld der Kanäle aufgrund ihrer geringeren Dichte im Vergleich zu den umgebenden Sedimenten zu detektieren. Die grundlegend andere Fragestellung und die nicht vergleichbaren Randbedingungen bei Messungen mit der γ - γ -Sonde im Kanal im Vergleich zu den Bohrlochmessungen erforderten die Entwicklung eines neuen Ansatzes bei der Analyse und Interpretation der Messergebnisse.

Zur Erforschung der bei den Messungen mit der γ - γ -Sonde ablaufenden physikalischen Prozessen, wurde das Simulationsprogramm GLog entwickelt. Mit GLog wurde der Versuchsaufbau der γ - γ -Sonde und die Kanalteststrecke virtuell detailgetreu nachgebildet und Messungen mit der γ - γ -Sonde bei verschiedenen Versuchskonfigurationen simuliert. Die mit GLog durchgeführten Modellierungen lieferten die entscheidenden Erkenntnisse, die für die Auswertung der Messsignale notwendig sind.

Die Überprüfung der Simulationen und die praktische Erprobung der γ - γ -Sonde erfolgte zunächst an einer eigens hierfür erbauten Kanaltteststrecke im Forschungszentrum Umwelt unter Laborbedingungen und anschließend unter natürlichen Bedingungen in einer Kanaltteststrecke in Rastatt. Die Labor-teststrecke bot die Möglichkeit mit verhältnismäßig wenig Aufwand und unter kontrollierten Bedingungen die verschiedensten Schadensszenarien nachzustellen. Die Auswertung der Messergebnisse dieser Versuchsreihen konnte somit direkt im Vergleich mit der jeweiligen Versuchskonfiguration erfolgen und führten zu einer Optimierung des Versuchsaufbaus der γ - γ -Sonde. Die Ergebnisse der Laborversuche wurden bei den Messungen in der Kanaltteststrecke Rastatt weitestgehend bestätigt.

Neben der Hohlraumdetektion erwiesen sich die Messungen mit der γ - γ -Sonde auch besonders geeignet, um verdeckte Hausanschlüsse während einer Kanalsanierung mit einem Reliningverfahren zu orten. Bei diesem Sanierungsverfahren wird ein zweites Rohr, der sogenannte Inliner, in den vorhandenen defekten Kanal eingezogen. Für eine Kanalkamera sind die durch den Inliner verdeckten Hausanschlüsse nicht sichtbar. Durch fehlerhaftes Einmessen der Hausanschlüsse kommt es beim Auffräsen der Hausanschlüsse zur Beschädigung des frisch sanierten Kanals, wodurch wiederum unerwünschte Folgekosten entstehen. Die Hausanschlüsse können mit der γ - γ -Sonde durch den Inliner hindurch sehr genau geortet werden. Bei einer Kombination der γ - γ -Sonde mit einem Fräsroboter kann dieser entsprechend positioniert und eine Beschädigung des Kanals vermieden werden.

Die Versuche in den Teststrecken konnten die prinzipielle Eignung des γ - γ -Messverfahrens zur Hohlraumdetektion und Ortung der verdeckten Hausanschlüsse aufzeigen. Für den praktischen Einsatz des Messverfahrens wird die Kombination mit einer TV-Kamera empfohlen und Vorschläge zur technischen Weiterentwicklungen aufgezeigt. Eine frühzeitige Detektion der Hohlräume und Lagerungsdefekte bei einer Kanalbefahrung bietet den Kanalnetzbetreibern die Möglichkeit ein dem Schadensbild optimal angepasstes und damit kostengünstiges Sanierungsverfahren anzuwenden.

VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (AGK) im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes: "Schadensdiagnose bei Abwasserkanälen mit Multisensorsystemen (SAM)", in Zusammenarbeit mit den folgenden Projektpartnern: dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Karlsruhe (MRT), dem Fraunhoferinstitut für Informations- und Datenverarbeitung in Karlsruhe (IITB) und dem Tiefbauamt der Stadt Rastatt.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. H. Hötzl, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, für die Vergabe und Betreuung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. H. Wilhelm, Institutsleiter des Geophysikalischen Instituts der Universität Karlsruhe, danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Bereitschaft das Korreferat zu übernehmen.

Herzlichen Dank an Herrn Dr. habil. M. Eiswirth für die Projektleitung, Unterstützung, Diskussionsbereitschaft und sein stetes Interesse an meiner Arbeit.

Ebenso danke ich herzlich meinen Arbeitskollegen und allen Projektpartnern für ihre fachliche und persönliche Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Besonders erwähnt sei hierbei Frau Dipl.-Geol. I. Held, Frau Dipl.-Geol. G. Gregolec, Herr Dipl.-Geol. L. Wolf, Herr Dipl.-Geol. T. Schneider, Herr Dipl.-Ing. C. Frey, Herr Dipl.-Geophys. J. Herbst, Herr Dipl.-Geol. R. Zorn und Herr Dipl.-Geol. H. Steger.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe für ihre Diskussionsbereitschaft und das angenehme, konstruktive Arbeitsklima.

Herrn Dipl.-Phys. K. Daumiller danke ich für die Entwicklung des Simulationsprogramms GLog und zusammen mit Herrn Dipl.-Phys. R. Glasstetter für die fachliche Unterstützung und wertvollen Anregungen.

Allen studentischen Hilfskräften, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben, sei herzlich gedankt. Besonders erwähnt seien hierbei Herr M. Lambert, Herr Dipl.-Geol. J. Oßwald und Herr cand.-Geol. H. Ulmer. Ganz besonderer Dank gebührt Herrn cand.-Gök. M. Ostermaier für seine zuverlässige und selbständige Arbeit.

Vorwort

Den Mitarbeitern des Tiefbauamtes Rastatt, besonders Herrn Dipl.-Ing. J. Kramp, Herrn T. Gerbert und Herrn A. Becher danke ich für ihre schnelle und unbürokratische Hilfe bei allen Arbeiten im Testfeld.

Herrn Dipl.-Ing. H.-J. Bittner, Geschäftsführer der Firma RGI in Bad Wildbad, danke ich für die konstruktive und unkomplizierte Zusammenarbeit bei der Herstellung und Wartung der γ - γ -Sonde.

Mein besonderer Dank gilt Frau T. Arbeth für ihre Geduld und ihre Gabe mich bei der Fertigstellung dieser Arbeit zu motivieren.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	III
Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVIII

1	Einleitung und Problemstellung	1
1.1	Der Zustand der Kanalisation in der BRD	1
1.2	Die Rechtsgrundlagen der Kanalstandhaltung in der BRD	3
1.2.1	Das Wasserhaushaltsgesetz des Bundes	3
1.2.2	Das Bundes-Bodenschutzgesetz	4
1.2.3	Die Eigenkontrollverordnungen der Länder	4
1.2.4	Die Eigenkontrollverordnung für Baden-Württemberg	5
1.2.5	Die Grundstücksentwässerung im kommunalen Satzungsrecht	6
1.2.6	Die europäische Normentwicklung:	7
1.3	Die Kanalinspektion	8
1.4	Hohlräume im Umfeld von erdverlegten Abwasserkanälen	10
1.4.1	Das Problem der Hohlräumstehung	11
1.4.2	Die Mechanismen der Hohlräumstehung	11
1.4.3	Das Problem der Hohlräumdetektion	18
1.5	Die Sanierungsverfahren für defekte Kanäle	20
1.5.1	Sanierung mit einem Injektionsverfahren	21
1.5.2	Sanierung mit einem Reliningverfahren	23
1.5.3	Das Problem des Auffindens von Hausanschlüssen bei Reliningverfahren	24
1.6	Stand der Technik und Forschung	26
1.7	Zusammenfassende Problemstellung	31
1.8	Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	33
2	Theoretische Grundlagen	35
2.1	Art und Eigenschaften der Strahlung	36
2.1.1	Materiestrahlung	36
2.1.2	Wellenstrahlung	36
2.1.3	Eigenschaften der Strahlung	37
2.1.4	Strahlungsquellen	39
2.1.5	Der α -Zerfall	41
2.1.6	Der β -Zerfall	41
2.1.7	Der γ -Zerfall	44
2.1.8	Neutronenquellen	46

2.2	Die Ausbreitung von Strahlung in Materie und ihre Wechselwirkungen mit Materie	47
2.2.1	Geladene und ungeladene Teilchen.....	47
2.2.2	Das γ -Quant	50
2.2.3	Der Wirkungsquerschnitt σ	51
2.2.4	Der lineare Absorptionskoeffizient μ	52
2.2.5	Der Photoeffekt	54
2.2.6	Der Comptoneffekt.....	55
2.2.7	Der Paarbildungseffekt.....	59
2.2.8	Der Kernphotoeffekt.....	60
2.2.9	Schwächung von Photonenflüssen	60
2.3	Strahlungsdetektoren	63
2.3.1	Der Szintillationsdetektor	63
2.3.2	Die Signalverarbeitung	65
2.4	Das γ - γ -Verfahren in der Bohrlochgeophysik	65
2.5	Das γ - γ -Verfahren bei der Hohlraumortung	70
3	Die γ-γ-Sonden Versuchsanordnung und -Durchführung	71
3.1	Aufbau der γ - γ -Sonde.....	71
3.1.1	Das Strahlergehäuse	71
3.1.2	Der Detektor.....	72
3.1.3	Der Auswerterechner	73
3.1.4	Der Lagerungs- und Transportbehälter.....	73
3.1.5	Der Zentrierschlitten	74
3.1.6	Die variable Bleiabschirmung am Detektor.....	75
3.2	Die Versuchsdurchführung.....	76
3.2.1	Versuche in der Teststrecke im FZU	76
3.2.2	Versuche in realen Abwasserkanälen.....	77
3.3	Strahlenschutz beim Umgang mit der γ - γ -Sonde	77
3.3.1	Biologische Wirkung ionisierender Strahlung.....	80
3.3.2	Dosisbegriffe im Strahlenschutz	82
4	Modellierung	83
4.1	Aufgabenstellung für die Modellierung.....	83
4.2	Das Simulationsprogramm GLog	83
4.2.1	GEANT die Basis von GLog	83
4.2.2	Systemvoraussetzungen und Datenverwaltung	85
4.2.3	Die Bedienung des Programms GLog.....	85
4.2.4	Die graphische Darstellung mit GLog.....	86
4.3	Ergebnisse der Modellierung mit GLog.....	88
5	Beschreibung der Teststrecken.....	95

5.1	Teststrecke im FZU.....	95
5.2	Teststrecke in Rastatt/Kastanienweg	102
6	Labor- und Geländeversuche mit Auswertung der Ergebnisse.....	109
6.1	Das Messsignal bei einem intakten Rohr	109
6.2	Das Messsignal bei einem Hohlraum.....	115
6.2.1	Positiver Signalausschlag	119
6.2.2	Negativer Signalausschlag	120
6.2.3	Geometrie des Versuchsaufbaus und Signalausschlag.....	120
6.2.4	Der Einfluss der Fahrtrichtung auf das Messsignal	122
6.3	Das Messsignal bei einem Hausanschluss.....	123
6.4	Das Messsignal bei einer Muffe	125
6.5	Das Messsignal bei einer Muffe mit Hohlraum	128
6.6	Das Messsignal aus verschiedenen Blickrichtungen.....	129
6.7	Das Messsignal bei Kanalrohren die im Grundwasser liegen ...	134
6.8	Perspektivische Darstellung der Messergebnisse.....	137
6.9	Messungen in der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg.....	140
7	Zusammenfassende Bewertung des Messverfahrens und Ausblick.....	148
7.1	Prinzipielle Eignung des Verfahrens	148
7.2	Messgenauigkeit	148
7.3	Einschränkungen beim Einsatz der γ - γ -Sonde	150
7.3.1	Zusätzlich notwendige Vorarbeiten	150
7.3.2	Dichtekontrast	150
7.3.3	Zeitaufwand.....	151
7.3.4	Verdrehung der γ - γ -Sonde	151
7.4	Ausblick.....	152
8	Literatur	153
	Anhang	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1:	Marktübliche TV-Kerasysteme (Fotos von IBAK-Kiel und JT-elektronik-Lindau). Innenausbau der Fahrzeuge und zwei verschiedene TV-Kerasysteme mit jeweiligem Kamerafahrzeugen.....	9
Abb. 1-2:	Schematische Darstellung eines typischen Stufengrabens mit Trennkanalesation für Regen- (RW) und Schmutzwasser (SW), Gas- und Wasserleitung, sowie den verschiedenen Bettungs- und Verfüllungsschichten von der Leitungszone bis zur Geländeoberfläche als Beispiel am SW-Kanal.....	12
Abb. 1-3:	Schematische Darstellung der inneren Suffosion (links) und der Kontaktsuffosion (rechts) in einem Erdstoff mit Einzelkornstruktur (nach ZIEMS 1968).	14
Abb. 1-4:	Schematische Darstellung der Kontakterosion bei Erdstoffen mit Einzelkornstruktur bei unterschiedlichen Strömungsrichtungen des Wassers (oben) und der inneren Erosion in einem ungleichförmigen nichtbindigen Erdstoff (links) (nach ZIEMS 1968).	17
Abb. 1-5:	Einteilung der Injektionsmittel (nach MÜHLHOFER 2001).	22
Abb. 1-6:	Einteilung der Reliningverfahren (nach STEIN 1999).	24
Abb. 1-7:	Beispiel eines Fräsroboters zum Öffnen von Hausanschlüssen bei einem Reliningverfahren (KMG Deutschland GmbH).	25
Abb. 2-1:	Übersicht der Einteilung der unterschiedlichen Erscheinungsformen von elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge und Energie (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).	36
Abb. 2-2:	Links: α -Zerfall Prinzipschema (SCHMIDT 1987). Rechts: Zerfallsschema von Ra-226 als Beispiel eines typischen α -Zerfalls (DIMITRIJEVIĆ 1972).	41
Abb. 2-3:	β^- -Zerfall Prinzipschema (SCHMIDT 1987).	42
Abb. 2-4:	Links: Prinzipschema β^+ -Zerfall (SCHMIDT 1987). Rechts: Zerfallsschema von Na-22 als Beispiel eines typischen β^+ -Zerfalls (DIMITRIJEVIĆ 1972).	43
Abb. 2-5:	Links: Prinzipschema des Elektroneneinfangs (SCHMIDT 1987). Rechts: Zerfallsschema von K-40 als Beispiel eines typischen Elektroneneinfangs (DIMITRIJEVIĆ 1972).	43

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-6:	Energiespektrum von β -Strahlung (SCHMIDT 1987).....	44
Abb. 2-7:	Prinzipschema eines γ -Zerfalls (SCHMIDT 1987).	44
Abb. 2-8:	Radioaktive Umwandlung von Cs-137. β^- -Zerfall von Cs-137 in Ba-137 unter Aussendung eines Elektrons. Emission eines γ -Quants mit $E_\gamma = 0,6616$ MeV aus einem angeregten Ba-137 Atomkern. (Zahlenwerte in Klammern: Teilchenausbeute in %) (nach KOELZER 1997, PFENNIG et al. 1998 und VOGT & SCHULTZ 1992).....	45
Abb. 2-9:	Ausschnitt aus der Karlsruher Nuklidkarte mit Cäsium-137 und seinen möglichen Zerfallsarten (nach PFENNIG et al. 1998).....	46
Abb. 2-10:	Energiespektrum einer Neutronenquelle (SCHMIDT 1987).....	47
Abb. 2-11:	Übersicht der möglichen Wechselwirkungsprozesse von Elektronen mit Materie (nach VOGT & SCHULZ 1992).....	49
Abb. 2-12:	Mögliche Wechselwirkungsprozesse beim Durchgang von α -, β^- , γ - und n-Strahlungsteilchen durch Materie (VOGT & SCHULZ 1992)	50
Abb. 2-13:	Übersicht der möglichen Wechselwirkungsprozesse von Photonen mit Materie (VOGT & SCHULZ 1992).	51
Abb. 2-14:	Linearer Schwächungskoeffizient μ für verschiedene Metalle in Abhängigkeit von der γ -Energie (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).....	53
Abb. 2-15:	Wirkungsbereiche von Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt als Funktion der Kernladungszahl Z des Absorbermaterials in Abhängigkeit von der Energie E_γ der γ -Quanten. Die Linien stellen die Wertepaare Z und E dar, bei denen die beiden benachbarten Effekte die gleiche Wahrscheinlichkeit aufweisen (nach MILTZER et al. 1986).....	54
Abb. 2-16:	Energie und Winkelverteilung von gestreuten Photonen (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).....	56
Abb. 2-17:	Comptoneffekt: Elastische Streuung eines γ -Quants mit einem freien Elektron aus der Elektronenhülle eines Atoms. Je nach Streuwinkel Θ wird ein bestimmter Teil der Energie und des Impulses des Quants auf das Elektron übertragen, der Rest bleibt bei dem gestreuten Quant (nach KOELZER 1997).....	57

Abb. 2-18:	Links: Wirkungsquerschnitte des Comptoneffekts für ein freies Elektron (nach DIMITRIJEVIĆ 1972). Rechts: Differenzieller Klein-Nischina Wirkungsquerschnitt für die Compton-Streuung (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).	58
Abb. 2-19:	Halbwertschichtdicke d_h von Photonenstrahlung bei Schmalstrahlgeometrie in Abhängigkeit von der Photonenenergie für verschiedene Abschirmmaterialien (nach VOGT & SCHULTZ 1992).	61
Abb. 2-20:	Prinzip des Szintillationsdetektors (VOGT & SCHULTZ 1992).	64
Abb. 2-21:	Zwei Beispiele für die technische Ausführung von Bohrloch γ - γ -Sonden zur Bestimmung der Gesteinsdichte (nach WONIK et al. 2000).	67
Abb. 2-22:	Beispiel zweier Kalibrierungskurven für eine γ - γ -Sonde (KNÖDEL et al. 1997).	69
Abb. 3-1:	Aufbau der γ - γ -Sonde.	71
Abb. 3-2:	γ -Quelle mit dem Radionuklid Cs-137 als massive Keramik in doppelt umschlossener Kapselung.	72
Abb. 3-3:	γ - γ -Sonde im Transportbehälter.	74
Abb. 3-4:	γ - γ -Sonde mit Zentrierschlitten. Oben: Seitenansicht. Links: Frontalansicht.	74
Abb. 3-5:	Oben: Seitenansicht der γ - γ -Sonde mit Zentrierschlitten und variabler Abschirmung am Detektor für Messungen mit unterschiedlichen Blickrichtungen. Links: Kunststoffgehäuse mit 270° Bleiabschirmung	75
Abb. 4-1:	Graphische Ausgabe des mit GLog modellierten Versuchsaufbaus der Teststrecke im FZU.	87
Abb. 4-2:	Perspektivesche Darstellungen mit GLog von Kanalrohren DN300 mit Glockenmuffen. Das mittlere Rohr und die Umhüllung der γ - γ -Sonde sind in der Mitte aufgeschnitten, zu sehen sind die Spuren von 100 γ -Quanten.	87
Abb. 4-3:	Graphische Ausgabe eines mit GLog modellierten Versuchsaufbaus. Dargestellt ist die γ - γ -Sonde $a = 40$ cm, ein Kanalrohr DN300 und ein hohlzylindrischer, luftefüllter Hohlraum 15 cm breit, 360°.	88
Abb. 4-4:	Graphische Darstellung der Modellierungen mit GLog an verschiedenen Positionen in der Teststrecke. Beschreibung im Text.	89

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4-5:	Ausschnitt der simulierten Teststrecke am FZU (Abb. 4-1 und Abb. 4-2) für die Modellierung in Abb. 4-6	90
Abb. 4-6:	Modellierungsergebnisse eines 10 cm breiten Hohlraumes.....	92
Abb. 4-7:	Durchschnittlicher Streuwinkel Θ der γ -Quanten, die im Detektor erfasst wurden.....	93
Abb. 4-8:	Abnahme der Photonenenergie eines γ -Quants mit $E_\gamma = 0,66$ MeV bei einer Compton-Streuung in Abhängigkeit vom Streuwinkel Θ	93
Abb. 5-1:	Kanalteststrecke im FZU.....	96
Abb. 5-2:	Korngrößenverteilung (mS, gs, fs; nach DIN 18123) des Sandes der Fa. Weisenburger, dargestellt anhand zweier Körnungslinien nach Sieb- und Schlämmanalyse (SCHNELL 2001).....	97
Abb. 5-3:	Teststrecke im FZU mit Steinzeugrohr und verschiedenen Styroporkörpern zur Simulation der Hohlräume. oben links: Container mit Sandbettung und Steinzeugrohr oben rechts: Styroporkörper 270° / 32 cm unten links: Styroporkörper 90° / 32 cm im Scheitel unten rechts: Styroporkörper 360° / 16 cm.....	99
Abb. 5-4:	Bemaßung der Steinzeugrohre in der Teststrecke im FZU.....	100
Abb. 5-5:	Strukturformel von Styrol und Polystyrol (nach MORTIMER 1987).....	100
Abb. 5-6:	Übersichtsplan der Teststrecke Kastanienweg in Rastatt Rheinau mit Lage der Gruben, Hausanschlüsse und Abzweige (nach EISWIRTH 2002).....	102
Abb. 5-7:	Detailausschnitt der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg, Haltung von S 4 nach S 5 mit Lage der Baugruben, Hausanschlüsse, Abzweige und des eingebauten Hohlraums in Grube 1, Gas- und Wasserleitung, Schmutzwasserkanal (SW) DN 300 Steinzeug und Regenwasserkanal (RW) DN 500 Beton (nach EISWIRTH 2002).....	104
Abb. 5-8:	Detailplan der Instrumentierung der Gruben 1 und 2 der Kanalteststrecke Rastatt/Kastanienweg (EISWIRTH 2002).....	105
Abb. 5-9:	Blick in Grube 2 der Kanalteststrecke Rastatt Rheinau.....	105
Abb. 6-1:	Abnahme des Grundsignals bei fünf Vergleichsmessungen pro Messpunkt mit zunehmendem Abstand a zwischen Quelle und Detektor, γ - γ -Sonde hängt frei in der Luft, ohne Rohr und Bettung.....	110

Abb. 6-2:	Abnahme des Grundsignals bei fünf Vergleichsmessungen pro Messpunkt mit zunehmendem Abstand a zwischen Quelle und Detektor. Die γ - γ -Sonde befindet sich in einem Steinzeugrohr, welches frei in der Luft hängt, ohne Bettung. .	111
Abb. 6-3:	Teststrecke im FZU. Versuch a): Veränderung des Abstandes a zwischen Quelle und Detektor. Versuch b): Fahrt mit der γ - γ -Sonde durch das Rohr im Bereich ohne Hohlraum oder Muffe.	112
Abb. 6-4:	Zählerüberlauf des Auswerterechners der γ - γ -Sonde in Abhängigkeit vom Abstand a zwischen Quelle und Detektor...	113
Abb. 6-5:	Veränderung der Basislinien der Messsignale bei unterschiedlichen Abständen a zwischen Quelle und Detektor.	114
Abb. 6-6:	Versuchsanordnung mit 56 cm breitem, 20 cm hohem und 360° rundumlaufendem Hohlraum.	115
Abb. 6-7:	Messreihe bei einem Hohlraum (Abb. 6-6) mit unterschiedlichen Abständen a	115
Abb. 6-8:	Verschiebung der Basislinien der Messsignale auf eine gemeinsame Nulllinie.	116
Abb. 6-9:	Normierung der Messsignale auf den jeweiligen Mittelwert der Basislinien.	116
Abb. 6-10:	Messreihe im Bereich eines Hohlraumes 56 cm breit, 20 cm hoch, 360°. Links: Versuchsreihe mit $a = 40$ cm, Position der Quelle bei 2,9 m (oben), 3,2 m (Mitte) 3,5 m (unten). Rechts: Versuchsreihe mit $a = 70$ cm, Position der Quelle bei 2,6 m (oben), 2,9 m (Mitte) und 3,2 m (unten).	118
Abb. 6-11:	Strahlengang bei $a = 70$ cm. Oben links: in einem Bereich ohne Hohlraum (Basissignal), oben rechts: kurz vor einem Hohlraum (positiver Signalausschlag), unten links: direkt bei einem Hohlraum (negativer Signalausschlag) unten rechts: beim Durchfahren des Bereichs mit einem Hohlraum. Der Bereich mit den für das Messsignal entscheidenden Wechselwirkungen ist dunkelrot gefärbt.	119
Abb. 6-12:	Messreihe mit einem Hohlraum 360°, 16 cm breit, 20 cm hoch (links). Messreihe mit einem Hohlraum 10 cm breit und jeweils 20 cm seitlich und 40 cm oberhalb des Rohres hoch (rechts).	121

Abbildungsverzeichnis

Abb. 6-13:	Versuchsaufbau wie in Abb. 6-6 nur mit gedrehter γ - γ -Sonde, so dass die Quelle sich in Fahrtrichtung vorne befindet.	122
Abb. 6-14:	Messreihen mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen. Mit (2) sind diejenigen gekennzeichnet, bei denen die Quelle in Fahrtrichtung vorne war (Abb. 6-13). Aus dem Abstand der positiven Signalausschläge lässt sich die Breite des Hohlraumes bestimmen.....	122
Abb. 6-15:	Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4 - S5 mit der γ - γ -Sonde, a = 45 cm, Hausanschluss bei 7,8 m.....	123
Abb. 6-16:	Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg von S4 nach S5 mit der γ - γ -Sonde a = 45 cm, mit einem Verschlusssteller verschlossener Abzweig bei 14,5 m.	124
Abb. 6-17:	Steckmuffe bei einem Steinzeigrohr mit Glockenmuffe und Spitzende.	125
Abb. 6-18:	Messreihe an der Muffe M1 in der Teststrecke im FZU.....	125
Abb. 6-19:	Strahlengang beim passieren einer Muffe.	126
Abb. 6-20:	Messreihe an der Muffe M1 in der Teststrecke im FZU. Oben: absolute Änderung der Zählrate. Unten: normierte Änderung der Zählrate.	127
Abb. 6-21:	Versuchsstrecke im FZU, Muffe mit Hohlraum.	128
Abb. 6-22:	Messreihe mit einem Hohlraum (56 cm breit, 360°) bei M1; absolute Änderung der Zählrate in cps.	128
Abb. 6-23:	Messreihe mit einem Hohlraum (56 cm breit, 360°) bei M1; normierte Änderung der Zählrate in %.	129
Abb. 6-24:	γ - γ -Sonde mit drehbarer 270° Bleiabschirmung am Detektor. .	130
Abb. 6-25:	Links: Skizze des Rohres mit Position und Größe der Hohlräume HR 1 und HR 2 in der Teststrecke im FZU (Seitenansicht von rechts). Rechts: Blick in Fahrtrichtung, dargestellt sind die Hohlräume HR 1 und HR 2 und die acht Blickrichtungen z.B. Sektor 1+2 = 01:30.	131
Abb. 6-26:	Befahrung mit a = 45 cm. Oben: Darstellung der Messergebnisse mit absoluter Änderung der Zählrate in cps. Mitte: absoluter Änderung der Zählrate in cps entlang der y-Achse zueinander versetzt. Unten: Darstellung der Messergebnisse in prozentualer Abweichung normiert auf das Basissignal.	133

Abb. 6-27:	Befahrung der gefluteten Versuchsrinne mit $a = 45$ cm. Oben: Darstellung der Messergebnisse mit absoluter Änderung der Zählrate in cps. Unten: Darstellung der Messergebnisse in prozentualer Abweichung normiert auf das Basissignal.....	135
Abb. 6-28:	Befahrung der Teststrecke im FZU mit verschiedenen Blickrichtungen im Vergleich mit und ohne Flutung der Versuchsrinne.	136
Abb. 6-29:	Extrahierte Signalcharakteristika einer Messreihe in der Teststrecke im FZU (Kap. 6.6) aus den Rohdaten von Abb. 6-26 mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls.....	137
Abb. 6-30:	Ansicht von rechts und links einer perspektivischen Darstellung der Messergebnisse von der Teststrecke im FZU nach der Merkmalgenerierung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul. Beschreibung siehe Text.	138
Abb. 6-31:	Ansicht von rechts und links einer perspektivischen Darstellung der Messergebnisse von der Teststrecke im FZU nach der Merkmalauswertung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul. Beschreibung siehe Text.	139
Abb. 6-32:	Teststrecke Rastatt/Kastanienweg mit geplanter und realisierter Hausentwässerung (nach EISWIRTH 2002).	140
Abb. 6-33:	Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Teilausschnitt von 0 m bis 21 m.	141
Abb. 6-34:	Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Teilausschnitt von 21 m bis 42 m.	141
Abb. 6-35:	Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Detailausschnitt von 0,5 m bis 3,5 m.	142
Abb. 6-36:	Zwei Detailausschnitte der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5, Hausanschluss bei 7,8 m / 09:00, Abzweig verschlossen bei 14,5 m / 09:00, Hohlraum bei 16,25 m / 40 cm breit / 180°.	143
Abb. 6-37:	Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5. Bilder einer TV-Befahrung des IITB vom 13.08.2002. Links: Hausanschluss nicht fachgerecht eingebaut bei 7,8 m / 09:00. Mitte: Abzweig verschlossen bei 14,5 m / 09:00. Rechts: Muffe stark beschädigt bei 16,85 m.	144

Tabellenverzeichnis

Abb. 6-38:	Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Detailausschnitt von 13,5 m bis 17,5 m.....	144
Abb. 6-39:	Extrahierte Signalcharakteristika aus den Rohdaten von Abb. 6-38 mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls.	145
Abb. 6-40:	Ansicht von rechts und links einer perspektivische Darstellung der Messergebnisse eines Detailausschnitts der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg nach der Merkmalgenerierung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul.	145
Abb. 6-41:	Ansicht von rechts und links einer perspektivischen Darstellung der Messergebnisse eines Detailausschnitts der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg nach der Merkmalauswertung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul.....	146
Abb. 6-42:	Extrahierte Signalcharakteristika aus den Rohdaten von Abb. 6-33 und Abb. 6-34 mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls.	147
Abb. 6-43:	Ansicht von rechts, perspektivische Darstellung der Messergebnisse der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S 4 - S 5 nach der Merkmalgenerierung (oben) und nach der Merkmalauswertung (unten) mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul.....	147

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1-1:	Übersicht der Kanalarten, Kanallängen und der Altersverteilung der Kanäle in der Bundesrepublik Deutschland (nach ATV 2001 und STATISTISCHES BUNDESAMT 2001).....	1
Tab. 1-2:	Zustandsklassifizierung der inspizierten Kanalisationen (nach ATV-DVWK-Umfrage 2001).....	2
Tab. 1-3:	Prozentuale Verteilung der Kanalschäden (nach ATV-DVWK-Umfrage 2001).	2
Tab. 1-4:	Fristen für die Wiederholungsprüfung (EkVO B-W vom 20.02.2001).....	6
Tab. 1-5:	Gegenüberstellung der Begriffsdefinitionen zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Kanalisationen nach DIN EN 752 und ATV-M 143 (MUNLV-NRW 1999).	20

Tab. 1-6:	Prozentuale Verteilung der eingesetzten Sanierungsverfahren mit errechneten durchschnittlichen Sanierungskosten (nach ATV-DVWK-Umfrage 2001 und STEIN 1999).....	21
Tab. 2-1:	Zusammenstellung der wichtigsten gesteinsbildenden Elemente mit ihren entscheidenden Parametern für die Dichtebestimmung mit der γ - γ -Methode. Z = Ordnungszahl, A_r = relative Atommassenzahl, Gew. % = Elementhäufigkeit in der kontinentalen Kruste, k.a. = keine Angabe (nach ZSCHERPE & STEINBRECHER 1997; BERCKHEMMER 1990; MORTIMER 1987).	69
Tab. 3-1:	Angaben zur Ortsdosisleistung mit und ohne Transportbehälter in unterschiedlichen Entfernungen entsprechend den Genehmigungsunterlagen der Herstellerfirma RGI vom 29.11.1999.....	79
Tab. 4-1:	Auswahl der wichtigsten Eingabeparameter im Steuerskript <code>glog.steer</code>	86
Tab. 5-1:	Sedimentspezifische Parameter des Mittelsandes der Fa. Weisenburger und durchschnittlicher Mineralbestand nach Röntgendiffraktometrie-Analyse (XRD) (SCHNELL 2001).....	97
Tab. 5-2:	Ungleichförmigkeitszahl, Trockendichte und Dichte bei Wassersättigung des Sandes für die Rinnenfüllung.	98
Tab. 5-3:	Geologisches Profil bei Grube 2.	106
Tab. 6-1:	Auswertung der statistischen Schwankungen der Messreihe von Abb. 6-2 bei fünf Vergleichsmessungen pro Messpunkt. ...	111

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

1.1 Der Zustand der Kanalisation in der BRD

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, ATV-DVWK, ist in Deutschland Sprecher für alle übergreifenden Wasserfragen und arbeitet als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz. Um ein möglichst umfassendes Bild über den Zustand der Kanalisation (Tab. 1-1) in Deutschland zu erhalten und Aussagen zum Investitionsbedarf (Tab. 1-2 und Tab. 1-6) in diesem besonders kostenintensiven Bereich der Abwasserentsorgung treffen zu können, führt die ATV-DVWK seit 1984 regelmäßig Umfragen zum Zustand der Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland durch. An der aktuellen Umfrage von 2001 (ATV-DVWK-Information 2001) beteiligten sich 162 Kommunen und Abwasserverbände aus dem gesamten Bundesgebiet. Diese repräsentieren mit rund 21,6 Millionen Einwohnern ca. 27% der Bevölkerung. Die erfasste Kanallänge betrug rund 80.150 km, dies entspricht bei ca. 445.951 km Gesamtlänge (STATISTISCHES BUNDESAMT 2001) etwa 18% der öffentlichen Kanalisation.

Tab. 1-1: Übersicht der Kanalarten, Kanallängen und der Altersverteilung der Kanäle in der Bundesrepublik Deutschland (nach ATV 2001 und STATISTISCHES BUNDESAMT 2001).

Art des Kanals	Wert	Einheit	Häufigkeit [%]
Mischwasserkanäle	226.532	km	50,8
Schmutzwasserkanäle	134.312	km	30,1
Regenwasserkanäle	84.887	km	19,0
Gesamtlänge öffentlicher Kanäle	445.951	km	100,0
davon <DN 800	396.896	km	89,0
Altersverteilung:	0-25	Jahre	30
	26-50	Jahre	36
	51-75	Jahre	10
	76-100	Jahre	14
	>100	Jahre	4
	unbekannt	Jahre	6
private Abwasserleitungen	ca. 900.000	km	-

1.1 Der Zustand der Kanalisation in der BRD

Fasst man den Verbrauch von Industrie und privaten Haushalten zusammen, fallen bundesweit jeden Tag ca. 12 Millionen Kubikmeter Abwasser und noch mal die gleiche Menge an Regenwasser an, die in der Kanalisation gesammelt und über diese zu den Klärwerken geleitet werden müssen (ATV 1998). Die Umfrage ergab, dass ca. 17% der öffentlichen Kanalisation kurz- bzw. mittelfristig sanierungsbedürftig sind und für deren Sanierung rund 45 Mrd. € veranschlagt werden müssen (Tab. 1-2). Diese Summe ergibt sich, wenn man aus den Kosten für Reparatur, Renovierung und Erneuerung (Tab. 1-6) anteilig die durchschnittlichen Sanierungskosten von 594 €/m errechnet und mit den 75.731 km, das sind die 17% Kanallänge der gesamten öffentlichen Kanalisation, multipliziert.

Tab. 1-2: Zustandsklassifizierung der inspizierten Kanalisationen (nach ATV-DVWK-Umfrage 2001).

Handlungsbedarf	Zustandklasse	Häufigkeit [%]
sofort / kurzfristig	ZK 0 + ZK 1	7
mittelfristig	ZK 2	10
langfristig	ZK 3	14
kein	ZK 4	69

Weitere 14% der öffentlichen Kanäle weisen geringfügige Schäden auf und müssen langfristig saniert werden. Die Gesamtausgaben für die Kanalsanierung in Deutschland betragen im Jahr 2000 rund 1,64 Mrd. €.

Tab. 1-3: Prozentuale Verteilung der Kanalschäden (nach ATV-DVWK-Umfrage 2001).

Schadensart	Häufigkeit [%]
Schadhafter Anschluss	27
Riss	19
Undichte Muffe	10
Wurzel	7
Hindernis	9
Lageabweichung	10
Korrosion	7
Sonstiges	11

Die privaten Grundleitungen sind fast doppelt so lang wie die öffentliche Kanalisation und ihr Zustand wird deutlich schlechter als der der öffentlichen Kanalisation eingeschätzt. Bei geschätzten 40% der privaten Entwässerungsleitungen besteht mittelfristig ebenfalls Sanierungsbedarf.

Der Anteil der nicht begehbaren Kanäle (kleiner DN 800, ATV M 143-1) an der Gesamtlänge der öffentlichen Kanalisation beträgt ca. 89%, von den privaten Entwässerungsleitungen dürften nahezu 100% nicht begehbar sein. Die Inspektion der Kanäle ergab, dass bei mindestens 56% der erfassten Schadensarten, durch schadhafte Anschlüsse, Risse und undichte Muffen, von einer Undichtigkeit des Kanals ausgegangen werden kann (Tab. 1-3).

1.2 Die Rechtsgrundlagen der Kanalinstandhaltung in der BRD

Wer als Betreiber von Abwasseranlagen sein Kanalnetz regelmäßig inspiziert und Schäden zügig behebt, schützt nicht nur die Umwelt und die Betriebssicherheit seiner Anlagen, sondern auch sich selbst - vor den rechtlichen Konsequenzen, die der Betrieb defekter Leitungen haben kann. Die Instandhaltung von Abwasser-Kanalisationsnetzen in Deutschland basiert auf einem Geflecht rechtlicher und normativer Grundlagen, das sich in den letzten Jahren erheblich verdichtet hat. Eine deutsche Sondersituation, die Trennung zwischen privater und kommunaler Rechtsverantwortung für Abwasserkanäle, wird durch aktuelle Entwicklungen im Bereich der Euro-Normierung zunehmend relativiert.

Dass die Instandhaltung der Abwasser-Entsorgungsnetze jahrzehntelang vernachlässigt wurde, ist auch auf die lange Zeit unzureichenden Rechtsgrundlagen für die Instandhaltung zurückzuführen. Heute besteht die rechtliche Basis aus einer Vielfalt von Regelungen in unterschiedlichen Rechtsbereichen, bedingt durch die föderale Struktur von Gesetzgebung und Administration. Sowohl Bundesrecht als auch Landesrecht und kommunales Recht spielen bei der Kanalinstandhaltung eine maßgebliche Rolle (MUNLV-NRW 1999; KANAL MÜLLER GRUPPE 2000).

1.2.1 Das Wasserhaushaltsgesetz des Bundes

Wasserrechtliche Grundlage des Betriebs von Entwässerungsleitungen ist § 18 b des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) des Bundes. Danach sind alle Abwasseranlagen, also auch die zugehörigen Abwasserleitungen, gemäß den

"allgemein anerkannten Regeln der Technik" zu bauen und zu betreiben. Das beinhaltet die Pflicht zu regelmäßiger Wartung, Inspektion und gegebenenfalls zur Reparatur oder zur Erneuerung defekter Komponenten. Der geordnete Anlagenbetrieb hat nicht zuletzt die Abwehr von Umweltgefahren zum Ziel. Die vergleichsweise allgemein gehaltene Regelung des § 18 b WHG wird in den Wassergesetzen der Bundesländer aufgegriffen und sinngemäß oder wörtlich wiederholt (MUNLV-NRW 1999; KANAL MÜLLER GRUPPE 2000).

1.2.2 Das Bundes-Bodenschutzgesetz

Am 01.03.1999 ist das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten in Kraft getreten. Es verfolgt das Ziel, die Funktionen des Bodens nachhaltig zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden, Altlasten oder Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Von den Pflichten zur Vorsorge und Gefahrenabwehr sind grundsätzlich auch private und öffentliche Betreiber von Kanalisationsanlagen betroffen (KANAL MÜLLER GRUPPE 2000).

1.2.3 Die Eigenkontrollverordnungen der Länder

Fast alle Landeswassergesetze sehen die Möglichkeit vor, durch Rechtsverordnungen die Überwachung von Abwasseranlagen zu regeln. Von dieser Möglichkeit macht derzeit ein Großteil der Bundesländer Gebrauch. Ein Teil der Länder unterwerfen alle öffentlichen Abwasserkanäle, teils aber auch die privaten Leitungen, dem Prinzip der dokumentierten Eigenkontrolle durch den Netzbetreiber. Dies bedeutet, dass die Abwassernetze mit mehr oder weniger exakt definierten Verfahren in bestimmten Fristen zu untersuchen und die Ergebnisse so zu dokumentieren sind, dass sie für die Wasseraufsichtsbehörden der Länder jederzeit einsehbar sind.

Da die rechtliche Regelungskompetenz bei den Bundesländern liegt, kann im Detail von bundeseinheitlichen Maßstäben bei der Überwachung und Instandhaltung der Abwasseranlagen aber keine Rede sein. Dies ist insofern von großer Bedeutung, da die in den jeweiligen "Eigenkontrollverordnungen" (EkVO) der Länder gesetzten Vorgaben nicht nur erhebliche Standortunterschiede etwa für Industriebetriebe nach sich ziehen, sondern auch strafrechtlich relevant sein können (MUNLV-NRW 1999; KANAL MÜLLER GRUPPE 2000).

1.2.4 Die Eigenkontrollverordnung für Baden-Württemberg

Die gesetzliche Verpflichtung zur Inspektion, Dokumentation und ggf. Sanierung der öffentlichen und privaten Kanalisation ergibt sich aus der Eigenkontrollverordnung (EkVO) des jeweiligen Bundeslandes. Diese besagt für Baden-Württemberg:

Aufgrund von § 83 Abs. 6 des Wassergesetzes für Baden-Württemberg (WG) in der Fassung vom 01. Januar 1999 (GBl. S. 1) wird verordnet: (...)

§ 2 Eigenkontrolle

(1) Wer Abwasseranlagen (...) betreibt, hat (...) entsprechende Prüfungen, Untersuchungen, Messungen und Auswertungen durchzuführen und die hierzu erforderlichen Kontrolleinrichtungen und Geräte zu verwenden.(...)

(3) Mit der Eigenkontrolle wird (...) die Einhaltung der die Abwasseranlage und die Einleitung betreffenden wasserrechtlichen Vorschriften und Verpflichtungen nachgewiesen (...).

§ 3 Betriebsdokumentation und Mitteilungspflichten

(1) Die Ergebnisse der Eigenkontrolle sowie Störungen und besondere Vorkommnisse sind (...) zu dokumentieren (Betriebsdokumentation). (...)

(3) Der Betreiber einer Abwasseranlage hat Störungen und besondere Vorkommnisse, die eine erhebliche Beeinträchtigung der Reinigungsleistung oder eine wesentliche nachteilige Veränderung des Gewässers besorgen lassen, der unteren Wasserbehörde unverzüglich anzuzeigen und zu dokumentieren (...).

Bei Nichteinhaltung der in § 2 und § 3 vorgeschriebenen Eigenkontrolle, Betriebsdokumentation und Mitteilungspflicht drohen dem Betreiber der Abwasseranlage entsprechende strafrechtliche Konsequenzen. Diese ergeben sich aus § 5 Ordnungswidrigkeiten:

Ordnungswidrig nach § 120 Abs. 1 Nr. 19 WG handelt, wer vorsätzlich oder fahrlässig als Betreiber einer Abwasseranlage

- die (...) vorgeschriebenen Prüfungen, Untersuchungen, Messungen und Auswertungen nicht, nicht richtig oder nicht vollständig durchführt,
- (...) die Betriebsdokumentation nicht, nicht richtig oder nicht vollständig führt, (...)
- (...) Störungen oder besondere Vorkommnisse nicht unverzüglich anzeigt und dokumentiert (...) (EkVO B-W 20.02.2001).

1.2 Die Rechtsgrundlagen der Kanalstandhaltung in der BRD

Welche Anforderungen an die Überprüfung und Dokumentation der Kanäle gestellt werden, sind im Anhang der EkVO aufgeführt. Demnach sind Kanalisationen regelmäßig daraufhin zu überprüfen, ob sie den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Die Überprüfungen und gegebenenfalls erforderlichen Sanierungen sind nach wasserwirtschaftlichen Dringlichkeiten durchzuführen. Die Überprüfungen sind spätestens vor Ablauf der in Tab. 1-4 genannten Fristen durchzuführen.

Tab. 1-4: Fristen für die Wiederholungsprüfung (EKVO B-W vom 20.02.2001).

Art der Kanäle	Lage / Zustand der Kanäle		
	Wasserschutzgebiete	saniert oder schadensfrei	nicht saniert
Misch- und Schmutzwasserkanäle	10 Jahre (Zone I u. II) 15 Jahre (Zone III)	15 Jahre	10 Jahre
Regenwasserkanäle für behandlungsbedürftiges Niederschlagswasser	15 Jahre	20 Jahre	15 Jahre

1.2.5 Die Grundstücksentwässerung im kommunalen Satzungsrecht

Lange Zeit lückenhaft war die Rechtsgrundlage der Instandhaltung von Entwässerungsleitungen auf privatem Grund und Boden. Fest steht, dass die grundlegenden Betreiberpflichten des Wasserhaushaltsgesetzes auch für alle privaten Kanäle gelten. Bis Mitte der 90er Jahre fehlte es jedoch an den technisch-normativen Maßstäben zur Erfüllung dieser Pflichten im privaten Leitungsbestand. Die Eigenkontrollverordnungen der Bundesländer betreffen den privaten Leitungsbestand entweder gar nicht oder nur, soweit es sich um industrielle Abwasserleitungen mit gefährlichem Abwasser handelt. Allerdings besteht von jeher der allgemeine zivilrechtliche Schadenersatzanspruch nach dem Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB): Wer fahrlässig oder vorsätzlich Leben, Körper, Gesundheit, Freiheit, Eigentum oder ein sonstiges Recht eines anderen widerrechtlich verletzt, ist zum Ersatz des entstehenden Schadens verpflichtet.

Die Haftungsregelungen haben die Instandhaltung von Abwasser-Kanalisationsnetzen vor allem im Bereich der industriellen Kanalnetze beflügelt. Um sich gegen Gewässer- oder Umweltschäden zu versichern, müssen die Unternehmen bei den meisten Versicherungen Nachweise über den Zustand des Kanalisationsnetzes erbringen. Anlagen mit völlig desolaten Kanalnetzen sind zunehmend schwer versicherbar. Inzwischen setzt sich aber auch zunehmend die technisch begründbare Überzeugung durch, dass undichte Grundleitungen den Betrieb des öffentlichen Netzes ganz erheblich stören können und zwar einerseits durch eintretendes Grundwasser, andererseits durch eingeschwemmtes Erdreich. Dies beeinträchtigt die hydraulische Kapazität der öffentlichen Kanäle und die Funktionsfähigkeit der Kläranlagen. Immer mehr Kommunen gehen auf dieser Grundlage dazu über, die Dichtheit privater Leitungen in kommunalen Abwassersatzungen vorzuschreiben und zugleich die Überwachung dieser Dichtheit zu regeln.

Die technische Norm DIN 1986-30 vom Januar 1995 schreibt die "anerkannten Regeln der Technik" für die Instandhaltung von Grundstücksentwässerungen fest und setzt damit bundesweit gültige Maßstäbe. Was industrielle Grundleitungen angeht, sind diese Maßstäbe oft deutlich strenger als die Vorschriften in vereinzeltigen Eigenkontrollverordnungen. So sind Grundstücksentwässerungen mit industriellem Abwasser nach DIN 1986-30 vollständig auf Dichtheit zu prüfen - und zwar nicht etwa durch optische Inspektion, sondern durch Beaufschlagung mit Luft- oder Wasserdruck. Private Leitungen mit rein häuslichem Abwasser sind per Kanal-TV-Kamera optisch zu untersuchen. Alle Leitungen sind nach der Erstinspektion in festen Abständen erneut zu inspizieren (MUNLV-NRW 1999; KANAL MÜLLER GRUPPE 2000).

1.2.6 Die europäische Normentwicklung:

Zu den wichtigsten Entwicklungen der jüngsten Zeit im rechtlich-normativen Bereich rund um den Abwasserkanal gehört die siebenteilig angelegte Euro-Norm EN 752 "Entwässerungsanlagen außerhalb von Gebäuden". Das eigentlich Bemerkenswerte an dieser europaweit verbindlichen Norm ist die Tatsache, dass sie keinen Unterschied zwischen kommunalen und privaten Abwasserleitungen mehr macht. Ein Abwassernetz reicht nach EN 752 ausdrücklich von der Hauswand bis zur Kläranlage. Damit wird die spezifisch deutsche Trennung zwischen privater und öffentlicher Verantwortung zumindest insoweit aufgehoben, dass alle Kanäle ab sofort nach gleichen technischen Maßstäben zu bauen, zu betreiben, zu unterhalten und zu sanieren sind (KANAL MÜLLER GRUPPE 2000).

1.3 Die Kanalinspektion

Laut der ATV-DVWK Umfrage von 2001 hat sich aufgrund der EkVO der Inspektionsgrad der öffentlichen Kanäle in den letzten Jahren deutlich erhöht. Er lag in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2001 bei durchschnittlich 75% des Kanalnetzes. Die Art der Inspektion hängt von der Größe des Kanals ab. Bei begehbaren Kanälen ab einem Rohrrinnendurchmesser DN 800 (80 cm) erfolgt die optische Zustandserfassung im allgemeinen durch direkte Inaugenscheinnahme, bei nicht begehbaren Kanälen kleiner DN 800 (ATV M 143-1) im allgemeinen durch Kanalfernsehen (Abb. 1-1). Die Gesamtlänge der nicht begehbaren Kanäle im gesamten Bundesgebiet beträgt mindestens 1.296.896 km. Davon sind ca. 369.896 km öffentliche Kanäle und mindestens 900.000 km private Abwasserleitungen (Tab. 1-1). Damit sind fast 1,3 Millionen Kilometer Kanalstrecke für eine direkte Inaugenscheinnahme nicht zugänglich, ihre Inspektion kann ausschließlich indirekt, d. h. gegenwärtig entsprechend den allgemein anerkannten Regeln der Technik mit geschlossenen, schwenkbaren TV-Systemen („closed circuit television“ CCTV) erfolgen. Diese Farbvideokamerasysteme werden über ferngesteuerte Roboter durch die Kanäle transportiert und erlauben lediglich eine visuelle Bestandsaufnahme des Kanalzustandes (BÖLKE 1996, STEIN 1999, ATV 1999).

Die TV-Anlagen werden vorwiegend in Kastentransporter eingebaut. So lassen sich die Untersuchungen im Innenraum des Fahrzeugs in geschützter Umgebung direkt am Einsatzort durchführen. Der Operator kann die gesamte Anlage allein vom Beobachtungsstand aus steuern. Im rückwärtigen Bereich des Fahrzeuges befindet sich die Kameras, Fahrwagen, Beleuchtungseinrichtungen, Winden, Arbeitsscheinwerfer, Kontrollmonitor etc.. Der Innenbereich ist mit Kontrollmonitoren, Steuergerät, PC, Drucker und Videorecorder eingerichtet. Am Einsatzort wird der Fahrwagen mit der Kamera an einer Seilwinde im Schacht abgelassen, die TV-Befahrung gestartet und auf Video oder andere Datenträger aufgezeichnet. Für das Protokoll werden Schacht- und Haltungsnummer mit der entsprechenden Software erfasst. Die Wegstreckenmessung des Fahrwagens erfolgt im Allgemeinen über die Messung der Kabellänge. Moderne Systeme bieten eine Durchmesserbestimmung, Neigungs-, Temperatur-, Deformations- und Schadensvermessung an. Bei der Schadensvermessung kann der Operator direkt bei der Untersuchung die optisch erkennbare Länge und Breite eines Schadens messen. Die Ergebnisse dieser TV-Befahrungen werden nach einem Bewertungsschema der ATV (ATV A 149 & ATV M 149) in verschiedene Schadensklassen unterteilt (Tab. 1-2, Anhang 4,

STEIN 1999) und gegebenenfalls entsprechend der sich aus der Schadensklasse ergebenden Dringlichkeit mit einem geeigneten Verfahren saniert (Kap. 1.5).



Abb. 1-1: Marktübliche TV-Kamerasysteme (Fotos von IBAK-Kiel und JT-elektronik-Lindau). Innenausbau der Fahrzeuge und zwei verschiedene TV-Kamerasysteme mit jeweiligem Kamerafahrwagen.

Reichen die visuell gewonnenen Inspektionsergebnisse als Entscheidungsgrundlage zur Festlegung von Maßnahmen zur Schadensbehebung nicht aus, so sind laut ATV-Merkblatt M 143 Teil 1 (1989) weitergehende Untersuchungen zur quantitativen Schadenserfassung durchzuführen. Vorgeschlagen werden z. B. Dichtheitsprüfungen, Rohrwerkstoffuntersuchungen, Profil- und Lagemessungen. Zahlreiche Untersuchungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass ein rein visuelles System zwar das auf der Rohrinneinnenseite erkennbare

Schadensmuster abbildet, jedoch die Dreidimensionalität des Schadens und dessen Auswirkungen auf den Boden und das Grundwasser nicht zu bewerten erlaubt (EISWIRTH 1995, EISWIRTH ET AL. 1995, BÖLKE 1996).

Schadhafte Veränderungen der Lagerungsdichte der Rohrbettung, oder die Entstehung von Hohlräumen (Kap. 1.4) im direkten Umfeld der Kanalrohre werden bei einer TV-Befahrung im Allgemeinen nicht erkannt, da diese Vorgänge sich jenseits der Rohrwandung abspielen und sich somit dem Blick der Kamera entziehen. Für den sicheren und langfristigen Betrieb von Kanalnetzen stellt jedoch die ordnungsgemäße Bettung der Kanäle eine Grundvoraussetzung dar. Die unerkannten Hohlräume bergen ein erhebliches Gefährdungspotential für den Straßenverkehr, da sie zu Senkungen und Setzungen des Bodens und zu Einstürzen des Fahrbahnbelages führen können (Anhang 1). Ein frühzeitiges Erkennen von Lagerungsdefekten und Hohlräumen, die die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Rohr-Boden-Systems entscheidend beeinflussen, kann den Netzbetreiber vor kostspieligen Fehlentscheidungen bei der Wahl des Sanierungszeitpunktes oder –verfahrens (Kap. 1.5) bewahren (ATV-DVWK-ARBEITSGRUPPE ES-5.8 2003).

1.4 Hohlräume im Umfeld von erdverlegten Abwasserkanälen

Der Eintritt von Grund- und Sickerwasser in einen defekten Kanal und der damit verbundene Eintrag von Boden- und Bettungsmaterial führt häufig zur Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Rohraufagers und zur Hohlraumbildung im Umfeld des Kanals (DOHMANN 1995). Als Folgeschäden, dieser bei den TV-Befahrungen nicht erkennbaren primären schadhafte Veränderungen im Rohrumfeld des Kanals, treten häufig Rohrbruch und Oberflächenabsenkungen bis zu Fahrbahneinbrüchen auf (Anhang 1). Die Senkungen, Spurrillen und Unebenheiten des Fahrbahnbelags stellen eine Behinderung für den Straßenverkehr dar; Fahrbahneinbrüche mit teilweise bis zu mehreren Kubikmetern großen Löchern in der Straße sind jedoch eine erhebliche Gefährdung für die Verkehrsteilnehmer und Anwohner. Durch Setzungen des Bodens und Absenkungen der Geländeoberfläche infolge der Hohlraumbildung können auch kostspielige Schäden an angrenzenden Gebäuden und sonstigen Bauwerken entstehen (STEIN 1999). Die Verfahren zur Vorsorge beschränken sich heute praktisch nur auf den ordnungsgemäßen Bau von Kanälen oder der Sanierung von Kanälen nach Straßeneinbrüchen ("Feuerwehrstrategie") (ATV-DVWK-ARBEITSGRUPPE ES-5.8 2003).

1.4.1 Das Problem der Hohlräumstehung

Über schadhafte Stellen am Kanalrohr (Tab. 1-3) kann sowohl Abwasser exfiltrieren als auch Grund- und Sickerwasser infiltrieren. Die Infiltration von Wasser geht meist einher mit der Einspülung von Sedimenten aus dem umgebenden Erdreich. Die eingespülten Sedimente werden anschließend entweder kontinuierlich von dem im Kanal fließenden Abwasser weggeschwemmt oder lagern sich in der Kanalsole ab und können mit der Zeit zu Querschnittsverengungen führen (DOHMANN 1995). Dabei können im Lauf der Zeit erhebliche Mengen an Bodenmaterial aus der Bettung und dem umgebenden Erdreich ausgetragen werden und zu nachteiligen Veränderungen der Lagerungsdichte der Rohrbettung oder gar zu größeren Hohlräumen in den Sedimenten führen. Die Hohlräume können sich mit der Zeit stetig vergrößern und im Untergrund völlig unbemerkt ein Volumen von mehreren Kubikmetern erreichen. Der fortschreitende Nachbruch der Sedimente und Tragschichten der Straße bis direkt unter den Asphaltbelag kann aufgrund der Eigensteifigkeit des Asphalts bei kühler Witterung über längere Zeit ebenfalls unbemerkt bleiben. Erst in den heißen Sommermonaten, wenn sich der Asphalt aufgrund der Sonneneinstrahlung erwärmt und leicht plastisch wird, kann es, ohne dass ein besonders starker Regen oder sonstiges außergewöhnliches Ereignis direkt vorangegangen sein muss, zum Einsturz der Fahrbahndecke kommen. Aus diesem Grund häufen sich im Sommer die Zeitungsberichte über Straßeneinbrüche infolge defekter Kanäle.

1.4.2 Die Mechanismen der Hohlräumstehung

Ganz allgemein neigen nichtbindige Lockergesteine und Erdstoffe unter bestimmten geologischen Verhältnissen bei gleichzeitigem Vorliegen entsprechender hydraulischer Randbedingungen zu Bodendeformationen und infolgedessen zu langsamen und langanhaltenden Senkungserscheinungen oder plötzlich an der Geländeoberfläche auftretenden Erdfällen. Diese Vorgänge wurden vor allem bei der Untersuchung von Bauwerksschäden an Deichen und Dämmen (DVWK Merkblatt 210 1986) und an Bauwerksschäden in geologischen Räumen (VOGEL 1999), in denen verkarstete oder geklüftete Festgesteine von nichtbindigen Lockergesteinen überlagert werden, festgestellt und eingehend erforscht. Es zeigte sich, dass es aufgrund von hydraulisch induzierten Suffosions- und Erosionsvorgängen innerhalb dieser Deckschichten zu einer Verlagerung von Lockermaterial in die Hohlräume des Untergrundes kommt und somit die Senkungen und Setzungen der Geländeoberfläche aus-

1.4 Hohlräume im Umfeld von erdverlegten Abwasserkanälen

gelöst werden (DACHROTH 2002; VOGEL & KAST 1994, WITTMAN 1980; SCHULER 1997).

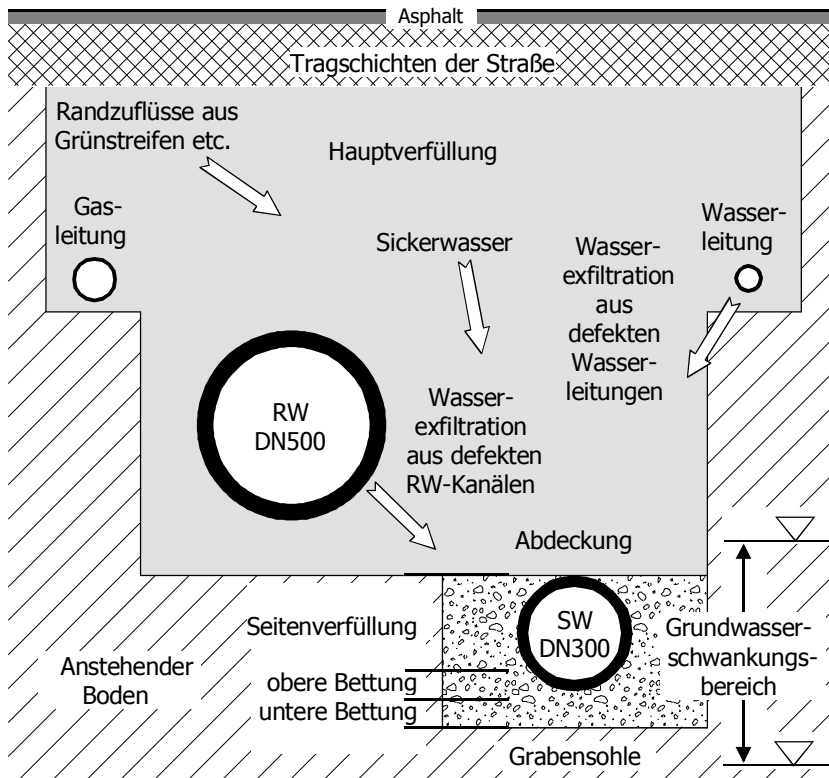


Abb. 1-2: Schematische Darstellung eines typischen Stufengrabens mit Trennkanaalisation für Regen- (RW) und Schmutzwasser (SW), Gas- und Wasserleitung, sowie den verschiedenen Bettungs- und Verfüllungsschichten von der Leitungszone bis zur Geländeoberfläche als Beispiel am SW-Kanal.

Erdverlegte Regen- und Schmutzwasserkanäle bilden ein ähnliches geometrisches und geologisches System (Abb. 1-2), so dass davon ausgegangen werden kann, dass die selben hydromechanischen Gesetzmäßigkeiten für das Entstehen der Hohlräume im Umfeld der Kanäle verantwortlich sind. Die Rohre entsprechen den Kluft- oder Karströhren, über die, sofern die Rohre defekt sind und Wasser eindringen kann, die Sedimente der Rohrbettung und der

Grabenverfüllung abtransportiert werden können. Für die Hauptverfüllung des Grabens wird im allgemeinen der ausgehobene anstehende Boden wieder eingebaut. Die Anforderungen bezüglich der Körnung, der bodenmechanischen Eigenschaften, der Mächtigkeit und der Verdichtung beim Einbau an die Rohrbettung, Seitenverfüllung und Abdeckung wird im Detail in DIN EN 1610 beschrieben. Ferner sind beim Einbau der Rohre noch Arbeitsblätter ATV A 127, A 139, A 142 sowie DIN 19695 und DIN EN 1295-1 zu beachten. Im Zusammenspiel mit den Wasserbewegungen in der ungesättigten Zone und ggf. einem schwankendem Grundwasserspiegel in der Leitungszone (Abb. 1-2), sind durch den Einbau der verschiedenen Sedimente und den Kontaktflächen der Rohrgrube zum anstehenden Boden die grundsätzlichen Voraussetzungen für die hydraulisch induzierten Suffosions- und Erosionsvorgängen und der damit verbundenen Verlagerung von Lockermaterial in die Kanäle gegeben.

Im Folgenden wird eine Übersicht der wichtigsten Prozesse gegeben, die zu einer Materialmobilisierung innerhalb von rolligen, nichtbindigen Lockergesteinen führen. Die Beurteilung der hydromechanischen Bodenstabilität von Lockergesteinen lässt sich vereinfachend auf das Grundproblem des Zusammenwirkens der verschiedenen Kornfraktionen eines Erdstoffes bei hydraulischem Kraftangriff reduzieren. Im Einzelnen können die folgenden Arten hydromechanischer Bodendeformationen unterschieden werden (BUSCH et al. 1993):

Die Suffosion:

Bei der Suffosion werden Bodenteilchen der feineren Kornfraktionen eines ungleichförmigen nichtbindigen Erdstoffes, oder eines ungleichförmigen bindigen Erdstoffes mit Ausfallkörnung, im Porenraum des Skeletts infolge eines hydraulischen Gradienten umgelagert und transportiert. Das aus den gröberen Kornfraktionen bestehende tragende Skelett wird dabei nicht verändert oder zerstört. Durch Suffosion erhöht sich die Porosität Φ und der Durchlässigkeitsbeiwert k des Erdstoffes, wodurch sich wiederum der Sickerwasserdurchfluss und der Sickerwasserströmungsdruck erhöht. Durch Suffosion nimmt die Raumdichte des Erdstoffes ab und es verändern sich Kornzusammensetzung, Kohäsion und Reibungswinkel. Das Volumen des Bodens bleibt zunächst konstant, bei anhaltender Suffosion kann die Stabilität jedoch plötzlich abnehmen und der Boden kollabieren. Eine länger andauernde Suffosion ist jedoch nur möglich, wenn die transportierten Teilchen an einer Grenz- oder Kontaktfläche des Erdkörpers ausgetragen werden. Wenn feine, zwi-

1.4 Hohlräume im Umfeld von erdverlegten Abwasserkanälen

schen den tragenden Skelettkörnern eingeklemmte Teilchen ebenfalls ausgewaschen werden, kann die Suffosion schließlich auch zur Schädigung des Erdstoffskeletts führen und damit den Übergang zur Erosion einleiten und einen Erosionsgrundbruch vorbereiten (ZIEMS 1968, REUTER et al. 1980).

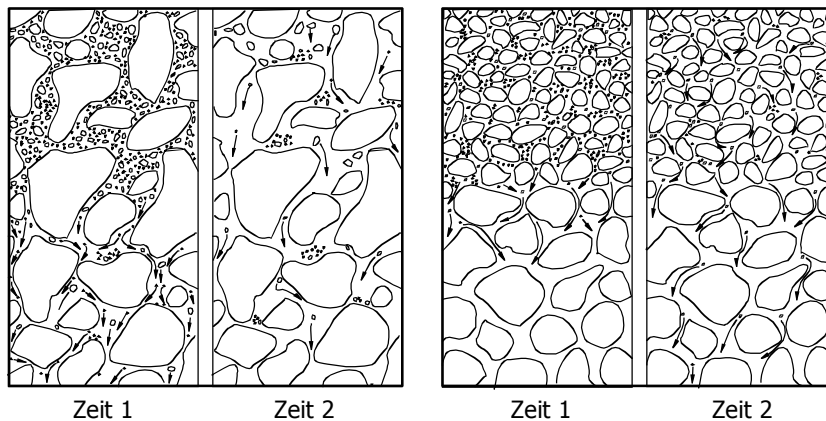


Abb. 1-3: Schematische Darstellung der inneren Suffosion (links) und der Kontaktsuffosion (rechts) in einem Erdstoff mit Einzelkornstruktur (nach ZIEMS 1968).

Hinsichtlich der Lage der Suffosion zum Erdkörper unterscheidet man die innere, die äußere und die Kontaktsuffosion (ZIEMS 1968):

- Die **äußere Suffosion** ist die Suffosion an der freien Oberfläche eines Erdkörpers, z.B. einer Gewässersohle und spielt daher bei der Entstehung der Hohlräume im Umfeld von Abwasserkanälen nur in Ausnahmefällen eine Rolle. Sie wird bei suffosionsgefährdeten Erdstoffen im allgemeinen durch die innere Suffosion ihre Fortsetzung finden, d.h. diese hervorrufen, in Gang halten, oder beschleunigen.
- Die **innere Suffosion** ist die Suffosion im Inneren eines Erdkörpers. Sie dauert nur verhältnismäßig kurze Zeit und die Transportwege der bewegten Teilchen sind begrenzt, sofern sie nicht durch die äußere oder Kontaktsuffosion eingeleitet oder fortgesetzt wird (Abb. 1-3 links).
- Die **Kontaktsuffosion** ist die Suffosion des feineren Erdstoffs an der Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Erdstoffe. Dabei finden die bewegten Teilchen des feineren Erdstoffs in den Poren des gröberen Erdstoffs Platz und setzen sich dort fest (Kolmation), oder wer-

den durch die innere Suffosion in diesem wiederum weiter transportiert (Abb. 1-3 rechts).

Suffosionsgefährdet sind Erdstoffe mit einem relativ großen Ungleichförmigkeitsgrad und insbesondere solche mit intermittierender Körnung. Eine Suffosionsberechnung setzt sich stets aus zwei Teilen zusammen. Zum einen ist nachzuweisen, ob in einem Erdstoff auf Grund seiner Porengeometrie Suffosion überhaupt möglich ist, man spricht dabei vom geometrischen Suffosionskriterium. Bei ungenügender geometrischer Suffosionssicherheit ist der Erdstoff suffosionsgefährdet. Die Suffosion tritt aber erst dann ein, wenn darüber hinaus auch das hydraulische Suffosionskriterium nicht erfüllt wird. Dies ist dann der Fall, wenn die hydraulische Transportkraft einen bestimmten, für die Suffosion in diesem Erdstoff erforderlichen Wert überschreitet (BUSCH et al. 1993). Neben dem rein geometrischen Faktor spielt bei einer Abschätzung der Suffosionsgefahr auch die Mineralzusammensetzung des Feinkornanteils, sowie der Anteil an organischen Verbindungen und der Wasserchemismus eine entscheidende Rolle. Bestimmte Tonminerale und organische Verbindungen können je nach Wassergehalt, pH-Wert, Kationendargebot etc. quellen, aggregieren, koagulieren oder dispergieren und damit ihre Geometrie ihre Stabilität, ihre Wasserlöslichkeit und ihr Fließverhalten stark verändern (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002; JASMUND & LAGALY 1993).

Die Erosion:

Im Gegensatz zur Suffosion werden bei der Erosion Teilchen fast aller Fraktionen eines Erdstoffs durch fließendes Wasser umgelagert und transportiert (Massenverlagerung). Die Erosion führt zur fortschreitenden Zerstörung des Erdstoffs. Wiederum wird hinsichtlich der Lage der Erosion zum Erdkörper unterschieden zwischen äußerer, innerer, Fugen- und Kontakterosion (ZIEMS 1968, BUSCH et al. 1993):

- Die **äußere Erosion** wird auch Flusserosion genannt und tritt bei der Überschreitung der zulässigen Schleppspannung des fließenden Oberflächengewässers auf. Sie spielt bei der Entstehung der Hohlräumen im Umfeld von Abwasserkanälen keine Rolle.
- Die **innere Erosion** findet in größeren, meist röhrenförmigen Hohlräumen im Inneren eines Erdkörpers statt (Abb. 1-4). Die Hohlräume sind häufig bereits vor Beginn der inneren Erosion durch pflanzliche oder tierische Einwirkungen wie Wurzel- und Wühltiergänge oder durch Suffosion und Erweiterung eines bevorzugten Porenkanals entstanden. Die Er-

weiterung der bevorzugten Porenkanäle erfolgt im allgemeinen rückschreitend, d.h. entgegen der Fließrichtung des Wassers. Die innere Erosion wird häufig gefördert durch Suffosions- und Kolmationserscheinungen, durch unterschiedliche Lagerungsdichte und Anisotropie des Erdstoffs, unterschiedliche Spannungen im Erdstoffgerüst und Wechsellagerungen unterschiedlicher Sedimente. Die innere Erosionsgefährdung kann nicht mit Hilfe determinierter physikalischer Verfahren nachgewiesen, sondern nur wahrscheinlichkeitstheoretisch erfasst werden.

- Die **Fugenerosion** findet zwischen massiven Bauteilen und dem angrenzenden Erdstoff statt. Die Gesetzmäßigkeiten sind weitgehend identisch mit denjenigen der inneren Erosion. Möglich ist die Fugenerosion vor allem durch Austrocknung des Erdstoffs oder durch unterschiedliche Setzung des Untergrundes eines Bauwerks, z.B. eines Schachtbauwerks oder des Kanals.
- Unter **Kontakterosion** wird die an einer Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Erdstoffe stattfindende Erosion des feineren Erdstoffs verstanden (Abb. 1-4). Die in den groben Erdstoff eindringenden Teilchen werden dort im allgemeinen abtransportiert (Suffosion), seltener abgelagert (Kolmation). Die Sicherheit gegen Kontakterosion wird durch die sogenannten Filterregeln reflektiert (TERZAGHI & PECK 1961), sie ergeben ein geometrisches Kontakterosionskriterium. Wird dieses nicht erfüllt, dann kommt es erst dann zur Kontakterosion, wenn auch das hydraulische Kontakterosionskriterium nicht erfüllt ist. Ist das geometrische hingegen erfüllt, so ist für ein fast beliebiges hydraulisches Gefälle i Sicherheit gegen Kontakterosion gegeben. Die Kontakterosion kann als eine der wichtigsten hydromechanischen Wirkungen des Wassers im Untergrund angesehen werden. Sie ist besonders von Bedeutung, wenn eine Wechsellagerung der Sedimente vorliegt und bei Sicker- oder Grundwasserströmung, bzw. häufige Grundwasserspiegelschwankungen über Schichtgrenzen hinweg, verursacht z.B. durch wechselnde Wasserstände im Vorfluter, zeitweilige Stauwasserbildungen oder anthropogene Eingriffe wie Grundwasserentnahme oder Wassereintrag bei Rohrbrüchen.
-

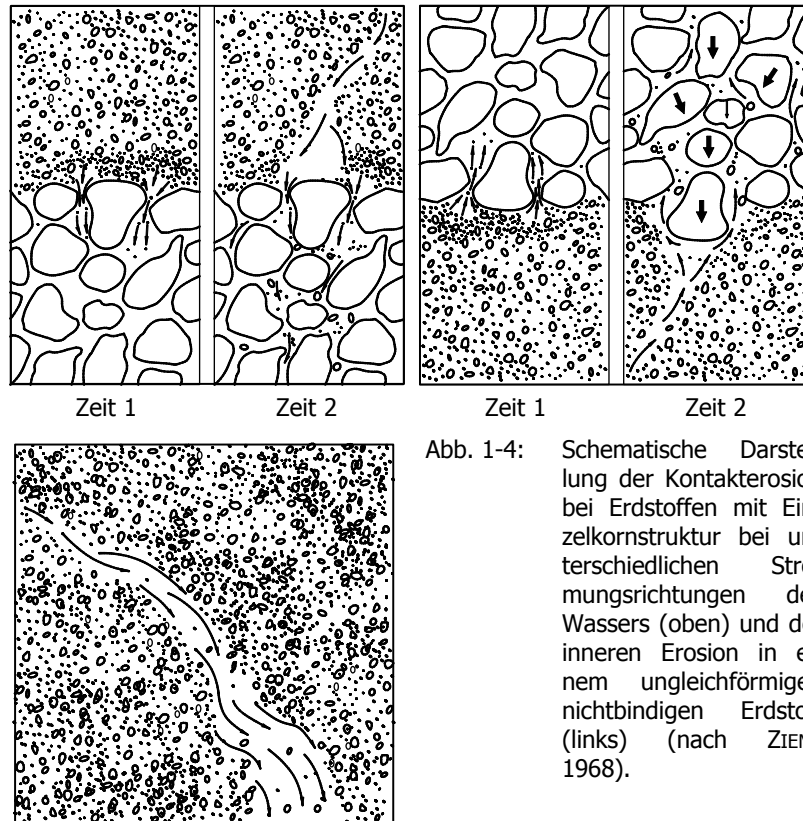


Abb. 1-4: Schematische Darstellung der Kontakterosion bei Erdstoffen mit Einzelkornstruktur bei unterschiedlichen Strömungsrichtungen des Wassers (oben) und der inneren Erosion in einem ungleichförmigen nichtbindigen Erdstoff (links) (nach ZIEMS 1968).

Unter den räumlichen, geometrischen und geologischen Bedingungen bei denen die Kanäle im Allgemeinen verlegt werden (Abb. 1-2), sind die Kriterien für Suffosions- und Erosionssicherheit häufig nicht erfüllt. Die Kontaktflächen zwischen der Grabenverfüllung und dem anstehenden Boden, die unterschiedlichen Materialien für die Bettung und Verfüllung, der Lagenweise Einbau der Verfüllung und die unterschiedlich starke Verdichtung der Erdstoffe, sowie eventuell vorhandene Wurzel- und Wühltiergänge (Fugenerosion) bergen ein hohes Risiko für Suffosions- und Erosionsvorgänge. Entscheidend für das Auslösen der schädlichen Deformationsprozesse sind jedoch letztendlich immer die aus der Bewegung des Wassers resultierenden Strömungskräfte, welche auf das Korngerüst des Erdstoffes übertragen werden. In Abb. 1-2 sind die wichtigsten Quellen für das hierfür benötigte Wasser dargestellt:

- Das Sickerwasser, welches von der Geländeoberfläche oder von seitlichen Randzuflüssen der Schwerkraft folgend dem Grundwasser zufließt. Durch Wechsellagerung der Sedimente und unterschiedliche Verdichtung einzelner Lagen kann das Sickerwasser auch gewisse Strecken horizontal zurücklegen (Stauwasserhorizonte) und so seitlich in die Sedimente der Grabenverfüllung strömen.
- Das Wasser, welches aus defekten Regenwasserkanälen in die ungesättigte Zone exfiltriert und der Schwerkraft folgend wiederum als Sickerwasser dem Grundwasser zufließt.
- Aus defekten Wasserleitungen können selbst innerhalb kurzer Zeit beträchtliche Mengen Wasser austreten.
- Ein großer Teil der Kanäle liegt im Grundwasser oder Grundwasserschwankungsbereich und sind somit wechselnden hydraulischen Belastungen ausgesetzt. Zu Zeiten hoher Grundwasserstände kann über Leckagen große Mengen Grundwasser in den Kanal infiltrieren und sofern die Suffosions- und Erosionssicherheitskriterien nicht erfüllt sind, entsprechende Mengen an Lockersedimente mit einspülen. Im Zuge von Baumaßnahmen führt die Trockenlegung der Baugrube häufig zur großräumigen Grundwasserabsenkung oder zu einem lokalen Anstieg des Grundwasserspiegels durch Einleitung des aus der Baugrube geförderten Grundwassers, wodurch es wiederum zu einer akuten, erosiven Materialmobilisierung kommen kann.

Sind die geometrischen Suffosions- und Erosionskriterien nicht erfüllt und über einen entsprechenden Zeitraum das hydraulische Suffosions- und / oder Erosionssicherheitskriterium überschritten, dann kann es zu einem fortwährenden Materialeintrag in die Kanalisation und einem Massendefizit in den überlagernden Sedimenten bis an die Geländeoberfläche und einem Einsturz der Straßenoberfläche kommen.

1.4.3 Das Problem der Hohlraumdetektion

Bei einer TV-Befahrung lässt sich allein aus der Tatsache, dass an einer Stelle im Kanal Ablagerungen angetroffen werden nicht zwangsläufig auf die Entstehung eines Hohlraumes an dieser Stelle schließen. Im umgekehrten Fall kann im Umfeld des Kanals ein Hohlraum entstehen, ohne dass an dieser Stelle die eingeschwemmten Sedimente bei einer TV-Befahrung zu sehen sind. Diese Unsicherheit bei der Zuordnung von Ablagerungen mit der Entstehung eines Hohlraumes beruht auf mehreren Gründen:

- Die eingeschwemmten Sedimente wurden mit dem im Kanal fließenden Abwasser weggespült.
- Die Sedimente müssen sich nicht zwangsläufig an dem Ort ablagern, an dem sie in den Kanal eingespült wurden. Sie können sich auch an einer völlig anderen Stelle im Kanal, an bereits vorhandenen Hindernissen wie z.B. ein Muffenversatz oder eingewachsenen Wurzeln, ablagern. Oder die Transportkraft des Abwassers nimmt ab, weil sich die Fließgeschwindigkeit des Wassers aufgrund eines kleineren Rohrgefälles oder eines größeren Rohrdurchmessers verringert.
- Die Ablagerungen wurden bei einer routinemäßigen Kanalreinigung entfernt. Um den Rückstau von Abwasser an Abflusshindernissen jeglicher Art zu vermeiden, werden die Kanäle im allgemeinen in regelmäßigen Abständen gereinigt. Bei dem hauptsächlich angewendeten Reinigungsverfahren, dem Hochdruckspülverfahren, wird ein Spülschlauch mit einer Reinigungsdüse gegen die Fließrichtung des Abwassers in den Kanal eingeführt. Beim Zurückziehen des Spülschlauches wird der Kanal durch den Druck der Wasserstrahlen aus den Düsen gereinigt. Ablagerungen werden dabei vom Rohr gelöst und weggespült.
- Entsprechend ATV Merkblatt M 143 Teil 2 Optische Inspektion, müssen die Kanalrohre vor jeder Inspektion mit einer TV-Kamera so gereinigt sein, dass der Istzustand des Kanals einwandfrei erfasst und beurteilt werden kann. Eventuell vorhandene Sedimente werden somit entfernt, bevor die TV-Inspektion durchgeführt wird.

Genauere Untersuchungen oder offizielle Statistiken über das Zusammenspiel verschiedener Randbedingungen für die Entstehung von Hohlräumen im Umfeld von Kanälen, deren Häufigkeit, Größenverteilung, Sanierungs- und Folgekosten etc. liegen zur Zeit bei der ATV nicht vor. Nach Aussage mehrerer Kanalnetzbetreiber ist jedoch die Hohlraumbildung und ihre Folgen ein häufiges, weit verbreitetes und kostspieliges Phänomen. Aus diesem Grund hat sich im Juni 2002 unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. J. Hartmann vom Fachbereich Stadtentwässerung und Abfallwirtschaft der Stadt Braunschweig als Sprecher die ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-5.8 2003: "Detektion von Lagerungsdefekten und Hohlräumen in der Umgebung von erdverlegten Abwasserkanälen" mit dem Ziel gebildet, verschiedene Verfahren zu testen, die ein frühzeitiges Erkennen von Lagerungsdefekten und Hohlräumen sowohl von der Geländeoberfläche als auch vom Kanalrohr aus ermöglichen.

1.5 Die Sanierungsverfahren für defekte Kanäle

Werden bei einer TV-Befahrung sanierungsbedürftige Schäden an einem Kanal entdeckt, dann stehen dem Kanalnetzbetreiber verschiedene Sanierungsverfahren zur Verfügung. Alle Sanierungsverfahren haben das Ziel, die vorhandenen Schäden so zu beseitigen, dass ein vorher definierter Sollzustand des Kanalnetzes erreicht wird. Die einzelnen Sanierungsverfahren werden in drei Hauptgruppen unterteilt (Tab. 1-6) (DIN EN 752-5):

- **Erneuerung:** Herstellung neuer Abwasserleitungen und -kanäle in der bisherigen oder einer anderen Linienführung, wobei die neuen Anlagen die Funktion der ursprünglichen Abwasserleitungen und -kanäle einbeziehen
- **Reparatur:** Behebung örtlich begrenzter Schäden
- **Renovierung:** Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Abwasserleitungen und -kanälen unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz

Um Begriffsverwechslungen zu vermeiden, sei an dieser Stelle auch auf die älteren Begriffsdefinitionen nach ATV-Merkblatt M 143 Teil 1 hingewiesen. Dort wird der Begriff "Sanierung" als Untergruppe zur Schadensbehebung im Sinne von Renovierung nach DIN EN 752 verwendet (Tab. 1-5).

Tab. 1-5: Gegenüberstellung der Begriffsdefinitionen zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Kanalisationen nach DIN EN 752 und ATV-M 143 (MUNLV-NRW 1999).

neu: nach DIN EN 752	alt: nach ATV-M 143 Teil 1
Sanierung	Schadensbehebung
Reparatur	Instandsetzung
Renovierung	Sanierung
Erneuerung	Erneuerung

Die grundsätzliche Entscheidung für eine der Hauptgruppen zur Kanalschadensbehebung wird maßgeblich beeinflusst (UVM-BW 2000):

- von der Möglichkeit und der Wirtschaftlichkeit einer technischen Veränderung,
- von der Entscheidung über den Weiterbetrieb der Haltung oder des betroffenen Netzbereiches,
- von der örtliche Situation wie Lage im Gelände oder Lage im Straßen-

- raum und zu anderen Ver- und Entsorgungsleitungen,
- von der Art des Kanals, ob Regen-, Misch- oder Schmutzwasserkanal,
- von den Verkehrslasten und anderen Lasten,
- vom Grundwasserstand,
- von den Abwasserverhältnissen in der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft, sowohl hinsichtlich der Qualität (z.B. Einleitung aggressiver Abwässer, warmer Abwässer etc.) als auch der Quantität (hydraulische Auslastung),
- vom Kanalzustand, den baulichen Merkmalen, der Schadensart, dem Schadensumfang und den Schadensursachen.

Tab. 1-6: Prozentuale Verteilung der eingesetzten Sanierungsverfahren mit errechneten durchschnittlichen Sanierungskosten (nach ATV-DVWK-Umfrage 2001 und STEIN 1999).

	Kosten [€/m]	Häufigkeit [%]		Sanierungsverfahren
Erneuerung	736	53	48	offene Bauweise
			5	geschlossene Bauweise
Reparatur	427	30	18	Ausbesserungsverfahren
			7	Injektionsverfahren
			5	Abdichtungsverfahren
Renovierung	373	17	1	Beschichtungsverfahren
			15	Reliningverfahren
			1	Montageverfahren

Im Folgenden werden kurz die Injektionsverfahren als eine Möglichkeit der Kanalreparatur und die Reliningverfahren aus der Hauptgruppe Renovierung vorgestellt. Die Injektionsverfahren stellen eine Möglichkeit dar, mit der rechtzeitig erkannte Hohlräume verfüllt werden könnten. Näheres hierzu wird in Kapitel 7 beschrieben. Die Reliningverfahren werden in Kapitel 1.5.2 kurz vorgestellt, da sich bei der Kanalsanierung mit Reliningverfahren Probleme ergeben, für deren Lösung das in dieser Arbeit vorgestellt γ - γ -Messverfahren hervorragend geeignet ist.

1.5.1 Sanierung mit einem Injektionsverfahren

Unter Injektion (Einpressung) wird entsprechend DIN 4093 das Einbringen von pumpfähigen Injektionsmitteln unter Druck in Risse und Hohlräume des

1.5 Die Sanierungsverfahren für defekte Kanäle

umgebenden Baugrundes über entsprechende Einfüllstutzen verstanden. Die Injektionen dienen allgemein zur:

- Abdichtung örtlich begrenzter Undichtigkeiten des Kanals zur Vermeidung von In- und Exfiltrationen.
- Wiederherstellung der statischen Tragfähigkeit des Baugrundes.

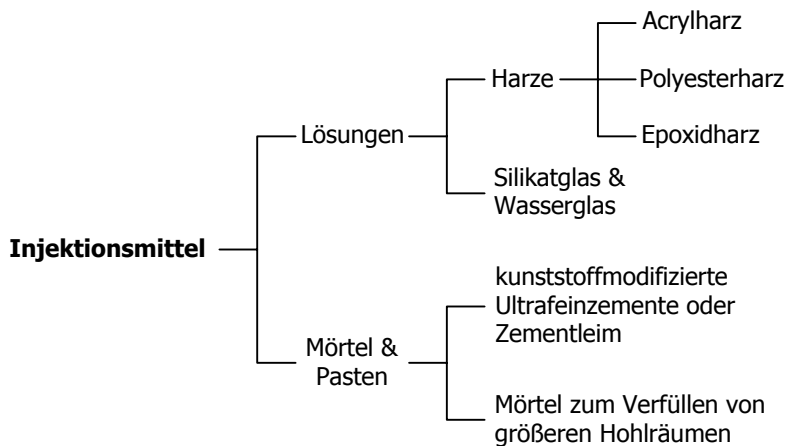


Abb. 1-5: Einteilung der Injektionsmittel (nach MÜHLHOFER 2001).

Die Injektion kann von außen, der Geländeoberfläche, und vom Inneren des Kanals heraus, entweder manuell oder mit einem Injektionsroboter, erfolgen. Injektionen von außen dienen vor allem zur Verfestigung des den Kanal umgebenden Lockergesteins und zur Abdichtung von Schadstellen des Kanalrohrs bei nicht begehbaren Kanälen. Injektionen von innen dienen zur Abdichtung von Rohrverbindungen, zum Verfüllen von Rissen und Hohlräumen in der Leitungstrasse (DOHMANN et al. 1993). Je nach Zielsetzung und Einsatzort wurden komplexe Injektionsrobotersysteme entwickelt, die je nach Verfahren mit unterschiedlichen Injektionsmitteln (Abb. 1-5) und Mischtechniken arbeiten.

Von besonderem Interesse im Zusammenhang mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren der Hohlraumdetektion mit einer γ - γ -Sonde sind die Boden- und Hohlrauminjektionen von innen. Hierfür werden durch die Kanalwandung mit dem Roboter Bohrungen hergestellt, in welche über Injektionslanzen oder -stutzen das entsprechende Injektionsmittel in das umgebende

Lockergestein oder den Hohlraum eingepresst wird. Die Möglichkeiten eines kombinierten Einsatzes einer Hohlraumortung mit einer γ - γ -Sonde und ggf. einer Verfüllung des Hohlraumes aus dem Kanal heraus mit einem Injektionsroboter wird in Kapitel 7.4 beschrieben.

1.5.2 Sanierung mit einem Reliningverfahren

Kann bei einem schadhaften Kanal als Sanierungsverfahren eine im Vergleich zur Erneuerung und Reparatur kostengünstige Renovierung durchgeführt werden, dann kommt hierbei fast ausschließlich ein Reliningverfahren, auch Auskleidungsverfahren genannt, zum Einsatz (Tab. 1-6). Allen Reliningverfahren ist gemeinsam, dass ein zweites Rohr, der sogenannte Inliner in den vorhandenen Kanal eingezogen wird (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR 2000, ATV-M 143-3, ATV-M 143-7). Der Inliner dient zur Wiederherstellung der Dichtheit, der Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Angriffe wie Abrasion und chemische Angriffe wie z.B. biogene Schwefelsäurekorrosion. Ebenso kann die Tragfähigkeit wiederhergestellt bzw. erhöht werden. Als Reliningverfahren werden angewendet:

- das Rohrstrangrelining: Hierbei werden Vorort eine größerer Anzahl von Einzelrohren, in der Regel aus HDPE, zu einem Rohrstrang zusammengesweißt. Anschließend wird der Rohrstrang über eine Einziehbaugrube in den bestehenden Kanal eingezogen.
- das Kurzrohrrelining: Hierbei werden Einzelrohre taktweise in die zu sanierende Haltung eingebracht. An der Schachtsohle werden die Kurzrohre zusammengesteckt und der Rohrstrang anschließend mit Hilfe einer Traverse um eine Rohrlänge in den Kanal hineingezogen bzw. mit hydraulischen Pressen geschoben.
- das Wickelrohrverfahren: Hierbei wird ein Endlos-PVC-Stegprofil mit einer speziellen Wickelmaschine an der Schachtsohle zu einem Inlinerrohr geformt und dieses durch die stetige Drehung der Wickelmaschine bis zum nächsten Einstiegsschacht bewegt.
- das Schlauchrelining: Hierbei wird der Inliner aus einem kunstharzgetränkten, glasfaserverstärkten Gewebeschlauch hergestellt und mit einem Inversionsrohr in den Kanal eingestülpt.

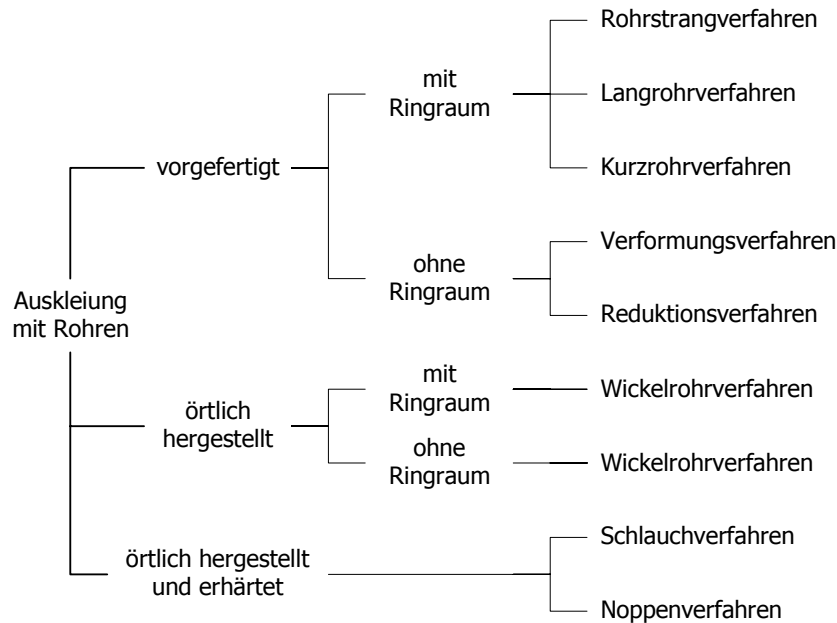


Abb. 1-6: Einteilung der Reliningverfahren (nach STEIN 1999).

Je nach Reliningverfahren können Kanäle mit einem Innendurchmesser von DN 80 bis DN 2000 saniert werden (DOHMANN et al. 1993).

1.5.3 Das Problem des Auffindens von Hausanschlüssen bei Reliningverfahren

Alle Reliningverfahren haben nach dem Einbringen und ggf. Aushärten des Inliners das Problem des Auffindens und der Wiederherstellung der Hausanschlüsse. In der Praxis werden die Positionen der Hausanschlüsse vor dem Einbringen des Inliners mit einem Maßband eingemessen. Nach der Sanierung des Kanals wird der Inliner mit einem Fräsroboter (Abb. 1-7) an der entsprechenden Position wieder geöffnet und der Hausanschluss eingebunden. Allerdings werden dabei die zu öffnenden Anschlüsse oft nicht genau genug getroffen, so dass es durch Fehlfräsungen zu Schäden an dem neu sanierten Kanal kommt. Dies wiederum macht nicht kalkulierte Folgesanierungen notwendig.

Schuld daran ist die hohe Messgenauigkeit der angewandten Messverfahren, welche den Anforderungen der Praxis nicht gerecht werden (RÖSER

2001). Selbst wenn man die Fehler ausschließt, die durch unsaubere Protokollführung und ungenaues Einmessen der Anschlüsse durch unentgeltliche Arbeiter entstehen, verbleiben andere subjektive und systematische Fehler. Zu den subjektiven Fehlern beim Einmessen gehören z.B. Ablesefehler durch unterschiedliche Ablesewinkel, unterschiedliche Bezugspunkte, unterschiedliche Straffung des Maßbandes etc. Hinzu kommen systematische Fehler wie durch unterschiedliche Wärmedehnung des Maßbandes zum Zeitpunkt des Einmessens im Vergleich zum Auffräsen der Anschlüsse, Verdrehung des Maßbandes im Kanal, unterschiedliche Lage in Kanalbögen etc.

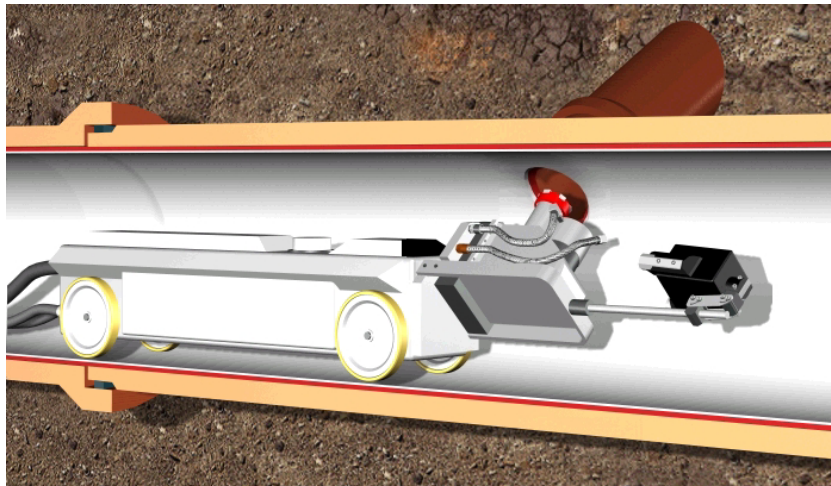


Abb. 1-7: Beispiel eines Fräsroboters zum Öffnen von Hausanschlüssen bei einem Reliningverfahren (KMG Deutschland GmbH).

Eine zusätzliche Ursache für Fehlfräsungen stellt häufig der Zeitdruck dar unter dem das Öffnen und Einbinden der Anschlüsse stattfinden muss. Die Hausanschlüsse können meist nur begrenzte Zeit aufgestaut werden können, ohne dass es durch den Rückstau des Abwassers zu Überschwemmungen in den angeschlossenen Bauwerken kommt.

Zur Vermeidung der kosten- und zeitintensiven Fehlfräsungen sollte laut RÖSER (2001) die Messungengenauigkeit deutlich kleiner als ± 50 mm sein, damit auch Anschlüsse mit lediglich DN 100, wie es bei Hausanschlüssen sehr oft der Fall ist, ohne Beschädigung des frisch sanierten Kanals geöffnet und fachgerecht eingebunden werden können.

1.6 Stand der Technik und Forschung

Die entsprechenden Gesetze und Verordnungen des Bundes und der Länder (Kap. 1.2) verpflichten die Kanalnetzbetreiber zur Inspektion, Wartung und Instandhaltung der Kanäle. Da die Gültigkeit der Gesetze und Verordnungen normalerweise über einen langen Zeitraum erhalten bleiben soll, sind diese im Wesentlichen in ihren Formulierungen allgemein gehalten und die Art und Weise der darin geforderten Maßnahmen sind zeitgemäß jeweils entsprechend den "allgemein anerkannten Regeln der Technik" oder entsprechend dem "Stand der Technik" durchzuführen.

Es handelt sich hierbei um juristische Begriffe im Umweltrecht, wobei mit den "allgemein anerkannten Regeln der Technik" Regeln gemeint sind, die auf wissenschaftlichen Grundlagen oder auf fachlichen Erkenntnissen beruhen, sich in der Praxis bewährt und allgemein durchgesetzt haben und damit Gedankengut der auf dem betreffenden Fachgebiet tätigen Personen geworden sind. Von dort gelangen sie über Fachausschüsse und Sachverständigengremien in die vielfältigen technischen Regelwerke (z.B. ATV) und finden Eingang in Rechts- und Verwaltungsvorschriften. Die "allgemein anerkannten Regeln der Technik" beschreiben somit einen Standard, der sich am Durchschnitt bestehender Anlagen orientiert, wodurch jedoch der Fortschritt der Technik auf diesem Gebiet erheblich gebremst wird (MUNLV-NRW 1999; UMWELTLEXIKON 2003)¹.

Abweichend davon stellt der "Stand der Technik" gewissermaßen die Spitzenposition der technischen Entwicklung dar. Er wird durch fortschrittliche Verfahren bestimmt, auch wenn diese sich noch nicht in der Praxis allgemein durchgesetzt haben. Es genügt, wenn die Eignung festgestellt wurde, beispielsweise dadurch, dass vergleichbare Verfahren, Einrichtungen und Abläufe bereits mit Erfolg in einem Betrieb erprobt worden sind. „Stand der Technik“ stellt damit ein höheres Anforderungsniveau dar, als die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ (MUNLV-NRW 1999; ZUBER 2003).

¹ Im Zuge der Fortschreibung von europäischen Richtlinien hat die EU 1995 den Begriff "BAT", der besten verfügbaren Techniken geprägt (best available techniques). Beste bedeutet, die im Hinblick auf ein hohes Schutzniveau zur Verhütung oder Minimierung von Umweltbelastungen wirksamsten Technologien. Verfügbar bedeutet, dass die Technologien in einem solchen Maßstab entwickelt und erprobt sein müssen, damit die Anwendung im industriellen Rahmen mit der erforderlichen kommerziellen Zuverlässigkeit möglich ist. Die wirtschaftliche Vertretbarkeit muss dabei gewährleistet sein (BVDM 2003).

Die TV-Befahrung zur Kanalinspektion nicht begehrbarer Kanäle entspricht den allgemein anerkannten Regeln der Technik, sie wird im ATV-Merkblatt M 143-2 genau beschrieben (Kap. 1.3). Sonstige den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechende Inspektions- und Prüfverfahren wie zum Beispiel die Dichtheitsprüfung mit Wasser, Luftüber- oder Unterdruck werden u.a. in den ATV-Merkblättern M 143-6, bei BÖLKE (1996), bei DOHMANN et al. (1993) und bei STEIN (1999) ausführlich beschrieben.

Ein Verfahren zur Hohlraumdetektion in der Umgebung erdverlegter Kanäle hat sich derzeit auf dem Markt noch nicht etabliert und hat damit auch keinen Eingang in die " allgemein anerkannten Regeln der Technik" gefunden. Gleichwohl wurden in der jüngsten Vergangenheit große Anstrengungen unternommen, klassische zerstörungsfreie Prüfmethode und geophysikalische Messverfahren auf diesen speziellen Anwendungsfall hin zu adaptieren. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass als Ergebnis dieser Forschungen sich ein einzelnes Verfahren zur Lösung aller Fragestellungen herauskristallisiert wird, da:

- die Erwartungen und Fragestellungen der Kanalnetzbetreiber an die Messungen sehr unterschiedlich sind.
- die Messbedingungen (Tiefenlage, Durchmesser, Rohrwandstärke, Füllungsgrad und Zugänglichkeit der Kanäle, Grabenverfüllung, Geologie, Grundwasserstand, Wassersättigung des Bodens etc.) sehr heterogen sind.
- die Eindringtiefen der Messungen je nach Art des verwendeten Messverfahrens begrenzt sind und eine größere Eindringtiefe meist eine geringere Detailauflösung zur Folge hat.
- manche Messverfahren gar nicht oder nur schlecht funktionieren, wenn der Kanal im Grundwasser liegt.
- sich nicht alle Messverfahren soweit miniaturisieren lassen, dass sie auch in nicht begehrbaren Kanälen angewendet werden können.
- die Messergebnisse eines einzelnen Messverfahrens meist mehrdeutig sind und sich nur mit Zusatzinformationen anderer Messverfahren oder mit einer gewissen Unsicherheit interpretieren lassen.

Daher muss für jeden Einzelfall unter Beachtung aller Randbedingungen ganz gezielt ein bestimmtes Verfahren ausgewählt werden. Da die verschiedenen Messverfahren für die spezielle Anwendung im Bereich der Kanalinspektion im Wesentlichen Neuentwicklungen und Produkte aus jüngsten Forschungsprojekten sind, liegen nur wenig Erfahrungsberichte vor. Aus diesem Grund hat

sich im Juni 2002 unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. J. Hartmann vom Fachbereich Stadtentwässerung und Abfallwirtschaft der Stadt Braunschweig die ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-5.8 2003: "Detektion von Lagerungsdefekten und Hohlräumen in der Umgebung von erdverlegten Abwasserkanälen" mit gebildet. Ihr Ziel ist es, die verschiedenen Verfahren zu testen und in einem ATV-Merkblatt zu beschreiben. Prinzipiell steht eine breite Palette an Verfahren hierfür zur Diskussion, welche sich wiederum in zwei Gruppen unterteilen lassen:

1) Messungen von der Geländeoberfläche aus:

- Reflexions- und Refraktionsseismik
- Radar (auch bezeichnet als: Bodenradar, Georadar, elektromagnetische Reflexion (EMR), Ground Penetration Radar (GPR), Radio Echo Sounding (RES))
- Gravimetrie
- Geoelektrik

2) Messungen vom Inneren des Kanalrohres aus:

- γ - γ -Sonde
- Reflexions- und Refraktionsseismik (nur bei begehbaren Kanälen)
- Ultraschallverfahren (Ultraschall-Echo, Impactecho)
- Radar (siehe oben)
- Full Wave Sonic Log
- Mikrowellenrückstreusensor

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren mit ihren verfahrensspezifischen Einschränkungen in der Anwendbarkeit sind in den jeweiligen Publikationen nachzulesen. Einen Überblick geben KABBE et al. (2001), EISWIRTH (1995), EISWIRTH et al. 1995 und EISWIRTH et. al. (1999).

Für die Inspektion, Wartung und Sanierung der nicht begehbaren Kanäle wurden in den letzten Jahren verstärkt Robotersysteme entwickelt. Hierbei wären zu nennen:

- K A R O (Kanalroboter)
(MUNSER et al. 2000, KUNTZE et al. 1994)
Projekt URL: <http://www.iitb.fhg.de/servlet/is/1604/>
- K U R T (Kanal-Untersuchungs-Roboter - Testplattform)
(HERTZBERG & KIRCHNER 1996; KIRCHNER & HERTZBERG 1997; SCHÖNHERR et al. 1999)
Produkt-Webseite: <http://www.kurt2.de>

- M A K R O (Mehsegmentiger autonomer Kanalroboter)
(ROME et al. 1999; ROME et al. 2001; SCHOLL et al. 2000)
Projekt URL: <http://www.ais.fhg.de/projects/Makro/makro.html>
- P I R A T (Pipe Inspection Real-Time Assessment Technique)
(KIRKHAM et al. 1999)
Projekt URL: http://www.cmst.csiro.au/.../vtd_pirat.htm
- Pipe Rover / Pearl Rover
(BRADBEER et al. 2000; BRADBEER 2000)
Projekt URL: <http://www.ee.cityu.edu.hk/~cpelab/Pearltech/Default.html>

Einen Überblick zum Thema Kanalrobotik mit weiterführender Literatur und Links zu den jeweiligen Projekten gibt das Fraunhofer Institut für Autonome Intelligente Systeme (AIS) online im Internet unter URL: <http://www.kanalrobotik.de/de/frameset.html>²

Zur Problematik der Hausanschlussfindung bei einer Kanalsanierung mit einem Reliningverfahren (Kap. 1.5.3) sind dem Autor neben dem hier vorgestellten Verfahren mit der γ - γ -Sonde lediglich zwei weitere Ansätze bekannt:

1. Vor dem Einbringen des Inliners wird in den Anschlusskanälen ein Spezialpacker mit Sender gesetzt. Nach dem Einziehen des Inliners und Verfüllen des Ringraumes wird ein Hochdruckschneidegerät mit integriertem Empfänger positioniert, die Öffnung freigeschnitten, der Packer zerstört und der Sender geborgen (DOHMANN et al. 1993; STEIN & NIEDEREHE 1987; STEIN 1999).
2. Das Fraunhoferinstitut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB) in Karlsruhe erprobt zur Zeit den Einsatz eines Mikrowellensensor zur Ortung von verdeckten Hausanschlüsse (KÜNZEL 2002).

Eine Gesamtbewertung des Systems Kanal-Bettung-Verfüllung war das Ziel des DFG-Projektes SAM, in dem auch die vorliegende Arbeit eingebunden war:

- S A M
(Schadensdiagnose bei Abwasserkanälen mit Multisensorsystemen)
(EISWIRTH & HÖTZL 1998, EISWIRTH 2000, EISWIRTH et al 2000 a, EISWIRTH et al 2000 b, EISWIRTH et al. 2001; EISWIRTH et al. 2002)
Projekt URL: http://www.agk.uni-karlsruhe.de/projekte/projekte_hydro/eiswirth/multisensorsysteme.html

² gesehen am 14.08.2003

Das Forschungsprojekt SAM wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) vom 1. November 1997 bis zum 31. Oktober 2002 gefördert. Schwerpunkt des fünfjährigen Projektes war die interdisziplinäre Entwicklung verschiedener Sensorsysteme zur Untersuchung und Bewertung der Kanalisation bezüglich der Dichtigkeit der Rohre, deren baulichen Zustand und Bettung durch die Kombination und intelligente Fusion verschiedener Detektionsverfahren. Als Forschergruppe schlossen sich zusammen: der Lehrstuhl für Angewandte Geologie (AGK) der Universität Karlsruhe, das Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT) der Universität Karlsruhe und das Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB). Als aktiven Partner für die Erprobung und den Einsatz der entwickelten Systeme in realen Abwassersystemen konnte das Tiefbauamt der Stadt Rastatt gewonnen werden. Es stand der Forschergruppe durch Bereitstellung und Vorbereitung von Kanalabschnitten, Bereitstellung einer Kanal-Teststrecke und Beratung in Hinblick auf eine problemorientierte Sensorentwicklung aktiv zur Seite.

Neben dem hier vorgestellten γ -Messverfahren (HESKE 2003) untersuchte und optimierte die AGK den Einsatz von hydrochemischen Sensoren (HELD 2003) zur Qualifizierung und Quantifizierung von infiltrierendem Grundwasser in das Kanalrohr. Hydrogeologische Messungen, wie weit sich Schadstoffe im Erdreich ausbreiten, begleiteten die Untersuchungen. Gemeinsam mit dem MRT forschte die AGK erfolgreich an verschiedenen geoelektrischen Messsystemen (WOLF 2003) zur Ortung von hydraulisch aktiven Leckagen. Das MRT untersuchte und optimierte den Einsatz des Rohrimpaktometers (HERBST 2003), ein akustisches System zur Ortung von Rissen in der Kanalrohrwandung und Detektion von Hohlräumen und Lagerungsdefekten im Umfeld des Rohres. Das IITB am Fraunhofer-Institut Karlsruhe optimierte ein optisches System, den Lichtschnittsensor (DEUTSCHER et al. 2003), zur Vermessung des Kanalrohres auf Deformationen, Rissbreiten, Hausanschlüsse etc. während der Inspektion. Die Forschung und Weiterentwicklung an einem Mikrowellenrückstreusensor (MUNSER & HARTRUMPF 2003) ergab, dass mit diesem Sensor aufgrund hydraulisch wirksamer Leckagen durchnässte Bereiche im Umfeld des Kanalrohres erkannt werden können.

Die beschriebenen Sensoren wurden von den einzelnen Projektpartnern vorläufig getrennt entwickelt, optimiert und für den Einsatz im Kanal angepasst. Für jeden Sensor konnte der Einsatzbereich bestimmt werden und die Vor- und Nachteile der Sensoren herausgearbeitet werden. Die optimale Ergänzung der einzelnen Sensoren zum Multisensorsystem wurde durch eine wissenschafts-

te Sensorfusion (FREY & KUNTZE 2003) der Messdaten am IITB auf der Grundlage von lernfähigen Neuro-Fuzzy-Methoden erreicht.

Durch die enge Zusammenarbeit fachlich sehr unterschiedlicher Forschungsgruppen (Geologie, Physik, Messtechnik, Informationstechnologie) konnte ein optimaler Synergieeffekt bei der Lösung der komplexen Problemstellung erreicht werden. Angestrebt wird nun die Umsetzung des erworbenen Know-hows in die Entwicklung eines professionell einsetzbaren Multisensorkanalroboter, der den industriellen Anforderungen beim täglichen Einsatz im Abwasserkanal entspricht.

1.7 Zusammenfassende Problemstellung

Für die kurz- bzw. mittelfristige Sanierung von ca. 75.731 km öffentlicher Kanäle werden Kosten in Höhe von ca. 45 Mrd. € veranschlagt. Die langfristig notwendige Sanierung weiterer 62.433 km öffentlicher Kanalisation wird die Kanalnetzbetreiber voraussichtlich zusätzliche 37 Mrd. € kosten (Kap. 1.1). Da die Kanalnetzbetreiber in der Bundesrepublik Deutschland gesetzlich zur Inspektion, Wartung und Instandhaltung der Kanäle verpflichtet sind, stehen sie angesichts dieser gewaltigen Summen die allein für die Kanalsanierung aufgebracht werden müssen, vor einer großen finanziellen Herausforderung (Kap. 1.2). Mehr denn je sind die Forschungseinrichtungen, Firmen und Ingenieurbüros gefordert, neue, bessere und effektivere Systeme und Methoden zur Kanalinspektion und Sanierung zu entwickeln (Kap. 1.6), damit die vorhandenen finanziellen Mittel zielgerichtet und möglichst kostenminimierend eingesetzt werden können. Je mehr Informationen über den Zustand des Kanals und der Kanalbettung bei einer Inspektion erkannt und dokumentiert werden, umso besser kann die Dringlichkeit seiner Sanierung eingestuft und das, dem Schadensbild optimal entsprechende, effektivste und kostengünstigste Sanierungsverfahren (Kap. 1.5) ausgewählt werden.

Bei defekten Kanälen kommt es häufig durch den Eintrag von Boden- und Bettungsmaterial zur Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Rohraufagers und zur Hohlraumbildung im Umfeld des Kanals (Kap. 1.4). Ein Messverfahren zur Detektion der Hohlräume und Lagerungsdefekte in ihrer frühen Entstehungsphase würde dem Kanalnetzbetreiber die Möglichkeit zur Sanierung des Schadens einräumen, bevor es durch Lageveränderungen des Kanals zum Riss, Muffenversatz und Rohrbruch oder infolge der Hohlraumentstehung zur Oberflächenabsenkung und zum Fahrbahneinbruch kommt. Eine Gefährdung der Anwohner, Passanten und Verkehrsteilnehmer sowie kostspielige Schäden

an Gebäuden wären damit zu vermeiden.

Bei den zur Kanalsanierung (Kap. 1.5.2) häufig eingesetzten Reliningverfahren tritt in der Praxis nach dem Einbringen des Inliners das Problem auf, dass die Hausanschlüsse durch den Inliner verdeckt sind und vom Kanal aus optisch nicht mehr zu erkennen sind (Kap. 1.5.3). Die verdeckten Hausanschlüsse müssen jedoch möglichst schnell wieder aufgefräst und in den sanierten Kanal eingebunden werden, da die einmündenden Kanäle nur eine begrenzte Zeit rückgestaut werden können. Ein großer Teil der Hausanschlüsse hat lediglich einen Innendurchmesser von 10 cm (DN100), so dass eine Ortung der Hausanschlüsse mit einer Genauigkeit von deutlich besser als ± 5 cm notwendig ist, damit der Kanal durch den Fräsvorgang nicht beschädigt wird. Ein Messsystem auf dem Fräsroboter mit dem die Hausanschlüsse mit der geforderten Genauigkeit geortet werden können um sie anschließend sofort aufzufräsen, würde kostspielige Fehlfräsungen verhindern und den Sanierungsfortschritt beschleunigen.

1.8 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine γ - γ -Sonde (Kap. 3.1) für den Einsatz im Kanal zur Detektion von Hohlräumen (Kap. 1.4.3) und zur Ortung von verdeckten Hausanschlüssen (Kap. 1.5.3) zu entwickeln und die prinzipielle Eignung des Messverfahrens hierfür durch Labor- und Geländeversuche (Kap. 6) zu überprüfen. In der Bohrlochgeophysik werden γ - γ -Sonden bereits seit Jahren erfolgreich zur Dichtebestimmung der durchteuften Gesteine eingesetzt (Kap. 2.4). Die Arbeitshypothese war nun, dass sowohl Hohlräume als auch Hausanschlüsse eine Veränderung der scheinbaren spezifischen Dichte in diesem Bereich im Vergleich zur "normalen" Umgebung eines Kanals darstellen und diese Veränderungen der scheinbaren spezifischen Dichte mit einer entsprechend für den Einsatz im Kanal adaptierten γ - γ -Sonde messbar sein müssten. Es galt nun die Unterschiede im Messsignal mit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu erklären, die sich durch die unterschiedlichen Randbedingungen bei der Befahrung eines Bohrlochs und eines Kanals ergaben.

Zur Durchführung der Laborversuche wurde eine 6,5 m lange Teststrecke im Forschungszentrum Umwelt (FZU) der Universität Karlsruhe aufgebaut (Kap. 5.1). Für die Geländeversuche wurde ein geeigneter Kanalabschnitt mit Trennkanalisation in Rastatt ausgewählt, entsprechend instrumentiert und präpariert (Kap. 5.2). Mit den Versuchen sollte das Messsignal bei unterschiedlichen Hohlraumgeometrien erforscht und die Messgenauigkeit des Verfahrens und die optimalen Versuchsgeometrien ermittelt werden.

Zur Optimierung des Versuchsaufbaus und zur Unterstützung bei der Interpretation des Messsignals wurde die Entwicklung des Simulationsprogramms GLog in Auftrag gegeben (Kap. 4). Mit GLog sollten möglichst realitätstreue Simulationen von Kanalbefahrungen durchgeführt werden, um detaillierte Informationen über die Wechselwirkungen der γ -Strahlung mit der Materie und deren Auswirkungen auf das Messsignal zu erhalten. Die Simulationen sollten außerdem eine Prognose des Messsignalverlaufs für unterschiedliche Schadensbilder ermöglichen.

1.8 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Messverfahren zur Detektion von Hohlräumen im Umfeld von Kanalrohren wird das radioaktive Cäsiumisotop Cs-137 als γ -Quelle in einer Kanalsonde verwendet. Warum und unter welchen Voraussetzungen γ -Strahlung bei diesem Messverfahren eingesetzt werden kann, wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

Da γ -Strahlung niemals alleine, sondern immer als Folge von anderen radioaktiven Zerfällen oder Wechselwirkungen radioaktiver Strahlung mit Materie auftritt, werden in den folgenden Abschnitten zum besseren Verständnis auch die grundlegenden Eigenschaften der wichtigsten anderen Strahlungsarten dargestellt.

In der Bohrlochgeophysik findet das Wissen über die Wechselwirkungen zwischen γ -Strahlung und Materie bereits seit längerem seine praktische Anwendung in der Bestimmung der Dichte der durchteuften Gesteinsschichten. In Kapitel 2.4 wird das γ - γ -Messverfahren vorgestellt und die für das Verständnis des Messprinzips notwendigen Gleichungen aus den vorangegangenen Abschnitten noch einmal kurz zusammengefasst. Der erfolgreiche Einsatz von γ - γ -Sonden im Bereich der Bohrlochgeophysik lieferte die Grundlage für die Idee, das Messverfahren für den Einsatz in nicht begehbaren Kanälen zu adaptieren und Veränderungen der Dichte des umgebenden Materials, verursacht durch Hohlräume und Hausanschlüsse, zu detektieren.

Für die technische Anwendung und den sicheren Umgang mit radioaktiven Substanzen ist ein theoretisches Grundwissen über radioaktive Stoffe, die Entstehung von verschiedenen Arten an radioaktiver Strahlung und deren Wechselwirkungen mit der Materie notwendig. Der Mensch verfügt über keine Sinnesorgane um radioaktive Strahlung und deren gesundheitliche Gefahren (Kap. 3.3.1) wahrzunehmen, er ist dabei ganz auf technische Hilfsmittel angewiesen. Mit dem entsprechenden Wissen und den daraus sich ergebenden technischen und persönlichen Sicherheitsmaßnahmen (Kap. 3.3) sind die Risiken bei den fast unbeschränkten Einsatzmöglichkeiten radioaktiver Strahlung in Medizin und Technik auf ein Minimum zu beschränken.

2.1 Art und Eigenschaften der Strahlung

2.1.1 Materiestrahlung

Als Materiestrahlung, auch Teilchen- oder Korpuskularstrahlung genannt, werden kleinste Teilchen bezeichnet, welche eine Ruhemasse besitzen und mit hoher Geschwindigkeit den Raum durchfliegen. Die wichtigsten materiellen Strahlungsteilchen sind schnell fliegende Elektronen e , Protonen p , Neutronen n und Alphateilchen α . Alphateilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen (Heliumkerne), welche gemeinsam als besonders stabiles Gebilde aus einem größeren instabilen Atomkern ausgestoßen werden. Die bei der Umwandlung von Atomkernen ausgestoßenen Elektronen werden als Betateilchen β bezeichnet (VOGT & SCHULTZ 1992). Mit Ausnahme der Neutronen handelt es sich jeweils um elektrisch geladene Materieteilchen.

2.1.2 Wellenstrahlung

Elektromagnetische Wellen, auch als elektromagnetische Schwingungen bezeichnet, erscheinen in der Physik in den mannigfaltigsten Formen. Ihre Einteilung in verschiedene Gruppen erfolgt nach ihrer Wellenlänge λ und deren Erscheinungsformen (Abb. 2-1).

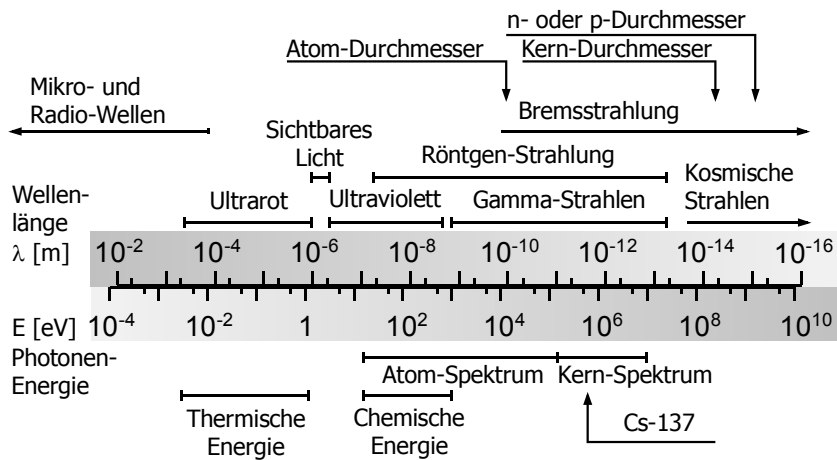


Abb. 2-1: Übersicht der Einteilung der unterschiedlichen Erscheinungsformen von elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge und Energie (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).

Das sichtbare Licht unterscheidet sich von γ -Strahlen lediglich durch die Wellenlänge (Abb. 2-1). Zwischen γ - und Röntgen-Strahlung X wird aufgrund ihrer Entstehung unterschieden. γ -Strahlung wird aus radioaktiven Atomkernen emittiert (Kap. 2.1.4). Röntgen-Strahlung entsteht bei Elektronenübergängen in der Atomhülle, sowie beim Auftreffen schnell bewegter geladener Teilchen, insbesondere Elektronen, auf schwere Materialien (Bremsstrahlung) wie Wolfram und Platin (z.B. in Röntgenröhren).

Schnelle periodische Änderungen (Schwingungen) von elektrischen und magnetischen Kraftfeldern können ähnliche Wirkungen wie materielle Strahlungsteilchen erzeugen. Zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit c , der Wellenlänge λ und der Schwingungszahl (Frequenz) ν besteht folgende Beziehung:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2.1)$$

Das elektrische und das magnetische Feld schwingen sowohl senkrecht zueinander und als auch senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle. Kurzwellige elektromagnetische Wellen lassen sich auch als teilchenhafte Wellenpakete, sogenannte Photonen oder Lichtquanten, auffassen. Sie können wie Teilchen auf die Materie einwirken, obwohl sie selbst keine Ruhemasse haben und nur Energie transportieren. Photonen breiten sich stets geradlinig und mit der Lichtgeschwindigkeit c aus (KOELZER 1997).

Die Begriffe hochenergetisches Photon und γ -Quant werden synonym verwendet. Ein Photon ist ganz allgemein ein Quant des elektromagnetischen Strahlungsfeldes unabhängig von der Energie der Strahlung. Der Begriff beschreibt die korpuskulare Natur der elektromagnetischen Strahlung. Ein γ -Quant ist ein energiereiches Photon der elektromagnetischen Strahlung.

2.1.3 Eigenschaften der Strahlung

Das Verhalten materieller Strahlungsteilchen ist charakterisiert durch ihre Bewegungsenergie, ihre Masse und ihre elektrische Ladung. Solange die Geschwindigkeit v eines bewegten Teilchen mit der Masse m klein gegen die Lichtgeschwindigkeit c bleibt, ist seine Bewegungsenergie E_{kin} gegeben durch die Beziehung:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2 \quad (2.2)$$

2.1 Art und Eigenschaften der Strahlung

Nach der Einsteinschen Relativitätstheorie gilt sobald sich die Teilchengeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert die genauere Formel:

$$E_{\text{kin}} = \left(\frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - m_0 \right) \cdot c^2 = (m - m_0) \cdot c^2 \quad (2.3)$$

Der Quotient

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

wird im Gegensatz zur Ruhemasse m_0 auch als relativistische Masse m bezeichnet, welche mit zunehmender Geschwindigkeit v größer wird (VOGT & SCHULTZ 1992). Die Ruheenergie m_0c^2 entspricht einem ruhenden Teilchen mit $v=0$ und einer Ruhemasse m_0 . Wegen der sehr kleinen Teilchenmassen werden Bewegungs- und Ruheenergie von Strahlungsteilchen nicht in Joule (J), sondern in Elektronenvolt (eV) angegeben. 1 eV ist die Bewegungsenergie eines Elektrons nach dem Durchlaufen eines elektrischen Spannungsgefälles im Vakuum von 1 Volt. Für die Ruheenergien der Atombestandteile gilt:

Elektron	$m_e \cdot c^2 = 0,511 \text{ MeV}$
Proton	$m_p \cdot c^2 = 938,272 \text{ MeV}$
Neutron	$m_n \cdot c^2 = 939,566 \text{ MeV}$

Da Photonen keine Ruhemasse haben und sich stets mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, lassen sich für die Berechnung ihrer Bewegungsenergie die obigen Formeln nicht anwenden. Die Bewegungsenergie von Photonen ist vielmehr proportional zur Schwingungszahl ν der Wellen, bzw. gemäß Gleichung (2.1) umgekehrt proportional zur Wellenlänge (VOGT & SCHULTZ 1992). Mit der Konstanten h , dem Planckschen Wirkungsquantum, erhält man eine Formel, mit der sich die Energie von Photonen ebenfalls in der Einheit Elektronenvolt berechnen lässt, sofern die Wellenlänge λ bzw. die Schwingungszahl ν der Wellen bekannt ist:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.4)$$

Damit lässt sich die Wellenlänge (Abb. 2-1) der γ -Strahlung berechnen, die beim radioaktiven Zerfall z.B. von Cs-137 (Abb. 2-7) emittiert wird:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 299792458 \text{ ms}^{-1}}{661,6 \cdot 10^3 \text{ eV}} = 1,87 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad (2.5)$$

Nach dem Äquivalenzprinzip von Einstein ist mit Gleichung (2.4) jedem Photon eine bestimmte träge Masse zugeordnet:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h \cdot \nu}{c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda} \quad (2.6)$$

Daraus ergibt sich der Impuls eines Photons zu:

$$p = m \cdot c = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} \quad (2.7)$$

In Gleichung (2.7) ist die Doppelnatur der Strahlung festgelegt. Das Wesen der Strahlung wird je nach Experiment entweder als Welle, z.B. bei Beugung und Interferenz, oder als Teilchen, Photon genannt, z.B. bei Polarisation und Streuung, erklärt. Die korpuskularen Eigenschaften treten um so mehr hervor, je energiereicher die Strahlung ist (DIMITRIJEVIĆ 1972).

2.1.4 Strahlungsquellen

Hochenergetische Strahlung kann mit Hilfe von Strahlungsgeneratoren wie zum Beispiel Röntgenröhren, Teilchenbeschleunigern und Kernreaktoren künstlich erzeugt, oder von radioaktiven Stoffen emittiert werden.

Radioaktive Stoffe sind Substanzen in denen infolge von Kernprozessen aus einzelnen Atomkernen spontan, d.h. ohne äußere Einwirkung, Strahlung in Form von Photonen und materiellen Teilchen emittiert wird. Die Zahl der Kernprozesse je Sekunde in einer radioaktiven Substanz wird als Aktivität A bezeichnet. Die Maßeinheit der Aktivität ist das Becquerel Bq. Als spezifische Aktivität A_{sp} wird der Quotient aus der Aktivität einer radioaktiven Substanz und deren Masse m bezeichnet, die Einheit ist Bq/kg. Die Radioaktivität ist also die Eigenschaft bestimmter Nuklide sich umzuwandeln. Die physikalische Größe der Radioaktivität ist die Aktivität.

Infolge des Zerfalls der radioaktiven Nuklide, nimmt die Anzahl der in einer Substanz noch vorhandenen radioaktiven Nuklide gemäß der Häufigkeit der Kernprozesse ab. Da der radioaktive Zerfall statistischen Gesetzen unterliegt, kann ein Gesetz nach dem der Zerfall abläuft nur für eine größere Anzahl von Kernen angegeben werden. Als Wahrscheinlichkeit für den Zerfall eines Bruchteils der vorhandenen radioaktiven Atomkerne N gilt die Zerfallskonstante λ .

2.1 Art und Eigenschaften der Strahlung

Mit N_0 als Anzahl der zu Beginn ($t=0$) der Beobachtung vorhandenen Atome des Radionuklids und N_t als Anzahl der zur Zeit t noch vorhandenen Atome des Radionuklids folgt:

$$-\left. \frac{dN}{dt} \right|_t \sim N_t \Rightarrow -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N_t \Rightarrow N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

Entsprechend gilt für das zeitliche Abklingen der Aktivität A einer radioaktiven Substanz:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

In Gleichung (2.9) ist A_t die Aktivität zum Zeitpunkt t und A_0 die Aktivität zur Zeit $t=0$. In der Praxis wird die Zerfallswahrscheinlichkeit von radioaktiven Substanzen meist durch die Halbwertszeit $T_{1/2}$ gekennzeichnet. Dies ist die Zeit in der die Zahl der vorhandenen radioaktiven Kerne auf die Hälfte des Anfangswertes abgesunken ist. Zwischen der Halbwertszeit $T_{1/2}$ und der Zerfallskonstante λ besteht folgender Zusammenhang:

$$\frac{N_{T_{1/2}}}{N_0} = \frac{A_{T_{1/2}}}{A_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (2.10)$$

Aus den Gleichungen (2.9) und (2.10) erhält man die in der Praxis gebräuchlichste Formel zur Berechnung der Aktivität einer radioaktiven Substanz zum Zeitpunkt t :

$$A_t = A_0 \cdot 2^{-\left(\frac{t}{T_{1/2}}\right)} \quad (2.11)$$

Je nachdem, ob die Bereitschaft zur spontanen Emission bei der betreffenden Atomart von Natur aus vorhanden ist oder erst durch künstliche Einflüsse erzeugt wurde, wird zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität unterschieden. Natürliche radioaktive Stoffe sind überwiegend schwere Atomkerne (z.B. U-235, U-238, Th-232), deren α -Emission häufig mit sehr großen Halbwertszeiten verbunden ist. Zur Erzeugung von künstlicher Radioaktivität können Substanzen in speziellen Vorrichtungen an Kernreaktoren mit Neutronen bestrahlt werden. So bildet sich zum Beispiel durch Bestrahlung des natürlich vorhandenen stabilen Nuklids Co-59 das radioaktive Nuklid Co-60, welches unter β^- -Emission (Kap. 2.1.6) in Ni-60 übergeht. Der Nickel-Kern befindet sich zunächst in einem metastabilen Zustand, aus dem er erst nach praktisch gleichzeitiger Emission zweier γ -Quanten von 1,173 MeV und 1,333 MeV in den stabilen Grundzustand übergeht. Die Gewinnung von Cs-137 erfolgt normalerweise durch Separation aus dem radioaktiven Abfall abgebrannter Kernbrennstäbe, in denen es als ein Zerfallsprodukt aus den natürlichen Zerfallsreihen des Urans entsteht (VOGT & SCHULTZ 1992).

Da die grundlegenden radiologischen Kenngrößen einer radioaktiven Substanz wie ihre Halbwertszeit, Strahlungsarten und Strahlungsenergien typische Eigenschaften der entsprechenden Nuklide sind, ist eine ausreichende Kennzeichnung einer radioaktiven Substanz zumeist durch die Angabe des Nuklids und der Aktivität wie z.B. Cs-137 740 MBq gegeben.

2.1.5 Der α -Zerfall

Beim α -Zerfall geht ein Mutterkern mit der Ordnungszahl Z und der Massenzahl A unter Emission eines He-Kerns, des α -Teilchens ($Z = 2$, $A = 4$), in einen Kern mit der Ordnungszahl $Z - 2$ und der Massenzahl $A - 4$ über (Abb. 2-2).

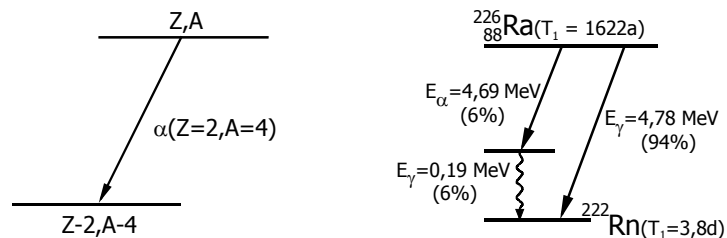


Abb. 2-2: Links: α -Zerfall Prinzipschema (SCHMIDT 1987).
Rechts: Zerfallsschema von Ra-226 als Beispiel eines typischen α -Zerfalls (DIMITRIJEVIĆ 1972).

Der α -Zerfall ist charakteristisch für die schwersten natürlichen Elemente wie Radium, Uran, Thorium und Transurane, bei denen die Bindungsenergien verhältnismäßig gering sind. Nach Abb. 2-2 rechts werden beim Ra 226 in 100 Zerfallsprozessen 94 α -Teilchen von 4,78 MeV, sechs β -Teilchen von 4,69 MeV und sechs Photonen von 0,19 MeV emittiert. Die Energiespektren von α -Strahlungen haben im Unterschied zu den Spektren der β -Strahlung eine Linienstruktur, da diese Strahlungsteilchen stets nur mit den Energien emittiert werden, die den für das Nuklid charakteristischen möglichen Übergängen zwischen den Kernzuständen entsprechen.

2.1.6 Der β -Zerfall

Unter dem β -Zerfall versteht man alle Zerfallsmöglichkeiten eines Kerns, bei denen die Anzahl der Nukleonen, d.h. die Massenzahl A , konstant bleibt, und die Kernladungszahl Z sich um eine Einheit ändert. Es gibt drei unterschiedliche Arten von β -Zerfällen.

2.1 Art und Eigenschaften der Strahlung

Beim β^- -Zerfall ($\beta^- = \text{Elektron } e^-$) emittiert der Kern ein Elektron und erhöht seine Kernladungszahl von Z auf $Z+1$ (Abb. 2-3). Er tritt sowohl bei natürlich- als auch bei künstlich-radioaktiven Elementen auf. Die β^- -Teilchen sind keine primären Bausteine der Atomkerne, sie entstehen aber in dem Augenblick, in dem der instabile Atomkern durch Umwandlung eines Kernneutrons in ein Kernproton gemäß der Gleichung



eine stabilere Nukleonenkonfiguration anstrebt. Durch das Ausstoßen eines oder mehrerer β^- -Teilchen wird der vorhandene Neutronenüberschuss abgebaut. Jede β^- -Aussendung ist mit der Emission eines weiteren Teilchens, dem sogenannten Anti-Neutrino $\bar{\nu}_e$ verknüpft. Das Neutrino hat zwar eine sehr kleine Masse und keine Ladung, übernimmt aber im Mittel etwa $2/3$ der beim β^- -Zerfall freiwerdenden Gesamtenergie. Den Restbetrag von $1/3$ der maximalen Energie übernimmt das β^- -Teilchen. Aus diesem Grund sind beim β^- -Zerfall nur kontinuierliche Spektren zu finden, deren maximale Energie charakteristisch für das betreffende Element ist.

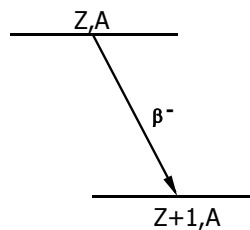


Abb. 2-3: β^- -Zerfall Prinzipschema (SCHMIDT 1987).

Beim β^+ -Zerfall ($\beta^+ = \text{Positron } e^+$) emittiert der Kern ein Positron und erniedrigt seine Kernladungszahl um eine Einheit von Z auf $Z - 1$ (Abb. 2-4). Die Umwandlung erfolgt nach der Gleichung



Auch die Aussendung eines Positrons ist mit der Emission eines Neutrinos verbunden, so dass die Positronenspektren ebenfalls kontinuierlich sind. Das Positron e^+ ist zwar stabil, hat aber trotzdem nur eine kurze Überlebensdauer, da es sich am Ende seiner Bahn mit einem Elektron e^- vereinigt. Dabei wird die Ruhemasse dieser beiden Teilchen in zwei Photonen von je $0,51 \text{ MeV}$ Energie umgewandelt.

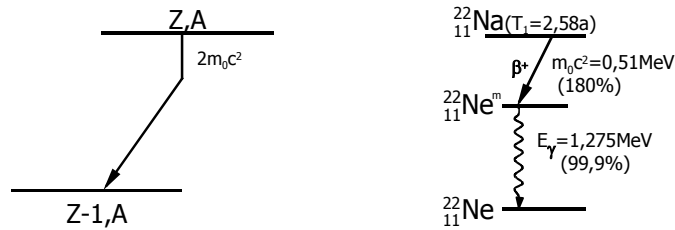


Abb. 2-4: Links: Prinzipschema β^+ -Zerfall (SCHMIDT 1987).
Rechts: Zerfallsschema von Na-22 als Beispiel eines typischen β^+ -Zerfalls (DIMITRIJEVIĆ 1972).

Beim Elektroneneinfang fängt sich der Kern ein Elektron aus der Hülle ein und erniedrigt dabei die Kernladungszahl um eine Einheit (Abb. 2-5). Das Umwandlungsschema lautet:

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (2.14)$$

Hier übernimmt das Neutrino die gesamte Zerfallsenergie. Vom Kern können Elektronen aus allen besetzten Schalen eingefangen werden, wobei allerdings der Einfang aus der K-Schale als der kernnächsten Schale am wahrscheinlichsten ist. Die dadurch in der K-Schale entstandene Lücke wird mit einem Elektron aus einer anderen, weiter außen gelegenen Schale, aufgefüllt. Dabei wird die charakteristische Röntgenstrahlung emittiert.

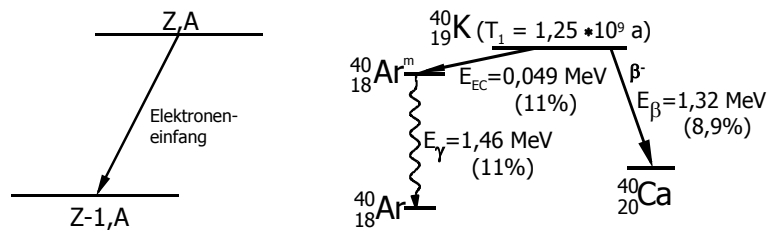


Abb. 2-5: Links: Prinzipschema des Elektroneneinfangs (SCHMIDT 1987).
Rechts: Zerfallsschema von K-40 als Beispiel eines typischen Elektroneneinfangs (DIMITRIJEVIĆ 1972).

Beim β -Zerfall gibt es im Endzustand immer drei Teilchen (vgl. Gl. (2.12), Gl. (2.13) und Gl. (2.14)). Die Energie- und Impulserhaltung lassen zu, dass die Übergangsenergie beliebig auf diese verteilt werden kann (Abb. 2-6). So kann das β -Teilchen mit allen Energien von Null bis zur Übergangsenergie auftreten, die jeweils fehlende Energie übernimmt das Neutrino (SCHMIDT 1987). Zur Kennzeichnung eines solchen β -Spektrums wird zumeist nur die Maximalener-

2.1 Art und Eigenschaften der Strahlung

gie $E_{\max} = E_0$ der β -Teilchen angegeben, die dem zugehörigen Energiesprung im Atomkern entspricht.

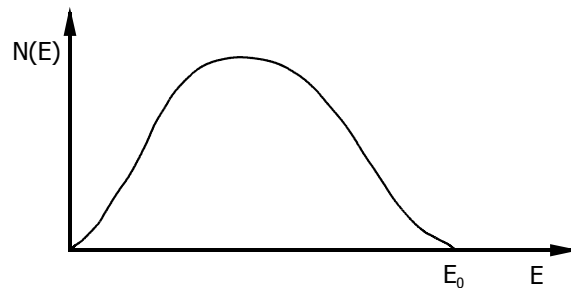


Abb. 2-6: Energiespektrum von β -Strahlung (SCHMIDT 1987).

2.1.7 Der γ -Zerfall

Im Gegensatz zum α - und β -Zerfall findet beim γ -Zerfall keine Kernumwandlung statt. γ -Strahlung entsteht in Verbindung mit dem α - und β -Zerfall und zwar dann, wenn Übergänge nicht zum Grundzustand sondern zu angeregten Zuständen des Tochterkerns führen. Diese angeregten Zustände sind im allgemeinen aber sehr kurzlebig und zerfallen dann mit typischen Halbwertszeiten im Bereich von 10^{-14} s unter Emission von γ -Strahlung in den Grundzustand (Abb. 2-7). Dabei handelt es sich um hochenergetische, kurzwellige elektromagnetische Strahlung (Kap. 2.1.2), deren Energien gewöhnlich zwischen 0,01 MeV und 10 MeV liegen.

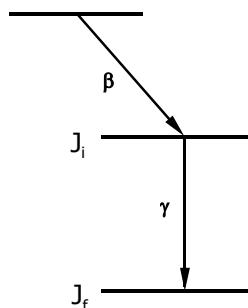


Abb. 2-7: Prinzipschema eines γ -Zerfalls (SCHMIDT 1987).

Neben den angeregten Kernzuständen mit extrem kurzer Lebensdauer, die praktisch spontan zerfallen, gibt es auch solche die eine deutlich längere Halbwertszeit besitzen. Solche angeregten Kernzustände nennt man metastabile Zustände oder auch Isomere. Das entsprechende Nuklid wird dann mit

einem "m" gekennzeichnet. Den Übergang vom angeregten in den Grundzustand bezeichnet man als isomeren oder inneren Übergang. Der β^- -Zerfall von Cs-137 führt mit einer Halbwertszeit von 30,17 Jahren (PFENNIG et al. 1998) und einer Wahrscheinlichkeit von 94,6% auf Ba-137m (VOGT & SCHULTZ 1992). Dies ist ein angeregter Zustand von Ba-137, der um 0,6616 MeV über dem Grundzustand liegt und mit einer Halbwertszeit von 2,55 Minuten unter Emission eines γ -Quants in diesen übergeht (Abb. 2-8).

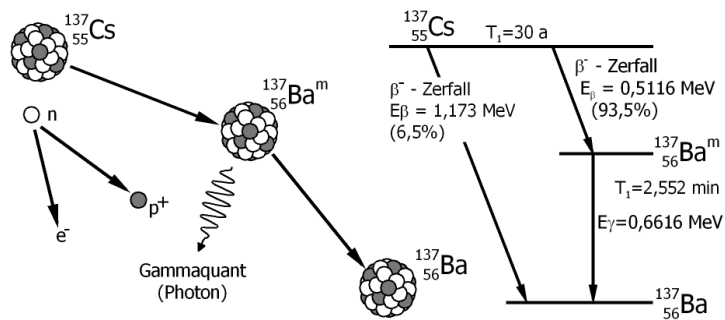


Abb. 2-8: Radioaktive Umwandlung von Cs-137. β^- -Zerfall von Cs-137 in Ba-137 unter Aussendung eines Elektrons. Emission eines γ -Quants mit $E_\gamma = 0,6616 \text{ MeV}$ aus einem angeregten Ba-137 Atomkern. (Zahlenwerte in Klammern: Teilchenausbeute in %) (nach KOELZER 1997, PFENNIG et al. 1998 und VOGT & SCHULTZ 1992).

In der Karlsruher Nuklidkarte (PFENNIG et al. 1998) (Abb. 2-9 links) ist jedes experimentell nachgewiesene Nuklid durch ein Feld mit Elementsymbol und Nukleonenzahl dargestellt. Die Nuklide sind auf der Karte so angeordnet, dass die Protonenzahl Z auf der Ordinate, die Neutronenzahl $N = A - Z$ auf der Abszisse aufgetragen ist. Stabile Nuklide haben schwarze Felder, die Felder der Nuklide mit β^- -Zerfall sind blau unterlegt. Die Angaben in der linken Spalte gelten für den metastabilen, die in der rechten Spalte für den Grundzustand. I_γ kennzeichnet γ -Quanten, die beim Zerfall in den Grundzustand desselben Nuklids auftreten (Isomerenzerfall). Neben den möglichen Zerfallsarten sind die Halbwertszeiten, die Zerfallsenergien, die Wirkungsquerschnitte etc. angegeben. Die Abb. 2-9 rechts zeigt, welches Tochternuklid in Abhängigkeit von der auftretenden Zerfallsart des Radionuklids entsteht. Der β^- -Zerfall von Cs-137 über Ba-137m zu Ba-137 unter Emission eines γ -Quants ist hier noch einmal dargestellt.

2.1 Art und Eigenschaften der Strahlung

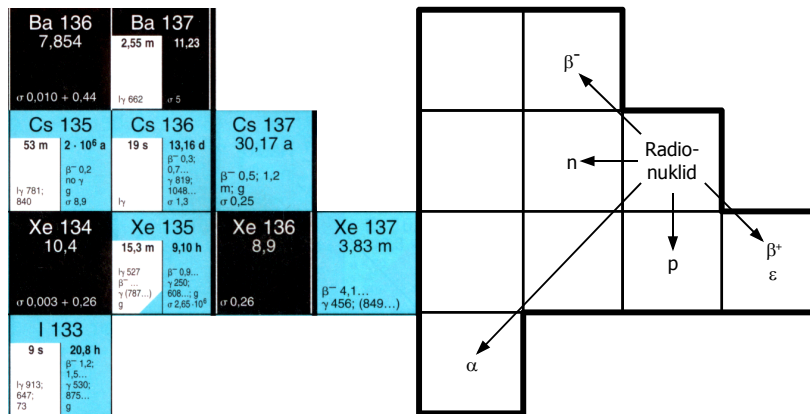


Abb. 2-9: Ausschnitt aus der Karlsruher Nuklidkarte mit Cäsium-137 und seinen möglichen Zerfallsarten (nach PFENNIG et al. 1998).

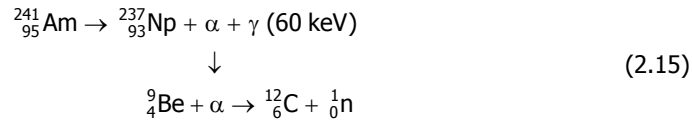
Die Energiespektren von γ -Strahlung haben wie die Spektren der α -Strahlung eine Linienstruktur, da diese Strahlungsteilchen stets nur mit den Energien emittiert werden, die den für das Nuklid charakteristischen möglichen Übergängen zwischen den Kernzuständen entsprechen. Die γ -Spektroskopie wird in Kapitel 2.2 ausführlich besprochen.

2.1.8 Neutronenquellen

Im Bereich der natürlichen Radioaktivität ist keine Neutronen-Emission bekannt. Neutronen entstehen bei Kernumwandlungen, die man in drei Gruppen einteilen kann:

1. Kernspaltung. Schwere Kerne spalten sich spontan oder durch Kernreaktionen induziert in meist zwei Bruchstücke. Dabei verdampft ein Teil des Neutronenüberschusses. Bei jeder Spaltung entstehen einige schnelle Neutronen.
2. Kernfusion. Bei der Verschmelzung z.B. eines Deuterons mit einem Tritiumkern entsteht neben dem α -Teilchen auch ein Neutron.
3. Kernreaktionen von denen die beiden ersten Gruppen natürliche Sonderfälle sind. Dabei werden Reaktionen mit einem hohen Wirkungsquerschnitt für die Neutronenproduktion ausgewählt. Die gebräuchlichsten sind die (γ, n) - und die (α, n) -Reaktionen, bei denen ein γ -Quant oder ein α -Teilchen eingefangen und ein Neutron emittiert wird. Als Neutronenquelle in Neutronensonden zur Bestimmung der Bodenwassergehalts

(BOHLEBER 1992) wird häufig eine Am-Be-Quelle verwendet, bei der die Neutronen durch eine (α, n) -Reaktion an Be-9 erzeugt werden.



Dabei wird eine beträchtliche Energie frei, die im wesentlichen das Neutron übernimmt. Als α -Quelle dient Am-241, das mehrere Gruppen von α -Teilchen emittiert. Die Isotope Am-241 und Be-9 sind in der Quelle fein gemischt, damit die α -Teilchen innerhalb ihrer Reichweite auf einen Be-Kern treffen. Die so entstehenden Neutronen haben ein kontinuierliches Energiespektrum (Abb. 2-10), weil die Neutronen in Gleichung (2.15) unter beliebigen Winkeln bezüglich des einfallenden α -Teilchens emittiert werden und somit unterschiedliche Energien erhalten. Die wahrscheinlichste Neutronenenergie liegt bei ungefähr 5 MeV.

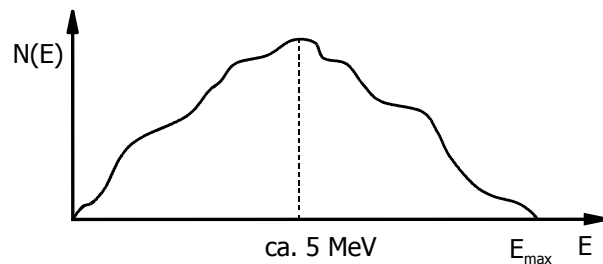


Abb. 2-10: Energiespektrum einer Neutronenquelle (SCHMIDT 1987).

2.2 Die Ausbreitung von Strahlung in Materie und ihre Wechselwirkungen mit Materie

2.2.1 Geladene und ungeladene Teilchen

Bei der Ausbreitung von Strahlung in Materie und deren möglichen Wechselwirkungen mit der Materie muss grundsätzlich zwischen elektrisch geladenen und ungeladenen Teilchen unterschieden werden.

Energiereiche, elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen, Protonen, Deuteronen oder Alphateilchen geben ihre Energie im wesentlichen durch zahlreiche Ionisierungs- und Anregungsprozesse entlang ihrer Flugbahn an das Material ab. Oberhalb der sogenannten kritischen Energie überwiegt bei Elektronen die Erzeugung von Bremsstrahlung. Es können vier Arten von Wechselwirkungs-

prozessen unterschieden werden, nach der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens sind dies (vgl. Abb. 2-11):

1. Inelastische Streuung an Elektronen (Abb. 2-11 a, b).
Das geladene Teilchen wird dabei abgebremst und verliert seine kinetische Energie an die Atome, Moleküle oder Kristalle, die dabei angeregt oder ionisiert werden.
2. Elastische Streuung an Kernen (Abb. 2-11 e).
Die Teilchen werden bei Annäherung an den positiv geladenen, ruhenden Kern gestreut und verlieren dabei an den Kern Rückstoßenergie, diese ist umso kleiner, je größer der Massenunterschied der Stoßpartner ist.
3. Inelastische Streuung an Kernen (Abb. 2-11 c).
Das geladene Teilchen gibt außer der durch die Kinematik bedingten Rückstoßenergie noch zusätzlich Energie ab. Hierher gehört die Bremsstrahlung. Sie ist eine elektromagnetische Strahlung die entsteht, wenn leichte Teilchen, besonders Elektronen, im Coulombfeld des Kerns abgebremst werden. Der Kern wird dabei nicht angeregt.
4. Elastische Streuung an Elektronen.
Sie sind nur von Bedeutung für sehr leichte Teilchen, also nur bei Elektron-Elektron-Stößen und da auch nur bei Energien unter 100 eV.

Geladene Teilchen können in hinreichend ausgedehnter Materie ihre gesamte Energie verlieren, d.h. sie haben eine endliche Reichweite (Abb. 2-12). Für den praktischen Strahlenschutz bedeutet dies, dass die α - und β -Strahlung durch entsprechende Abschirmungen vollständig absorbiert werden können (Kap. 3.3). Die entstehende β -Strahlung beim Zerfall des Cs-137 Isotops (Abb. 2-8) der verwendeten γ -Quelle in der γ - γ -Sonde (Kap. 3.3) spielt beim Strahlenschutz im Umgang mit der γ - γ -Sonde keine Rolle, da diese bereits weitestgehend innerhalb der gekapselten Quelle, spätestens aber an der Stahlummantelung der γ - γ -Sonde absorbiert wird. Strahlenschutzmassnahmen gegen α -Strahlung sind beim Umgang mit der γ - γ -Sonde nicht zu beachten (3.3), da bei der verwendeten γ -Quelle (Kap. 3.1.1) keine α -Strahlung entsteht.

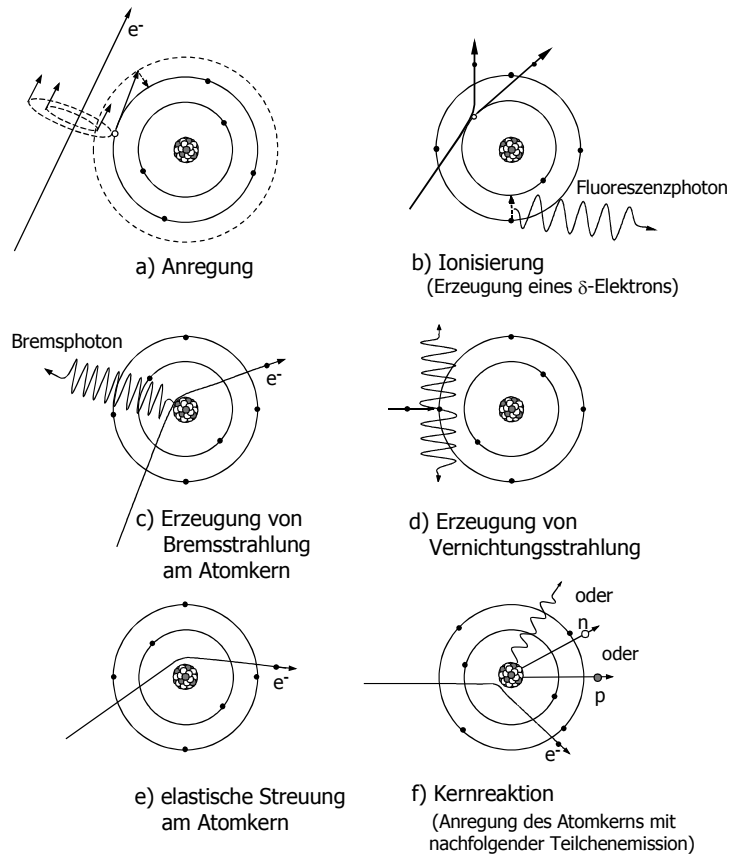


Abb. 2-11: Übersicht der möglichen Wechselwirkungsprozesse von Elektronen mit Materie (nach VOGT & SCHULZ 1992).

Elektrisch neutrale, materielle Teilchen oder Photonen können verhältnismäßig große Strecken ungestört durch die Materie fliegen, bis sie bei einem gelegentlichen Stoß einen Teil ihrer Bewegungsenergie an ein geladenes Teilchen der Materie abgeben, das seinerseits die aufgenommene Bewegungsenergie durch Ionisierung, Anregung oder die Erzeugung von Bremsstrahlung verliert.

Neutronen können im Gegensatz zu Photonen nur mit Atomkernen reagieren, wobei zwischen elastischer und inelastischer Streuung, Absorption, Mehrteilchenerzeugung und Kernzersplitterung unterschieden wird. Strahlenschutz-

massnahmen gegen Neutronenstrahlung sind beim Umgang mit der γ - γ -Sonde nicht zu beachten (3.3), da bei der verwendeten γ -Quelle (Kap. 3.1.1) keine Neutronenstrahlung auftritt.

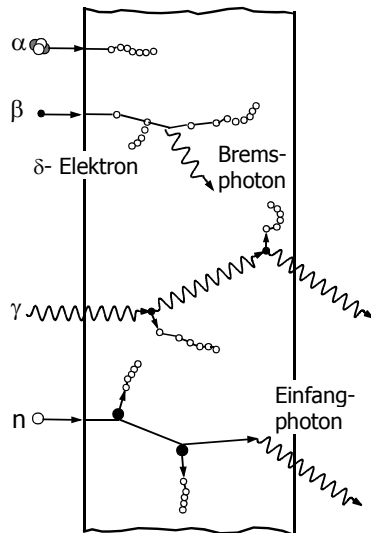


Abb. 2-12: Mögliche Wechselwirkungsprozesse beim Durchgang von α -, β -, γ - und n-Strahlungsteilchen durch Materie (VOGT & SCHULZ 1992)

2.2.2 Das γ -Quant

Im Gegensatz zu den geladenen Teilchen ionisiert das γ -Quant die Materie nicht direkt, es kann deshalb weite Strecken ungestört durchqueren. Es macht sich bemerkbar und wird nachweisbar durch drei Prozesse der elektromagnetischen Wechselwirkung: den Photoeffekt (2.2.5), die Comptonstreuung (2.2.6) und die Paarbildung (2.2.7). Die dabei freigesetzten oder erzeugten Elektronen und Positronen übernehmen kinetische Energie, die sie durch Ionisierung wieder abgeben. Das γ -Quant überträgt beim Photoeffekt seine Energie vollständig auf ein Elektron der umgebenden Materie, bei der Comptonstreuung nur zum Teil. Durch den Paarbildungseffekt kann sich oberhalb von etwa 1,022 MeV die gesamte Photonenenergie in zwei bewegte Teilchen, ein Elektron e^- und ein Positron e^+ , mit entgegengesetzten Ladungen umwandeln.

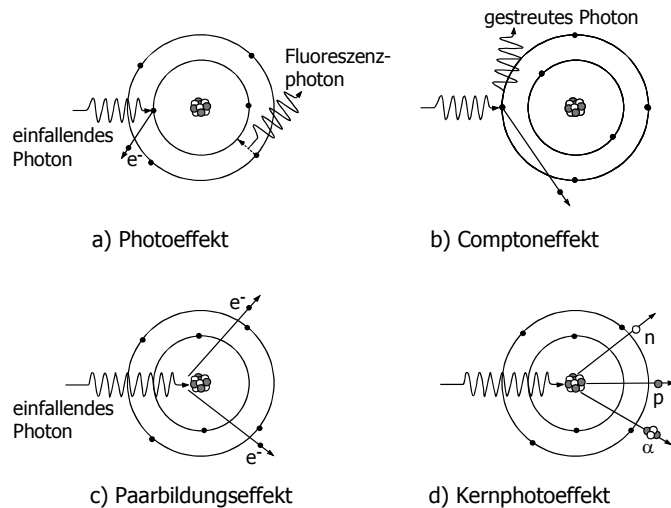


Abb. 2-13: Übersicht der möglichen Wechselwirkungsprozesse von Photonen mit Materie (VOGT & SCHULZ 1992).

2.2.3 Der Wirkungsquerschnitt σ

Für die Beschreibung der Wechselwirkung von Photonen mit Materie verwendet man die Wahrscheinlichkeiten bzw. die Wirkungsquerschnitte σ der verschiedenen Prozesse. Sie werden üblicherweise in der Einheit cm^2 oder Barn angegeben. Danach stellen die Wirkungsquerschnitte eine effektive Zielfläche des beschossenen Kerns oder Elektrons dar. Man unterscheidet zwischen dem sogenannten mikroskopischen und dem makroskopischen Wirkungsquerschnitt.

Der mikroskopische Wirkungsquerschnitt ist für eine bestimmte Reaktion die durchschnittliche Anzahl von Einzelprozessen, bezogen auf einen Kern oder ein Elektron, d.h. $\text{cm}^2/\text{Elektron}$ oder Kern. Der makroskopische Wirkungsquerschnitt ergibt sich durch die Multiplikation des mikroskopischen Wirkungsquerschnittes mit der Anzahl der Wechselwirkungspartner N , der Anzahl der Elektronen oder Kerne in 1 cm^3 (DIMITRIJEVIĆ 1972). Dieses Produkt stellt den sogenannten linearen Schwächungskoeffizienten oder totalen Absorptionskoeffizienten μ (2.2.4) dar:

$$\mu = \sigma \cdot N [\text{cm}^{-1}] \quad (2.16)$$

Für ein Material mit dem Atomgewicht A , der Dichte ρ und der Kernladungszahl Z kann die Anzahl der Atome oder Kerne je cm^3 nach Gleichung (2.17)

und die Anzahl der Elektronen je cm^3 nach Gleichung (2.18) berechnet werden (DIMITRIJEVIĆ 1972).

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A} \left[\frac{\text{Atome}}{\text{cm}^3} \right] \quad (2.17)$$

$$N = \frac{N_A \cdot \rho \cdot Z}{A} \left[\frac{\text{Elektrone}}{\text{cm}^3} \right] \quad (2.18)$$

Die in Gleichung (2.16) definierte Größe μ stellt die relative Intensitätsabnahme eines Strahlenbündels in einer Absorberdicke von 1 cm dar (DIMITRIJEVIĆ 1972).

2.2.4 Der lineare Absorptionskoeffizient μ

Die Abnahme der Intensität elektromagnetischer Strahlung durch Absorption in der Materie wird durch die Beziehung

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d} \quad (2.19)$$

beschrieben (FRICKE & SCHÖN 1999). Die Größe μ aus Gleichung (2.16) die die Wahrscheinlichkeit der Absorption beschreibt, heißt der lineare Absorptions- oder Schwächungskoeffizient. Die Größe

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (2.20)$$

ist die mittlere freie Weglänge der Strahlung in Materie, d.h. der mittlere Weg den ein Quant zurücklegt bevor es absorbiert wird. Die Absorption ist im wesentlichen den drei Prozessen Photo-, Paarbildungs- und mit Einschränkung auch dem Comptoneffekt zuzuschreiben. Der lineare Absorptionskoeffizient ist demnach die Summe der partiellen Absorptionskoeffizienten der Einzelprozesse:

$$\mu = \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{C}} + \mu_{\text{p}} \quad (2.21)$$

Die Absorptionskoeffizienten (2.16) sind über die Teilchendichte und damit über die Anzahl der Atome pro Volumeneinheit (2.17) verknüpft mit den Wirkungsquerschnitten der betreffenden Prozesse.

$$\mu = (\sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{C}} + \sigma_{\text{p}}) \cdot N [\text{cm}^{-1}] \quad (2.22)$$

Die linearen Schwächungskoeffizienten μ für verschiedene Abschirmmaterialien in Abhängigkeit von der γ -Energie der Quelle lassen sich aus Abb. 2-14 ablesen.

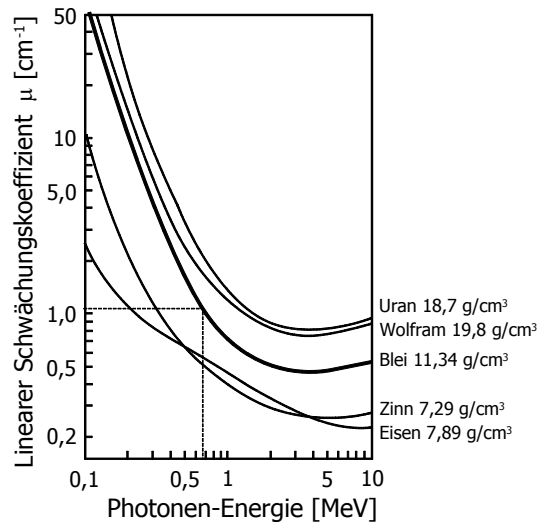


Abb. 2-14: Linearer Schwächungskoeffizient μ für verschiedene Metalle in Abhängigkeit von der γ -Energie (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).

Bei leichten Elementen wird die Absorption fast ausschließlich durch den Comptoneffekt verursacht, der Photoeffekt macht sich erst bei kleinen γ -Energien bemerkbar, die Paarbildung tritt erst bei γ -Energien größer als 5 MeV merklich auf. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der Z-Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte. Erst bei höheren Ordnungszahlen fällt der Photoeffekt ins Gewicht, um dann bei den schweren Elementen zu überwiegen. In Abb. 2-15 sind die Bereiche der Ordnungszahl und der Energie dargestellt, in welcher einer der drei Effekte dominierend ist. Sie sind durch zwei Kurven getrennt. Auf der linken Kurve sind die linearen Absorptionskoeffizienten für den Photo- und den Comptoneffekt gleich groß, auf der rechten für den Compton- und den Paarbildungseffekt.

Abb. 2-15 zeigt, dass bei den Energien mit denen die in der Bohrlochgeophysik gebräuchlichen γ -Quellen Co-60 ($E_\gamma = 1,173$ MeV und $1,333$ MeV) und Cs-137 ($E_\gamma = 0,6616$ MeV) ihre Photonen emittieren, d.h. bei Energien um 1 MeV und etwas darunter, bei leichten Elementen mit einer Ordnungszahl bis ca. $Z = 20$ praktisch nur Comptoneffekt stattfindet. Dies ist der entscheidende Punkt, warum sich Photonen in diesem Energiebereich für ein Verfahren zur Dichtebestimmung der durchteuften Gesteinsschichten in Bohrlöchern (Kap. 2.4) und zur Ortung von Dichteänderungen im Umfeld von Kanälen, wie

sie durch Hohlräume und Hausanschlüsse hervorgerufen werden (Kap. 6), eignen.

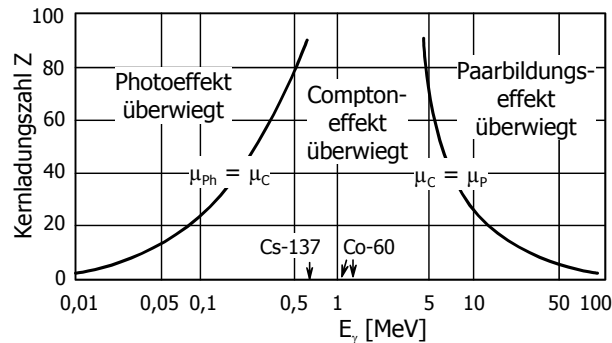


Abb. 2-15: Wirkungsbereiche von Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt als Funktion der Kernladungszahl Z des Absorbermaterials in Abhängigkeit von der Energie E_γ der γ -Quanten. Die Linien stellen die Wertepaare Z und E dar, bei denen die beiden benachbarten Effekte die gleiche Wahrscheinlichkeit aufweisen (nach MILITZER et al. 1986).

2.2.5 Der Photoeffekt

Der Photoeffekt ist die Absorption eines Photons durch ein Atom unter gleichzeitiger Emission eines freien Elektrons. Das Schicksal des getroffenen Elektrons ist von der Energie des Elektrons und der Schale in der es sich befand abhängig.

Ist die Energie des Photons kleiner als die Bindungsenergie der Elektronen, dann können diese nicht vom Atom abgetrennt werden, sondern nur auf einen Zustand höherer Energie gehoben werden. Das Atom ist dann angeregt. Wenn aber die Energie des Photons $h\nu$ größer ist als die Bindungsenergie des Elektrons E_i , dann kann das Photon absorbiert werden und das getroffene Elektron verlässt als sogenanntes Photoelektron den Atomverband mit einer kinetischen Energie von:

$$E = h \cdot \nu - E_i \quad (2.23)$$

Das Atom ist dann ionisiert. Bei der Anregung können nur diskrete Energien absorbiert werden, die durch die Differenzen der Zustandsenergien gegeben sind. Bei der Ionisation kann jede beliebige Energie die größer ist als die Ionisierungsenergie absorbiert werden. Um das Atom zu ionisieren wird ihm zunächst die Bindungsenergie zugeführt. Den Rest der γ -Energie erhält das

freigesetzte Elektron als kinetische Energie. Die Bindungsenergie E_i des Elektrons hängt von entsprechenden Schale der Elektronenhülle und der Ladungszahl Z des Atoms ab. Sie ist für ein Einzelatom identisch mit der Ionisierungsenergie. Das freiwerdende Elektron verliert seine kinetische Energie wiederum durch die Ionisationsprozesse längs seines Weges im Absorbermaterial.

Nach der Emission eines Photoelektrons befindet sich das Atom im angeregten Zustand. Es kehrt in den Grundzustand innerhalb einer Zeit von etwa 10^{-8} s zurück, indem in die vorhandene Lücke ein Elektron aus einer höheren Schale springt. Dabei wird die sogenannte charakteristische Röntgenstrahlung emittiert. Die Photoelektronen stammen zu mehr als 80% aus der K-Schale, die Teilnahme der anderen Elektronenschalen der Atome am Photoeffekt ist entsprechend kleiner.

Der Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts σ_{ph} ist von der Ordnungszahl des Absorberelements und der Energie des Photons abhängig (DIMITRIJEVIĆ 1972). Ist die γ -Energie nahezu gleich der Bindungsenergie des Elektrons, ist der Wirkungsquerschnitt des Photoeffektes am größten, mit wachsender Photonenenergie fällt er stark ab.

2.2.6 Der Comptoneffekt

Der Comptoneffekt ist die Streuung von γ -Quanten an freien, geladenen Teilchen (Abb. 2-17). Da die Bindungsenergien der Elektronen im Vergleich zu den Photonenenergien vieler in der Praxis vorkommenden γ -Quellen klein ist, kann man die Hüllenelektronen der Atome als freie Elektronen betrachten (EVANS 1955). Stößt ein Photon auf ein freies Elektron, so spielt sich der Vorgang unter Austausch von Energie und Impuls nach den Gesetzen der Mechanik als elastischer Stoß ab. Das Photon wird nach dem Stoß und der Übertragung von Energie auf das Elektron selbst mit verminderter Energie gestreut. Das Elektron verlässt als sogenanntes Comptonelektron die Atomhülle mit der kinetischen Energie

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2 \quad (2.24)$$

und das Photon fliegt mit der Energie

$$E_\gamma = h \cdot \nu' \quad (2.25)$$

weiter. Es gilt die Beziehung:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \nu' + E_{kin} \quad (2.26)$$

Die Aufteilung der Photonenenergie $h\nu$ auf die beiden Energiebeträge nach

Gleichung (2.26) hängt vom Streuwinkel Θ ab (Abb. 2-17) und kann nach der Comptonschen Gleichung berechnet werden (DIMITRIJEVIĆ 1972).

$$E'_\gamma = h \cdot \nu' = \frac{h \cdot \nu}{1 + \frac{h \cdot \nu}{m_0 \cdot c^2} \cdot (1 - \cos \Theta)} \quad (2.27)$$

Die Energie des gestreuten Photons wird für einen Streuwinkel von $\Theta = 0^\circ$ maximal und für $\Theta = 180^\circ$ minimal. Bei $\Theta = 0^\circ$ hat keine Wechselwirkung zwischen dem Photon und einem freien Elektron stattgefunden, das Photon wurde nicht gestreut, seine Energie und Flugbahn ändert sich nicht. Beim maximal möglichen Streuwinkel $\Theta = 180^\circ$ wird das Photon in die Richtung zurückgestoßen aus der es herkam, dabei gibt es ein Maximum an Energie an das freie Elektron ab (Abb. 2-16).

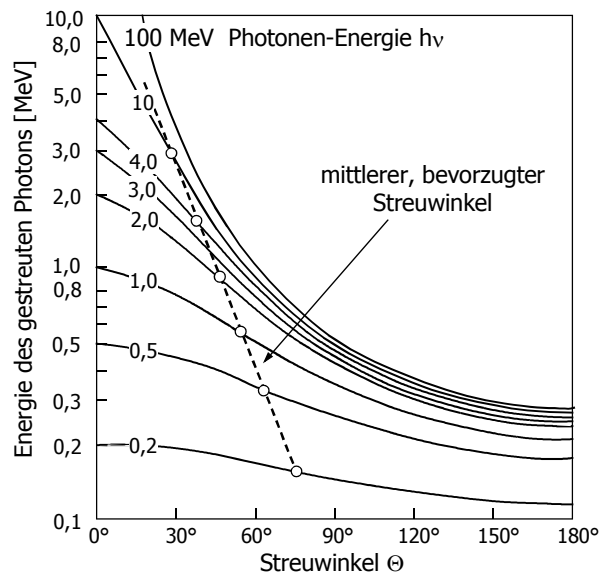


Abb. 2-16: Energie und Winkelverteilung von gestreuten Photonen (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).

Mit den Gleichungen (2.27) und (2.1) kann man die Wellenlängenzunahme $\Delta\lambda$ des gestreuten Photons berechnen:

$$\Delta\lambda = \frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_0 \cdot c} (1 - \cos \Theta) \quad (2.28)$$

Damit ist die Wellenlängenänderung des Photons unabhängig von seiner

Energie und von den Eigenschaften des Streukörpers.

Die Größe $h/m_0c = 2,426 \cdot 10^{-10} \text{ cm}$ wird Compton-Wellenlänge genannt. Sie entspricht einer Photonenenergie, die der Energie der Ruhemasse des Elektrons $m_0c^2 = 0,51 \text{ MeV}$ äquivalent ist. Für $\Theta = 180^\circ$ wird

$$\Delta\lambda_{\text{max}} = 4,85 \cdot 10^{-10} \text{ cm} \quad (2.29)$$

also gleich der doppelten Compton-Wellenlänge.

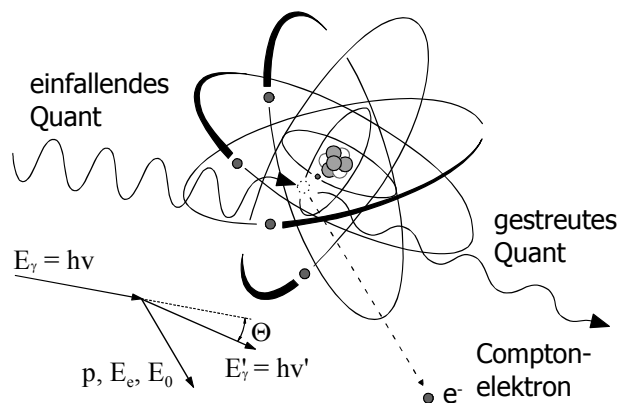


Abb. 2-17: Comptoneffekt: Elastische Streuung eines γ -Quants mit einem freien Elektron aus der Elektronenhülle eines Atoms. Je nach Streuwinkel Θ wird ein bestimmter Teil der Energie und des Impulses des Quants auf das Elektron übertragen, der Rest bleibt bei dem gestreuten Quant (nach KOELZER 1997).

Der Streuwinkel Θ für Photonen kann jeden Betrag zwischen 0° und 180° annehmen, jedoch sind bestimmte Richtungen, in denen gestreute Photonen emittiert werden, bevorzugt. Je höher die Photonenenergie ist, umso mehr verengt sich die Winkelverteilung der gestreuten Photonen und die Wahrscheinlichkeit für eine Streuung mit großem Θ nimmt deutlich ab. Für praktische Überlegungen genügen meistens die mittleren, bevorzugten Werte für den Streuwinkel Θ . Diese Werte sind in Abb. 2-16 mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet. Bei Cs-137 als γ -Quelle ist nach Abb. 2-16 mit einer Photonenenergie von 0,66 MeV mit einem bevorzugten Streuwinkel $\Theta = 60^\circ$ zu rechnen, die Energie $h\nu'$ des gestreuten Photons beträgt nach der Streuung noch ca. 0,4 MeV. Bei einer weiteren Wechselwirkung wäre bei diesem Photon ein Streuwinkel von ca. $\Theta = 68^\circ$ zu erwarten, das Photon hätte danach noch eine Energie von ca. 0,28 MeV.

Der bevorzugte Streuwinkel von $\Theta = 60^\circ$ bei einer γ -Quelle aus Cs-137 kann für den positiven Signalausschlag beim Passieren einer Muffe mit der γ - γ -Sonde verantwortlich gemacht werden (Kap. 6.4 Abb. 6-19 links).

Die Emission der Compton-Elektronen ist theoretisch auf den Winkelraum zwischen 0° und 90° beschränkt. Bei einer Streuung des Photons um $\Theta = 180^\circ$ wird das Elektron in der Richtung des einfallenden Photons emittiert, der Winkel beträgt 0° zur ursprünglichen Flugrichtung. Je mehr sich der Streuwinkel des Photons $\Theta = 0^\circ$ nähert, umso mehr nähert sich der Emissionswinkel des Elektrons an 90° an.

Den Gesamtwirkungsquerschnitt für den Comptoneffekt σ_C kann man gemäß der Gleichung (2.26) in einen Streuquerschnitt $\sigma_{C \text{ Streu}}$ und einen Absorptionsquerschnitt $\sigma_{C \text{ Absorp}}$ aufteilen:

$$\sigma_C = \sigma_{C \text{ Streu}} + \sigma_{C \text{ Absorp}} \quad (2.30)$$

Die Gleichung (2.30) ist in Abb. 2-18 links dargestellt.

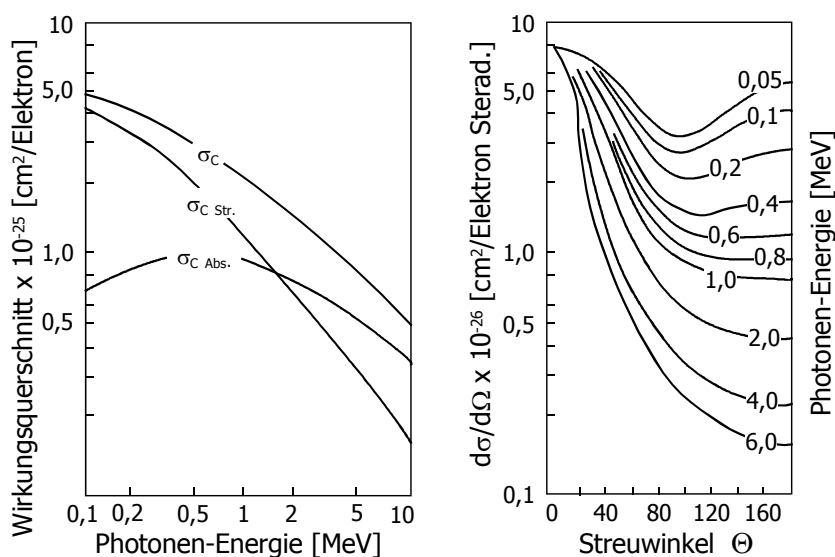


Abb. 2-18: Links: Wirkungsquerschnitte des Comptoneffekts für ein freies Elektron (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).
Rechts: Differenzieller Klein-Nischina Wirkungsquerschnitt für die Compton-Streuung (nach DIMITRIJEVIĆ 1972).

Die Streuung von Photonen in eine bestimmte Richtung lässt sich mit dem

differenziellen Wirkungsquerschnitt $d\sigma_C$ für einen Raumwinkel von $d\Omega$ mit der Klein-Nischina-Formel ausdrücken (DIMITRIJEVIĆ 1972):

$$\frac{d\sigma_C}{d\Omega} = \frac{r_0}{2} \cdot \left(\frac{h \cdot v'}{h \cdot v} + \left(\frac{h \cdot v'}{h \cdot v} \right)^3 - \left(\frac{h \cdot v'}{h \cdot v} \right)^2 \cdot \sin^2 \Theta \right) \quad (2.31)$$

wobei $r_0 = e^2/m_0c^2 = 2,818 \cdot 10^{-13}$ cm den klassischen Elektronenradius bedeutet. Die Gleichung (2.31) ist in Abb. 2-18 rechts dargestellt.

Alle Wirkungsquerschnitte beziehen sich auf die Streuung an einem freien, einzelnen Elektron. Die Elektronen sind zwar in der Materie gebunden, ihre Bindungsenergie ist aber wie eingangs schon erwähnt, zumindest für die leichten Atome sehr viel kleiner als diejenigen Energien, für die der Comptoneffekt überhaupt von Bedeutung ist und können deshalb als frei angesehen werden. Als entscheidende Konsequenz für die Dichtebestimmung mit dem γ - γ -Messverfahren (Kap. 2.4) ist daher der Wirkungsquerschnitt σ_a pro Atom für ein Element mit der Ordnungszahl Z in guter Näherung die Summe der Wirkungsquerschnitte σ_e pro Elektron.

$$\sigma_a = \sigma_e \cdot Z \quad (2.32)$$

Der Wirkungsquerschnitt σ ist also der Ordnungszahl Z proportional. Die praktische Anwendung dieser Erkenntnis beim γ - γ -Messverfahren wird in Kapitel 2.4 erläutert. Für schwere Atome, bei denen die Bindungsenergie der inneren Elektronen beträchtliche Werte annimmt, gilt diese Beziehung natürlich nicht mehr.

2.2.7 Der Paarbildungseffekt

Beim Paarbildungseffekt wird ein Photon infolge der Wechselwirkungen mit dem Coulomb-Feld eines Atomkerns in zwei bewegte Teilchen, ein Elektron e^- und ein Positron e^+ mit entgegengesetzter elektrischer Ladung umwandelt. Das γ -Quant verschwindet, seine Energie tritt als Folge der Materialisation der Strahlung als Ruhe- und Bewegungsenergie des Teilchen- Antiteilchen-Paares auf. Der Paarbildungseffekt wird bei den weitergehenden Betrachtungen nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Bei der Energie $E_\gamma = 0,662$ MeV der in der vorliegenden Arbeit verwendeten γ -Quelle (Cs-137, Abb. 2-15) kann der Paarbildungseffekt nicht auftreten (SCHMITZ 1996), da für den Paarbildungseffekt eine Mindestenergie notwendig ist, die gleich der doppelten Ruheenergie eines Elektrons (Kap. 2.1.3) ist:

$$E_\gamma \geq 2 \cdot m_e \cdot c^2 = 2 \cdot 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV} \quad (2.33)$$

Der Paarbildungseffekt spielt daher bei den Messungen mit der γ - γ -Sonde in den Kanälen (Kap. 6) keine Rolle.

2.2.8 Der Kernphotoeffekt

Energiereiche Photonen etwa ab 8 MeV können auch in Wechselwirkung mit Atomkernen treten. Beim Kernphotoeffekt werden ein oder mehrere Nukleonen (Neutronen, Protonen, α -Teilchen) aus dem Atomkern herausgestoßen. Die gesamte Photonenenergie wird vom Kern absorbiert und er selbst geht in einen angeregten Zustand über. Der Kernphotoeffekt wird bei den weitergehenden Betrachtungen nicht berücksichtigt, da er im allgemeinen nur bei Energien zu berücksichtigen ist, wie sie von Beschleunigern erzeugt werden.

2.2.9 Schwächung von Photonenflüssen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Wechselwirkungen der Photonen mit den Bausteinen der Materie ergeben durch die Absorption oder Streuung der Quanten eine Schwächung des Photonenflusses. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der einzelnen Elementarprozesse ist in erster Linie von der Photonenenergie abhängig. Sie kann durch die entsprechenden Schwächungs- bzw. Absorptionskoeffizienten für die einzelnen Prozesse angegeben werden. Bei der für diese Arbeit verwendete γ -Quelle (Cs-137) treten maximale Photonenenergien von $E_\gamma = 0,6616$ MeV auf und damit sind für Schwächung der Photonenflüsse nur noch der Photo- und der Comptoneffekt maßgebend.

Bei hohen Ordnungszahlen der Materie spielt in diesem Energiebereich der Photoeffekt eine wesentliche Rolle. Auf diesem Effekt beruhen gute Schwächungseigenschaften von Blei, Wolfram, Uran und Eisen. Das Photon wird absorbiert und die charakteristische Röntgenstrahlung emittiert. Diese hat aber wegen ihrer geringen Energie nur ein kleines Durchdringungsvermögen. Da beim Photoeffekt γ -Strahlen durch Absorption tatsächlich vernichtet werden, ist er für die Abschirmung von γ -Strahlung der entscheidende Effekt. Da Blei ein relativ preisgünstiger Werkstoff und einfach zu bearbeiten ist, wird er häufig zur Abschirmung von γ -Strahlen verwendet. Bei der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten γ - γ -Sonde (Kap. 3) wurde ein Bleikörper zwischen der γ -Quelle und dem Detektor angebracht, damit der Detektor gegen die direkte Bestrahlung von der Quelle abgeschirmt ist. Da immer eine endliche Anzahl an Photonen einen Absorber mit beliebiger Dicke durchdringt, kann der Bleikörper die Intensität der Strahlung nur abschwächen aber nicht alle

γ -Quanten absorbieren. Aus diesem Grund misst der Detektor auch eine bestimmte Anzahl an γ -Quanten pro Zeiteinheit, auch wenn die γ -Sonde sich nicht im Kanalrohr befindet und damit keine γ -Quanten von der Umgebung rückgestreut werden (Abb. 6-1).

Als ein Maß für die Schwächung des Photonenflusses, also ein Maß wie stark ein bestimmtes Material die γ -Strahlen abschirmt, wird die Halbwertschichtdicke d_h (HWS) verwendet. Sie ist diejenige Schichtdicke d eines bestimmten Materials, die die Photonenflussdichte eines schmalen Strahlenbündels auf die Hälfte der Anfangsflussdichte schwächt (DIMITRIJEVIĆ 1972). Die HWS lässt sich berechnen mit:

$$\text{HWS} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \text{ [cm]} \quad (2.34)$$

Die linearen Schwächungskoeffizienten μ für verschiedene Abschirmmaterialien in Abhängigkeit von der γ -Energie lassen sich aus Abb. 2-14 ablesen. Die Photonenenergie der γ -Quanten die das Radionuklid Cs-137 emittiert (Kap. 3) beträgt 0,6616 MeV (Abb. 2-8). Damit ergibt sich für Blei als Absorber:

$$\text{HWS} = \frac{\ln 2}{1,25 \text{ cm}^{-1}} = \frac{0,693}{1,25 \text{ cm}^{-1}} = 0,55 \text{ cm} \quad (2.35)$$

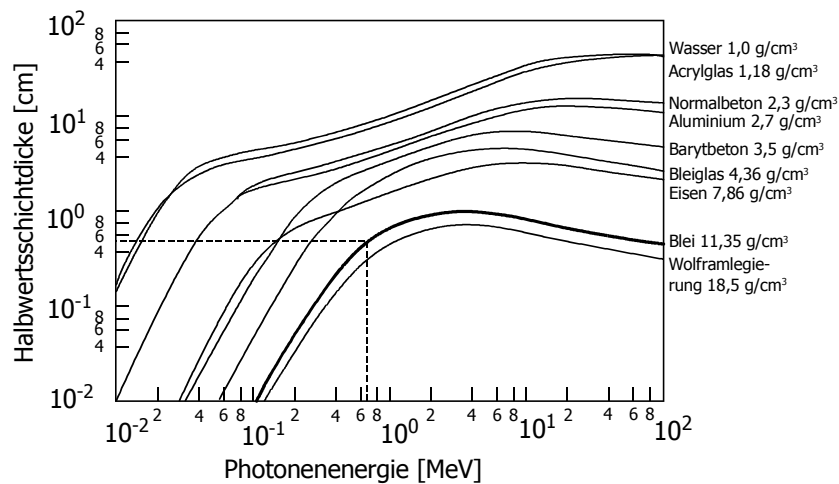


Abb. 2-19: Halbwertschichtdicke d_h von Photonenstrahlung bei Schmalstrahlgeometrie in Abhängigkeit von der Photonenenergie für verschiedene Abschirmmaterialien (nach VOGT & SCHULTZ 1992).

Die Halbwertschichtdicken für verschiedene Abschirmmaterialien in Abhängigkeit von der Energie der Photonenstrahlung lassen sich aber auch direkt aus Abb. 2-19 ablesen. Aus dem Diagramm erhält man für Blei ebenfalls eine HWS von ca. 5,5 mm, d.h. nach 5,5 mm wird die Photonenflussdichte um die Hälfte, nach 11 mm auf ein Viertel und nach 16,5 mm auf 1/16 der Anfangsflussdichte abgeschwächt. Diese Überlegungen sind bei der Abschirmung des Detektors für die Messungen mit verschiedenen Blickrichtungen in Kapitel 6.6 von Bedeutung. Je dicker die Segmente der Bleiabschirmung um den Detektor gewählt werden, umso deutlicher sind die Signalunterschiede in den einzelnen Blickrichtungen sofern Dichteunterschiede vorhanden sind. Problematisch wird dabei allerdings, dass aufgrund der mit $11,35 \text{ g/cm}^3$ hohen Dichte von Blei, das Gewicht mit jedem Millimeter mehr an Abschirmung sehr stark zunimmt und die γ -Sonde sich bei den Messfahrten zu verdrehen beginnt.

Der Comptoneffekt ist bei einer Photonenenergie $E_\gamma \leq 0,7 \text{ MeV}$ der dominierende Wechselwirkungsprozess bei Materie mit kleiner Ordnungszahl. Es handelt sich dabei um einen echten Streuprozess bei dem die Anzahl der Primärphotonen nicht geändert wird, lediglich ihre Energie wird verringert und ihre Ausbreitungsrichtung ändert sich um den Streuwinkel Θ . Die durch den Comptoneffekt beschleunigten Elektronen verlieren ihre Energie rasch durch die Ionisation entlang ihres Weges und haben nur eine geringe Reichweite. Die gestreuten Photonen können nun, sofern ihre Energie stark genug verringert wurde, durch den Photoeffekt absorbiert werden, eine Comptonstreuung erfahren, oder die Materie durchdringen.

Durch die Comptonstreuung werden im Gegensatz zum Photoeffekt zwar keine γ -Quanten vernichtet. Ihre Anzahl bleibt unverändert, lediglich ihre Flugrichtung ändert sich. Geht man von einem parallelen Strahlenbündel mit einer bestimmten Flussdichte aus, dann bewirkt die Comptonstreuung eine Abschwächung der Flussdichte in sofern, dass durch den Streuprozess mit zunehmender Wegstrecke im Absorber immer mehr γ -Quanten von ihrer parallelen Bahn abgelenkt werden, dadurch eine stetig größer werdende Fläche in Anspruch nehmen und sich damit die Anzahl der γ -Quanten pro Flächeneinheit reduziert.

Für die Auswertung der Signalverläufe in Kapitel 6 bedeutet dies, dass die Abnahme der Zählrate bei einer Kanalbefahrung mit der γ -Sonde je nach Versuchsbedingungen auch daher resultieren kann, dass der Weg den die γ -Quanten von der Quelle bis zum Detektor zurücklegen mussten, länger wurde, da sich der Ort an dem die meisten Wechselwirkungen stattgefunden

haben verlagert hat und damit die Flussdichte am Detektor abnimmt.

Betrachtet man das Strahlungsfeld einer punktförmigen Strahlungsquelle im Vakuum, die in alle Richtungen gleichmäßig (isotrop) γ -Quanten emittiert, dann nimmt die Flussdichte mit wachsendem Abstand von der Quelle umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes auch ohne Wechselwirkungen mit der Materie ab. Diese Gesetzmäßigkeit folgt daraus, dass die von einem Strahlenbündel durchsetzte Oberfläche einer Kugel um den Quellpunkt quadratisch mit dem Abstand zunimmt. Dementsprechend nimmt die pro Flächeneinheit und Zeitintervall auftretende Teilchenzahl (Flussdichte) im umgekehrten Verhältnis ab. Die Anzahl der γ -Quanten insgesamt bleibt dabei konstant. Diese Gesetzmäßigkeit wird Abstandsgesetz genannt und hat große Bedeutung für den Strahlenschutz im Umgang mit radioaktiven Stoffen. Es ist eine einfache aber sehr effektive Schutzmaßnahme und besagt: Abstand zur Quelle immer möglichst maximal halten. Für die Auswertung der Messsignale der γ - γ -Sonde bedeutet das Abstandsgesetz dementsprechend eine Abnahme der Zählrate mit wachsender Wegstrecke der γ -Quanten zwischen Quelle und Detektor.

2.3 Strahlungsdetektoren

Im vorhergehenden Abschnitt 2.2 wurden die Wechselwirkungen der Strahlung mit der Materie erläutert. Es zeigte sich, dass die geladenen Teilchen ihre Energie auf direkte Weise durch Anregung oder Ionisation weitergeben, während die ungeladenen Teilchen zunächst in einem elementaren Prozess geladene Teilchen erzeugen, auf diese ihre Energie ganz oder teilweise übertragen und die dann ihrerseits mit der Materie wechselwirken. Es gibt eine ganze Reihe unterschiedlicher Möglichkeiten, die verschiedenen Strahlungsteilchen nachzuweisen. Im Folgenden wird jedoch ausschließlich die Funktionsweise eines anorganischen Kristallszintillators zur Detektion von γ -Quanten, wie er bei den Messungen mit der γ - γ -Sonde in Kapitel 6 verwendet wurde, besprochen.

2.3.1 Der Szintillationsdetektor

Ionisierende Strahlungsteilchen können bei Wechselwirkungen in bestimmten Materialien (Szintillatoren) momentan Lichtblitze (Szintillationen) auslösen, bei denen die Menge der Photonen ein Maß für die Energie der auftreffenden Teilchen ist. Die Zeitdauer der Lichtemission wird durch die Abklingzeit ge-

2.3 Strahlungsdetektoren

kennzeichnet, die je nach Szintillationsmaterial zwischen etwa 3 ns und 4.000 ns liegt. Zum Nachweis wird das Licht über einen Lichtleiter auf eine lichtempfindliche Elektrode (Photokathode) geleitet, aus der es Elektronen auslöst. Diese werden in einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV), oder meist auch Photomultiplier genannt, durch ein System von Emissionselektroden (Dynoden) entsprechend Abb. 2-20 schrittweise in ihrer Anzahl so verstärkt, dass am Ausgang ein großer energieproportionaler Stromimpuls auftritt (LEO 1987).

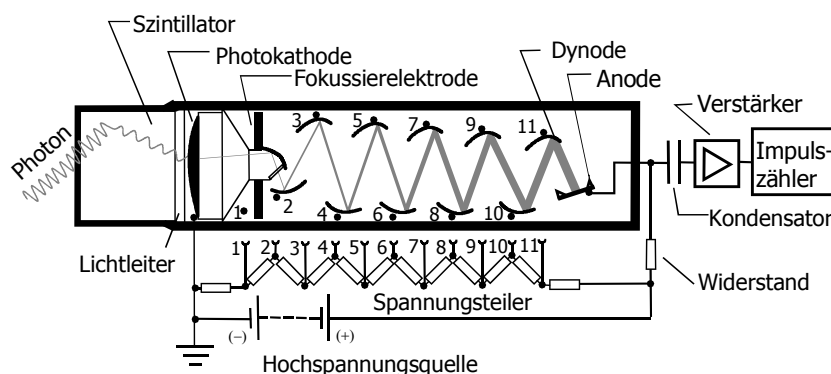


Abb. 2-20: Prinzip des Szintillationsdetektors (VOGT & SCHULTZ 1992).

Strahlungsteilchen verschiedener Energien können somit als Impulse entsprechend unterschiedlicher Impulshöhen registriert werden. Bei einem idealen Detektor müsste deshalb z.B. Photonenstrahlung mit diskretem Energiespektrum auch zu einem diskreten Spektrum der Impulshöhe, einem Linienspektrum führen. In realen Detektoren entstehen allerdings stets Signalverluste durch Photonen, die im Gefolge der Wechselwirkungen den Detektor wieder verlassen und ihre Energie nicht auf Elektronen übertragen und damit auch nicht zum Szintillationsimpuls beitragen. Dies hat verkleinerte Impulshöhen zur Folge, wodurch kleinere einfallende Photonenenergien vorgetäuscht werden. TI aktiviertes NaJ hat unter den Alkalijodiden die größte Lichtausbeute und ist der am meisten verwendete anorganische Kristallszintillator. Er zeichnet sich wegen der großen effektiven Ordnungszahl durch einen besonders großen Wirkungsquerschnitt für Photonenwechselwirkungen aus. Nachteilig ist jedoch die große Empfindlichkeit gegen Luftfeuchtigkeit, die eine wasserdichte Umschließung dieser Detektoren erforderlich macht (Kap. 3.1.2) (NEUERT 1966).

2.3.2 Die Signalverarbeitung

Die elektrischen Impulse aus den Detektoren werden in elektronischen Schaltkreisen mit dem Ziel verarbeitet, die analoge und zeitliche Information möglichst vollständig zugänglich zu machen. Die Nachweiselektronik kann in drei Teile gegliedert werden.

Unmittelbar vom Detektor gelangt der Impuls in den Analogteil, wo er verstärkt und für die Weiterverarbeitung geeignet geformt wird. Am Ausgang des analogen Teils ist im allgemeinen noch die gesamte Information verfügbar, die der Detektor über ein Ereignis hat, d.h. über die Energie, die durch ein Ereignis im Detektor deponiert worden ist und über den Zeitpunkt, an dem dies stattgefunden hat. Die Information über die Energie liefert das Ladungsintegral, da dieses proportional zur Energie ist.

Im nächsten Schritt werden die analogen Impulse in Standardimpulse umgewandelt, sobald das Analogsignal am Eingang eine bestimmte Höhe überschreitet (Diskriminator). Bei der Umwandlung geht Information verloren, da das analoge Impulsspektrum kontinuierlich, die Auswahl der zu registrierenden Impulse jedoch diskontinuierlich ist.

Im dritten Teil, dem digitalen Teil werden die vorliegenden Informationen gesammelt und ausgegeben. Zu diesem Zweck werden die logischen Impulse mit einem Impulzzähler registriert. Als Ausgabe erhält man eine Zählrate der γ -Quanten die im Detektor Impulse erzeugt haben, die die eingestellten Energieschwelle überschritten haben. Die Ausgabe der Daten kann über einen Monitor, Drucker, etc. erfolgen, oder in einem Speichermedium abgelegt und zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Im digitalen Teil kann z.B. auch die Messzeit eingestellt werden, indem der Zähler über einen Gate-Eingang nur für eine vorgegebene Zeit geöffnet wird (Kap. 3.1.3).

2.4 Das γ - γ -Verfahren in der Bohrlochgeophysik

Bei der Dichtemessung mit dem γ - γ -Messverfahren wird mit einer γ - γ -Sonde ein Bohrloch befahren, um nach entsprechender Kalibrierung und Auswertung der Daten die Dichte des umgebenden Gesteins zu bestimmen. Die Sonde besteht aus einer linearen Anordnung von einer γ -Quelle, verschiedenen Bleiabschirmungen und meist zwei Detektoren (Abb. 2-21). Dieses Verfahren wurde in der Bohrlochgeophysik entwickelt, um Aussagen zur mineralogischen Zusammensetzung und sedimentologischen Entwicklung der durchteuften Gesteinsschichten zu treffen und um seismischen Interpretationen und la-

gerstättenkundliche Berechnungen durchführen zu können. Für die Bohrtechnik sind die Daten aus Gründen der technischen Sicherheit von großer Bedeutung.

Am unteren Ende einer Bohrloch γ - γ -Sonde befindet sich eine γ -Quelle, bei den Sonden in Abb. 2-21 wurde hierfür Cs-137 mit einer Aktivität von ca. 3,6 GBq verwendet. Darüber befinden sich zwei NaJ-Szintillationszähler als Detektoren zum Nachweis von γ -Strahlung, die gegen die direkte Strahlung durch Bleikörper gegen die γ -Quelle abgeschirmt sind.

Die von der Quelle emittierte γ -Strahlen werden an den Elektronenhüllen der Atome, aus denen das durchteufte Gestein besteht, gestreut (Comptoneffekt Kap. 2.2.6) und je nach deren Dichte mehr oder weniger absorbiert (Photoeffekt Kap. 2.2.5). Ein Teil der Streustrahlung wird zu den Detektoren rückgestreut und wird dort quantitativ erfasst (Kap. 2.3). Es wird also nicht die Materialdichte, sondern die Elektronendichte bestimmt, was jedoch bei den Elementen bis zur Ordnungszahl $Z = 26$ (Fe) bis auf einen Faktor dasselbe ist, da das Verhältnis der Elektronenzahl Z zur relativen Atommassenzahl A_r bis zum Element Eisen, mit Ausnahme von $Z = 1$ (H), in guter Näherung konstant ist.

$$\frac{Z}{A_r} \approx 0,5 \quad (2.36)$$

Das bei der Messung erfasste Volumen ist im wesentlichen vom Abstand Quelle - Detektor (bei Bohrloch γ - γ -Sonden "Spacing" genannt), der Energie der Quelle und der Dichte des Gesteins abhängig. Seine horizontale Maximalausdehnung beträgt für ein Spacing von ca. 40 cm bei einer Dichte von $1,8 \text{ g/cm}^3$ ungefähr 15 cm (WONIK 2000). Als Eindringtiefe wird jene Materialdicke definiert, die 90% der Zählrate hervorruft (FRICKE & SCHÖN 1999). HEARST & NELSON (1985) geben eine Zusammenstellung von Literaturwerten zur Eindringtiefe von γ - γ -Sonden verschiedener Autoren:

- 9 - 12 cm je nach Sondentyp und Dichte (GULIN & PONYATOV 1969)
- 5 cm für Cs-137 Quelle und $\rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$ (FERRONSKIY et al. 1968)
- 6 cm für Cs-137 Quelle und $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$ (FERRONSKIY et al. 1968)
- ≤ 12 cm für Co-60 Quelle (FERRONSKIY et al. 1968)
- 12 cm kompensierte Sonde, $\rho = 2,1 \text{ g/cm}^3$ (SCERMAN & LOCKE 1975)
- 15 cm für Cs-137 Quelle, bei einem Spacing von 40 cm und $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$ (WONIK et al. 2000)

Der Messfehler bei der Bestimmung der Gesteinsdichte kann laut WONIK

(2000) unter optimalen Laborbedingungen bei 1 - 2% gehalten werden, im Bohrloch muss jedoch mit dem doppelten Messfehler gerechnet werden.

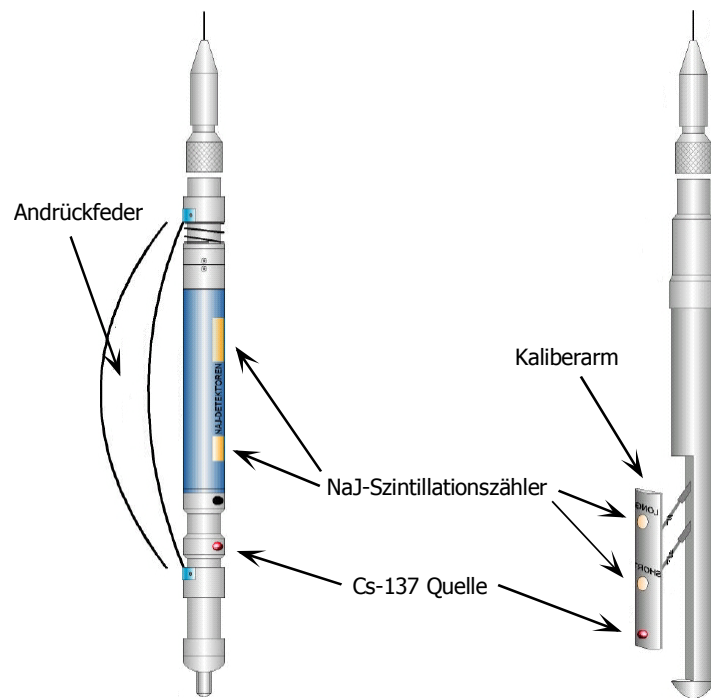


Abb. 2-21: Zwei Beispiele für die technische Ausführung von Bohrloch γ - γ -Sonden zur Bestimmung der Gesteinsdichte (nach WONIK et al. 2000).

Zur Herleitung des Zusammenhangs zwischen der gemessenen Intensität der rückgestreuten γ -Quanten und der Dichte des Absorbermaterials sind hier die entscheidenden Gleichungen aus den vorangegangenen Kapiteln noch einmal zusammengestellt. Die Nummer hinter der Gleichung bezieht sich auf die ursprüngliche Textstelle. Die entsprechenden Einschränkungen und Randbedingungen für die Gültigkeit der jeweiligen Gleichung sind dort nachzulesen.

Der Wirkungsquerschnitt für den Comptoneffekt setzt sich zusammen aus:

$$\sigma_C = \sigma_{C \text{ Streu}} + \sigma_{C \text{ Absorp}} \quad (2.30)$$

und ist proportional der Ordnungszahl

$$\sigma_a = \sigma_e \cdot Z \quad (2.32)$$

Der Absorptionskoeffizient ist das Produkt des Wirkungsquerschnitts mit der Anzahl der Wechselwirkungspartner.

$$\mu_C = \sigma_C \cdot N \text{ [cm}^{-1}\text{]} \quad (2.16)$$

Die Anzahl der Wechselwirkungspartner pro Volumeneinheit lässt sich berechnen aus dem Produkt der Avogadro'schen Zahl, der Dichte und der Ordnungszahl geteilt durch die relative Atommassenzahl des Absorbermaterials:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho \cdot Z}{A_r} \left[\frac{\text{Elektrone}}{\text{cm}^3} \right] \quad (2.18)$$

Die Abnahme der Intensität elektromagnetischer Strahlung durch Absorption in der Materie wird durch die Beziehung

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d} \quad (2.19)$$

beschrieben, wobei I die gemessene Intensität der Strahlung nach dem Durchgang durch eine Absorber mit der Dicke d und dem Absorptionskoeffizient μ ist. I_0 ist die Intensität der Quelle. Setzt man Gleichung (2.36) in Gleichung (2.18) und diese wiederum in Gleichung (2.16) so erhält man

$$\mu_C = \sigma_C \cdot N_A \cdot \rho \cdot 0,5 \quad (2.37)$$

und somit eine proportionale Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten des Comptoneffekts von der Dichte ρ des Absorbers. Der totale lineare Absorptionskoeffizient μ ist die Summe der partiellen Absorptionskoeffizienten der Einzelprozesse:

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_C + \mu_p \quad (2.21)$$

Da aber bei den eingesetzten γ -Energien kein Paarbildungseffekt auftreten kann und die Ordnungszahlen der meisten gesteinsbildenden Elemente kleiner als $Z = 26$ ist (Tab. 2-1), dominiert der Comptoneffekt so stark (Abb. 2-15), dass Gleichung (2.37) in Gleichung (2.19) eingesetzt werden kann. Damit ist die Funktion der Intensität der gemessenen rückgestreuten γ -Quanten in Abhängigkeit von der Dichte des durchstrahlten Materials gegeben.

Um über den gemessenen Wert der Intensität der rückgestreuten γ -Quanten dann die tatsächliche Gesteinsdichte möglichst genau bestimmen zu können sind allerdings noch Korrekturen (Lithologiekorrektur bei Abweichung von $Z/A = 0,5$) und entsprechende Kalibrierungen der γ - γ -Sonde durchzuführen (Abb. 2-22). Genauere Ausführung für die praktische Anwendung einer γ - γ -Sonde, die Durchführung der Korrekturen und Kalibrierungen sind unter anderem in BELKNAP ET AL. (1956), BENDER (1985), , FRICKE & SCHÖN (1999), GORBACHEV (1995), HATZSCH (1994), HEARST & NELSON 1985, KEYS (1997), KNÖDEL ET AL. (1997), KREKCHI (1975), LABO (1987), MILITZER & WEBER (1985),

MILITZER et al. (1986), PIRSON (1963), SCHLUMBERGER (1978, 1982) und SCHULZ (2000) nachzulesen.

Tab. 2-1: Zusammenstellung der wichtigsten gesteinsbildenden Elemente mit ihren entscheidenden Parametern für die Dichtebestimmung mit der $\gamma\text{-}\gamma$ -Methode. Z = Ordnungszahl, A_r = relative Atommasenzahl, Gew. % = Elementhäufigkeit in der kontinentalen Kruste, k.a. = keine Angabe (nach ZSCHERPE & STEINBRECHER 1997; BERCKHEMMER 1990; MORTIMER 1987).

Element	Z	A_r	Z/A_r	Gew. %
H	1	1,008	0,9921	k.a.
C	6	12,011	0,4995	k.a.
O	8	16,000	0,5000	47
Na	11	22,991	0,4784	3
Mg	12	24,32	0,4934	2
Al	13	26,98	0,4818	8
Si	14	28,09	0,4984	28
S	16	32,07	0,4989	k.a.
Cl	17	35,46	0,4794	k.a.
K	19	39,10	0,4859	3
Ca	20	40,08	0,4990	4
Fe	26	55,85	0,4655	5

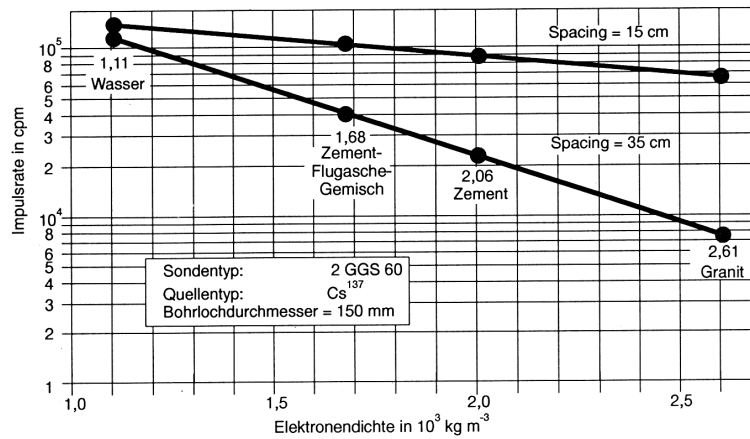


Abb. 2-22: Beispiel zweier Kalibrierungskurven für eine $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde (KNÖDEL et al. 1997).

2.5 Das γ - γ -Verfahren bei der Hohlraumortung

Die in den vorangegangenen Kapiteln 2.1, 2.2 und 2.3 erarbeiteten theoretischen Grundlagen dienen dem Verständnis, warum und wie das γ - γ -Messverfahren in der Bohrlochgeophysik zur Bestimmung der Gesteinsdichte (Kap. 2.4) eingesetzt werden kann und warum es als logische Konsequenz daraus auch zur Hohlraumortung im Umfeld von Kanälen geeignet ist.

Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Messungen mit einer γ - γ -Sonde in Abwasserkanälen (Kap. 6) war es nicht das Ziel, aus der Zählrate der rückgestreuten γ -Quanten eine Dichte in g/cm^3 der umgebenden Materie wie in der Bohrlochgeophysik, sondern Veränderungen der Dichte des Materials im Umfeld der Kanäle, wie sie z.B. durch einen Hohlraum oder einen Hausanschluss verursacht werden, zu bestimmen. Entscheidend für die Interpretation der Messergebnisse in Kapitel 6 ist also die relative Veränderung der Zählrate, verursacht durch eine relative Veränderung der scheinbaren spezifischen Dichte. Relativ bezieht sich dabei auf eine Veränderung der Werte bezogen auf einen beliebigen anderen Messpunkt. Die scheinbare spezifische Dichte setzt sich zusammen aus der Dichte der Kanalrohrwandung und der Dichte der Rohrbettung.

Eine exakte Bestimmung der Dichte ist bei dem verwendeten Versuchsaufbau (Kap. 3) nicht möglich, da die γ - γ -Sonde im Kanalrohr zentriert geführt wird damit asymmetrische geometrische Faktoren, vor allem bei Messungen mit verschiedenen Blickrichtungen (Kap. 6.6), das Messsignal nicht verfälschen. Eine Bohrloch γ - γ -Sonde wird im Gegensatz dazu mit einem Dezentrierbügel oder auch Anpressfeder (Abb. 2-21) genannt, an die Rohrwandung gedrückt, damit der Luftspalt oder gegebenenfalls die Bohrspülung das Messergebnis nicht verfälschen und die Zählrate anhand den Kalibrierungsmessungen in einen Dichtewert umgerechnet werden kann. Eine Auswertung der Kanalbefahrungen allein anhand der relativen Signaländerungen vereinfacht den Mess- und Auswerteaufwand allerdings auch erheblich und macht die γ - γ -Sonde ohne langwierige Kalibrierungen im Vorfeld schnell und flexibel in unterschiedlichen Kanälen mit unterschiedlichen Rohr- und Bettungsmaterialien einsatzbereit.

3 DIE γ - γ -SONDEN VERSUCHSANORDNUNG UND -DURCHFÜHRUNG

3.1 Aufbau der γ - γ -Sonde

Die γ - γ -Sonde besteht aus einer linearen Anordnung von einem Strahlergehäuse und dem Detektor (Abb. 3-1). Am Strahlergehäuse ist die Positionierstange befestigt, mit der das Strahlergehäuse im Sondengehäuse verschoben und damit der Abstand a zwischen der Quelle und der Mitte des Detektors verändert werden kann, ohne das Gehäuse der γ - γ -Sonde zu öffnen. Die gewünschte Position der Quelle wird fixiert, indem die Positionierstange mit einer Schraube am Sondengehäuse festgeklemmt wird. Der Abstand a kann stufenlos zwischen minimal 18 cm und maximal 72 cm verändert werden.

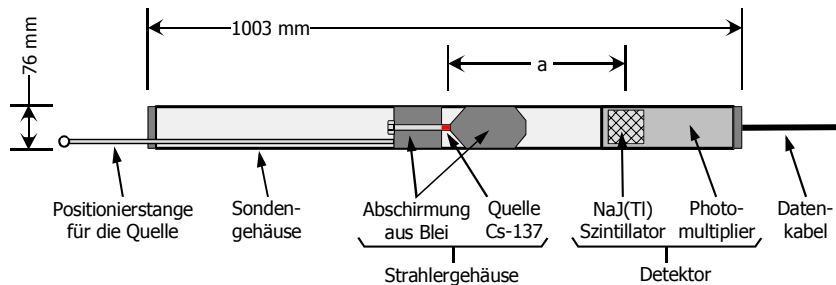


Abb. 3-1: Aufbau der γ - γ -Sonde.

3.1.1 Das Strahlergehäuse

Das Strahlergehäuse besteht aus zwei Bleikörpern und der γ -Quelle (Abb. 3-1). Die Bleikörper schirmen einen bestimmten Bereich des ansonsten symmetrischen, kugelförmigen, isotropen Strahlungsfeldes der Quelle ab. Der linke Bleikörper schirmt den rückwärts gerichteten Teil des Strahlungsfeldes ab, da dieser für das Messsignal keinen Beitrag liefert (vgl. Kap. 2.5) aber die Ortsdosisleistung (Kap. 3.3.2) im rückwärtigen Teil der γ - γ -Sonde unnötig erhöhen würde. Der rechte Bleikörper schirmt den Detektor gegen die direkte Strahlung der Quelle ab. Trotzdem erreichen den Detektor immer eine endliche Anzahl an γ -Quanten, da elektromagnetische Strahlung sich niemals ganz abschirmen lässt (Gl. (2.19)) und ein Teil der γ -Quanten den Absorber durchdringen (vgl. Abb. 6-1). Die Bleiabschirmung bewirkt jedoch, dass das Grundsignal, verursacht durch die direkte Strahlung, klein gegen das Messsignal bleibt.

3.1 Aufbau der γ - γ -Sonde

Als γ -Quelle wird das Radionuklid Cs-137 verwendet (Kap. 2.1.7). Der radioaktive Stoff wird als massive Keramik in die Strahlerkapsel eingebaut und von zwei Hüllen doppelt umschlossen (Abb. 3-2). Dadurch kann das radioaktive Präparat auch bei extremer mechanischer und thermischer Beanspruchung der Strahlerkapsel nicht entweichen, eine Kontamination der Umgebung, oder die Inhalation oder Inkorporation des offenen radioaktiven Stoffes durch das Bedienpersonal ist damit ausgeschlossen. Die thermische und mechanische Beanspruchbarkeit dieses Kapseltyps wird in DIN 25 426 Teil 1 beschrieben, die genauen Daten des Strahlers sind dem Datenblatt VZ 79/1 des Herstellers Amersham Buchler in Braunschweig zu entnehmen. Die Aktivität der Quelle betrug im Jahr 2000 ca. 740 MBq, bei einer Halbwertszeit von 30 Jahren ist die Aktivität für den Zeitraum der durchgeführten Messungen entsprechend Gleichung (2.9) als annähernd konstant zu betrachten.

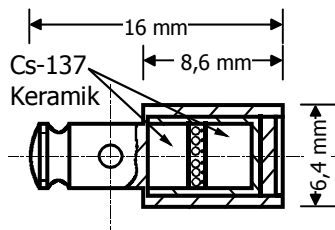


Abb. 3-2: γ -Quelle mit dem Radionuklid Cs-137 als massive Keramik in doppelt umschlossener Kapselung.

3.1.2 Der Detektor

Zur Detektion der γ -Quanten wird in der γ - γ -Sonde ein NaJ(Tl) Szintillator verwendet (Abb. 3-1), die Abmessungen des Kristalls betragen 52 mm in der Länge bei einem Durchmesser von 55 mm. Die Funktionsweise eines Szintillationsdetektors ist in Kapitel 2.3.1, die Signalverarbeitung in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Der Detektor ist fest mit dem Sondengehäuse verbunden und nicht beweglich. Die Elektronik ist gegen Spritzwasser geschützt und weitestgehend wasserdicht. Das Eintauchen des Detektors in Wasser sollte bei der verwendeten Bauausführung jedoch vermieden werden. Bei einem industriellen Einsatz der γ - γ -Sonde ist auf eine wasserdichte Ausführung des Detektors unbedingt zu achten.

3.1.3 Der Auswerterechner

Der Detektor ist über ein 100 m langes Kabel mit dem Auswerterechner verbunden. Das Kabel liefert die Spannungsversorgung für den Photomultiplier und leitet die von ihm erzeugten elektrischen Impulse zurück an den Auswerterechner.

Mit dem Auswerterechner wird per Tastendruck eine Messung gestartet. Die detektierte Anzahl an γ -Quanten wird als Zählrate (Anzahl pro Zeiteinheit) in counts per second (cps) auf einem Display angezeigt (Integralkontrollator) und gleichzeitig im ASCII-Format in eine Datei geschrieben.

Wie lange eine Messung dauert, kann im Menüpunkt Parameter eingestellt werden. Einganguntersuchungen haben ergeben, dass die mit einer Sekunde kürzeste einstellbare Messzeit, bei der verwendeten Quellstärke von $A = 740 \text{ MBq}$, eine ausreichende Statistik liefert und die Schwankungen der Zählrate bei Messungen unter gleichen Bedingungen sehr klein gegen das Messsignal sind. Die natürlichen Schwankungen der Zählrate ergeben sich zum einen dadurch, dass die angegebene Aktivität einer Quelle, also die radioaktiven Zerfälle pro Zeiteinheit, ein statistischer Prozess ist und über einen längeren Zeitraum gemittelt wird (vgl. Kap. 2.1.4). Zum anderen unterliegt die Anzahl der Wechselwirkungen der γ -Quanten mit der Materie natürlichen statistischen Schwankungen, da alle Prozesse nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit stattfinden (vgl. Kap. 2.2).

Zu jeder Zählrate wird die entsprechende Position der Messung abgespeichert. Dies geschieht durch die Addition eines einstellbaren Weginkrements von Messpunkt zu Messpunkt. Der Datenspeicher fasst bis zu 1000 Wertepaare (Position, Zählrate), die nach Abschluss der Messungen mit einem Nullmodemkabel über die seriellen Schnittstellen und einem beliebigem Terminalprogramm auf einen PC übertragen werden können. Die Datensätze sind mit jedem ASCII-Editor lesbar und können entsprechend mit einem Tabellenkalkulationsprogramm und dem γ - γ -Sonden-Diagnosemodul (Kap. 6.8, FREY 2003) weiterbearbeitet und die Messergebnisse graphisch dargestellt und ausgewertet werden (Kap. 6).

3.1.4 Der Lagerungs- und Transportbehälter

Zum Transport und zur Lagerung der γ - γ -Sonde ist eine Abschirmung der Quelle notwendig, um die Ortsdosisleistung in der Umgebung der Sonde auf die vorgeschriebenen Werte zu reduzieren (Tab. 3-1). Hierzu wird die Sonde

3.1 Aufbau der γ - γ -Sonde

(Abb. 3-1) in den Transportbehälter eingeschoben und mit dem Sicherungsbolzen und einem Vorhängeschloss gegen unbefugte Entnahme gesichert (Abb. 3-3). In dieser Position ist die Quelle zusätzlich durch einen 7 cm dicken und 18,5 cm langen Bleizylinder abgeschirmt.

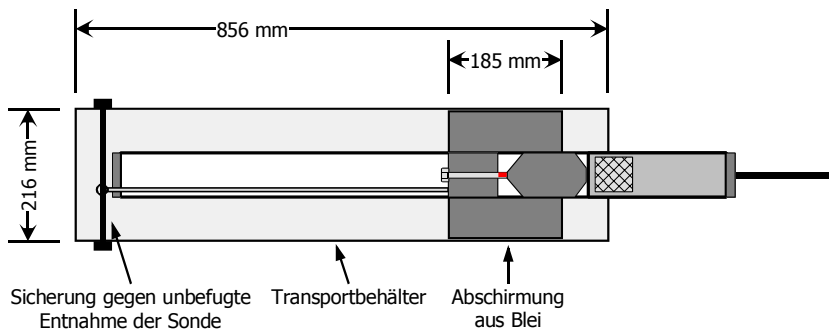


Abb. 3-3: γ - γ -Sonde im Transportbehälter.

3.1.5 Der Zentrierschlitten

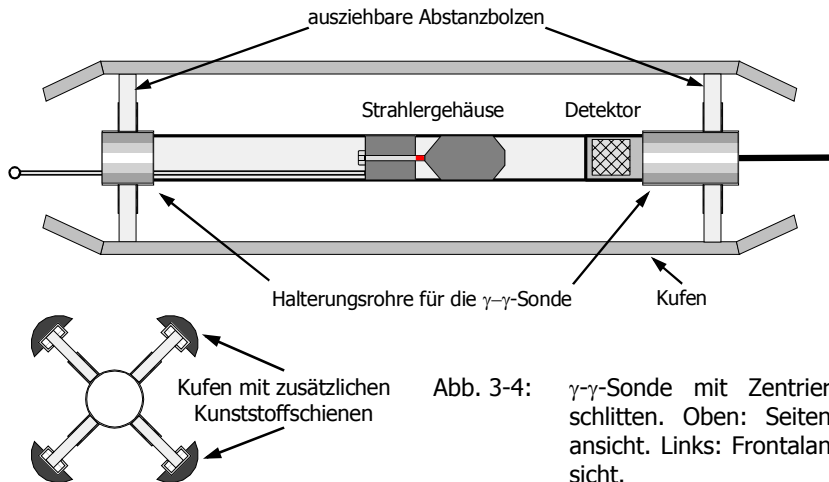


Abb. 3-4: γ - γ -Sonde mit Zentrierschlitten. Oben: Seitenansicht. Links: Frontalansicht.

Bei Messungen mit der γ - γ -Sonde im Kanal ist auf eine zentrierte Führung der Sonde zu achten (vgl. Kap. 6.6). Hierzu wird die γ - γ -Sonde aus dem Transportbehälter entnommen, in die Halterungsrohre des Zentrierschlittens eingeschoben (Abb. 3-4) und mittels einer Klemmschraube an den Halterungsrohren befestigt. Durch einen Teleskopmechanismus und Verlängerungsbolzen

lassen sich die Abstanzenbolzen in ihrer Länge stufenlos verändern und an Rohrdurchmesser von DN 200 bis DN 600 anpassen. An die Kufen, bestehend aus einem Aluminiumrechteckprofil, können halbrunde Kunststoffschienen befestigt werden um den Reibungswiderstand zu reduzieren und die Abnutzung der Aluminiumprofile zu verhindern.

3.1.6 Die variable Bleiabschirmung am Detektor

Mit der linearen Anordnung von Quelle und Detektor (Abb. 3-1) erreichen den Detektor in einem homogenen Umfeld statistisch gesehen aus allen Richtungen einer Ebene senkrecht zur Längsachse des Kanals, die gleiche Anzahl an rückgestreuten γ -Quanten. Damit wird die Position eines Hohlraumes in der Längsachse des Kanals, anhand der Veränderung der scheinbaren spezifischen Dichte im Umfeld des Rohres, zwar erkannt, die radiale Position, ob sich der Hohlraum z.B. im Scheitel oder im rechten Kämpferbereich befindet kann nicht festgestellt werden. Damit auch dessen radiale Position ermittelt werden kann (Kap. 6.6), wird am Zentrierschlitten im Bereich des Detektors ein Kunststoffgehäuse mit einer variablen Bleiabschirmung angebracht (Abb. 3-5).

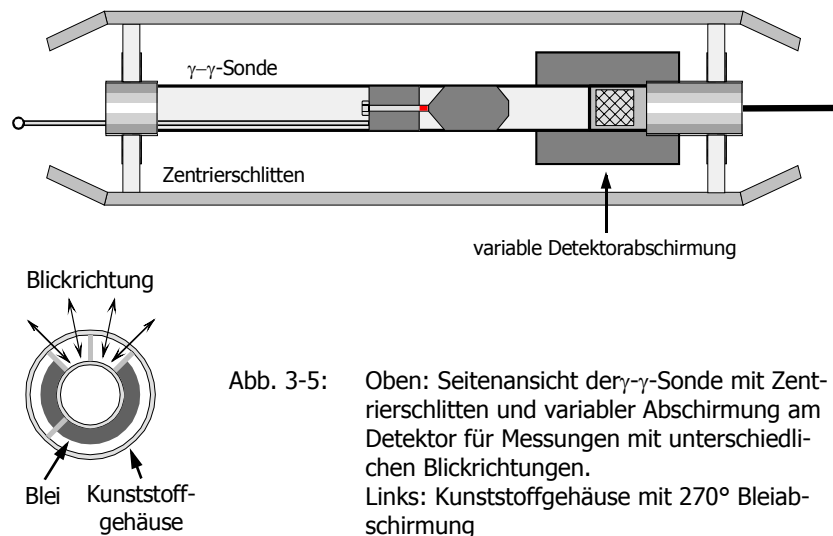


Abb. 3-5: Oben: Seitenansicht der γ - γ -Sonde mit Zentrierschlitten und variabler Abschirmung am Detektor für Messungen mit unterschiedlichen Blickrichtungen.
Links: Kunststoffgehäuse mit 270° Bleiabschirmung

Das Kunststoffgehäuse ist in vier Segmente unterteilt 1 x 180°, 1 x 90° und 2 x 45°. Diese Segmente können jeweils mit bis zu 30, je 1 mm dicken, entsprechend vorgeformten Bleiblechen gefüllt werden. Je nach Belegung der

einzelnen Segmente, kann damit ein Bleikörper um den Detektor aufgebaut werden, der ein Zylindersegment mit 45°, 90°, 135° usw. bis 360° abschirmt. Das Kunststoffgehäuse wiederum, und damit auch das Zylindersegment aus Blei, lässt sich ebenfalls in 45° Schritten um den Detektor drehen. Diese variable Bleiabschirmung am Detektor absorbiert entsprechend ihrer Dicke (Kap. 2.2.9) einen Teil der rückgestreuten γ -Quanten, so dass das Messsignal hauptsächlich von γ -Quanten aus der Richtung ohne Bleiabschirmung erzeugt wird. Dieser für das Messsignal ausschlaggebende Bereich ohne Abschirmung wird im Folgenden als Blickrichtung des Detektors bezeichnet. Die Blickrichtungen sind bei allen Messungen immer von der Sicht der γ - γ -Sonde aus in Fahrtrichtung angegeben, so wie es den rechts - links Angaben einer TV-Befahrung entspricht. Für eine schnelle und einfache Orientierung wird die Blickrichtung als Uhrzeit, z.B. 03:00 für rechts, oder 07:30 für links unten, der kürzeren Schreibweise wegen jeweils ohne die Bezeichnung "Uhr", angegeben (Abb. 6-25).

3.2 Die Versuchsdurchführung

3.2.1 Versuche in der Teststrecke im FZU

In der Teststrecke im FZU wurde eine große Anzahl an Messkampagnen mit der γ - γ -Sonde durchgeführt. Die Beschreibung des Aufbaus der Teststrecke ist in Kapitel 5.1 nachzulesen, die Ergebnisse der Messungen werden in Kapitel 6 vorgestellt. Zur Durchführung einer Messung sind einige wenige vorbereitende Maßnahmen notwendig. Alle Personen die mit der γ - γ -Sonde arbeiten, müssen innerhalb der letzten sechs Monate eine Strahlenschutzbelehrung vom Strahlenschutzbeauftragten erhalten haben und tragen während der Messung ein Personendosimeter (Kap. 3.3). Für die jeweiligen Versuchsreihen wird am Zentrierschlitten das Kunststoffgehäuse für die variable Abschirmung des Detektors in der gewünschten Position angebracht und die für diesen Versuch vorgesehenen Segmente mit der entsprechenden Anzahl Bleibleche befüllt. Anschließend wird der Zentrierschlitten ins Rohr der Teststrecke geschoben und die Länge der Abstanzbolzen so angepasst, dass die Halterungsrohre für die γ - γ -Sonde zentriert im Rohr sind. Am hinteren Ende des Zentrierschlittens wird an den dafür vorgesehenen Ösen ein Seil, am vorderen ein Maßband befestigt. Am Auswerterechner werden die Messzeit und die Weginkremente eingestellt (Kap. 3.1.3) und das Datenkabel der γ - γ -Sonde angeschlossen. Wenn alle Vorbereitungen abgeschlossen sind, wird die γ - γ -Sonde aus dem Transportbehälter entnommen und in die Halterungsrohre des Zentrierschlittens

tens eingeführt. Da das Datenkabel auch als Zugseil verwendet wird, muss die extra dafür vorgesehene kunststoffummantelte Drahtseele im Datenkabel zur Zugentlastung an einer Öse des Zentrierschlittens befestigt werden. Mit den Seilen an beiden Enden kann die γ - γ -Sonde an jede beliebige Position im Kanal gezogen werden. Die Positionsbestimmung erfolgt über das mitgeführte Maßband. Mit einer Taste am Auswerterechner wird die Messung gestartet, danach die neue Position angefahren usw. Das Auslesen der Datensätze wird in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Nach Abschluss einer Messfahrt wird das Kunststoffgehäuse mit der Detektorabschirmung in die gewünschte neue Position gedreht, die Sonde wieder neu positioniert und die Messfahrt mit anderer Blickrichtung gestartet.

3.2.2 Versuche in realen Abwasserkanälen

Die prinzipielle Art der Versuchsdurchführung ändert sich bei Messungen mit der γ - γ -Sonde in realen Abwasserkanälen nicht. Der Einsatz einer γ - γ -Sonde ist jedoch bei externem Umgang beim zuständigen Gewerbeaufsichtsamt vorher schriftlich anzumelden. Mit dem zuständigen Amt der Kommune ist die Absperrung, Sicherung und Reinigung des Straßen- und Kanalabschnitts zu klären. Gegebenenfalls ist während den Messungen eine Wasserhaltung zu betreiben, je nach Wasserzustrom genügt auch eine Absperrung der Haltung mit einer Blase. Vor der Befahrung mit der γ - γ -Sonde wurde bei unbekanntem Kanalabschnitt stets eine TV-Befahrung durchgeführt um etwaige Hindernisse, wie einragende Hausanschlüsse oder starken Wurzeleinwuchs zu erkennen und ein Verklemmen des Zentrierschlittens im Kanal zu vermeiden. Bei externem Einsatz der Versuchsanordnung wird ein Stromaggregat für die Stromversorgung verwendet.

3.3 Strahlenschutz beim Umgang mit der γ - γ -Sonde

Der Versuchsaufbau enthält das Radionuklid Cs-137 (Kap. 3.1.1), welches über einen β^- -Zerfall in Ba-137m zerfällt. Aus diesem angeregten Zustand geht es unter Emission eines γ -Quants mit der Energie $E_\gamma = 0,6616$ MeV in den Grundzustand über (Kap. 2.1.7). Das Bedienpersonal der γ - γ -Sonde ist somit unter bestimmten Bedingungen und zeitlich begrenzt radioaktiver Strahlung ausgesetzt. Laut Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) vom 26. Juli 2001 § 6 Abs. 1 und Abs. 2 ist jeder, der mit radioaktiven Stoffen umgeht dazu verpflichtet, unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und

Umwelt zu vermeiden und jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.

Da der Mensch kein Sinnesorgan zur Wahrnehmung von radioaktiver Strahlung besitzt, sind für den sicheren Umgang mit radioaktiven Stoffen entsprechende Grundkenntnisse bezüglich der physikalischen Vorgänge und deren biologischen Wirkungen erforderlich (Kap. 3.3.1). Fehlen diese Grundkenntnisse, so neigen die meisten Menschen zu zwei Extremen: einer übertriebenen und realitätsfremden Abneigung, oder im schlimmeren Fall zu einem sorglosen und gefährlichen Umgang mit radioaktiven Stoffen. Nur wer über die notwendigen Kenntnisse verfügt, kann die Gefahr einer Strahlenexposition sowohl einschätzen als auch relativieren und ein vernünftiges Verhältnis im Umgang mit der γ - γ -Sonde finden. Personen die mit radioaktiven Stoffen umgehen sind daher laut StrlSchV vom Strahlenschutzbeauftragten in regelmäßigen Abständen über die Gefahren und den sicheren Umgang zu belehren. Zusätzlich wurde eine Strahlenschutzanweisung für den sicheren und ordnungsgemäßen Umgang mit der γ - γ -Sonde (01.03.2000) schriftlich verfasst. Diese ist stets bei den Unterlagen zur γ - γ -Sonde mitzuführen und somit dem Bedienpersonal jederzeit zugänglich. Stark vereinfacht wird der Umgang mit der γ - γ -Sonde durch die spezielle Bauart der verwendeten Strahlerkapsel (Kap. 3.1.1). Das verwendete Radionuklid ist so gekapselt, dass eine Kontamination von Mensch und Umwelt mit dem Radionuklid Cs-137 oder eine Inkorporation oder Inhalation von Cs-137 nicht möglich ist.

Eine unnötig hohe Strahlenexposition von Mensch und Umwelt, insbesondere des Bedienpersonals wird vermieden, indem:

- nur die Personen sich im Strahlungsfeld der γ - γ -Sonde aufhalten, wie es die gegebene Situation zur Bedienung erfordert,
- die γ - γ -Sonde nur im dafür vorgesehenen Transportbehälter transportiert oder gelagert wird (Abb. 3-3, Tab. 3-1),
- alle vorbereitende Maßnahmen für eine Messung bereits abgeschlossen sind, bevor die γ - γ -Sonde aus dem Transportbehälter entnommen wird,
- zu jedem Zeitpunkt, den Umständen entsprechend, auf einen maximalen Abstand zum Strahler geachtet wird (Abstandsgesetz Kap. 2.2.9, Tab. 3-1),
- die Zeit während der sich eine Person im Strahlungsfeld der γ - γ -Sonde aufhält, den Umständen entsprechend, möglichst kurz zu halten ist.

Befindet sich die γ - γ -Sonde im Transportbehälter, so ist die Ortsdosisleistung an der Oberfläche des Behälters durch die Transportabschirmung bereits auf ca. 7,5 μ Sv/h reduziert (Tab. 3-1). Zum Vergleich: Würde sich eine Person 2000 Stunden, das entspricht 250 Arbeitstagen (entspricht ca. einem Jahr ohne Urlaubstage, VOLKMER 2003) mit je 8 Stunden Arbeitszeit, direkt an der Oberfläche der Transportabschirmung aufhalten, dann wäre die maximal mögliche Ortsdosis 15 mSv und damit immer noch 5 mSv unter dem Grenzwert der effektiven Dosis von 20 mSv für beruflich strahlenexponierte Personen.

Bereits bei einer Entfernung von nur einem Meter vom nicht abgeschirmten Strahler nimmt die Ortsdosisleistung von ca. 7 mSv/h auf 0,07 mSv/h ab (Tab. 3-1). Erst nach 285 Stunden, das sind fast 36 Arbeitstagen mit je 8 Stunden Arbeitszeit erreicht die Ortsdosis in 1,0 m Abstand vom nicht abgeschirmten Strahler mit 19,95 mSv knapp den Grenzwert.

Tab. 3-1: Angaben zur Ortsdosisleistung mit und ohne Transportbehälter in unterschiedlichen Entfernungen entsprechend den Genehmigungsunterlagen der Herstellerfirma RGI vom 29.11.1999.

Ort der Messung:	Ortsdosisleistung:
An der Oberfläche der Abschirmung	ca. 7,5 μ Sv/h
0,1 m Abstand vom nicht abgeschirmten Strahler:	ca. 7000,0 μ Sv/h - Messstrahl
1,0 m Abstand vom nicht abgeschirmten Strahler:	ca. 70,0 μ Sv/h - Messstrahl

Bei Versuchen mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Versuchsaufbau der γ - γ -Sonde ist die Zeit, in der das Bedienpersonal einer direkten Strahlenexposition ausgesetzt ist, auf wenige Minuten pro Tag begrenzt. Sie beschränkt sich auf den kurzen Zeitraum, in dem die Sonde aus der Transportabschirmung entnommen und in den Kanal eingeführt wird. Werden dabei die oben aufgeführten Maßnahmen zur Minimierung der Strahlenexposition eingehalten, ist das Erreichen des Grenzwertes der effektiven Dosis in Höhe von 20 mSv im Kalenderjahr gänzlich ausgeschlossen.

Die γ - γ -Sonde ist eine experimentelle Versuchsanordnung, für die zu Beginn der Arbeit keine Erfahrungen vorlagen, wie sich der Umgang mit dem Versuchsaufbau im Detail gestalten wird. Deshalb wurde in Absprache mit dem zuständigen Gewerbeaufsichtsamt Karlsruhe, entsprechend der Genehmigung vom 19.01.2000, in der Strahlenschutzanweisung (§ 34 StrlSchV) für den Umgang mit der γ - γ -Sonde vom 01.03.2000 festgelegt, dass das Bedienperso-

nal der γ - γ -Sonde während den Messungen ein amtliches, persönlich zugeordnetes Personendosimeter (Filmplakette) zu tragen hat. Die Auswertung der Filmplaketten erfolgte monatlich durch das GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz, in Neuherberg. Bei keiner der Filmplaketten konnte ein aufgenommener Dosiswert über der Nachweisgrenze nachgewiesen werden.

Bei einer für den industriellen Einsatz angefertigten γ - γ -Sonde können entsprechende bauliche Schutzmaßnahmen getroffen werden, so dass das Tragen eines Personendosimeters nicht notwendig sein wird und der Umgang noch sicherer und einfacher für das Bedienpersonal ist (Kap. 7.4).

3.3.1 Biologische Wirkung ionisierender Strahlung

Die Strahlenwirkung ionisierender Strahlung auf biologische Gewebe erfolgt zunächst über die sehr kurzzeitigen physikalischen Wechselwirkungsprozesse mit den Atomen. Die Strahlung verliert dabei einen Teil ihrer Energie durch Absorption, wobei Ionisierung und Anregung die entscheidende Rolle spielen. Für die Wirkung der Strahlung ist es unwesentlich, ob sie von außen auf den Körper einfällt, oder aus radioaktiven Stoffen stammt, die inkorporiert sind. Die Schädigung eines Gewebes hängt vielmehr von der Strahlenart, Energie und Flussdichte sowie der Einwirkdauer des Strahlenfeldes im betroffenen Gewebe ab. Die physikalischen Wechselwirkungsprozesse können Änderungen der Atomverbindungen (Moleküle) verursachen, die wiederum die Eigenschaften und das Verhalten der Zellen beeinträchtigen. Insbesondere können chemisch aktive Moleküle (Radikale) erzeugt werden, die auf lebenswichtige Zellbereiche einwirken. Dadurch kann entweder unmittelbar die Lebensfunktion einer Zelle beeinträchtigt werden (Verlangsamung oder Blockierung von Zellteilung, Zelltod usw.) oder eine Veränderung der Erbanlagen (Mutation) der Zelle entstehen, die bei der Teilung auf weitere Zellen übertragen wird. Besonders schwerwiegend wirken sich solche Erbveränderungen aus, wenn sie in Keimzellen (Ei- oder Spermazellen) oder während des frühen Wachstums eines Organismus erfolgen. Da die Zellen im Verlauf der Zellteilung besonders strahlungsempfindlich werden, erweisen sich Gewebe mit hoher Zellteilungsrate als besonders strahlungsgefährdet (Knochenmark, Haut), während Zellen, die sich weniger häufig teilen, wesentlich resistenter sind (Nerven, Bindegewebe, Muskeln) (VOGT & SCHULZ 1992; VOLKMER 2003).

Hinsichtlich der Wirkung auf den Organismus wird unterschieden zwischen Schäden in Körperzellen (somatischen Strahlenschäden), die am bestrahlen

Organismus in Erscheinung treten und Schäden in Keimzellen (genetischen Strahlenschäden), die entweder schon frühzeitig die Lebensfähigkeit entstehenden Lebens verhindern oder erst bei der Nachkommenschaft durch somatische Wirkungen in Erscheinung treten (VOGT & SCHULZ 1992; VOLKMER 2003). Man unterscheidet ferner zwischen stochastischen und deterministischen Strahleneffekten. Das Ausmaß dieser Effekte bestimmt wesentlich die Strahlengrenzwerte für den Menschen (LENKETT 1996).

Unter deterministischen Strahlenschäden versteht man Schäden, die als Summe vieler elementarer Strahlenwirkungsprozesse auftreten. Sie können erst oberhalb von Dosiswellenwerten auftreten, sind also nicht zufallsabhängig. Bis zu einer bestimmten Dosis tritt keine Schädigung auf, ab dem Schwellenwert jedoch regelhaft. Zu den deterministischen Strahlenschäden gehört z.B. die Trübung der Augenlinse.

Stochastische Schäden entstehen durch die Wirkung eines einzigen Korpuskels, Röntgen- oder γ -Quants. Ein einziger radioaktiver Strahl setzt dabei die Schädigung in vollem Umfang, die Dosis der Strahlung hat keinen Einfluss auf das Ausmaß des Schadens (Alles-oder-Nichts-Gesetz), sondern nur auf die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines solchen. Die stochastischen Schädigungen sind also den Gesetzmäßigkeiten des Zufalls unterworfen.

Die direkte Strahlenwirkung ("Treffertheorie") bewirkt das Herauslösen eines oder mehrerer Bindungselektronen aus einem Molekül der Zelle und damit der Verlust der biologischen Eigenschaften des Moleküls. Dies kann zum Absterben der Zelle, oder durch Veränderungen im Genmaterial zu Mutationen führen. Mit der Dosis steigt die Trefferzahl und damit die Wahrscheinlichkeit des Zelltodes. Bei indirekter Strahlenwirkung verliert ein Wassermolekül ein Bindungselektron, es wird dadurch zum hochreaktiven Radikal und holt sich ein Elektron aus einem organischen Molekül. Meist sind davon die Nukleotidbasen im Zellkern betroffen, wodurch z.B. die DNS und RNS ihre biologische Wirksamkeit verlieren (KIEFER 1981).

Nach dem Zeitpunkt des Auftretens der Strahlenschäden unterscheidet man zwischen Früh- und Spätschäden. Früh einsetzende Schäden (Tage bis Monate) sind z.B. Schädigungen des Knochenmarks und des peripheren Blutbildes sowie Schädigungen von Magen- und Darmzellen und die akute Strahlenkrankheit nach Ganzkörperbestrahlung. Zu den Strahlenspätschäden (Jahre) zählen: Teratogene Schäden (Entwicklungsanomalien), Mutagene Schäden (Genetische Defekte), Cancerogene Schäden (Krebsentstehung).

3.3.2 Dosisbegriffe im Strahlenschutz

Im Folgenden werden verschiedene Begriffe kurz erläutert, welche im praktischen Strahlenschutz beim Umgang mit radioaktiven Quellen häufig verwendet werden. Da diese Thematik sehr komplex ist, muss im Einzelfall auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen werden.

Die Energiedosis D beschreibt das Verhältnis aus der gesamten von der Strahlung durch Ionisation und Anregung an die Materie in einem kleinen Volumenelement übertragenen Energie und der Masse in dem bestrahlten Volumenelement. Die Einheit der Energiedosis ist Joule durch Kilogramm (J/kg), ihr besonderer Einheitenname ist das Gray (Gy).

Die Ionendosis J beschreibt die mit der Energieübertragung von Strahlung auf Materie verknüpfte Wirkung und zwar die elektrische Ladung, die in einem Luftvolumen freigesetzt wird. Es ist der Quotient aus dieser Ladung und der in dem betrachteten kleinen Volumenelement enthaltenen Masse trockener Luft, die Einheit ist Coulomb durch Kilogramm (C/kg) (VOGT & SCHULTZ 1992).

Auch bei gleicher Energiedosis kann ionisierende Strahlung verschieden starke biologische Wirkungen im Körpergewebe hervorrufen. Im allgemeinen ist die Wirkung um so stärker, je größer die Ionisierungsdichte wird. Nach der Strahlenschutzverordnung ist die Äquivalentdosis H das Produkt aus der Energiedosis D und dem Bewertungsfaktor q , der seinerseits das Produkt aus dem Qualitätsfaktor Q und dem modifizierenden Faktor N ist. Die Einheit der Äquivalentdosis ist ebenfalls Joule/kg (J/kg), ihr besonderer Einheitenname ist Sievert (Sv). Der Ausdruck Äquivalentdosis wird im Strahlenschutz für Strahlendosen weit unter den Schwellenwerten für deterministische Strahlenwirkungen als Grundlage zur Abschätzung stochastischer Strahlenwirkungen verwendet (VOGT & SCHULTZ 1992).

Unter der Ortsdosis wird die an einem bestimmten Ort gemessene Äquivalentdosis für Weichteilgewebe verstanden. In der Ortsdosimetrie werden Messungen frei im Strahlungsfeld durchgeführt. Solche Messungen haben im allgemeinen vorsorgende Bedeutung in dem Sinne, dass damit erwartete Strahlenexposition von Personen vorab abgeschätzt werden können.

Die effektive Dosis ist die Summe der gewichteten Organdosen in bestimmten Geweben oder Organen des Körpers durch äußere oder innere Strahlenexposition (§ 3 StrlSchV). Für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis 20 mSv im Kalenderjahr (§ 55 StrlSchV). Der Grenzwert für die Summe der in allen Kalenderjahren ermittelten effektiven Dosen beruflich strahlenexponierter Personen beträgt 400 mSv (§ 56 StrlSchV).

4 MODELLIERUNG

4.1 Aufgabenstellung für die Modellierung

Das Messsignal (Kap. 6) enthält keine Information darüber, wo die Wechselwirkungen tatsächlich stattgefunden haben. Es handelt sich dabei lediglich um eine Zählrate pro Zeiteinheit die sich je nach Abstand zwischen Quelle und Detektor, Abschirmung des Detektors, Rohrmaterial, Rohrdurchmesser, Rohrwanddicke, Bettungsmaterial etc. verändert. Das Simulationsprogramm GLog wurde entwickelt, um den signifikanten Bereich der Wechselwirkungen, die Eindringtiefe und den Messbereich in der Längsachse des Rohres (Z-Achse Abb. 4-3) zwischen Quelle und Detektor bestimmen zu können. GLog gibt unter anderem Auskunft über Ort und Art der Wechselwirkungen und den zurückgelegten Weg jedes einzelnen Photons. Mit den Ergebnissen der Simulationen kann der typische Verlauf des Messsignals beim Passieren einer Muffe oder eines Hohlraums erklärt werden, so dass den charakteristischen Signalverläufen (Kap. 6) des Messsignals eine exakte Messposition im Kanalrohr zugeordnet werden kann.

Nach erfolgreicher Anpassung des Modells an die Realität für Messungen mit der γ - γ -Sonde im Abwasserkanal können die Simulationen mit GLog zukünftig auch für die Auswertung des Messsignals bei bisher unbekanntem Randbedingungen genutzt werden. Dadurch wird es nicht mehr unbedingt notwendig sein, zeit- und kostenintensive Teststrecken (Kap. 5) zu errichten um die Auswirkungen unterschiedliche Rohrmaterialien, Rohrdurchmesser, Rohrgeometrien, Rohrwandstärken etc. auf das Messsignal zu untersuchen.

4.2 Das Simulationsprogramm GLog

4.2.1 GEANT die Basis von GLog

Mit der Entwicklung des Simulations-Programms GLog wurde Herr Dipl.-Phys. K. Daumiller beauftragt. GLog basiert auf dem Detektor Beschreibungs- und Simulations-Tool GEANT (**GE**ometry **ANd** **T**racking), welches Bestandteil der Programmbibliothek des CERN (**C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire), der Europäischen Organisation für Kernphysik in Genf ist.

GEANT simuliert den Durchgang von Elementarteilchen durch Materie. Ursprünglich wurde GEANT für Hoch-Energie-Physik-Experimente entwickelt, mittlerweile wird GEANT jedoch auch in anderen wissenschaftlichen Bereichen wie zum Beispiel der Medizin, der Biologie, dem Strahlenschutz und der Raumfahrt eingesetzt (CERN 1994). Die grundlegenden Funktionen von

GEANT sind:

- die Simulation des Versuchsaufbaus (Geometry),
- der Transport (Tracking) von Teilchen durch einen Versuchsaufbau um das Ansprechverhalten eines Detektors zu simulieren,
- die graphische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Spuren (Trajektorien) der Elementarteilchen.

Die beiden letzten Funktionen sind in der interaktiven Version von GEANT miteinander kombiniert, so dass sowohl die Optimierung des Versuchsaufbaus als auch die Fehlersuche in der Entwicklungsphase des Programms durch die direkte optische Kontrolle vereinfacht wird.

GEANT ermöglicht dem Benutzer:

- die Beschreibung des Versuchsaufbaus mit einer Vielzahl von geometrischen Volumen. Jedem Volumen wird eine MEDIUM-NUMMER zugewiesen, wobei unterschiedliche Volumen die gleiche MEDIUM-NUMMER haben können. Ein Medium ist definiert durch die sogenannten TRACKING MEDIUM-Parameter, die auf das MATERIAL, mit dem die Volumen gefüllt sind, verweisen (Anhang 2: GEOMETRY & MATERIALS);
- die Erzeugung von Teilchen mittels Monte Carlo Generatoren (Anhang 2: PARTICLES & INITIALIZATION OF KINEMATICS);
- den Transport dieser Teilchen durch die unterschiedlichen Bereiche des Versuchsaufbaus unter Berücksichtigung der Grenzen der geometrischen Volumen und den physikalischen Effekten entsprechend der Natur der Teilchen selbst, ihren Wechselwirkungen mit der Materie und dem magnetischen Feld (Anhang 2: TRACKING & PHYSICS);
- die Aufzeichnung der Teilchenspuren (Anhang 2: EVENT PROCESSING HISTORY & OUTPUT ADDITIONAL SIMULATED DATA);
- die Simulation und Aufzeichnung des Ansprechverhaltens des Detektors (Anhang 2: DIGITALIZATION & OUTPUT SIMULATED RAW DATA);
- die Visualisierung des Versuchsaufbaus und der Teilchenspuren (Anhang 2: OUTPUT DRAWING).

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, müssen die einzelnen Unterprogramme (Module) von GEANT entsprechend mit Informationen über den Versuchsaufbau, die verwendeten Materialien, die Quelle und den Detektor versorgt und miteinander verknüpft werden.

4.2.2 Systemvoraussetzungen und Datenverwaltung

Glog wurde entwickelt für UNIX / Linux Betriebssysteme. Die Simulationen mit GEANT sind im Allgemeinen extrem rechenintensiv, so dass für Simulationen mit ausreichender Statistik innerhalb akzeptabler Laufzeit ein Rechner mit maximal möglicher Rechenleistung notwendig ist. In der vorliegenden Arbeit wurden überwiegend die Parallelrechner IBM RS/6000 SP-256 und IBM SP-SMP im Rechenzentrum der Universität Karlsruhe verwendet.

Die Rechenzeit die eine Simulation beansprucht hängt im Wesentlichen von der Energie und der Anzahl der generierten Teilchen ab. Bei den meisten Simulationen wurden zwischen $5 \cdot 10^5$ und $5 \cdot 10^7$ γ -Quanten generiert, die für das Verfolgen eines γ -Quants im Versuchsaufbau (TRACKING) benötigte Zeit lag zwischen $2 \cdot 10^{-1}$ s und $2 \cdot 10^{-4}$ s. Die Rechenzeit für eine Simulation der γ - γ -Sonde an einer bestimmten Position im Versuchsaufbau betrug damit zwischen 0,5 h und 12 h, die Simulation einer Versuchsreihe mit 20 bis 50 verschiedenen Positionen benötigte manchmal mehrere Tage. Da die Parallelrechner jedoch mehrere Simulationen gleichzeitig bearbeiten können, konnte die insgesamt benötigte Zeit stark reduziert werden.

Die bei den Simulationen anfallende Datenmenge hängt neben der Anzahl der generierten Teilchen auch von der Auswahl an Informationen ab, die bei jeder Wechselwirkung abgespeichert werden soll. Die Informationen werden als Ntuple in eine hbook-Datei geschrieben. Dabei handelt es sich um eine Parameterliste bei der für jedes Ereignis alle Relationen und Abhängigkeiten sämtlicher abgespeicherter Variablen erhalten bleiben. Zum Auslesen der hbook-Dateien und zur Datenanalyse ist das vom CERN entwickelte Datenanalyseprogramm PAW (Physics Analysis Workstation) erforderlich.

4.2.3 Die Bedienung des Programms GLog

Der ausführbare Programmcode von GLog wird über Shell-Skripte aufgerufen, welche die Bedienung erleichtern indem sie einige Konfigurationsschritte automatisieren. Mit dem Steuerskript `glog.steer` (Anhang 3) können ausgewählte Parameter für den Lauf einer bestimmten Simulation (run) in das Programm eingelesen werden (Tab. 4-1).

Eine Simulation der Bewegung der γ - γ -Sonde durch das Kanalrohr wird durch mehrere aufeinanderfolgende einzelne Simulationen an unterschiedlichen Positionen erreicht. Dies erfolgt am einfachsten im sogenannten Batch-Modus. Hierbei werden automatisch entweder nacheinander, oder je nach Rechner auch parallel, die gewünschten Simulationen mit der entsprechenden Positionierung der γ - γ -Sonde gestartet. Im Batch-Modus wird die Anfangs-, Endposition und Schrittweite der γ - γ -Sonde festgelegt. Daraus werden die entsprechenden Steuerskripte generiert. Die einzelnen Simulationen erhalten fortlaufende Run-Nummern (z.B. RUNG 100 Tab. 4-1), die zur Identifikation auch dem Steuerskript (z.B. `glog.steer.100`), der Protokolldatei (z.B. `100.jobout`) und der Ausgabedatei (z.B. `100.hbook`) zugeordnet werden.

Tab. 4-1: Auswahl der wichtigsten Eingabeparameter im Steuerskript `glog.steer`.

Parameter	Bedeutung
RUNG 100	Nummer (z.B. 100) der Simulation (run), alle Ausgabedateien wie z.B. <code>100.hbook</code> und <code>100.jobout</code> erhalten automatisch die selbe Nummer vorangestellt.
PROB 0. 50. 0.	Positionierung der Sonde im Rohr entsprechend den x, y, z Koordinaten.
SRCE 1 0.66 1 30	Anzahl Teilchen pro Ereignis Energie des Teilchens in MeV Art des Teilchens (1=Gamma) Distanz zwischen Quelle und Detektor in cm
TUBE 30 2	Innendurchmesser des Rohres in cm Wandstärke des Rohres in cm
TRIG 10000000	Anzahl der Ereignisse welche bei dieser Simulation gestartet werden sollen.

4.2.4 Die graphische Darstellung mit GLog

Die Geometrien aller Körper mit ihren entsprechenden Materialeigenschaften der γ - γ -Sonde und des Versuchsaufbaus der Teststrecke im FZU wurden mit GLog so detailgetreu wie möglich nachgebildet. GEANT stellt dazu standard-

mäßig sechzehn geometrische Körper wie Quader oder Zylinder bereit, auch komplexere Gebilde wie Trapezoide sind definiert. Der gesamte Versuchsaufbau wurde mit diesen Grundbausteinen zusammengesetzt. Nach der Konstruktionsphase wurden den Volumina Materialien zugeordnet. Ein Material wird in GEANT durch Dichte, Massen- und Kernladungszahl bestimmt. Neben standardmäßig definierten Materialien (chemische Elemente) können weitere reine aber auch zusammengesetzte Materialien vorgegeben werden. Bei Stoffen aus mehreren Komponenten werden die charakteristischen Größen aus dem prozentualen Mischungsverhältnis bestimmt.

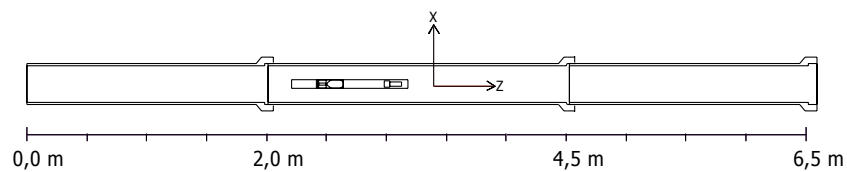


Abb. 4-1: Graphische Ausgabe des mit GLog modellierten Versuchsaufbaus der Testsstrecke im FZU.

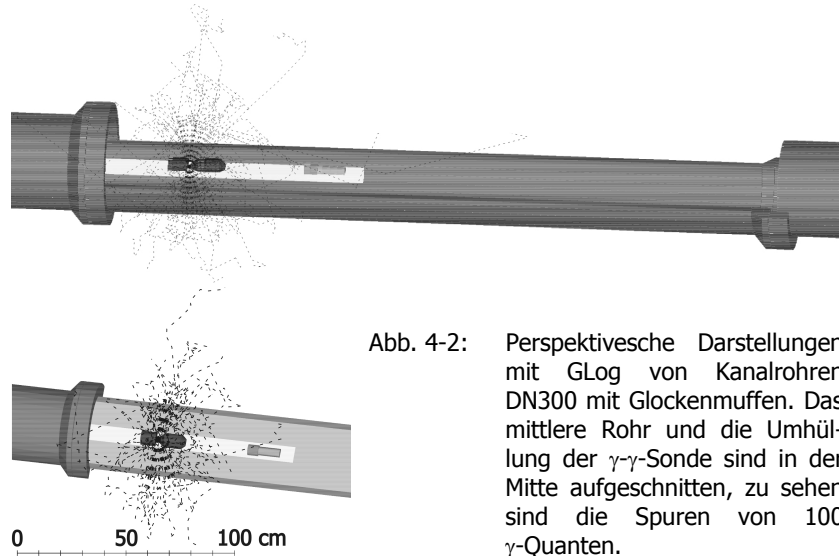


Abb. 4-2: Perspektivische Darstellungen mit GLog von Kanalrohren DN300 mit Glockenmuffen. Das mittlere Rohr und die Umhüllung der γ - γ -Sonde sind in der Mitte aufgeschnitten, zu sehen sind die Spuren von 100 γ -Quanten.

Die Visualisierung des simulierten Versuchsaufbaus durch beliebige Schnitte (Abb. 4-1) und perspektivische Bilder (Abb. 4-2) mit dem graphischen Ausgabemodul ermöglicht eine einfache Überprüfung der Programmierung. Zusätz-

4.3 Ergebnisse der Modellierung mit GLog

lich stellt GEANT die Möglichkeit zur Verfügung, die Teilchenspuren einer Simulation graphisch sichtbar zu machen.

Den Rohren wurde die durchschnittliche Materialzusammensetzung von Steinzeugrohren DN 300 mit einer Dichte von $2,2 \text{ g/cm}^3$ zugewiesen (Kap. 5.1). Entsprechend dem verwendeten sehr reinen Quarzsand (Tab. 5-1) als Bettungs- und Füllmaterial wurde die Rohrumgebung als eine Silizium-Sauerstoff-Mischung mit einer Lagerungsdichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ simuliert (Tab. 5-2). Die Hohlräume wurden jeweils als luftgefüllte Hohlzylinder mit unterschiedlichen Abmessungen simuliert (Abb. 4-3). Prinzipiell sind auch andere Volumen die den realen Formen eines Hohlraumes eher entsprechen möglich, die Auswertung der Simulationen ist jedoch bei spiegel- und rotationssymmetrischen Körpern erheblich einfacher.

Das Modul EVENT PROCESSING HISTORY (Anhang 2) speichert alle Informationen über die γ -Quanten und ihre Wechselwirkungen als Ntuple so ab, wie sie in der Simulation berechnet werden. Dies sind z.B. Art und Ort der Wechselwirkung, neuer Impulsvektor, Streuwinkel, Flugzeit, neue γ -Energie nach einer Wechselwirkung, deponierte Energie im Detektor. Um eine Ausgabe der Zählrate zu erhalten, die der Zählrate der γ - γ -Sonde entspricht, werden im Modul DIGITIZATION (Anhang 2) die Eigenschaften des Detektors und des Auswerterechners berücksichtigt (counts in Abb. 4-6).

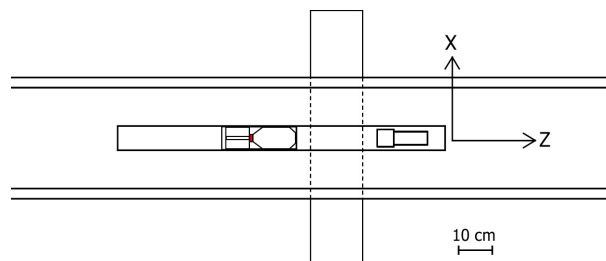


Abb. 4-3: Graphische Ausgabe eines mit GLog modellierten Versuchsaufbaus. Dargestellt ist die γ - γ -Sonde $a = 40 \text{ cm}$, ein Kanalrohr DN300 und ein hohlzylindrischer, luftgefüllter Hohlraum 15 cm breit, 360° .

4.3 Ergebnisse der Modellierung mit GLog

Simulationen der γ - γ -Sonde mit je einhundert γ -Quanten in drei typischen Situationen bei einem intakten Rohr, bei einer Muffe und bei einem Hohlraum

sind in Abb. 4-4 jeweils in mit einem Längs- und einem Querschnitt dargestellt. Die Spuren der γ -Quanten wurden so lange verfolgt und als gestrichelte Linie abgebildet, bis ihre Energien infolge von Wechselwirkungen 10 keV unterschritten. Durch die Form der Bleikörper wird die Quelle so abgeschirmt, dass die γ -Quanten vorzugsweise in einen radialsymmetrischen Kegel abgestrahlt werden.

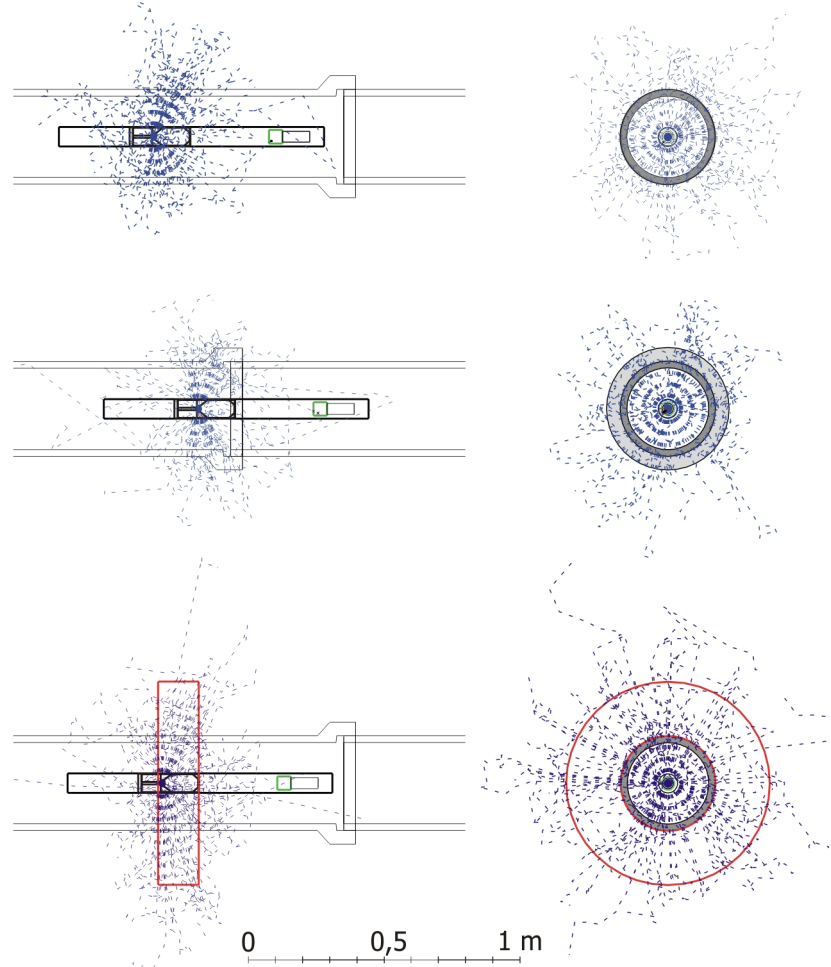


Abb. 4-4: Graphische Darstellung der Modellierungen mit GLog an verschiedenen Positionen in der Teststrecke. Beschreibung im Text.

4.3 Ergebnisse der Modellierung mit GLog

Im oberen linken Bild von Abb. 4-4 ist zu sehen, dass die meisten γ -Quanten im Bereich der γ -Quelle mit der Materie wechselwirken bis sie schließlich absorbiert werden. Nur sehr wenige γ -Quanten werden in Richtung Detektor gestreut, ein γ -Quant hat eine Wechselwirkung im Szintillator und wird dabei vernichtet. Die Eindringtiefe der meisten γ -Quanten beträgt 15 cm bis 20 cm, von einzelnen über 30 cm. Bei den mittleren Abbildungen von Abb. 4-4 ist zu erkennen, dass an der Muffe deutlich mehr γ -Quanten rückgestreut werden und weniger die Rohrwandung durchdringen. Diejenigen γ -Quanten die die Rohrwandung durchdrungen haben, dringen ungefähr gleich tief in die Bettung ein bevor sie absorbiert werden wie im oberen Bild ohne Muffe. Bei einem Hohlraum wie er in den unteren Abbildungen zu sehen ist, dringen die γ -Quanten bis zu 50 cm tief in die Bettung ein, da im Bereich des luftgefüllten Hohlraums die Wahrscheinlichkeit, dass sie absorbiert werden, sehr gering ist. Die Simulationen in Abb. 4-4 dienen lediglich der Anschauung für die geometrischen Verhältnisse, für eine statistische Auswertung sind die simulierten einhundert γ -Quanten nicht ausreichend.

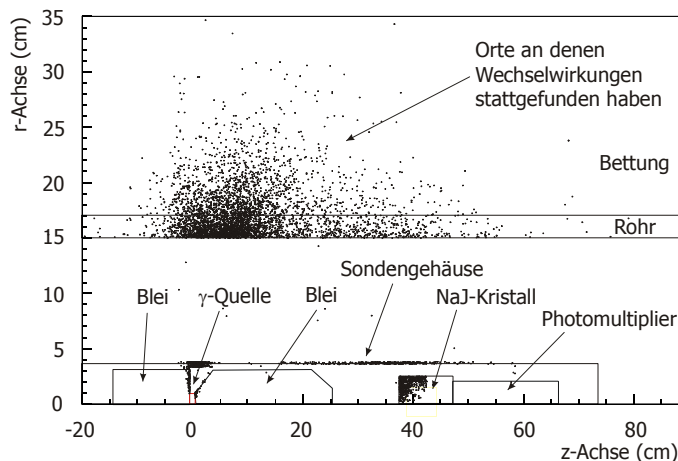


Abb. 4-5: Ausschnitt der simulierten Teststrecke am FZU (Abb. 4-1 und Abb. 4-2) für die Modellierung in Abb. 4-6

Für die folgenden Simulationen (Abb. 4-7 bis Abb. 4-6) wurden an dreißig Positionen mit einer Schrittweite von 6 cm jeweils $0,74 \cdot 10^7$ γ -Quanten generiert. Dies entspricht einem hundertstel der Aktivität der Quelle, die in der γ - γ -Sonde verwendet wurde (Kap. 3.1.1). In der Bettung befand sich ein

15 cm breiter hohlzylindrischer, luftgefüllter Hohlraum (Abb. 4-3). Die Positionen der γ - γ -Sonde wurden in den Simulationen so gewählt, dass die komplette Sonde von rechts nach links am Hohlraum "vorbeifährt". Die Auswertung der Simulationen ist in Abb. 4-6 zu sehen. Aus darstellungstechnischen Gründen bewegt sich in den Abbildungen (linke Spalte) jedoch der Hohlraum von rechts nach links, was wiederum einer Bewegung der γ - γ -Sonde von links nach rechts entspricht. Für die Auswertung wurde ein Schnitt in der Längsachse des Kanals gemacht, so dass vom Kanal und der γ - γ -Sonde nur die Hälfte abgebildet ist (Abb. 4-5). Die Quelle befindet sich auf der z-Achse bei 0 cm, der Detektor bei 40 cm, der Abstand a zwischen Quelle und Detektor beträgt somit ebenfalls 40 cm. Der 2 cm starken Rohrwandung wurden die Materialeigenschaften von Steinzeug zugewiesen, der Innendurchmesser des Kanals betrug 30 cm (DN 300). Der Bettung wurden die Materialeigenschaften von Quarzsand mit einer Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ zugewiesen. Die Punkte in Abb. 4-5 und in der linken Spalte von Abb. 4-6 repräsentieren die Orte, an denen γ -Quanten gestreut wurden, die anschließend im Detektor erfasst wurden. Alle γ -Quanten die nicht zur gemessenen Zählrate beitrugen, sind nicht dargestellt. Die Punkte zeichnen die Geometrie des Messaufbaus nach. Die Diagramme der rechten Spalte in Abb. 4-6 zeigen den Verlauf des simulierten Messsignals.

Die Simulationen zeigen, warum ein Hohlraum bei einer Kanalbefahrung mit der γ - γ -Sonde den typischen Doppelpeak (Abb. 6-10, Abb. 4-6 unten) im Messsignal erzeugt. Deutlich ist zu erkennen, dass die meisten γ -Quanten die zum Detektor rückgestreut werden, auf Höhe der Quelle plus ca. 10 - 15 cm in Richtung zum Detektor einer Wechselwirkung mit der Materie unterliegen. Damit ist der für das Messsignal entscheidende Bereich lokalisiert (Abb. 4-6 oben). Befindet sich der Hohlraum zwischen Quelle und Detektor, steigt die Zählrate an (Abb. 4-6 zweite Reihe von oben), da die im entscheidenden Messbereich rückgestreuten γ -Quanten weniger Materie durchqueren müssen und somit die Wahrscheinlichkeit steigt, dass sie den Detektor erreichen. Der durchschnittliche Streuwinkel Θ ändert sich in diesem Bereich nicht (Abb. 4-7). Befindet sich der Hohlraum direkt über der Quelle (Abb. 4-6 mittlere Reihe), dann dringen die γ -Quanten tiefer ein (Abb. 4-4) und haben somit, sofern sie rückgestreut werden, einen längeren Weg zum Detektor. Damit sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die γ -Quanten den Detektor erreichen. γ -Quanten die tiefer in die Bettung eindringen benötigen einen größeren Streuwinkel Θ um wieder auf den Detektor treffen zu können (Abb. 4-7).

4.3 Ergebnisse der Modellierung mit GLog

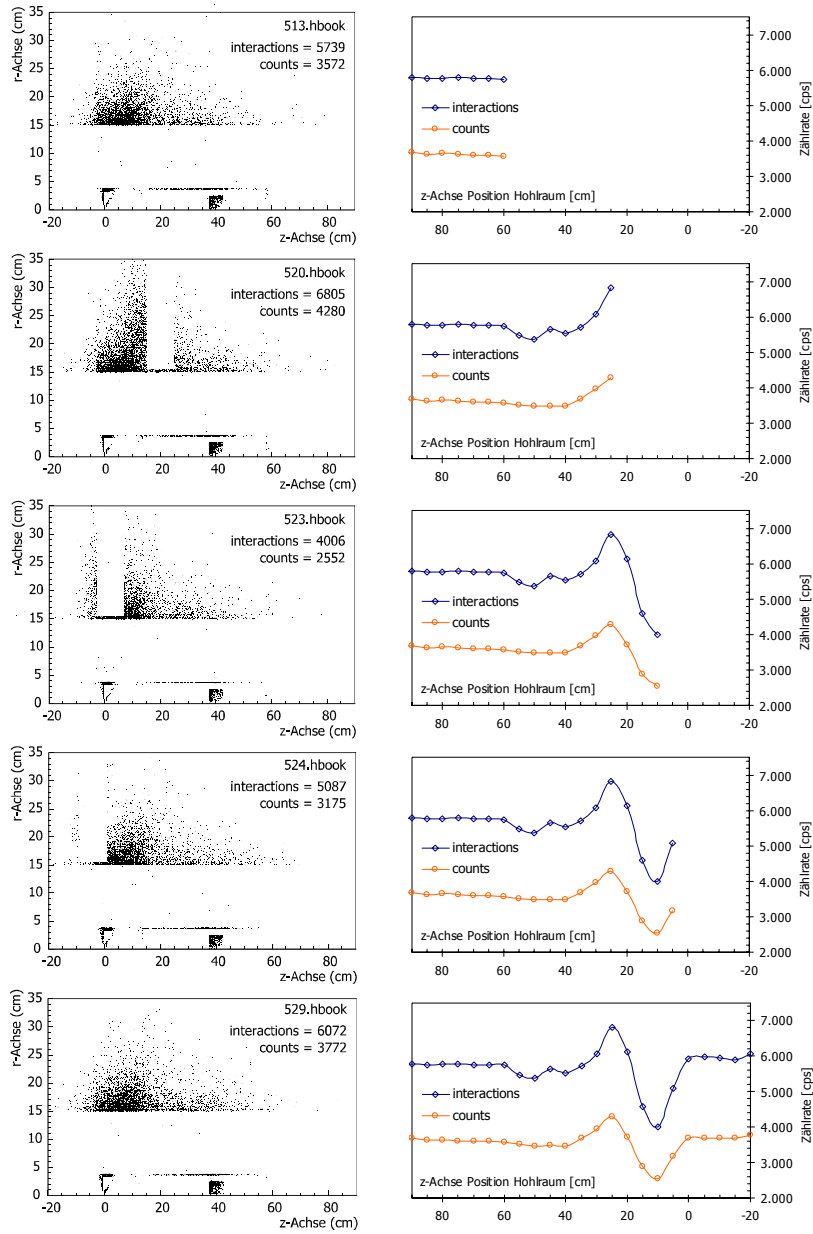


Abb. 4-6: Modellierungsergebnisse eines 10 cm breiten Hohlräume.

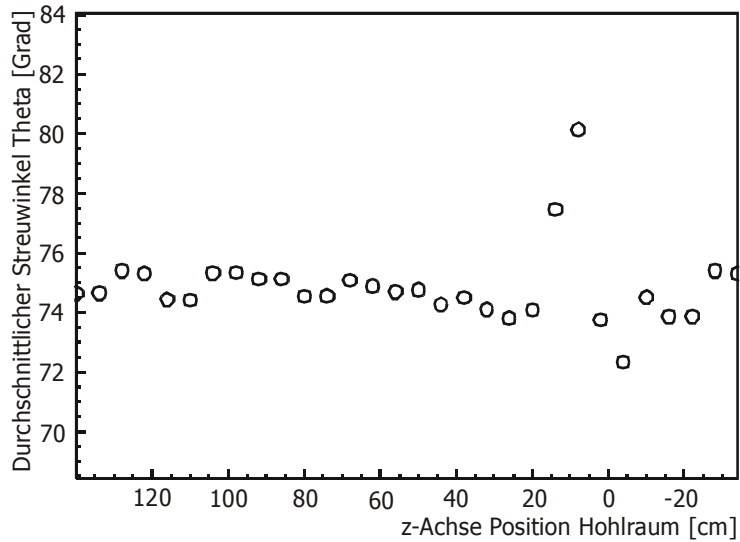


Abb. 4-7: Durchschnittlicher Streuwinkel Θ der γ -Quanten, die im Detektor erfasst wurden.

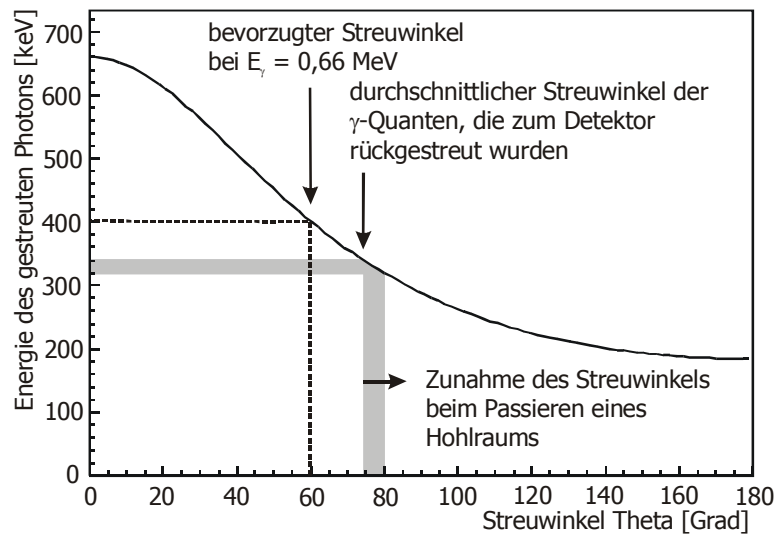


Abb. 4-8: Abnahme der Photonenenergie eines γ -Quants mit $E_\gamma = 0,66$ MeV bei einer Compton-Streuung in Abhängigkeit vom Streuwinkel Θ .

Bei größeren Streuwinkeln steigt der Energieverlust an, den die γ -Quanten bei der Compton-Streuung erleiden (Abb. 2-16, Abb. 2-17) und die Wahrscheinlichkeit, dass die γ -Quanten absorbiert werden, erhöht sich bei kleineren γ -Energien drastisch (Abb. 2-11, Abb. 2-15). Die Zählrate des Messsignals erreicht den Scheitelpunkt des negativen Signalausfalls. Nach dem Passieren des Hohlraums erreicht die Zählrate des Messsignals wieder ihren ursprünglichen Wert (Abb. 4-6 zweite Reihe von unten).

Unter der vereinfachten Annahme, dass nur eine Wechselwirkung stattfindet, beträgt der geometrisch notwendige Streuwinkel um den Detektor direkt zu treffen, bei $a = 40$ cm und einer Eindringtiefe von 15 cm, etwa 115° . Die Modellierungen ergaben jedoch, dass eine direkte Rückstreuung der γ -Quanten zum Detektor mit nur einer Wechselwirkung sehr selten ist. Bevor die γ -Quanten den Detektor treffen werden sie im Durchschnitt fünf mal gestreut. Im Bereich ohne Hohlraum beträgt der durchschnittlich größte Streuwinkel bei den Simulationen für Abb. 4-6 ca. 75° (Abb. 4-7). Beim Passieren des Hohlraums erhöhte sich der durchschnittlich größte Streuwinkel aufgrund der größeren Eindringtiefe auf ca. 80° . Die errechnete Zählrate nimmt dementsprechend beim Passieren des Hohlraums ab. Die Energien der um 75° bis 80° gestreuten Photonen reduzierten sich auf ca. 350 keV bis 325 keV (Abb. 4-8). Bei allen weiteren Wechselwirkungen waren die Streuwinkel deutlich kleiner und selten größer als 10° . Der bei einer Photonenenergie von $E_\gamma = 0,66$ MeV wahrscheinlichste Streuwinkel von 60° (Abb. 2-16) ist noch kleiner als die durchschnittlich größten Streuwinkel, die bei den Simulationen errechnet wurden. Deshalb treffen nur ca. 0,1‰ der von der γ -Quelle emittierten γ -Quanten den Detektor.

Die Simulationen trugen somit entscheidend zum Verständnis der bei den Messungen mit der γ - γ -Sonde ablaufenden physikalischen Prozessen bei. Die Ursachen für den typischen Doppelpeak beim Passieren eines Hohlraums konnten detailliert aufgezeigt und erklärt werden. Der für das Messsignal entscheidende Bereich, in dem die meisten relevanten Wechselwirkungen stattfinden, konnte ermittelt werden, er liegt im Bereich der γ -Quelle. Um den Detektor zu treffen, waren bei den Simulationen durchschnittlich fünf Compton-Streuungen notwendig. Die Simulationen ergaben eine Eindringtiefe der für das Messsignal relevanten γ -Quanten von 15 cm bis 20 cm.

5 BESCHREIBUNG DER TESTSTRECKEN

Im Rahmen des DFG-Projektes SAM waren für die Erprobung der einzelnen Sensorsysteme (Kap. 1.6) geeignete Kanaltteststrecken erforderlich. Hierfür wurde eine Labor-Teststrecke im FZU errichtet (Kap. 5.1) und ein Haltungsabschnitt des Abwasserkanals im Kastanienweg in Rastatt (Kap. 5.2) entsprechend ausgebaut und instrumentiert. Die Teststrecke im FZU ermöglicht alle Sensoren unter Laborbedingungen zu erproben, d.h. die Randbedingungen können einfach und schnell bestimmt und verändert werden. Die Teststrecke Rastatt/Kastanienweg dient der Überprüfung und Weiterentwicklung der Anwendbarkeit der einzelnen Sensoren unter realen Bedingungen.

Bei der Auswahl der Kanalrohre bei beiden Teststrecken wurde darauf geachtet, dass das Rohrmaterial und der Rohrdurchmesser gängigen Rohren in den Abwassersystemen der Kommunen entsprechen. Laut der ATV-Information von 2001 werden bei den nichtbegehbaren Kanälen < DN 800 44,5% Beton-/Stahlbetonrohre und 48,7% Steinzeugrohre verwendet. Ähnliche Zahlen lagen auch der Auswahl einer Teststrecke der SAM-Forschergruppe im Jahre 1999 zugrunde. Damit alle Sensorsysteme unter den gleichen Bedingungen getestet werden, wurde als Rohrdurchmesser die gängige Größe DN 300 festgelegt.

5.1 Teststrecke im FZU

Die Teststrecke im FZU besteht aus einem sandgefüllten Container, einem Kanalrohr und einer Vorrichtung, um das Kanalrohr und / oder den Container mit Wasser zu fluten. Der Container ist 5 m lang, 1,5 m hoch und 1,5 m breit und besteht aus einem tragenden Stahlgerippe das mit 2 cm dicken Kunststoffplatten ausgelegt ist. Die Kunststoffplatten sind in den Ecken und Stößen mit Silicon (Terostat-33 transparent) ausgefugt, so dass ein wasserdichter Behälter entsteht (Abb. 5-1 und Abb. 5-3).

In der Bodenfläche des Containers sind zehn, jeweils einzeln verschließbare Anschlüsse angebracht, über die der Container entweder mit Wasser geflutet oder entleert werden kann. Die Wasserversorgung wird durch einen Vorratsbehälter am Boden neben dem Container mit ca. 650 Liter und einem Hochbehälter mit ca. 250 Liter Fassungsvermögen sichergestellt. Je nach Ventilstellung bleibt der Container trocken, fließt Wasser vom Container in den Vorratsbehälter oder vom Hochbehälter über die Anschlüsse in der Bodenfläche in den Container. Dadurch lassen sich unterschiedliche Grundwasserflurab-

5.1 Teststrecke im FZU

stände nachstellen und es sind Messungen möglich, bei denen das Rohr vollständig im Wasser liegt (Kap. 7.3.2). Die Anschlüsse im Boden sind mit einem engmaschigen Edelstahldrahtsieb (0,71 mm Maschenweite, 0,30 mm Drahtdurchmesser) und einem 5 cm hohen Sandfilter der Korngruppe 1/2 abgedeckt, damit der Sand im Container nicht ausgeschwemmt wird.

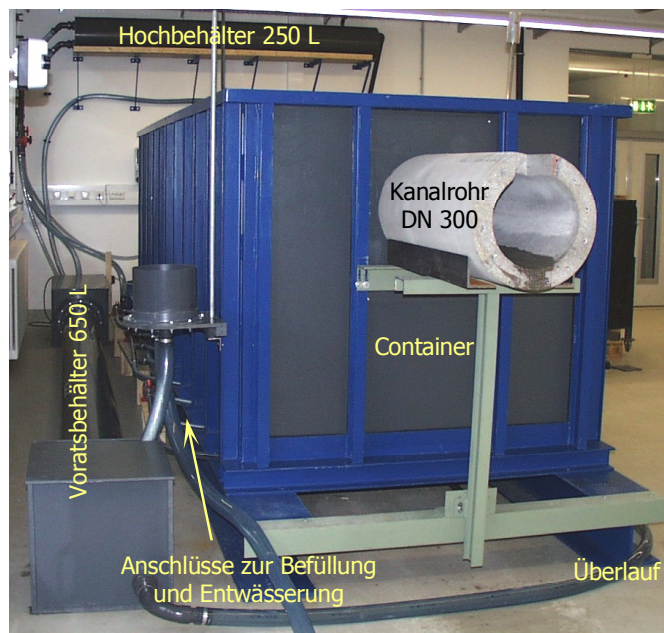


Abb. 5-1: Kanalteststrecke im FZU.

Als Bettungsmaterial für die Rohre wurden 17 Tonnen Quarzsand in den Container eingebaut. Das Material ist ein natürliches, unbehandeltes fluviatiles Sediment des Rheins (Baggersee Fa. Glaser, Malsch) und besteht zu ca. 90% aus Sand, wobei die Mittelsandfraktion mit ca. 55% stark dominiert (Abb. 5-2). Auf die restlichen Anteile fallen ca. 5% Feinkies und ca. 5% Schluff, die Tonfraktion ist mit 0,1 – 0,2 % sehr, der Anteil an organischem Material (Tab. 5-1) äußerst gering. Der Durchlässigkeitsbeiwert nach HAZEN liegt durchschnittlich bei $2,5 \times 10^{-4}$ m/s (SCHNELL 2001). Tab. 5-1 zeigt die chemische Zusammensetzung des Sandes gemäß Spezifikation der Fa. Weisenburger und die von SCHNELL (2001) ermittelten hydraulischen und stofflichen Parameter.

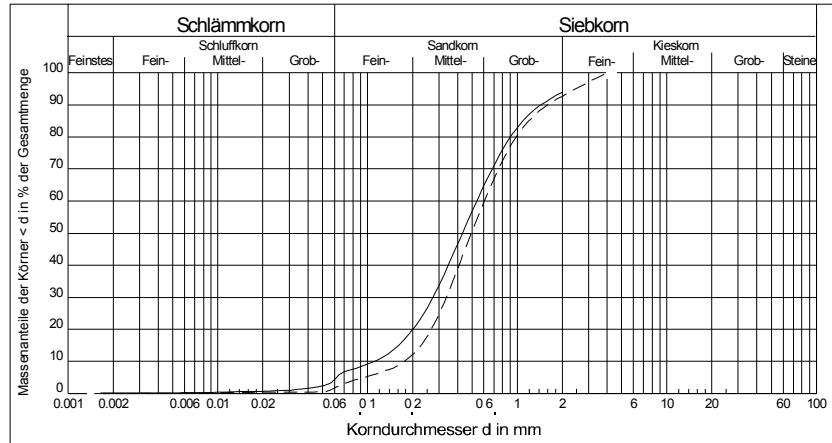


Abb. 5-2: Korngrößenverteilung (mS, gs, fs; nach DIN 18123) des Sandes der Fa. Weisenburger, dargestellt anhand zweier Körnungslinien nach Sieb- und Schlämmanalyse (SCHNELL 2001).

Tab. 5-1: Sedimentspezifische Parameter des Mittelsandes der Fa. Weisenburger und durchschnittlicher Mineralbestand nach Röntgendiffraktometrie-Analyse (XRD) (SCHNELL 2001).

Parameter	Einheit	Wert
SiO ₂	[Gew.-%]	91,0
Al ₂ O ₃	[Gew.-%]	3,0
Fe ₂ O ₃	[Gew.-%]	1,16
CaO + MgO	[Gew.-%]	1,35
Na ₂ O	[Gew.-%]	0,21
K ₂ O	[Gew.-%]	1,94
Glühverlust (DIN 18 128)	[Gew.-%]	0,24
Porosität n ₀ *	[-]	0,42
Effektive Porosität n _{eff} *	[-]	0,22
Karbonat (DIN 18 129)	[Gew.-%]	1,7
Durchlässigkeitsbeiwert k _r **	[m/s]	2,5 × 10 ⁻⁴
Quarz***	Vol.-%	~ 90
Feldspat***	Vol.-%	5 – 10
Karbonat***	Vol.-%	1 – 2
Schichtsilikate***	Vol.-%	0 – 5

* = Bestimmung mittels Markierungsversuch bzw. Sättigungsversuch an Stechzylinderproben

** = nach HAZEN *** = XRD-Analyse

Tab. 5-2: Ungleichförmigkeitszahl, Trockendichte und Dichte bei Wassersättigung des Sandes für die Rinnenfüllung.

Parameter	Einheit	Wert
Ungleichförmigkeitszahl $U (d_{60}/d_{10})$	[-]	3,3
Trockendichte ρ_d	[g/cm ³]	1,5
Dichte bei Wassersättigung ρ_r	[g/cm ³]	1,9

Mit einer Ungleichförmigkeitszahl $U = 3,3$ ist die Körnung des Sand nach DIN 1054 (1976) und DIN 4017 (1990) am Übergang von gleichförmig ($U < 3$) zu ungleichförmig ($U = 3-5$) (Tab. 5-2). Aufgrund seiner geringen Ungleichförmigkeitszahl, seines mit $< 1\%$ sehr geringen Anteils bindiger Beimengungen (Abb. 5-2) und des geringen Anteils an organischem Material ist der Sand im trockenen Zustand wenig standfest. Die Standfestigkeit lässt sich jedoch durch anfeuchten des Sandes deutlich verbessern, so dass Umbaumaßnahmen einfacher durchgeführt werden können (Abb. 5-3). Aus den selben Gründen lässt sich der Sand kaum verdichten und verändert sein Volumen auch bei Wassergehaltsänderungen nicht, was bei einer Flutung der Rinne für entsprechende Versuche äußerst nachteilig wäre (Kap. 6.7). Die Flutung der Versuchsrinne ($11,25 \text{ m}^3$) über die Zuläufe im Boden des Containers bis zur Wassersättigung des Sandes ist bei einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (stark durchlässig nach DIN 18130) innerhalb weniger Stunden möglich. Dasselbe gilt auch für die Entwässerung der Versuchsrinne. Die Menge des zu- und abströmenden Wassers bei der Flutung und Entwässerung der Versuchsrinne sollte jedoch mit den Ventilen begrenzt werden, damit durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten keine Suffosions- und Erosionsvorgänge induziert werden. Aufgrund des extrem geringen Anteils an organischem Material und bindigen Beimengungen ist die Feldkapazität des Sandes so gering, dass er innerhalb weniger Tage selbst bei Raumtemperatur so stark austrocknet, dass seine Dichte annähernd seiner Trockendichte nach Ofentrocknung (Tab. 5-2) entspricht. Die Dichte des Sandes variiert damit je nach Wassergehalt zwischen $1,5 \text{ g/cm}^3$ und $1,9 \text{ g/cm}^3$ bei Wassersättigung.

Zu Beginn des DFG-Projektes wurden sieben jeweils 1 m lange Betonrohre DN 300 mit Stahlarmierung eingebaut (Abb. 5-1). Die Zusammensetzung des für Kanalrohre verwendeten Betons ist äußerst unterschiedlich und hängt von der regionalen Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten ab. Als Grundstoffe werden in erster Linie quarzische Stoffe (Flussskies), Kalkstein und Basalt verwendet. Je Kubikmeter Frischbeton werden 270 kg bis 360 kg Zement

zugegeben, als Füller kommen z.B. Steinkohlenflugasche oder Kalksteinmehl zum Einsatz. Die Dichte der Beton- und Stahlbetonrohre liegt etwa zwischen $2,3 \text{ g/cm}^3$ und $2,5 \text{ g/cm}^3$, wobei für Stahlbetonrohre eher der Wert $2,5 \text{ g/cm}^3$ anzusetzen ist (nach freundlicher Auskunft von Herrn W. Niederehe Fa. FBS - Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V., Bonn; LINDACKERS 1962).



Abb. 5-3: Teststrecke im FZU mit Steinzeugrohr und verschiedenen Styroporkörpern zur Simulation der Hohlräume.
 oben links: Container mit Sandbettung und Steinzeugrohr
 oben rechts: Styroporkörper $270^\circ / 32 \text{ cm}$
 unten links: Styroporkörper $90^\circ / 32 \text{ cm}$ im Scheitel
 unten rechts: Styroporkörper $360^\circ / 16 \text{ cm}$.

Nach den Betonrohren wurden drei Steinzeugrohre DN 300 eingebaut (Abb. 5-3). Das mittlere Rohr ist 2,5 m lang, die Endstücke sind jeweils 2,0 m lang (Abb. 5-4). Ein Steinzeugrohr besteht aus mindestens 30 Gew.-% kristalliner Phase, mindestens 10 Gew.-% Mullit und ca. 60 Gew.-% amorpher Phase (Glasphase). Anteilig am Gesamtmassenanteil besteht die kristalline Phase aus 20 - 25 Gew.-% Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), 10 - 15 Gew.-% Quarz (SiO_2) und ggf. maximal 3 - 5 Gew.-% Cristobalit (SiO_2). Die Dichte eines Steinzeugscherbens

5.1 Teststrecke im FZU

beträgt ca. $2,2 \text{ g/cm}^3$ (nach freundlicher Auskunft von Herrn Dipl.-Ing. D. T. Böhme, Fa. Steinzeug Abwassersysteme GmbH).

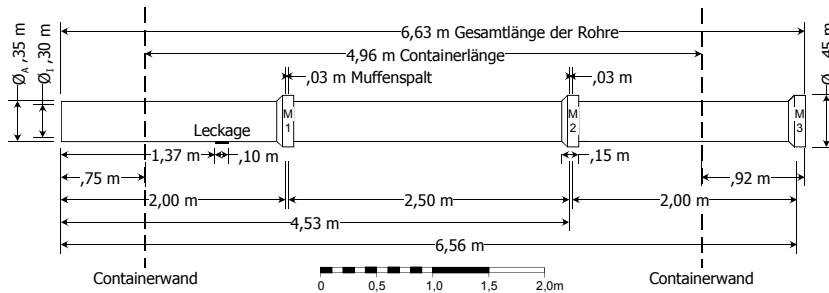


Abb. 5-4: Bemaßung der Steinzeugrohre in der Teststrecke im FZU.

An der Position 1,37 m wurde ein 10 cm langer und 5 mm breiter Schlitz in die Rohrsohle gefräst. Der Schlitz dient den SAM-Projektpartnern zur Grundwasserinfiltrationsmessungen mit den hydrochemischen Sensoren, der Leckageanordnung mit der geoelektrischen Sonde und der Rissortung mit dem Rohrimpaktometer (Kap. 1.6).

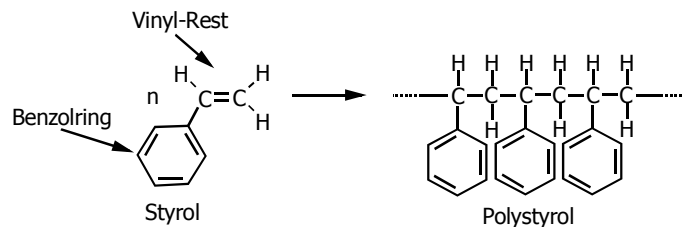


Abb. 5-5: Strukturformel von Styrol und Polystyrol (nach MORTIMER 1987).

Zur Simulation der Hohlräume wurden für die Messungen mit der γ - γ -Sonde zur Hohlraumortung (Kap. 6) Styroporkörper mit unterschiedlichen Geometrien am Rohr angebracht und in der Bettung vergraben (Abb. 5-3). Das Material Styropor eignet sich aufgrund seiner mit $0,04 \text{ kg/m}^3$ extrem geringen Dichte (Kap. 2.4 und Kap. 2.5) gut als Ersatz für die sonst schwierig zu realisierenden Hohlräume im Bettungsmaterial des Kanalrohres. Styropor® ist der Handelsname der Fa. BASF für einen geschäumten Kunststoff und besteht aus dem Kunststoff Polystyrol ($\rho = 1,05 \text{ kg/m}^3$).

Styropor wird hergestellt indem Polystyrol - Perlen, in welche ein Treibmittel eingearbeitet ist, durch Wärme aufgeschäumt wird. Polystyrol ist ein weit verbreiteter, thermoplastischer Massenkunststoff. Er wird in der Regel durch radikalische Polymerisation von Styrol gewonnen (Abb. 5-5). Styrol besteht aus einem Benzolring und einer zwei Kohlenstoffatome langen Seitenkette mit Doppelbindung, die Vinylrest genannt wird. Styroporkörper sind sehr günstig in der Anschaffung und lassen sich besonders einfach durch sägen oder schneiden zu beliebigen Formstücken weiterverarbeiten (Abb. 5-3).

Bei den Messungen mit der γ - γ -Sonde (Kap. 6) wurden häufig vorgefertigte Kreissegmente aus Styropor verwendet. Die 90° und 180° umspannenden Kreissegmente wurden aus 8 cm starken Styroporplatten gesägt. Sie haben einen Innendurchmesser von ca. 35 cm und einen Außendurchmesser von ca. 55 cm. Durch die Kombination der einzelnen Segmente wurden die in Kapitel 1 beschriebenen "Hohlräume" realisiert.

5.2 Teststrecke in Rastatt/Kastanienweg

Zur Erprobung und Weiterentwicklung der Sensorsysteme in realen Abwassersystemen wurde im Wohngebiet Rheinau der Stadt Rastatt eine Haltungslänge des Abwasserkanals im Kastanienweg als Teststrecke ausgewählt (Abb. 5-6). Der Kastanienweg verbindet den Altmurgweg im Nordwesten mit dem Rheinauer Kirchweg im Südosten. Nördlich der Straße befindet sich ein Sportplatz, südlich stehen sechs Wohnhäuser deren Abwasserleitungen in den Kanal im Kastanienweg angeschlossen sind.

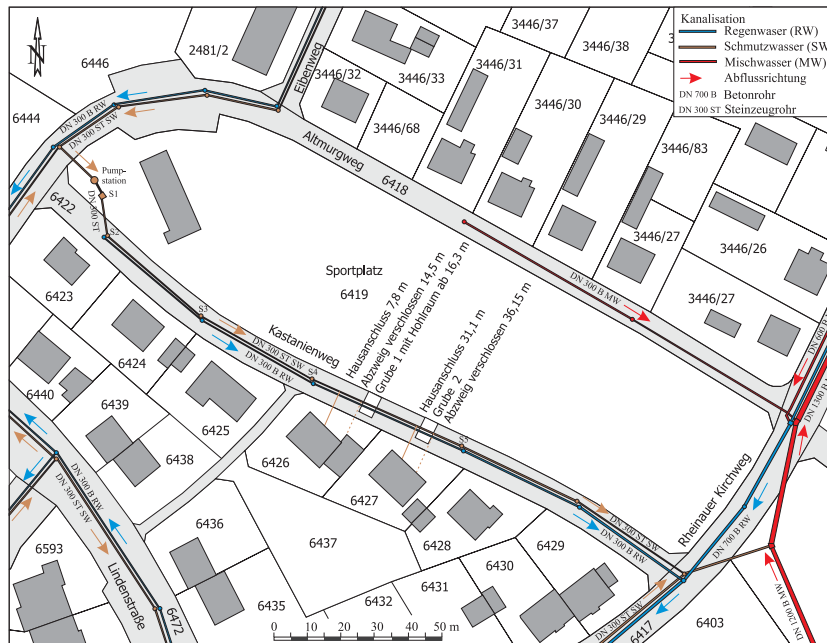


Abb. 5-6: Übersichtsplan der Teststrecke Kastanienweg in Rastatt Rheinau mit Lage der Gruben, Hausanschlüsse und Abzweige (nach EISWIRTH 2002).

Die Anforderungen der Forschergruppe an die Teststrecke zur Erfüllung der Zielvorhaben des DFG-Projektes SAM waren:

- Trennsystem
- Steinzeug oder Beton als Rohrmaterial (x)
- Rohrdurchmesser DN 300 (x)
- Kanalrohr maximal 3 m unter Geländeoberkante
- Kanalrohr muss bereits seit längerer Zeit eine hydraulisch aktive Leckage haben
- der bauliche Zustand des Rohres muss noch so gut sein, dass das Rohr mit den einzelnen Sensorsystemen befahren werden kann (x)
- keine einragenden Hausanschlüsse die eine Befahrung behindern (x)
- keine Wurzeleinwüchse die eine Befahrung behindern (x)
- schwankende Grundwasserstände
- Rohrsohle liegt während mittlerer Grundwasserverhältnisse oberhalb der Grundwasseroberfläche, d.h. keine Grundwasserinfiltration (x)
- Abstand zwischen Rohrsohle und Grundwasseroberfläche während niedriger Grundwasserverhältnisse (i.A. September) maximal 1 m
- Grundwasseroberfläche über Rohrscheitel während hoher Grundwasserverhältnisse (i.A. April)
- einfache Wasserhaltung durch Pumpwerk im Zulauf (x)
- Verbindung zwischen Schmutzwasserkanal und Regenwasserkanal zur Erzeugung von Mischwässern durch Bypass möglich
- Schaffung von neuen künstlichen Leckagen möglich
- umfangreiche Instrumentierung über Baugrube möglich
- Einbau eines Hohlraumes möglich (x)
- keine Fehlanlüsse am Abwasserkanal
- ruhige Verkehrslage (x)

Die Kanaltteststrecke im Kastanienweg erfüllt alle Anforderungen der DFG-Forschergruppe nahezu in idealer Weise. Für die Messungen mit der γ - γ -Sonde sind lediglich die mit einem Kreuz (x) gekennzeichneten Anforderungen von Bedeutung. Der Umfang der Instrumentierung der Teststrecke über zwei Baugruben zur Erfassung der raumzeitlichen Veränderungen bei der Abwasserversickerung und die Ergebnisse der Messkampagnen und Forschungen der Projektpartner sind in EISWIRTH (2002) detailliert beschrieben.

5.2 Teststrecke in Rastatt/Kastanienweg

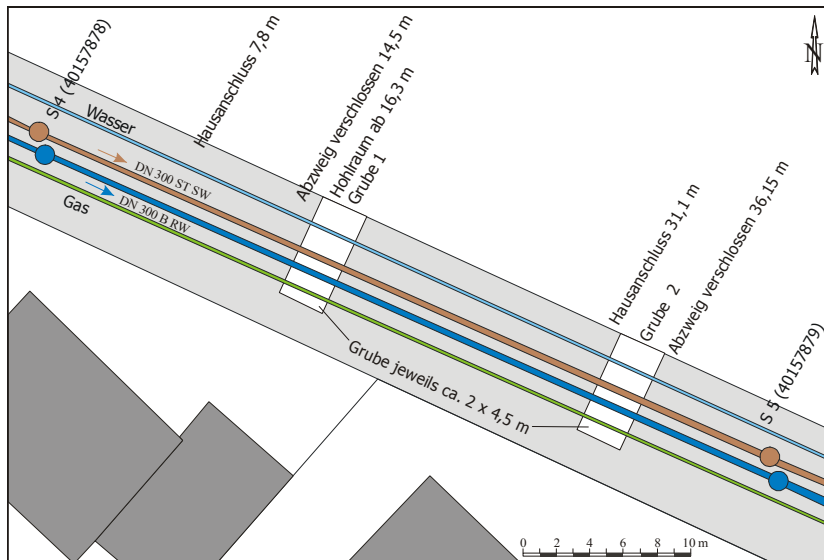


Abb. 5-7: Detailausschnitt der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg, Haltung von S 4 nach S 5 mit Lage der Baugruben, Hausanschlüsse, Abzweige und des eingebauten Hohlraums in Grube 1, Gas- und Wasserleitung, Schmutzwasserkanal (SW) DN 300 Steinzeug und Regenwasserkanal (RW) DN 500 Beton (nach EISWIRTH 2002).

Eine TV-Befahrung vom 10.10.1996 (Anhang 4) der Haltung S 4 nach S 5 im Kastanienweg (Abb. 5-7) ergab bei 7,80 m und 31,10 m jeweils einen Hausanschluss. Beide waren nicht fachgerecht eingebunden (vgl. Abb. 6-37 links), das Rohr ragt jedoch nicht in den städtischen Kanal ein und stellt somit auch keine Behinderung bei einer Befahrung mit der γ - γ -Sonde dar. Bei 14,50 m und 36,10 m befindet sich jeweils ein verschlossener Abzweig (vgl. Abb. 6-37 Mitte). Dieser Abzweig war offensichtlich beim Verlegen des Schmutzwasserkanals für den Anschluss des häuslichen Abwassers vorgesehen gewesen. In Grube 1 wurde bei Position 16,3 m ein Styroporkörper auf dem Scheitel des Schmutzwasserrohres angebracht. Der Styroporkörper simuliert einen Hohlraum, er ist ein Kreissegment mit 180° (von 09:00 über 12:00 bis 03:00, vgl. Abb. 6-25) und 40 cm lang. Abb. 5-8 zeigt die Instrumentierung der Gruben 1 und 2 im Kastanienweg mit Bodenfeuchte- (BF), Bodentemperatur- (BT), Bodenluft- (BL) und Grundwassermessstellen (GW), Saugkerzenanlage, Stromversorgung und TDR (EISWIRTH 2002) und die Position des Hohlraums im Scheitel des Schmutzwasserkanals in Grube 1.

5 Beschreibung der Teststrecken

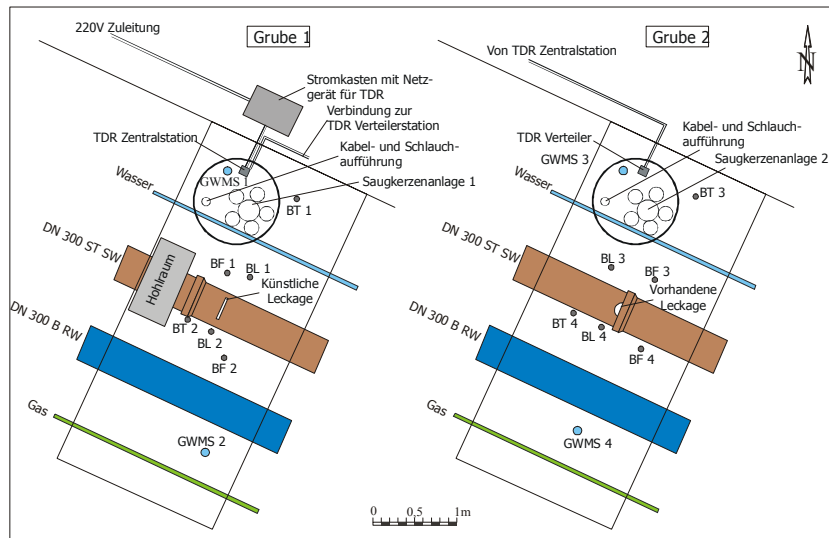


Abb. 5-8: Detailplan der Instrumentierung der Gruben 1 und 2 der Kanalteststrecke Rastatt/Kastanienweg (EISWIRTH 2002).

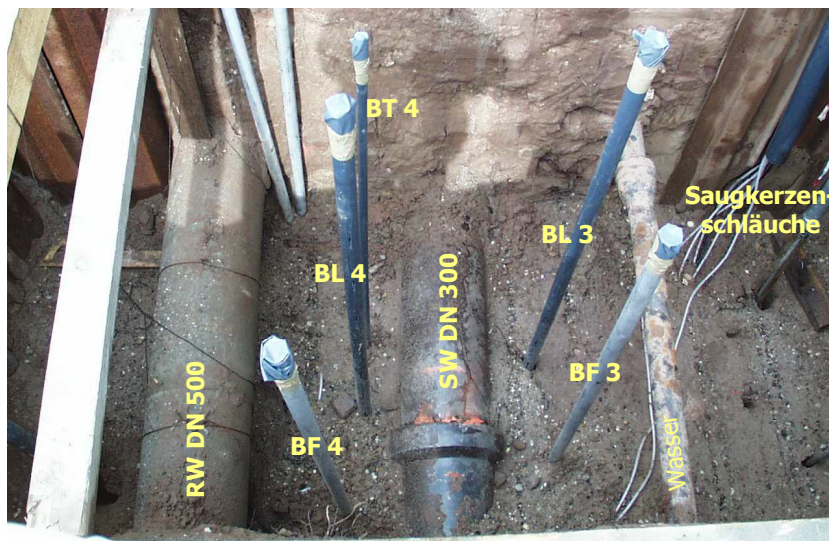


Abb. 5-9: Blick in Grube 2 der Kanalteststrecke Rastatt Rheinau.

5.2 Teststrecke in Rastatt/Kastanienweg

Abb. 5-9 zeigt einen Blick in die offene Grube 2. Der Schmutzwasserkanal (SW) DN 300 aus Steinzeug (Mitte), der Regenwasserkanal (RW) DN 500 aus Beton (links), die Wasserleitung (rechts) und die Gasleitung (ganz links, nicht im Bild) wurden in einem sogenannten Stufengraben verlegt, wobei der Schmutzwasserkanal bei Grube 2 mit ca. 2 m unter Geländeoberkante am tiefsten liegt. Die Gesamtlänge der Haltung beträgt 44,20 m, die einzelnen Steinzeugrohre sind jeweils 1 m lang.

Als Bettungsmaterial für die Kanalrohre und zur Wiederverfüllung der Gruben wurde das zuvor ausgehobene Material verwendet. Auch beim ursprünglich ausgehobenen Stufengraben wurde zur Wiederbefüllung das natürlich anstehende Material verwendet. Beim Ausbau einer Grundwassermessstelle im ungestörten Bereich direkt neben der Straße zwischen Grube 2 und dem Sportplatz wurde ein geologisches Profil aufgenommen (Tab. 5-3).

Tab. 5-3: Geologisches Profil bei Grube 2.

Tiefe u.GOK [m]	Schichtenbeschreibung
0,0 - 0,2	Oberboden
0,2 - 2,0	Schluff, tonig, feinsandig-sandig
2,0 - 4,0	Sand, kiesig, tonig
4,0 - >6,0	Kies, sandig

Die natürlich anstehenden Sedimente sind als Bettungsmaterial und für die Wiederbefüllung gut geeignet, da es sich bis zur Grubensohle um verdichtungsfähige, feinkörnige Sedimente handelt. Größere Steine, Blöcke oder Bauschutt wurden nicht eingebaut (DIN EN 1610, ATV A 139). Geologische und hydrogeologische Detailaufnahmen von Rastatt und das Gebiet um den Kastanienweg im Speziellen sind in OBWALD (2002) und EISWIRTH (2002) nachzulesen.

Für eine Befahrung der Kanalisation mit der γ - γ -Sonde muss der Kanal gereinigt und der Zufluss von größeren Mengen Abwasser verhindert werden. Kleinere Abwassermengen von den im Kastanienweg angeschlossenen Wohnhäusern (Abb. 5-6) beeinträchtigen die Messung nicht. Größere Abwassermengen, die durch die vorgeschalteten Kanäle (Altmurweg, Eibenweg etc.) zufließen, werden im Sammelbehälter der Pumpstation zurückgehalten bis der Wasserstand einen bestimmten Pegel erreicht hat. Bei Automatikbetrieb der Pumpstation schaltet sich dann eine oder, je nach Wasseranfall, auch zwei

Abwasserpumpen an und entleeren den Sammelbehälter innerhalb weniger Minuten über den Schmutzwasserkanal im Kastanienweg in den größeren Abwassersammelkanal DN 1300 im Rheinauer Kirchweg (Abb. 5-6). Solange die Pumpen laufen ist der Schmutzwasserkanal bis zu dreiviertel mit Abwasser gefüllt. Messungen mit der γ - γ -Sonde sind währenddessen nicht möglich, die γ - γ -Sonde ist vorher aus dem Kanal zu entfernen. Bei durchschnittlichem Wasseranfall spricht die Pegelschaltung der Pumpstation alle drei bis fünf Stunden an. An Regentagen verkürzt sich das Pumpintervall deutlich. Dies ist ein eindeutiger Hinweis auf Fehlschlüsse von Grundstücksentwässerungen am Schmutzwasserkanal. Während den Messungen mit der γ - γ -Sonde wird die Pumpstation auf Handbetrieb umgestellt, damit sichergestellt ist, dass der Kanal abwasserfrei bleibt. Um das volle Speichervolumen des Sammelbehälters ausnutzen zu können, wird zuvor die Pumpe von Hand einmal eingeschaltet und der Sammelbehälter geleert. Danach wird die entsprechende Haltung mit der Kanalreinigungsdüse des Spülfahrzeuges der Stadt Rastatt gereinigt und dabei das Zugseil (Kap. 3.2) für die γ - γ -Sonde mit in den Kanal eingezogen. Bei durchschnittlichem Wasseranfall reicht das Speichervolumen des Sammelbehälters der Pumpstation für einen halben Tag, so dass einmal Leerpumpen des Sammelbehälters und Spülung der Haltung jeweils morgens und mittags ausreichen. Am Ende des Arbeitstages wird die Pumpe von Handbetrieb wieder auf Automatik umgestellt.

5.2 Teststrecke in Rastatt/Kastanienweg

6 LABOR- UND GELÄNDEVERSUCHE MIT AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

6.1 Das Messsignal bei einem intakten Rohr

Die Versuchsanordnung und Funktionsweise der γ - γ -Sonde wurde in Kapitel 3 beschrieben. Im Folgenden wird anhand einer gezielten Auswahl an Versuchsergebnissen Schritt für Schritt die Entstehung des Messsignals und seine Interpretation bei einer Kanalbefahrung mit verschiedenen Szenarien erklärt. Sofern nicht ausdrücklich erwähnt, wurden die Messungen in der Teststrecke im FZU durchgeführt.

Die bei den Messungen aufgezeichneten Dateien beinhalten als Rohdaten die vom Detektor erfasste Zählrate an rückgestreuten γ -Quanten pro Messpunkt in counts per second (cps). Entsprechend dem Messprotokoll und der Wegstreckenerfassung wird jedem Messwert eine Position im Rohr zugeordnet. Die x-Koordinate in den Diagrammen mit den Messsignalen von Kanalbefahrungen (Abb. 6-10) gibt dabei jeweils die Position der Quelle wieder. Das Messsignal, also die Anzahl der rückgestreuten γ -Quanten, ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Aktivität der Quelle
- Abstand zwischen Quelle und Detektor
- Abschirmung zwischen Quelle und Detektor
- Öffnungswinkel der Abschirmung um den Detektor
- Durchmesser des Rohres
- Material der Rohrwandung
- Rohrumbgebung (Wassergehalt, Materialzusammensetzung und Lagerungsdichte des Bettungsmaterials, Hohlraum, Hausanschluss oder sonstiges Bauwerk)

In den folgenden Abschnitten wird der Verlauf des Messsignals bei einer Veränderung dieser Faktoren beschrieben. Bei den Versuchen in der Teststrecke im FZU nicht veränderte Faktoren und deshalb für diese Messungen als konstant zu betrachten sind:

- die Aktivität der Quelle (Kap. 3)
- die Abschirmung zwischen Quelle und Detektor (Kap. 3)
- der Durchmesser des Rohres (Kap. 5)
- das Material der Rohrwandung (Kap. 5)

6.1 Das Messsignal bei einem intakten Rohr

Das Messsignal setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen:

- Das Grundsignal (Abb. 6-1) ist derjenige Anteil an γ -Quanten des Messsignals, der die Abschirmung durchdringt und den Detektor auf direktem Weg ohne Rückstreuung in der Umgebung erreicht. Die Abschirmung zwischen Quelle und Detektor schwächt die Strahlungsintensität zwar deutlich ab, eine endliche Anzahl an γ -Quanten durchquert jedoch jeden Absorber.

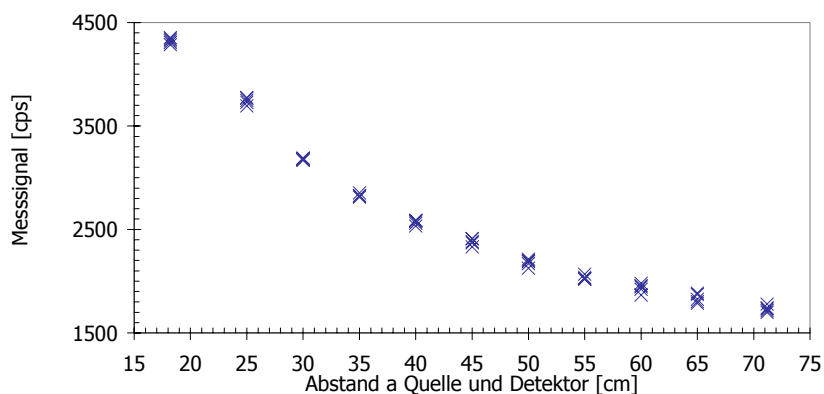


Abb. 6-1: Abnahme des Grundsignals bei fünf Vergleichsmessungen pro Messpunkt mit zunehmendem Abstand a zwischen Quelle und Detektor, γ - γ -Sonde hängt frei in der Luft, ohne Rohr und Bettung.

- Sofern die Rohrwandung ohne größere bauliche Schäden ist, erzeugt sie durch Rückstreuung der γ -Quanten einen relativ konstanten und sehr hohen Anteil des Messsignals (Abb. 6-2, Tab. 6-1). Dieser Anteil ist verglichen mit den anderen Anteilen sehr hoch, da das Rohrmaterial mit $2,2 \text{ g/cm}^3$ bei den verwendeten Steinzeugrohren ($2,3 \text{ g/cm}^3$ bei Beton und $2,5 \text{ g/cm}^3$ bei Stahlbeton) eine im Vergleich zur Bettung mit ca. $1,5 \text{ g/cm}^3$ bis maximal $1,9 \text{ g/cm}^3$ (Tab. 5-2, PRINZ 1991) deutlich höhere Dichte besitzt. Bei einer Eindringtiefe der γ -Quanten von nur wenigen Zentimetern befindet sich das Rohr mit mindestens $2,0 \text{ cm}$ Wandstärke zudem am sensibelsten Messbereich (vgl. Kap. 2.4 Angaben zur Eindringtiefe). Da bei Hausanschlüssen ein Loch in der Rohrwand ist, wirken sie sich auf diesen Anteil des Messsignals besonders stark aus.
- Das Umfeld des Rohres liefert den dritten Anteil des Messsignals und ist entscheidend für die Hohlraumortung (Abb. 6-7).

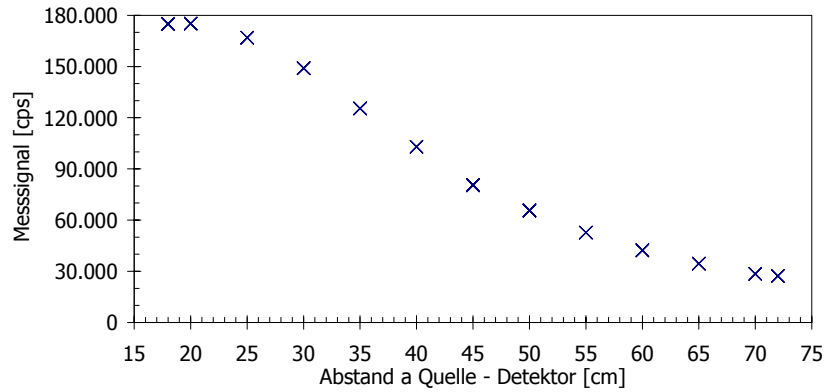


Abb. 6-2: Abnahme des Grundsignals bei fünf Vergleichsmessungen pro Messpunkt mit zunehmendem Abstand a zwischen Quelle und Detektor. Die γ - γ -Sonde befindet sich in einem Steinzeugrohr, welches frei in der Luft hängt, ohne Bettung.

Tab. 6-1: Auswertung der statistischen Schwankungen der Messreihe von Abb. 6-2 bei fünf Vergleichsmessungen pro Messpunkt.

a [cm]	\varnothing [cps]	Messsignal				Δ	
		+ max.		- max.		[cps]	[%]
		[cps]	[%]	[cps]	[%]		
20	175.183	147	0,08	118	0,07	266	0,15
25	166.928	97	0,06	62	0,04	159	0,10
30	149.075	157	0,11	191	0,13	348	0,23
35	125.443	159	0,13	131	0,10	290	0,23
40	102.987	129	0,13	130	0,13	259	0,25
45	80.448	257	0,32	244	0,30	501	0,62
50	65.645	205	0,31	205	0,31	410	0,62
55	52.695	81	0,15	92	0,17	173	0,33
60	42.324	202	0,48	303	0,72	505	1,19
65	34.536	85	0,25	78	0,22	163	0,47
70	28.484	194	0,68	134	0,47	328	1,15

6.1 Das Messsignal bei einem intakten Rohr

In Tab. 6-1 sind die Schwankungen des Messsignals der Versuchsreihe für Abb. 6-2 dargestellt. Der Abstand a zwischen Quelle und Detektor wurde in 5 cm Schritten von 20 cm bis 70 cm vergrößert und jeweils fünf mal mit 1 s Messzeit die Anzahl der rückgestreuten γ -Quanten gemessen. Von der durchschnittlichen Zählrate (\bar{N} in cps) wurden die relativen maximalen Abweichungen $+ \text{max.}$ in cps und $- \text{max.}$ in cps und der relative Schwankungsbereich Δ in cps berechnet. Bei einem Abstand $a = 35$ cm betrug die durchschnittliche Zählrate 125.443 cps. Die höchste Zählrate lag um 159 cps höher, was bezogen auf die durchschnittliche Zählrate einer Abweichung von 0,10% entspricht. Die niedrigste Zählrate lag um 131 cps tiefer, was bezogen auf die durchschnittliche Zählrate einer Abweichung von 0,13% entspricht. Der Schwankungsbereich umfasste insgesamt 290 cps, das sind 0,23% der durchschnittlichen Zählrate. Die durchschnittliche Schwankungsrate des Messsignals, gemittelt über alle Messungen von Abb. 6-2, betrug lediglich $\pm 0,12\%$ bezogen auf die jeweilige durchschnittliche Zählrate. Damit sind die statistischen Schwankungen relativ gering und die Reproduzierbarkeit eines Messwertes am gleichen Ort unter gleichen Bedingungen extrem hoch.

Positioniert man die γ - γ -Sonde im Rohr der Teststrecke im FZU in einem Bereich mit gleichmäßig verdichteter Bettung ohne Muffe oder Hohlraum (Abb. 6-3) und verändert lediglich den Abstand a zwischen Quelle und Detektor, so erhält man als Messsignal eine Art Sägezahnsignal (Abb. 6-4).

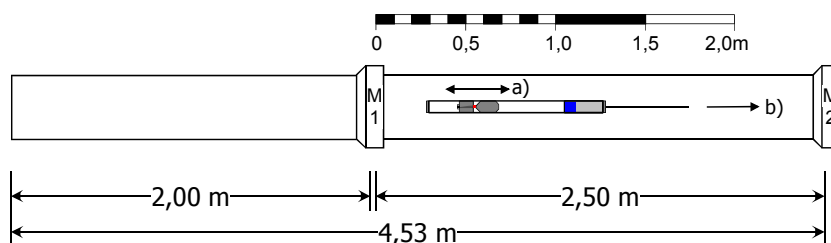


Abb. 6-3: Teststrecke im FZU. Versuch a): Veränderung des Abstandes a zwischen Quelle und Detektor. Versuch b): Fahrt mit der γ - γ -Sonde durch das Rohr im Bereich ohne Hohlraum oder Muffe.

Dieser Signalverlauf ergibt sich daraus, dass der Auswerterechner der γ - γ -Sonde lediglich über einen 16-Bit Zähler verfügt und damit nur Zahlenwerte bis $2^{16} = 65.536$ darstellen kann. Finden mehr als 2^{16} Ereignisse im Detektor statt, so läuft der elektronische Zähler über und beginnt wieder von Null an zu zählen. Addiert man zu den Werten nach dem Zählerüberlauf jeweils einmal

oder zweimal 2^{16} , erhält man die entsprechend korrigierte Zählrate (Abb. 6-4). Diese Korrektur der Zählrate ist bei allen Versuchen zu beachten und wurde bei den nachfolgend beschriebenen Messungen durchgeführt.

Die Abnahme der Zählrate bei großem Abstand a (Abb. 6-4) beruht hauptsächlich darauf, dass die Flussdichte der γ -Strahlen mit dem Quadrat des Abstandes r von der Strahlungsquelle abnimmt und damit die Anzahl der γ -Quanten, welche den Detektor erreichen, mit $1/r^2$ abnehmen (Abstandsgesetz Kap. 2.2.9). Bei kleinem Abstand a flacht die Steigung der Kurve stark ab und das Messsignal läuft gegen einen endlichen Betrag, der bei dieser Versuchsanordnung knapp unter 180.000 cps liegt. Dieser Effekt beruht ausschließlich auf einem Messfehler, da der Detektor derart hohe Zählraten zeitlich nicht mehr auflösen kann. Aus diesem Grund sind die Messsignale mit $a < 35$ cm für die Auswertung nicht zu verwenden.

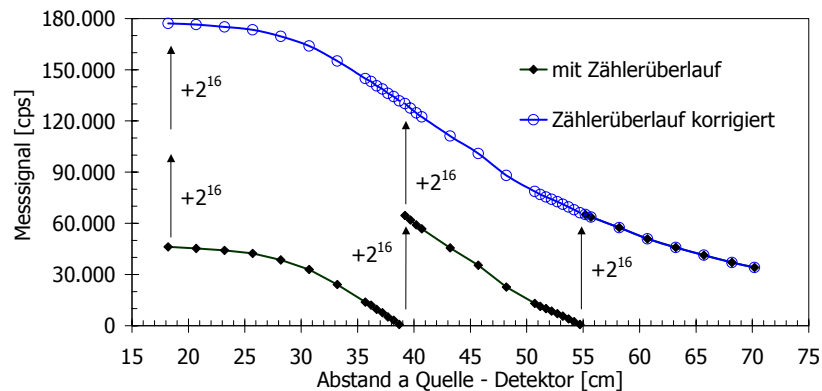


Abb. 6-4: Zählerüberlauf des Auswerterechners der γ -Sonde in Abhängigkeit vom Abstand a zwischen Quelle und Detektor.

In Abb. 6-5 sind die Messsignale einer Versuchsreihe dargestellt, bei der die Teststrecke im FZU mit unterschiedlichen Abständen a in einem Bereich ohne Muffe zwischen 2,5 m und 3,5 m (Abb. 6-3) befahren wurde. Die relativ konstanten Messsignale aus Bereichen ohne Muffe, Hohlraum, Hausanschluss oder sonstigen Anomalien werden im Folgenden als Basissignal oder Basislinie angesprochen. Vergleicht man die Messungen von Abb. 6-4 mit denen von Abb. 6-5 bei gleichem Abstand a , so stellt man fest, dass die Zählraten in Abb. 6-4 deutlich kleiner sind, da die Lage der Basislinie neben dem Abstand zwischen Quelle und Detektor auch von den anderen erwähnten Faktoren

6.1 Das Messsignal bei einem intakten Rohr

abhängig ist. Die Messungen wurden an unterschiedlichen Tagen bei unterschiedlicher Bodenfeuchte durchgeführt. Änderungen im Wassergehalt des Sandes bewirken eine im ganzen Bereich gleichmäßige Veränderung der Lagerungsdichte und damit eine Verschiebung der Basislinie.

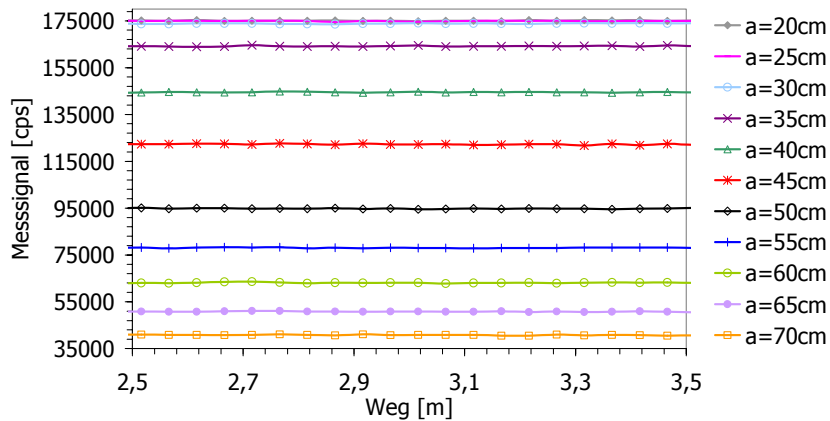


Abb. 6-5: Veränderung der Basislinien der Messsignale bei unterschiedlichen Abständen a zwischen Quelle und Detektor.

Daraus resultieren für die weiteren Betrachtungen wichtige Schlussfolgerungen:

- Die Lage der Basislinie einer Messreihe kann bei gleichem Abstand a je nach Messumgebung stark variieren.
- Die absolute Zählrate in cps ist von Bedeutung, wenn man Messungen mit unterschiedlichen Abständen a miteinander vergleicht.
- Für die Interpretation einer Messreihe ist nur die relative Änderung bezogen auf die Basislinie von Bedeutung.

6.2 Das Messsignal bei einem Hohlraum

Befährt man mit der γ - γ -Sonde einen Bereich des Rohres in dem sich ein Hohlraum in der Rohrbettung befindet (Abb. 6-6) kann man die Position des Hohlraumes durch Veränderungen im Messsignal eindeutig feststellen (Abb. 6-7).

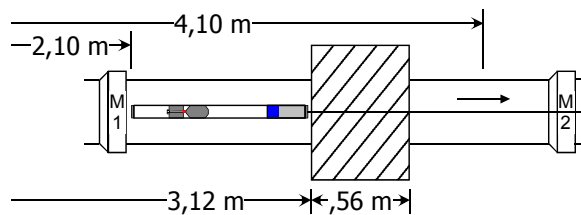


Abb. 6-6: Versuchsanordnung mit 56 cm breitem, 20 cm hohem und 360° rundumlaufendem Hohlraum.

Die Form und Amplitude des Messsignals verändert sich relativ zur Basislinie je nach Abstand a unterschiedlich. In Abb. 6-7 sind die Signalverläufe der Messreihe mit Korrektur des Zählerüberlaufs dargestellt.

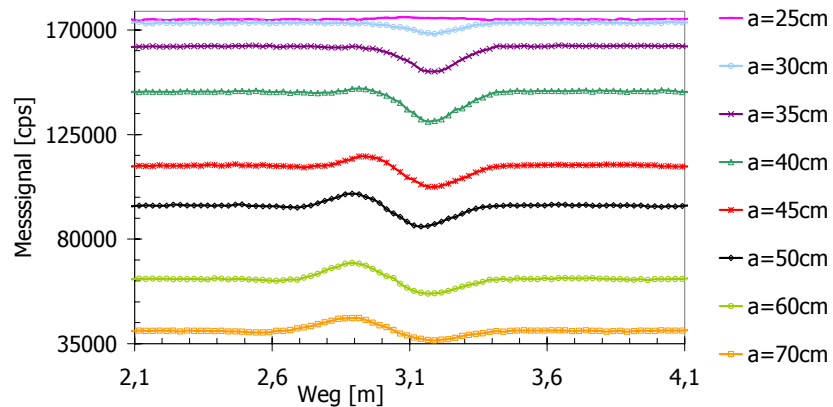


Abb. 6-7: Messreihe bei einem Hohlraum (Abb. 6-6) mit unterschiedlichen Abständen a .

Um eine bessere Auflösung und Vergleichsmöglichkeit der Signalveränderung zu erhalten, wurden in Abb. 6-8 alle Basislinien auf 0 cps verschoben. Dargestellt sind die absoluten Änderungen der Zählraten in cps der einzelnen Mess-

6.2 Das Messsignal bei einem Hohlraum

signale bezogen auf eine gemeinsame Nulllinie Im Bereich des Hohlraumes zeigen die Messsignale eine deutliche Abnahme der Zählrate. Bei zunehmendem Abstand a bildet sich im Bereich vor dem Hohlraum zusätzlich ein positiver Signalausschlag heraus.

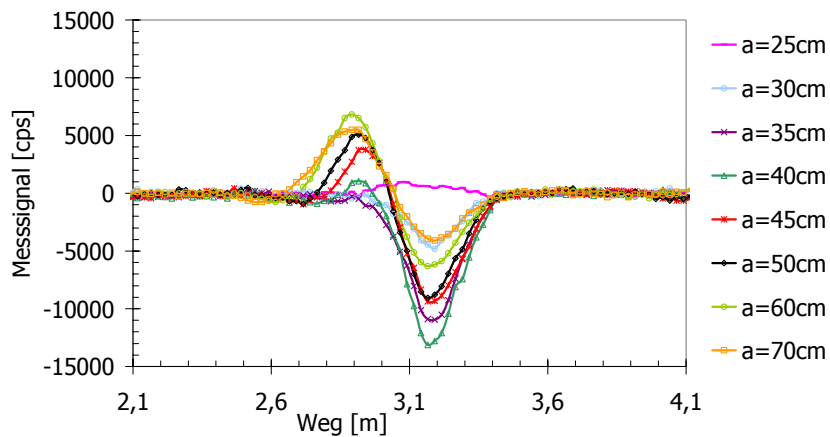


Abb. 6-8: Verschiebung der Basislinien der Messsignale auf eine gemeinsame Nulllinie.

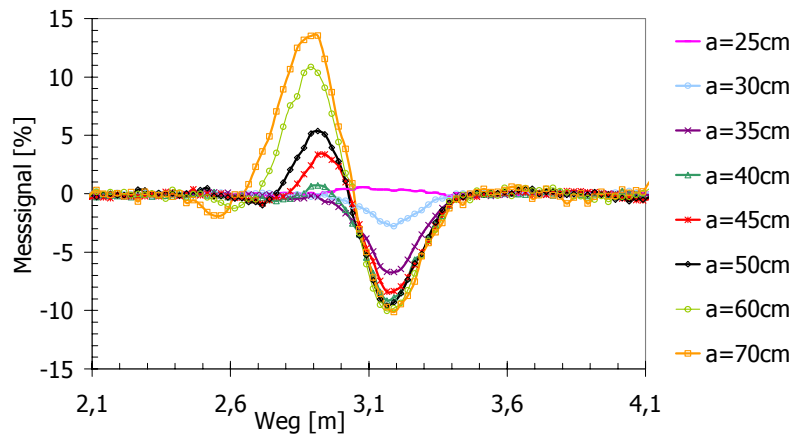


Abb. 6-9: Normierung der Messsignale auf den jeweiligen Mittelwert der Basislinien.

Für Abb. 6-9 wurden die Messsignale der Rohdaten aus Abb. 6-7 auf den Mittelwert der jeweiligen Basislinie normiert:

$$\text{Messsignal [\%]} = \frac{\text{Rohdaten [cps]} - \text{Mittelwert [cps]}}{\text{Mittelwert [cps]}} \times 100\% \quad (6.1)$$

Bei einer Normierung der Rohdaten bezogen auf die zugehörige Basislinie wird die Amplitude der Signaländerung relativ zum Mittelwert des Messsignals berücksichtigt. Das Untergrundsignal variiert in Abb. 6-7 von ca. 30.000 cps bei $a = 70$ cm bis fast 180.000 cps bei $a = 25$ cm, wobei die absolute Änderung der Zählrate von ca. +7.000 cps bis ca. -13.000 cps (Abb. 6-8) reicht. Eine Änderung der Zählrate um 5.000 cps bei einem Basissignal von 30.000 cps ist jedoch aus statistischen Gründen viel stärker zu bewerten als bei einem Basissignal von 180.000 cps. Aus diesem Grund wird für die Auswertung der folgenden Messreihen die Messsignaländerung wie in Abb. 6-9 in Prozent bezogen auf die Basislinie angegeben.

Für die Entstehung unterschiedlicher Signalverläufe bei zunehmendem Abstand a und unterschiedlichen Hohlraumgeometrien sind mehrere Effekte verantwortlich (vgl. Kap. 2):

- Entsprechend dem Abstandsgesetz nimmt die Flussdichte an γ -Quanten mit $1/r^2$ ab je länger die Wegstrecke r der γ -Quanten von der Quelle zum Detektor ist (Kap. 2.2.9).
- Die Intensitätsabnahme von γ -Strahlen durch Absorption in Materie mit der Dicke d gehorcht einem Exponentialgesetz und wird durch die material- und energieabhängige Absorptionskonstante μ beschrieben (Kap. 2.2.4, Gleichung (2.19)).
- Bei jeder Compton-Streuung gibt das γ -Quant Energie ab. Die Energieänderung der Strahlung bei der Streuung hängt vom Streuwinkel θ ab und ist maximal bei einer Rückstreuung um $\theta = 180^\circ$. Nimmt die Energie der γ -Quanten ab, so erhöht sich wiederum die Wahrscheinlichkeit der Absorption (Kap. 2.2.6).
- Die Wahrscheinlichkeit für eine Compton-Streuung mit großem Streuwinkel θ nimmt mit abnehmenden γ -Energien zu (Kap. 2.2.6).
- Der Wirkungsquerschnitt σ_a pro Atom für ein Element mit der Ordnungszahl Z ist in guter Näherung die Summe der Wirkungsquerschnitte σ_e pro Elektron: $\sigma_a = Z \cdot \sigma_e$. und ist damit der Ordnungszahl der Elemente proportional bis $Z = \text{ca. } 26$. Die Wahrscheinlichkeit für eine Compton-Streuung steigt mit zunehmender Elektronendichte (Kap. 2.2.3).

Der Übergang zwischen diesen Effekten in Abhängigkeit von der Geometrie der Versuchsanordnung verläuft fließend und wird im Folgenden anhand der Messreihen mit $a = 40$ cm und $a = 70$ cm besprochen (Abb. 6-10).

6.2 Das Messsignal bei einem Hohlraum

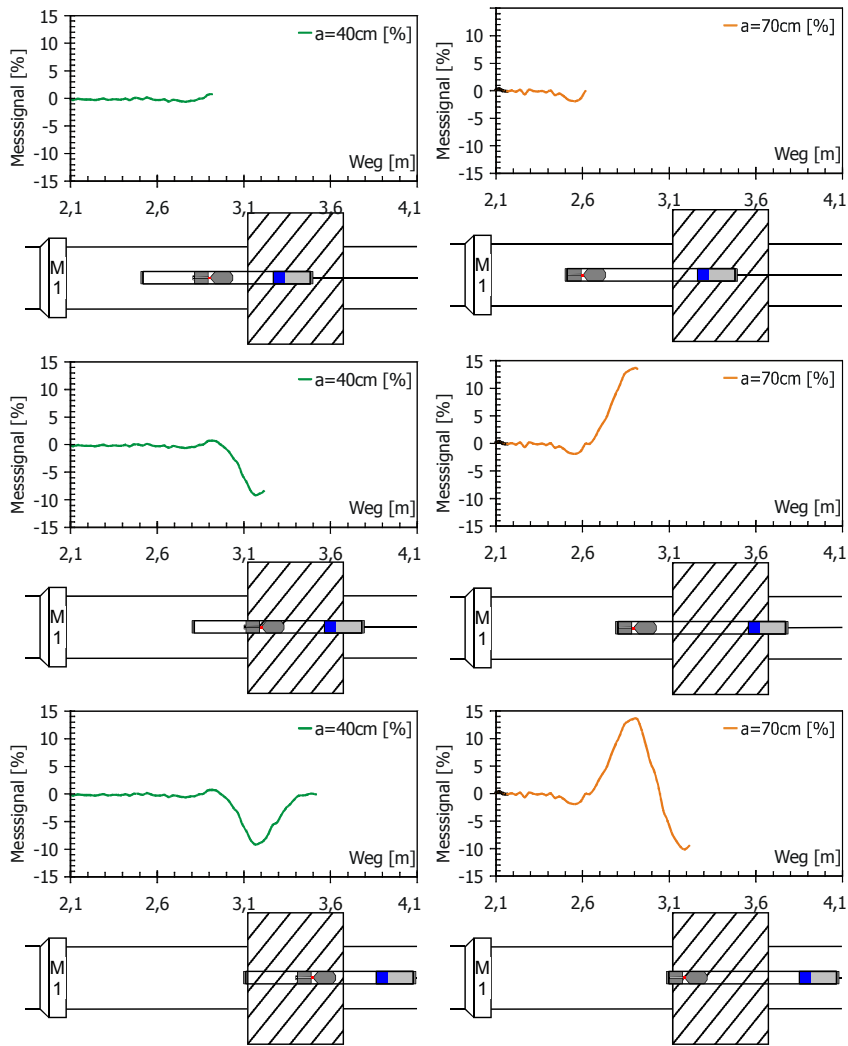


Abb. 6-10: Messreihe im Bereich eines Hohlraumes 56 cm breit, 20 cm hoch, 360°. Links: Versuchsreihe mit $a = 40$ cm, Position der Quelle bei 2,9 m (oben), 3,2 m (Mitte) 3,5 m (unten). Rechts: Versuchsreihe mit $a = 70$ cm, Position der Quelle bei 2,6 m (oben), 2,9 m (Mitte) und 3,2 m (unten).

6.2.1 Positiver Signalausschlag

Betrachtet man den Signalverlauf bei $a = 70$ cm (Abb. 6-10 rechts), so stellt man fest, dass die Zählrate ab der Strahlerposition bei 2,6 m kontinuierlich zunimmt, bei 2,9 m ein Maximum erreicht, daraufhin kontinuierlich wieder abnimmt und bei 3,2 m ein Minimum erreicht. Dabei schneidet das Messsignal bei ca. 3,05 m die Nulllinie des Basissignals.

Aus den Ergebnissen der Modellierung ist bekannt (Kap. 4.3), dass die meisten für das Messsignal relevanten Wechselwirkungen in einem Bereich fast senkrecht von der Quelle aus stattfinden. Dies ist der Bereich welcher von den Bleikörpern um die Quelle nicht abgeschirmt wird und in Abb. 6-11 farblich markiert ist. Für die Darstellung in Abb. 6-11 wird vereinfacht angenommen, dass die γ -Quanten von der Quelle aus kommend in die Bettung eindringen, dort nur eine Compton-Streuung erfahren und auf direktem Weg zum Detektor rückgestreut werden.

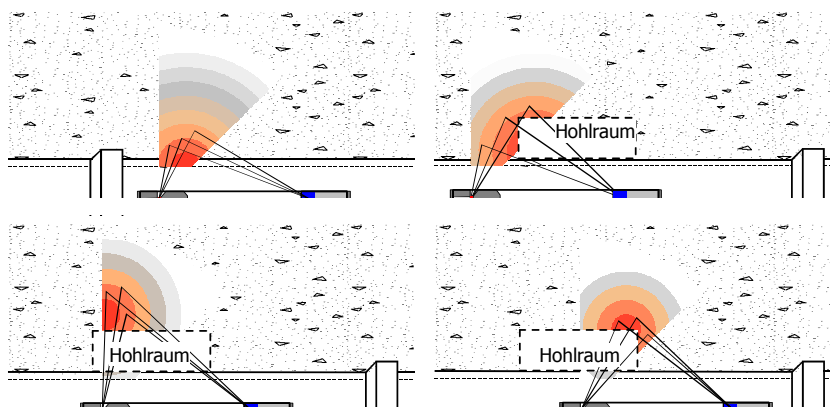


Abb. 6-11: Strahlengang bei $a = 70$ cm. Oben links: in einem Bereich ohne Hohlraum (Basissignal), oben rechts: kurz vor einem Hohlraum (positiver Signalausschlag), unten links: direkt bei einem Hohlraum (negativer Signalausschlag) unten rechts: beim Durchfahren des Bereichs mit einem Hohlraum. Der Bereich mit den für das Messsignal entscheidenden Wechselwirkungen ist dunkelrot gefärbt.

Befindet sich zwischen dem Ort der Wechselwirkung und dem Detektor ein Hohlraum (Abb. 6-10 $a = 70$ cm bei 2,9 m und Abb. 6-11 oben rechts) und somit ein Bereich mit wenig Materie, also geringer Elektronendichte, dann

steigt die Zählrate des Messsignals an, da die Wahrscheinlichkeit, dass die γ -Quanten auf ihrem Rückweg zum Detektor absorbiert werden, kleiner wird. Je kleiner der Abstand a an der γ - γ -Sonde eingestellt ist, umso weniger kommt dieser Effekt aus geometrischen Gründen zum Tragen (Abb. 6-9, Abb. 6-10) und die Effekte, welche den negativen Signalausschlag bewirken, überwiegen.

6.2.2 Negativer Signalausschlag

Der Signalverlauf erreicht sowohl bei $a = 70$ cm (Abb. 6-10 rechts) als auch bei $a = 40$ cm (Abb. 6-10 links) jeweils bei 3,2 m mit ca. 10% Abnahme gegenüber dem Basissignal ein Minimum. In dieser Position befindet sich die Quelle am Anfang des Hohlraumes.

Sobald sich die Quelle im Bereich des Hohlraumes befindet, legen die γ -Quanten einen längeren Weg bis zum Ort der ersten Wechselwirkung zurück, da die Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung beim Durchqueren des Hohlraumes sehr gering ist (Abb. 6-11 unten links). Sie steigt erst wieder an, wenn die γ -Quanten in das Bettungsmaterial eindringen. Infolge dessen sinkt die Zählrate des Messsignals, da mit zunehmender radialer Entfernung von der γ - γ -Sonde wiederum ein größerer Streuwinkel θ notwendig ist damit die γ -Quanten den Detektor treffen, aber die Wahrscheinlichkeit einer Streuung mit größeren Winkeln abnimmt. Zusätzlich nimmt die Flussdichte an γ -Quanten wiederum mit $1/r^2$ bei zunehmenden Wegstrecken ab und die Wahrscheinlichkeit der Vernichtung der γ -Quanten durch Absorption steigt.

6.2.3 Geometrie des Versuchsaufbaus und Signalausschlag

Vergleicht man die absoluten Änderungen der Zählraten in Abb. 6-8 mit den prozentualen Änderungen des normierten Messsignals bezogen auf die jeweilige Basislinie in Abb. 6-9, dann stellt man fest, dass:

- der positive Signalausschlag bei den normierten Messsignalen bis zum Abstand $a = 70$ cm kontinuierlich zunimmt,
- die absolute Änderung der Zählrate bei $a = 60$ cm ihr Maximum erreicht,
- der negative Signalausschlag bei den normierten Messsignalen ab einem Mindestabstand von $a \approx 45$ cm bei allen Messreihen annähernd gleich groß ist,
- die absolute Änderung der Zählrate bei $a = 40$ cm ihr Minimum erreicht.

Daraus lässt sich für Messungen in einem Rohr DN 300 und einer zentriert geführten γ - γ -Sonde ein optimaler Abstand a zwischen Quelle und Detektor von 40 cm bis 55 cm ableiten. Bei diesen Abständen liegt die absolute und die relative Änderung der Zählrate des Messsignals im Bereich mit den maximalen negativen Signalwertänderung, sobald die Quelle sich im Bereich des Hohlraumes befindet. Der positive Signalausschlag ist zur Hohlraumdetektion nicht zwingend notwendig, erleichtert jedoch bei stärkeren Schwankungen des Basissignals durch die prägnante Form in Kombination mit dem negativen Signalausschlag die Ortung eines Hohlraumes. Bei einem Abstand von $a = 40$ cm bis 55 cm ist der positive Signalausschlag hierfür ausreichend stark ausgeprägt.

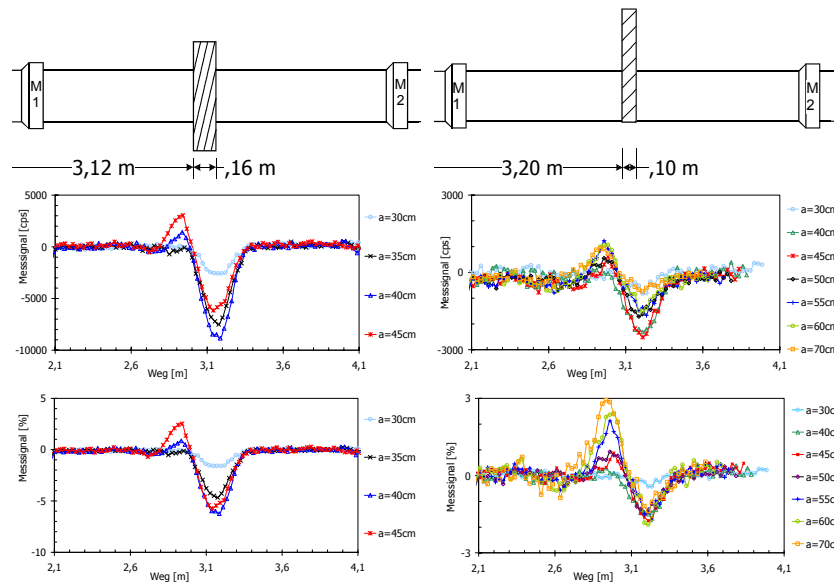


Abb. 6-12: Messreihe mit einem Hohlraum 360°, 16 cm breit, 20 cm hoch (links). Messreihe mit einem Hohlraum 10 cm breit und jeweils 20 cm seitlich und 40 cm oberhalb des Rohres hoch (rechts).

Abb. 6-12 zeigt die Messergebnisse von zwei Messreihen mit schmälere Hohlräumen und unterschiedlichen Abständen a . Der charakteristische Signalverlauf mit positivem und negativem Signalausschlag beim Passieren eines Hohlraumes ist bei beiden Messreihen ebenfalls vorhanden. Die Amplituden der Signalausschläge verringern sich jedoch erwartungsgemäß bei kleineren und schmälere Hohlräumen.

6.2.4 Der Einfluss der Fahrtrichtung auf das Messsignal

Standardmäßig war bei den Messreihen der Detektor in Fahrtrichtung vorne und die Quelle hinten (Abb. 6-3). Für die folgende Messreihe wurde die γ - γ -Sonde um 180° gedreht (Abb. 6-13). Die Quelle befand sich damit in Fahrtrichtung vorne, der Detektor hinten. Zum Vergleich sind die Signalverläufe dieser Messreihen in Abb. 6-14 den Signalverläufen mit Standardanordnung gegenübergestellt.

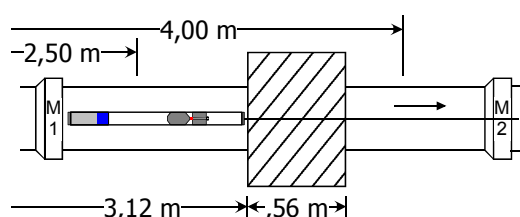


Abb. 6-13: Versuchsaufbau wie in Abb. 6-6 nur mit gedrehter γ - γ -Sonde, so dass die Quelle sich in Fahrtrichtung vorne befindet.

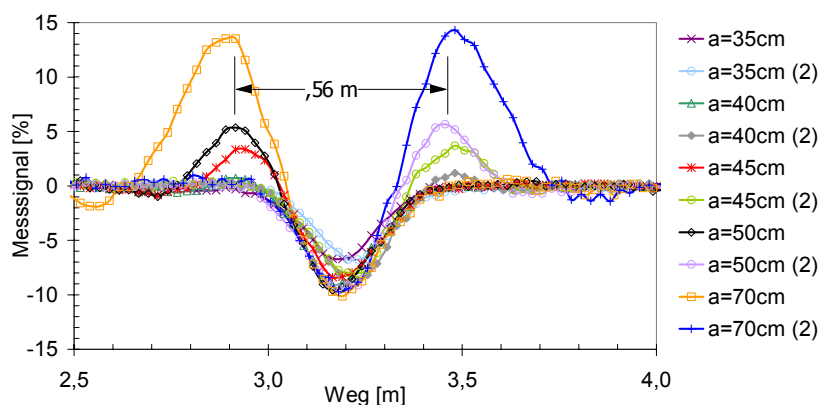


Abb. 6-14: Messreihen mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen. Mit (2) sind diejenigen gekennzeichnet, bei denen die Quelle in Fahrtrichtung vorne war (Abb. 6-13). Aus dem Abstand der positiven Signalausschläge lässt sich die Breite des Hohlraumes bestimmen.

Die Reihenfolge von positivem und negativem Signalausschlag kehrt sich erwartungsgemäß um. Die Position des negativen Signalauschlages ist bei beiden Versuchsanordnungen die gleiche und erreicht auch hier ihr Minimum,

sobald die Quelle wenige Zentimeter in den Bereich des Hohlraumes eingefahren ist. Der positive Signalausschlag folgt, sobald die Quelle den Bereich des Hohlraumes wieder verlassen hat und die γ -Quanten auf ihrem Weg zum Detektor den Hohlraum durchqueren. Die physikalisch-geometrischen Zusammenhänge für die Abnahme und die Zunahme der Zählrate an den jeweiligen Positionen sind die selben wie in der anderen Fahrtrichtung. Aus dem Abstand der Scheitelpunkte der positiven Signalausschläge lässt sich die Breite des Hohlraumes bestimmen, da am Anfang und am Ende des Hohlraumes jeweils dieselben geometrisch-physikalische Bedingungen gegeben sind.

6.3 Das Messsignal bei einem Hausanschluss

Hausanschlüsse und Seitenzuläufe in einem DN 300 Schmutzwassersammelkanal haben häufig eine Nennweite von DN 100 bis DN 200. Das einmündende Rohr ist wie ein kleiner, kreisförmiger und sehr tiefer Hohlraum. Daher entspricht das Messsignal bei einem Hausanschluss (Abb. 6-15) dem Signalverlauf bei einem schmalen Hohlraum (Abb. 6-12).

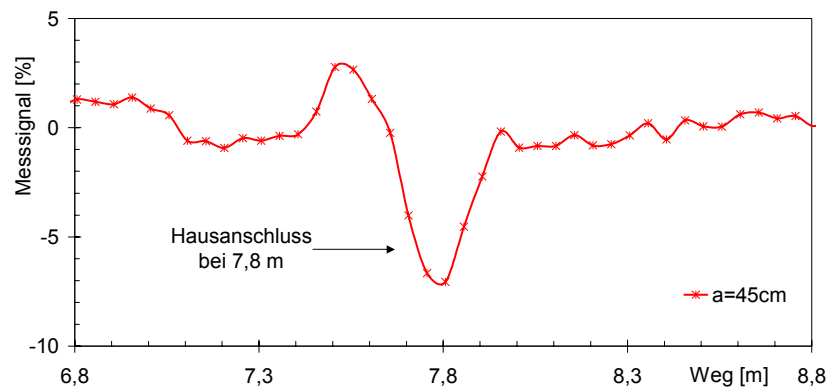


Abb. 6-15: Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4 - S5 mit der γ - γ -Sonde, $a = 45$ cm, Hausanschluss bei 7,8 m.

In die Teststrecke im FZU wurde kein Rohr mit Hausanschluss eingebaut, so dass die Auswertung des Messsignals bei einem Hausanschluss ausschließlich bei Befahrungen der Teststrecke Rastatt-Kastanienweg durchgeführt wurde. Bei den Messfahrten in der Teststrecke Rastatt-Kastanienweg konnten die Hausanschlüsse exakt geortet werden (Kap. 6.9). Beim Scheitelpunkt des negativen Signalauschlages befindet sich die Quelle genau auf Höhe des

6.3 Das Messsignal bei einem Hausanschluss

Hausanschlusses. Seitenzuläufe, an die die Hausentwässerung noch nicht oder nicht mehr angeschlossen ist, werden meistens mit einem Verschlusssteller verschlossen (Abb. 6-37 Mitte). Der verschlossene Abzweig ist für die γ - γ -Sonde trotzdem erkennbar, da der Verschlusssteller im Vergleich zur herkömmlichen Rohrwandung eine viel geringe Wandstärke hat und zudem häufig aus Kunststoff hergestellt und somit ein Bereich mit signifikanter Dichteanomalie ist (Abb. 6-16).

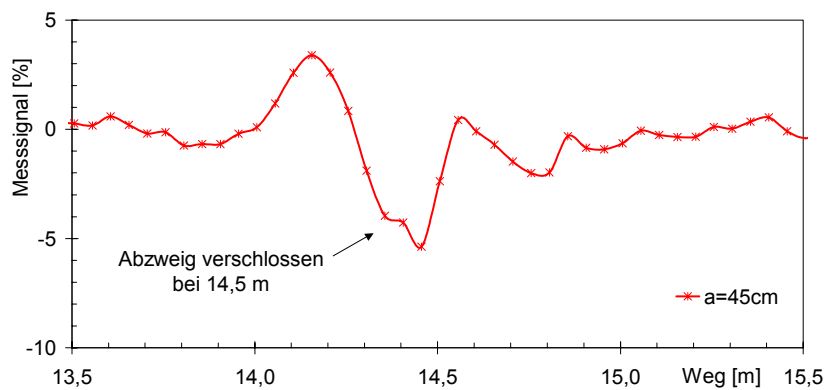


Abb. 6-16: Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg von S4 nach S5 mit der γ - γ -Sonde $a = 45$ cm, mit einem Verschlusssteller verschlossener Abzweig bei 14,5 m.

6.4 Das Messsignal bei einer Muffe

Bei den Rohrverbindungen der Schmutz- und Regenwasserkanäle aus Steinzeug, Beton und Stahlbeton sind Glockenmuffen weit verbreitet. Glockenmuffen sind Steckmuffen, bei denen das Spitzende des einen Rohres in die im Durchmesser größere Glockenmuffe des anderen Rohres gesteckt wird (Abb. 6-17). Im Bereich der Muffe erhöht sich damit die Rohrwandstärke insgesamt auf mehr als das Doppelte und damit erhöht sich auch die scheinbare spezifische Dichte in diesem Bereich bei gleichbleibender Rohrbettung.

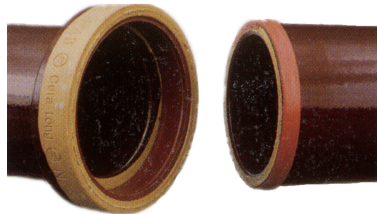


Abb. 6-17: Steckmuffe bei einem Steinzeigrohr mit Glockenmuffe und Spitzende.

Bei Messungen mit der γ - γ -Sonde (Abb. 6-18) sind die Muffen deutlich am Messsignal zu erkennen (Abb. 6-20). Das Messsignal mit positivem und negativem Signalausschlag ähnelt zunächst dem im Bereich eines Hohlraumes. Die physikalisch-geometrischen Zusammenhänge, welche die Änderung der Zählrate verursachen, unterscheiden sich jedoch grundsätzlich.

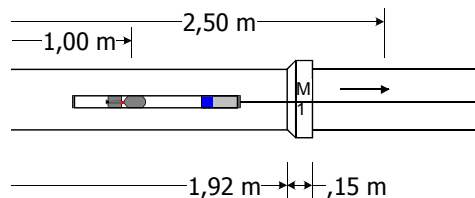


Abb. 6-18: Messreihe an der Muffe M1 in der Teststrecke im FZU.

Der positive Signalausschlag entsteht durch stärkere Rückstreuung der γ -Quanten in der verdickten Rohrwandung der Muffe, sobald die Quelle nur noch ca. 10 cm von der Muffe entfernt ist (Abb. 6-19 links) und der Streuwinkel Θ mit Werten um 60° im Bereich des bevorzugten Streuwinkels bei einer γ -Energie von 0,66 MeV liegt (vgl. Kap. 2.2.6, Abb. 2-16). Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung in der Wandung steigt, da die Dichte der Rohrwand

6.4 Das Messsignal bei einer Muffe

lung höher ist als die Dichte der umgebenden Bettung und der Weg der γ -Quanten durch die Wandung im Bereich der Muffe mehr als doppelt so lang ist im Vergleich zu einem Bereich ohne Muffe.

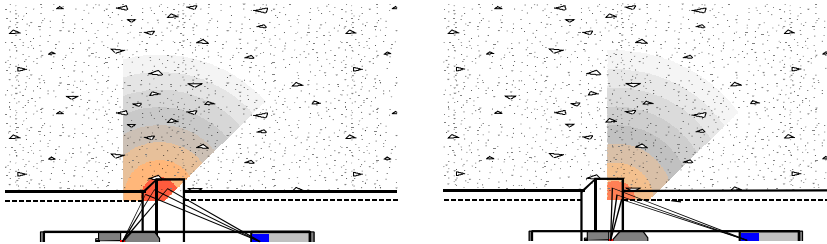


Abb. 6-19: Strahlengang beim passieren einer Muffe.

Befindet sich die Quelle genau im Bereich der Muffe (Abb. 6-19 rechts) nimmt die Zählrate ab, es folgt ein negativer Signalausschlag. In dieser Position der Quelle durchdringen relativ wenig γ -Quanten die dickere Rohrwandung der Muffe, dementsprechend werden auch weniger γ -Quanten vom umgebenden Bettungsmaterial rückgestreut. Für eine Rückstreuung durch die Rohrwandung muss der Rückstreuwinkel θ aus geometrischen Gründen beträchtlich größer sein (Abb. 6-19 rechts), was wiederum die Wahrscheinlichkeit einer Rückstreuung deutlich senkt.

Der Beginn des positiven Signalauschlages ist nur von der Position der Quelle abhängig und nicht, wie bei einem Hohlraum, vom Abstand a zwischen Quelle und Detektor (vgl. Abb. 6-9).

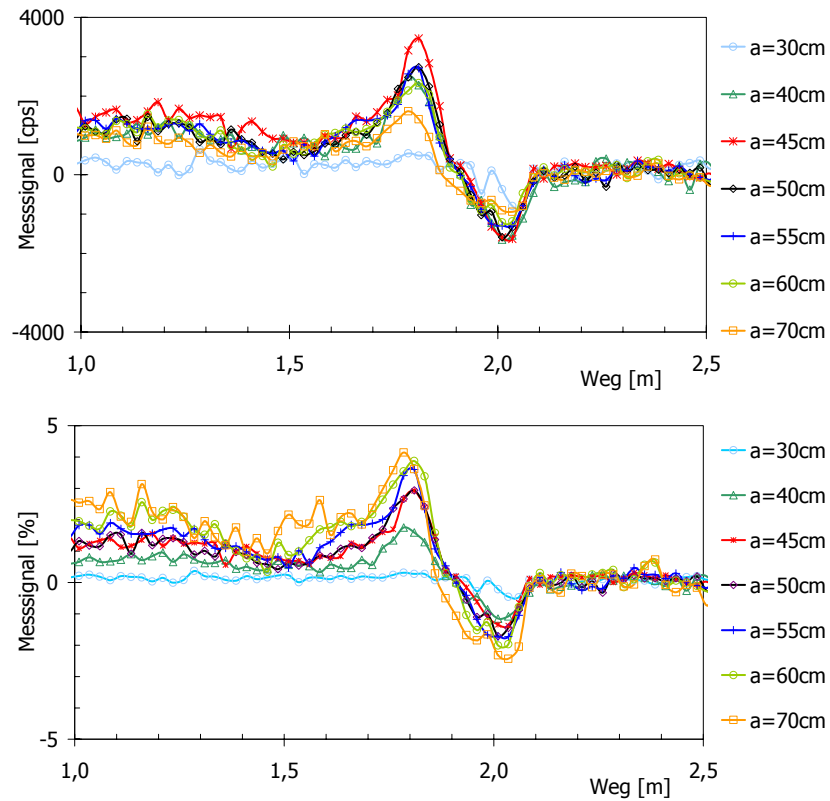


Abb. 6-20: Messreihe an der Muffe M1 in der Teststrecke im FZU. Oben: absolute Änderung der Zählrate. Unten: normierte Änderung der Zählrate.

Der unruhige Verlauf der Basislinie von 1,0 m bis zur Muffe M1 in Abb. 6-20 liegt begründet in vorausgegangenen Umbaumaßnahmen im Rohrumfeld in diesem Bereich ohne anschließende ausreichende Verdichtung des Bettungsmaterials.

6.5 Das Messsignal bei einer Muffe mit Hohlraum

Hat sich ein Hohlraum direkt an einer Muffe gebildet (Abb. 6-21) überlagern sich die bereits beschriebenen Effekte, welche für den positiven und negativen Signalausschlag bei einer Muffe und einem Hohlraum verantwortlich sind (Abb. 6-23). Beim Vergleich von Abb. 6-8 und Abb. 6-9 mit Abb. 6-23 und Abb. 6-24 fällt auf, dass bei jeweils gleicher Hohlraumgröße der negative Signalausschlag bei beiden Messreihen sowohl bezüglich der Änderung der Zählrate als auch der Breite des Signalauschlages, fast gleich ist. Der positive Signalausschlag beginnt jedoch bei der Messreihe mit Hohlraum bei der Muffe deutlich früher, ist breiter und die Änderung der Zählrate ist deutlich größer.

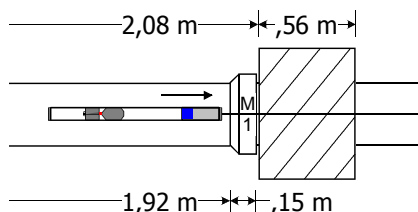


Abb. 6-21: Versuchsstrecke im FZU, Muffe mit Hohlraum.

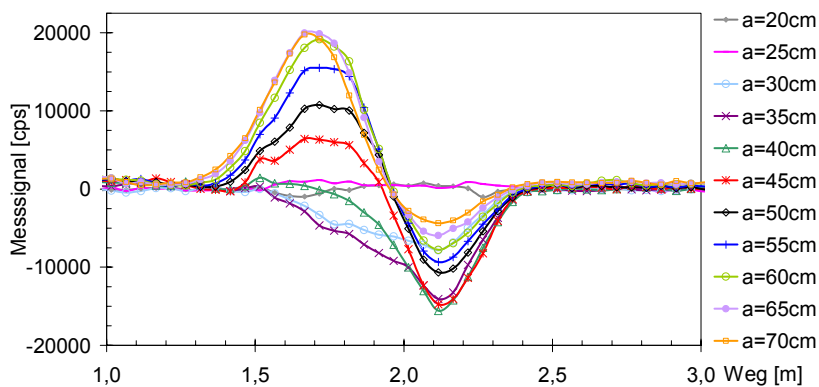


Abb. 6-22: Messreihe mit einem Hohlraum (56 cm breit, 360°) bei M1; absolute Änderung der Zählrate in cps.

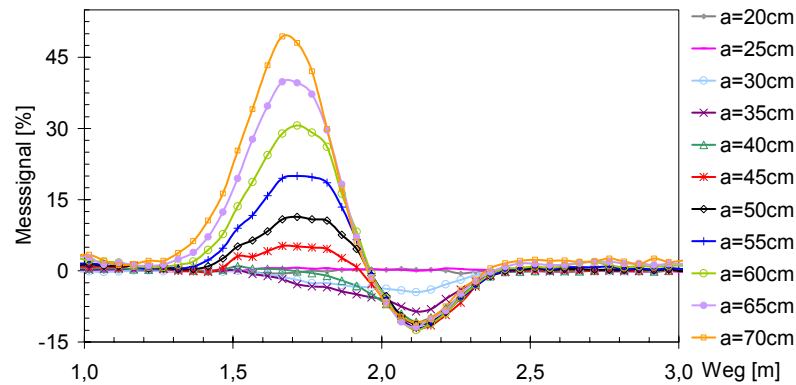


Abb. 6-23: Messreihe mit einem Hohlraum (56 cm breit, 360°) bei M1; normierte Änderung der Zählrate in %.

6.6 Das Messsignal aus verschiedenen Blickrichtungen

Die bisher vorgestellten Messungen zeigen, dass beim Befahren eines Kanals mit der γ -Sonde die durch einen Hohlraum oder Rohrwandstärkeänderungen verursachten Veränderungen der scheinbaren spezifischen Dichte festgestellt und deren Positionen entlang der Längsachse des Kanals auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden können. Die verwendete Quelle strahlt die γ -Quanten kugelsymmetrisch ab, die Bleiabschirmungen vor und hinter der Quelle absorbieren jedoch einen Grossteil der γ -Quanten, so dass der für die Messung relevante Raumbereich auf einen kleinen Teil des Kugelvolumens begrenzt wird (vgl. Abb. 6-11, Abb. 6-19). Eine für diese Messreihe in bestimmten Bereichen des Detektors angebrachte variable Bleiabschirmung absorbiert zusätzlich einen Teil der rückgestreuten γ -Quanten, so dass aus der Richtung ohne Abschirmung deutlich mehr γ -Quanten den Detektor erreichen (Abb. 6-24). Das Messsignal wird somit überwiegend von rückgestreuten γ -Quanten aus dem Raumwinkel ohne Abschirmung geprägt. Dieser für das Messsignal ausschlaggebende Bereich ohne Abschirmung wird im Folgenden als Blickrichtung des Detektors bezeichnet.

Damit der Bereich und die Stärke der Abschirmung verändert werden können, wird auf die γ -Sonde über den Detektor eine Röhre aus Kunststoff geschoben, die im Inneren in einen 180°, einen 90° und zwei 45° Segmente unter-

teilt ist (Abb. 6-24). In diese Segmente können jeweils bis zu 30 Bleibleche mit einer Dicke von je 1 mm eingelegt werden. Damit lässt sich die Dicke der Abschirmung von 0 mm bis 30 mm in 1 mm Schritten und der abgeschirmte Raumwinkel von 0° bis 360° in 45° Schritten variieren (Abb. 6-24 rechts). Die Kunststoffröhre mit der Abschirmung lässt sich in $8 \times 45^\circ$ Schritten einmal um den Detektor drehen. Daraus ergeben sich z.B. bei einer 270° Abschirmung die acht Blickrichtungen: 12:00, 01:30, usw. bis 10:30 mit einem Öffnungswinkel von 90° (Abb. 6-25 rechts). Nach jeder 45° Drehung überdeckt sich der nicht abgeschirmte Bereich des Detektors um 45° mit der vorherigen Messung. Die Blickrichtungen sind bei allen Messungen wie bei einer TV-Befahrung immer von der Sicht der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde aus in Fahrtrichtung angegeben.

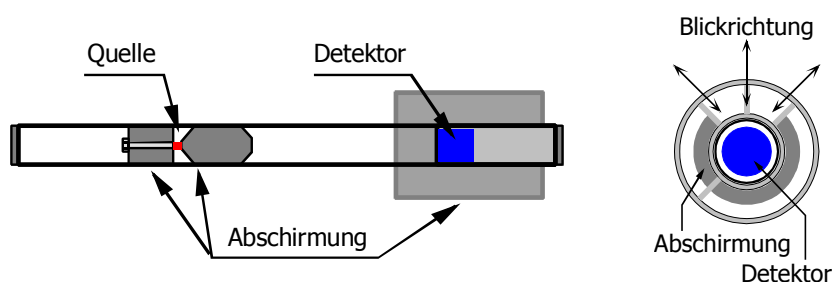


Abb. 6-24: $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde mit drehbarer 270° Bleibeschirmung am Detektor.

Am Rohr der Teststrecke im FZU wurden für die folgenden Messungen zwei Hohlräume in den Sandkörper eingebaut. Hohlraum HR 1 wurde durch einen Styroporkörper (32 cm breit, 20 cm hoch, 180°), Hohlraum HR 2 durch einen leeren Wasserkanister (L x B x T: 46 x 28 x 24 cm) aus Kunststoff simuliert. HR 1 befand sich im Scheitel des Rohres kurz vor Muffe M 1, HR 2 wurde in der Mitte des Rohres, seitlich bei 09.00 eingebaut (Abb. 6-25 links).

Für eine winkelauflösende Messung wurde der Detektor der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde in einem Bereich von 270° mit 10 mm dickem Blei abgeschirmt. Das Rohr wurde mit einem Abstand $a = 45$ cm zwischen Quelle und Detektor achtmal mit der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde befahren. Die Abschirmung wurde nach jeder Befahrung jeweils um 45° gedreht, so dass bei der Messung mit Blickrichtung nach 01:30 die Sektoren 1 und 2, bei der mit Blickrichtung nach 03:00 die Sektoren 2 und 3 etc. ohne Abschirmung waren (Abb. 6-25 rechts).

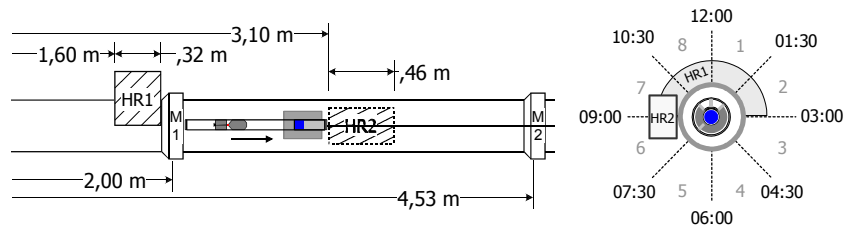


Abb. 6-25: Links: Skizze des Rohres mit Position und Größe der Hohlräume HR 1 und HR 2 in der Teststrecke im FZU (Seitenansicht von rechts).
Rechts: Blick in Fahrtrichtung, dargestellt sind die Hohlräume HR 1 und HR 2 und die acht Blickrichtungen z.B. Sektor 1+2 = 01:30.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Abb. 6-26 dargestellt. Die obere Abbildung zeigt die absolute Änderung der Zählrate des Messsignals in cps bezogen auf eine gemeinsame Nulllinie. In dieser Darstellung lassen sich die einzelnen Messreihen zwar schlecht voneinander unterscheiden, dafür wird deutlich in welchen Bereichen das Messsignal in allen Blickrichtungen den gleichen Verlauf nimmt oder wo einzelne Messsignale von den anderen abweichen.

Für das mittlere Diagramm in Abb. 6-26 wurden die Messsignale des oberen Diagramms entlang der y-Achse um einen festen Betrag zueinander versetzt um Unterschiede der einzelnen Blickrichtungen zu verdeutlichen. Die y-Achse des Diagramms ist ohne Einheit. Zu betrachten sind jeweils die relativen Unterschiede der Signalausschläge der einzelnen Messreihen mit den unterschiedlichen Blickrichtungen. Das untere Diagramm zeigt die prozentuale Abweichung des Messsignals normiert auf die Basislinien der Messreihen. Die Messergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren:

- Das Messsignal bei Muffe M 2 von 4,2 m bis 4,6 m ist bei allen Messreihen fast identisch. Das heißt in allen Blickrichtungen verändert sich die scheinbare spezifische Dichte gleichermaßen, alle geometrische Veränderungen, wie z.B. die Verdopplung der Wandstärke bei der Muffe sind radialsymmetrisch gleich. Die Interpretation dieser Messung lautet: Muffe ohne Hohlraum oder anderer Dichteanomalie bei ca. 4,5 m.
- Das Messsignal in Blickrichtung 07:30 und 09:00 zeigt zwischen 2,7 m und 3,4 m (bei HR 2) einen deutlich stärkern Ausschlag als in anderen Blickrichtungen. Die Interpretation dieser Messung lautet: Dichte-

6.6 Das Messsignal aus verschiedenen Blickrichtungen

- anomalie, vermutlich Hohlraum auf der linken Seite bei ca. 3,2 m.
- Bei Hohlraum HR 1 und Muffe M 1 zeigt das Messsignal in Blickrichtung 12:00 den größten Ausschlag. In den anderen Blickrichtungen nehmen die Signalausschläge mehr oder weniger stark ab, je mehr die Messung nach 06:00 zeigt und damit weg vom Hohlraum gerichtet ist. Der negative Signalausschlag der Muffe M 1 folgt gleich im Anschluss an den negativen Signalausschlag des Hohlraumes und ist nicht in alle Blickrichtungen gleichmäßig wie bei Muffe M 2, da sich die Faktoren zur Signalaus- bildung Hohlraum und Muffe überlagern. Die Interpretation dieser Mes- sung lautet: Dichteanomalie, vermutlich Hohlraum bei ca. 1,7 m im Scheitelpunkt vor einer Muffe bei ca. 2,0 m.

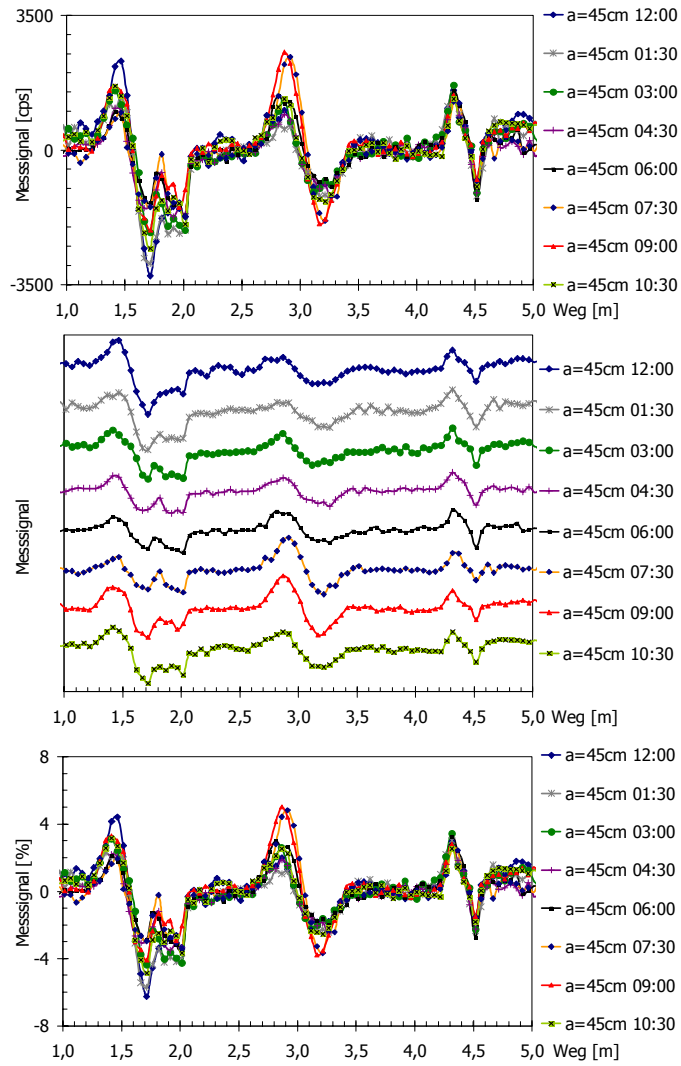


Abb. 6-26: Befahrung mit $a = 45$ cm. Oben: Darstellung der Messergebnisse mit absoluter Änderung der Zählrate in cps. Mitte: absolute Änderung der Zählrate in cps entlang der y-Achse zueinander versetzt. Unten: Darstellung der Messergebnisse in prozentualer Abweichung normiert auf das Basissignal.

6.7 Das Messsignal bei Kanalrohren die im Grundwasser liegen

Im Kapitel 1.4.2 "Die Mechanismen der Hohlraumentstehung" wird die Entstehung der Hohlräume durch hydraulisch induzierte Suffosions- und Erosionsvorgänge innerhalb der Deckschichten bei nichtbindigen Lockergesteinen beschrieben. Besonders häufig entstehen Hohlräume im Umfeld von Kanälen, die im Grundwasser oder Grundwasserschwankungsbereich liegen. Zur Untersuchung des Messsignals beim Passieren eines Hohlraumes und einer Muffe bei Kanälen, die im Grundwasser liegen, wurde die Versuchsrinne im FZU bis 20 cm über Rohrscheitel mit Wasser geflutet und der Kanister HR 2 ebenfalls mit Wasser gefüllt (Abb. 6-25). Anschließend wurde dieselbe Messreihe, wie in Kapitel 6.6 beschrieben, mit acht verschiedenen Blickrichtungen durchgeführt.

Die Messergebnisse sind in Abb. 6-27 analog zu Abb. 6-26 dargestellt. Zum Vergleich der Messreihen mit den Blickrichtungen 12:00, 09:00 und 06:00, einmal ohne und einmal mit Wasserfüllung des Hohlraumes HR 2 und gefluteter Versuchsrinne, sind diese in Abb. 6-28 abgebildet. Erwartungsgemäß fällt der positive und negative Signalausschlag beim Passieren des wassergefüllten Hohlraumes HR 2 deutlich schwächer aus, da der Dichtekontrast zwischen dem wassergefüllten Hohlraum mit einer Dichte von 1 g/cm^3 und dem wassergesättigten Sand mit einer Dichte von ca. $1,9 \text{ g/cm}^3$ deutlich abgenommen hat (Abb. 6-28). Der Signalausschlag bei Muffe M 2 ist bezüglich der Signalform und Signalhöhe bei beiden Messreihen gleich. Dies ist ein weiterer Beleg dafür, dass das Messsignal bei einer Muffe kaum vom Bettungsmaterial beeinflusst wird und im Wesentlichen auf eine Erhöhung der Zählrate durch stärkere Rückstreuung aufgrund doppelter Rohrwandstärke bei einem günstigen Streuwinkel Θ bei 4,3 m (Quelle kurz vor der Muffe) und eine Erniedrigung der Zählrate durch stärkere Absorption und einen ungünstigen Streuwinkel Θ bei 4,5 m (Quelle genau an der Muffe) zurückzuführen ist. Das Muffensignal bei M 1 wird wieder überlagert vom Signal des Hohlraumes HR 1 im Scheitel des Rohres direkt an der Muffe. Das Signal von HR 1 ist auch bei gefluteter Versuchsrinne deutlich zu sehen, da der Styroporkörper kaum Wasser aufnimmt und sich somit seine Dichte kaum verändert.

Im mittleren Diagramm der Abb. 6-28 ist der Unterschied zwischen trockener und gefluteter Rinne für die Hohlraumdetektion besonders deutlich zu sehen. Selbst bei Blickrichtung 09:00 direkt auf den wassergefüllten Hohlraum ist dieser nur schwach zu erkennen. Bei realen Abwasserkanälen ist außerdem

davon auszugehen, dass das Basissignal aufgrund einer inhomogenen Grabenverfüllung stärker rauscht und dass, sofern ein Hohlraum in der Bettung oder Grabenverfüllung vorhanden ist, dieser nicht mit reinem Wasser sondern mit einer Schlamm suspension angefüllt ist, deren Dichte deutlich größer 1 g/cm^3 ist und somit bei einer Befahrung mit der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde nicht erkannt wird.

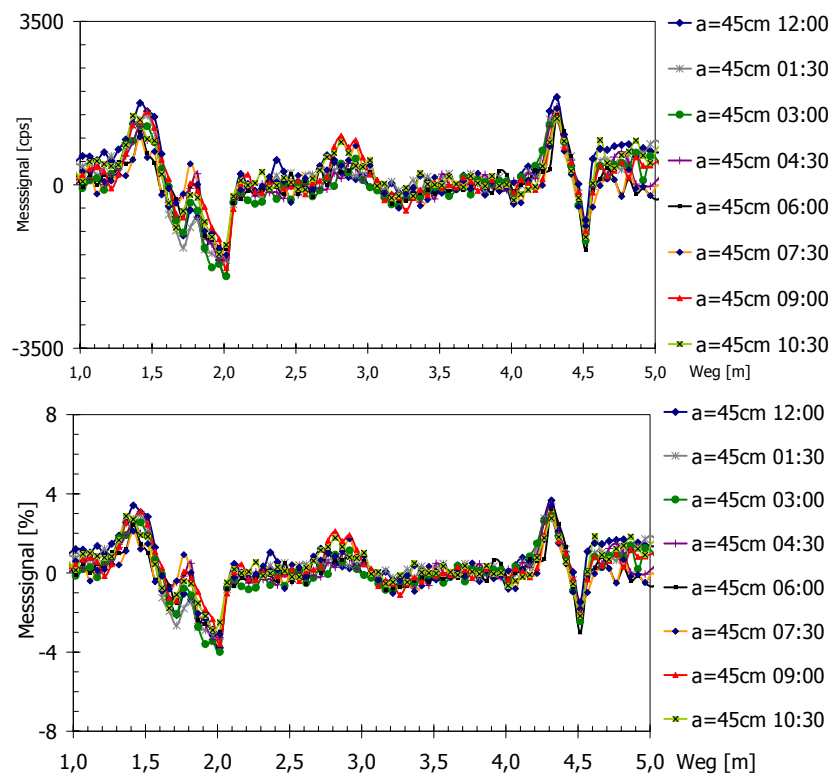


Abb. 6-27: Befahrung der gefluteten Versuchsrinne mit $a = 45 \text{ cm}$.
 Oben: Darstellung der Messergebnisse mit absoluter Änderung der Zählrate in cps.
 Unten: Darstellung der Messergebnisse in prozentualer Abweichung normiert auf das Basissignal.

6.7 Das Messsignal bei Kanalrohren die im Grundwasser liegen

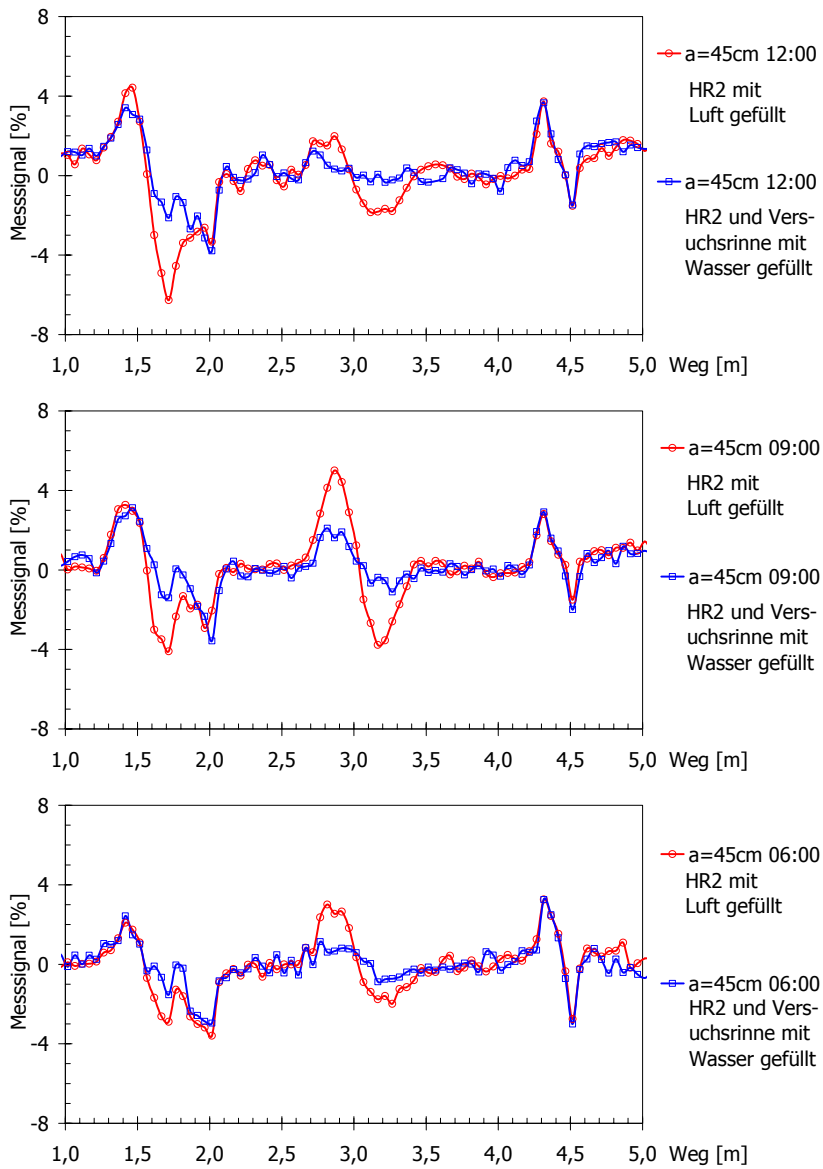


Abb. 6-28: Befahrung der Teststrecke im FZU mit verschiedenen Blickrichtungen im Vergleich mit und ohne Flutung der Versuchsrinne.

6.8 Perspektivische Darstellung der Messergebnisse

Eine Darstellung der Messergebnisse einer Kanalbefahrung mit der γ - γ -Sonde in x-y-Liniendiagrammen ist nur für einfache Messungen sinnvoll und übersichtlich (z.B. Abb. 6-8). Sobald ein Kanalabschnitt mit mehreren Blickrichtungen befahren wird (Abb. 6-26), verliert diese Art der Darstellung schnell an Übersichtlichkeit und eine Interpretation der Messergebnisse ist nur noch mit geübtem Auge und Erfahrung in der Datenauswertung möglich. Um die Auswertung der Messergebnisse zu vereinfachen, wurde im Rahmen des DFG-Projektes SAM (Kap. 1.6) am Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB Karlsruhe ein Diagnosemodul entwickelt. Mit dem Diagnosemodul ist eine perspektivische Darstellung der Messergebnisse möglich und die sensortypischen Merkmale werden automatisch als solche erkannt und angezeigt (FREY & KUNTZE 2003). Das Diagnosemodul wurde zur Datenfusion der unterschiedlichen Sensoren, welche innerhalb des SAM-Projektes getestet wurden, entwickelt. Die Auswertung und Darstellung von gemessenen Daten ist aber auch in einem Offline-Modus für jeden der Sensoren einzeln möglich. Die Auswertung und Darstellung der Messergebnisse einer Kanalbefahrung mit der γ - γ -Sonde mit dem Diagnosemodul werden im Folgenden vorgestellt.

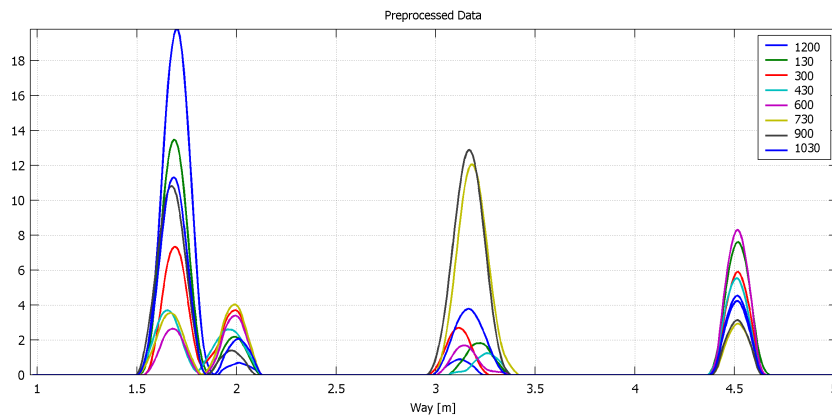


Abb. 6-29: Extrahierte Signalcharakteristika einer Messreihe in der Teststrecke im FZU (Kap. 6.6) aus den Rohdaten von Abb. 6-26 mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls.

Die Messwerte (Abb. 6-26) werden zur Auswertung dem γ - γ -Sonde Diagnose-

semomodul zugeführt. Das Diagnosemodul extrahiert in einer ersten Stufe, der Merkmalgenerierungsstufe, aus dem gemessenen Sensorsignal aussagekräftige Signalcharakteristika und fasst diese in einem Merkmalvektor geringerer Dimensionalität zusammen (Abb. 6-29). In Abb. 6-30 ist ein aus der Zählrate von Messungen mit verschiedenen Blickrichtungen (Abb. 6-26) durch Bandpassfilterung erzeugtes Merkmal perspektivisch dargestellt. Eine Darstellung von Messsignalen mit verschwindend kleinem Merkmal würde eine ebenmäßige Röhre ergeben. Eine Abweichung vom Normalwert, bedingt durch entsprechend signifikante Veränderungen im Messsignal, wirkt sich in einer Veränderung des Merkmals und somit in der Darstellung durch eine Veränderung der Geometrie der Röhre aus. Die perspektivische Darstellung der extrahierten Signalcharakteristika lässt sich mit der Maus auf der graphischen Oberfläche des Diagnosemoduls in jede beliebige Lage drehen und wenden. Es besteht die Möglichkeit bestimmte Bereiche herauszuzoomen und einen Verstärkungsfaktor für die Signalcharakteristika einzugeben. Zur Orientierung sind jeweils am Anfang und am Ende der Darstellung die Blickrichtungen als Uhrzeiten, der Anfangs- und Endwert des dargestellten Kanalanschnitts und im Scheitel des Rohres eine mitlaufende Metrierung dargestellt.

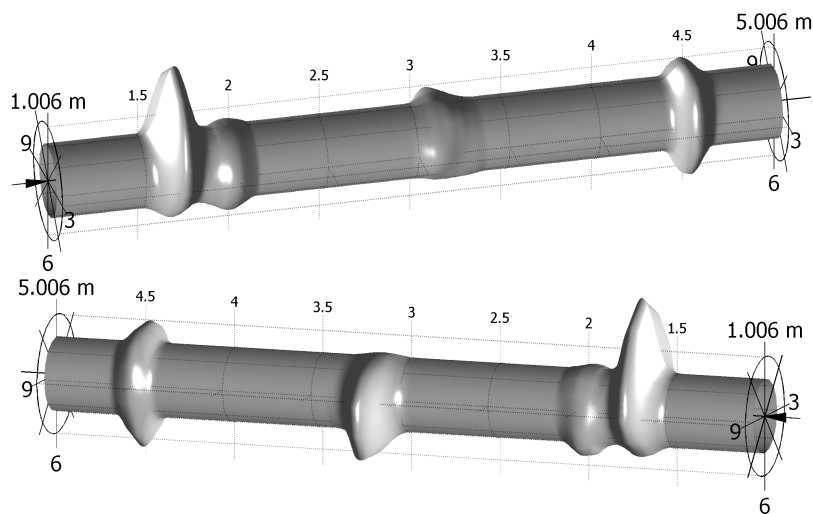


Abb. 6-30: Ansicht von rechts und links einer perspektivischen Darstellung der Messergebnisse von der Teststrecke im FZU nach der Merkmalgenerierung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul. Beschreibung siehe Text.

In Abb. 6-30 sind die Muffen M 1 bei 2 m und M 2 bei 4,5 m als radialsymmetrische Abweichungen vom Normalwert zu erkennen (vgl. Abb. 6-25). Der Hohlraum HR 1 bei ca. 1,7 m im Scheitel des Rohres und HR 2 bei ca. 3,2 m in Richtung 09:00 werden in ihrer räumlichen Lage eindeutig wiedergegeben. Die aus der Abweichung vom Normalwert resultierende perspektivische Darstellung entspricht nicht der Form des Hohlraums, sondern lediglich der Raumlage des extrahierten Merkmals. Muffen können von Hohlräumen dadurch unterschieden werden, dass sie ein radialsymmetrisches Bild erzeugen und im Allgemeinen sich in regelmäßigen Abständen, den Rohrlängen entsprechend, wiederholen (Abb. 6-43).

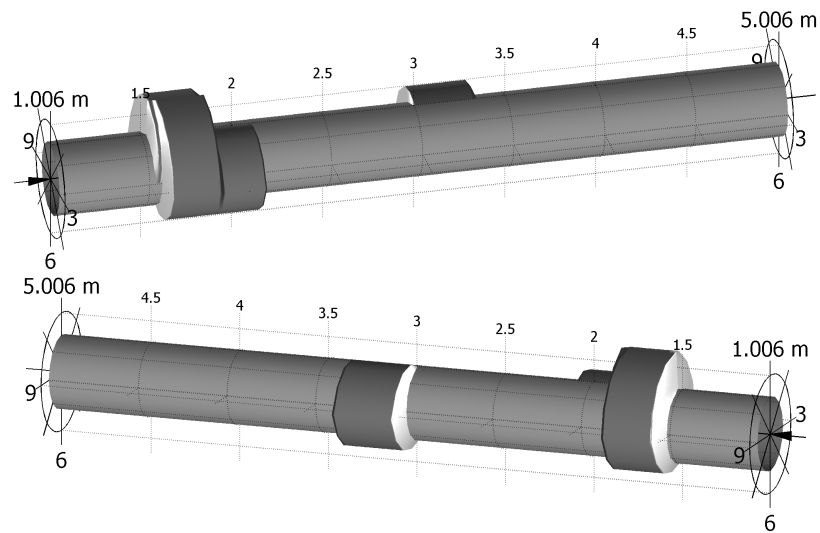


Abb. 6-31: Ansicht von rechts und links einer perspektivischen Darstellung der Messergebnisse von der Teststrecke im FZU nach der Merkmalauswertung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul. Beschreibung siehe Text.

Die Merkmalauswertung stellt als zweite Stufe des Diagnosemoduls einen logischen Entscheidungsprozess dar. Hierbei werden die durch die Merkmale repräsentierten quantitativen Informationen in eine qualitative Aussage, d.h. das Vorliegen einer Anomalie an der betrachteten Rohrposition, transformiert. Unbeschädigte Muffen werden im allgemeinen in diesem Schritt nicht mehr dargestellt, da sie die notwendigen Merkmale für eine Dichteanomalie, verursacht durch einen Hohlraum oder einen Abschluss, nicht erfüllen. Das Diagnoseergebnis dieser Merkmalauswertung ist in Abb. 6-31 dargestellt. Auch diese

Darstellung lässt sich zur Auswertung und Interpretation der Messergebnisse auf der graphischen Oberfläche des Diagnosemoduls beliebig drehen, wenden und vergrößern.

Das Diagnosemodul hat bei der Merkmalauswertung bei Muffe M 1 in Richtung 03:00 eine Anomalie erkannt, obwohl dort keine sein dürfte. Die Signalunterschiede der einzelnen Blickrichtungen sind an der Muffe offensichtlich so groß, dass die Merkmalauswertung bei den für diese Messung eingestellten Filtern nicht mehr zwischen Muffe und Anomalie unterscheiden kann. Für eine möglichst fehlerfreie Interpretation der Messergebnisse sind daher immer alle zur Verfügung stehenden Daten auszuwerten. Ein Vergleich der Darstellungen der Messsignale in Abb. 6-26 und Abb. 6-30 lässt eher auf die korrekte Kombination "Hohlraum an einer Muffe" schließen.

6.9 Messungen in der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg

Die Teststrecke Rastatt/Kastanienweg (Kap. 5.2) wurde mit der γ - γ -Sonde von Schacht S4 nach Schacht S5 befahren (Abb. 6-32). Der Detektor war mit einer 270° umspannenden und 15 mm dicken Bleiabschirmung versehen. Die Teststrecke wurde insgesamt vier mal befahren und die Blickrichtung der γ - γ -Sonde dabei jeweils um 90° gedreht (03:00, 06:00, 09:00 12:00). Die Messergebnisse der Befahrung von 0 m bis 21 m sind in Abb. 6-33, die von 21 m bis 42 m in Abb. 6-34 dargestellt.

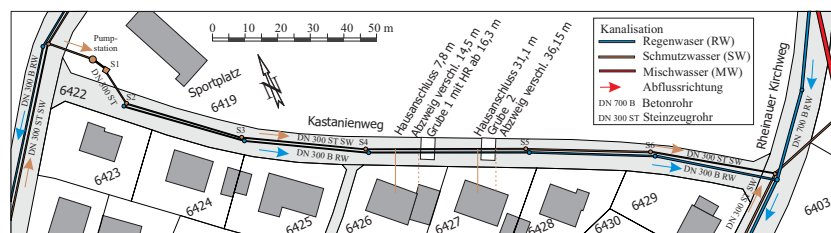


Abb. 6-32: Teststrecke Rastatt/Kastanienweg mit geplanter und realisierter Hausentwässerung (nach EISWIRTH 2002).

Aufgrund der mit jeweils 21 m extrem großen Wegstrecken sind in den Diagrammen die Details nur schwer, die entscheidenden Ereignisse sind jedoch deutlich zu erkennen. Besonders auffällig sind die fünf großen Signalausschläge bei Position 7,8 m, 14,5 m, 16,35 m, 31,1 m und 36,15 m.

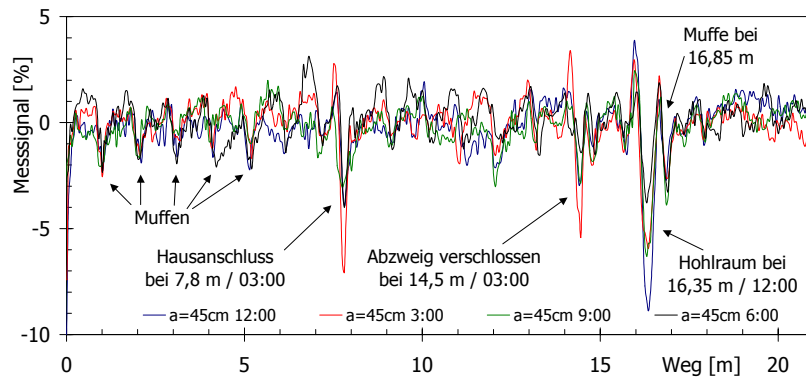


Abb. 6-33: Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Teilausschnitt von 0 m bis 21 m.

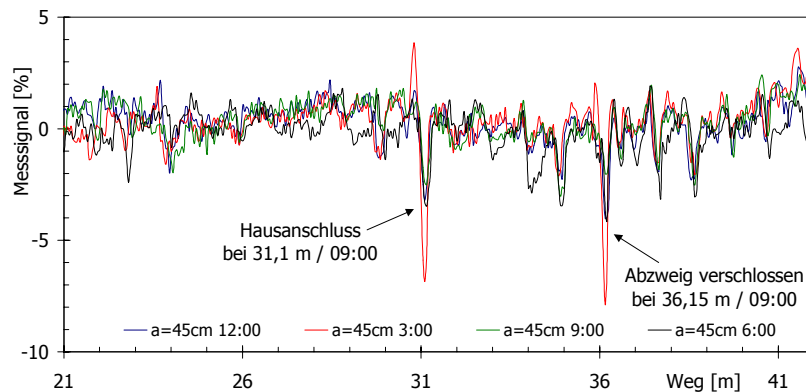


Abb. 6-34: Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Teilausschnitt von 21 m bis 42 m.

Die TV-Befahrung der Haltung S4 nach S5 im Kastanienweg (Anhang 4) ergab an vier dieser Positionen Hausanschlüsse oder verschlossene Abzweige. An der fünften Position befindet sich ab 16,25 m im Scheitel des Rohres ein 40 cm breiter, 20 cm hoher und 180° umspannender "Hohlraum" aus Styropor. Dieser wurde beim Ausbau der Teststrecke Kastanienweg in Grube 1 auf dem Rohr angebracht (Kap. 5.2).

Die Basislinie ist bei dieser Messung, verglichen mit den Messungen in der Teststrecke im FZU, deutlich unruhiger. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da

in der Teststrecke im FZU das gesamte Bettungsmaterial aus einem gleichmäßig verdichteten Mittelsand bestand und das Bettungsmaterial im Kastanienweg zwar den nach DIN EN 1610 geforderten Anforderungen genügt, aber weitaus inhomogener ist. Zur Verfüllung des Verlegegrabens wurde wie üblich das vorher entnommene anstehende Bodenmaterial verwendet (Kap. 5.2). Außerdem war das Rohr in der Teststrecke im FZU während der Versuche trocken, sauber und in neuwertigem Zustand. Der Kanal im Kastanienweg zeigt deutliche Alterungserscheinungen, wie Lageabweichungen und Wurzeleinwüchse an fast allen Muffen, Scherbenbildung und Abplatzungen an der Rohrwand und verfestigte Ablagerungen in der Rohrsohle, an denen sich einige Zentimeter tief Wasser anstaut. Unter diesen Bedingungen sind Schwankungen im Basissignal bei Messung mit der γ - γ -Sonde stets zu erwarten.

Von den Versuchsergebnissen aus der Teststrecke im FZU ist bekannt, dass das Messsignal bei einer Glockenmuffen ca. 40 cm breit ist (Abb. 6-20). Im Kastanienweg wurden Steinzeugrohre mit nur 1 m Länge verlegt. Ist die Bettung und das Rohr intakt und sind keine Hausanschlüsse oder Hohlräume vorhanden, dann verbleiben noch ca. 60 cm zur Ausbildung des Basissignals (Abb. 6-35). Trotz den im Vergleich zur Teststrecke im FZU extrem schlechten Randbedingungen ist das sich regelmäßig in einem Meter Abstand wiederholende Muffensignal fast über die gesamte Haltungslänge gut zu erkennen.

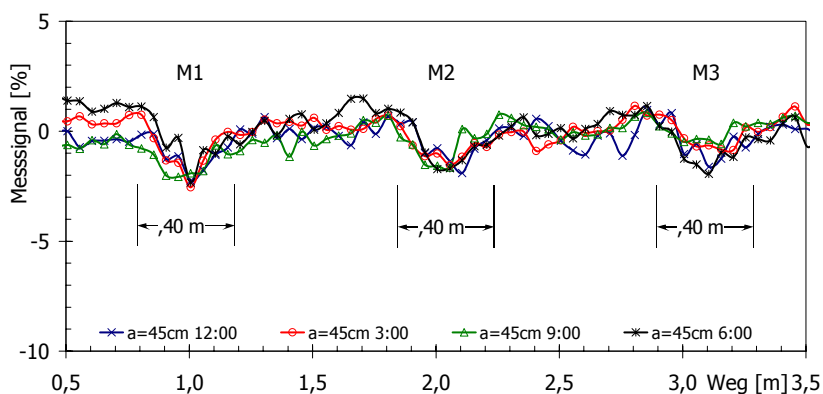


Abb. 6-35: Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Detailausschnitt von 0,5 m bis 3,5 m.

Abb. 6-36 zeigt die Skizze eines Detailausschnitts der Haltung von S4 nach S5 im Kastanienweg. Bei 7,8 m befindet sich ein nicht fachgerecht eingebauter Hausanschluss mit DN 150 (Abb. 6-37 links). Obwohl nicht zulässig, war es vor allem in früheren Jahren oft üblich für den Anschluss der Hausentwässerung ein mehr oder weniger passendes Loch in den städtischen Abwasserkanal zu schlagen und den Kanal der Hausentwässerung ohne fachgerechte Anbindung und Abdichtung in diesen einmünden zu lassen. Bei 14,5 m befindet sich ein mit einem Verschlusssteller verschlossener Abzweig (Abb. 6-37 Mitte). Bei der Verlegung des Abwasserkanals war dieser Abzweig offensichtlich für die nun bei 7,8 m realisierte Grundstücksentwässerung eingebaut worden (Abb. 6-32).

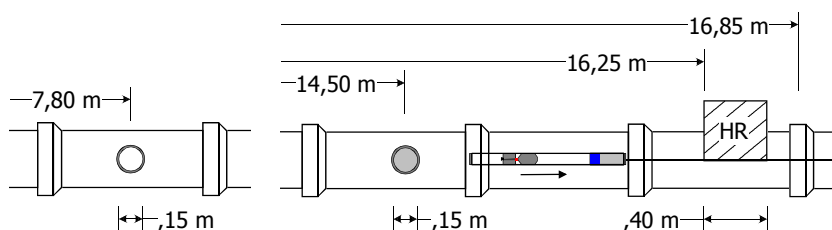


Abb. 6-36: Zwei Detailausschnitte der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5, Hausanschluss bei 7,8 m / 09:00, Abzweig verschlossen bei 14,5 m / 09:00, Hohlraum bei 16,25 m / 40 cm breit / 180°.

An beiden Positionen ist der Signalausgang des 03:00 Messsignals deutlich größer als der Signalausgang der anderen Blickrichtungen (Abb. 6-38) und damit die axiale und radiale Lage der Abzweige eindeutig bestimmt. Die Lage des Hohlraumes lässt sich anhand des Messsignals ebenfalls gut bestimmen. Das 12:00 Signal zeigt den größten, das 06:00 Signal den kleinsten und die 03:00 und 09:00 Signale mittlere Ausschläge (Abb. 6-38). Laut TV-Protokoll vom 10.10.1996 (Anhang 4) ist der Kanal in diesem Bereich intakt und kein Anschlussbauwerk vorhanden. Es muss sich folglich laut Messsignal um einen Hohlraum im Scheitelbereich handeln. Die gleich im Anschluss folgenden größeren Signalausschläge sind in allen vier Blickrichtungen fast gleich stark. Es muss sich also um eine radialsymmetrische Veränderung der scheinbaren spezifischen Dichte handeln. Das Protokoll der TV-Befahrung berichtet von einem "Sonstigen Schaden mit Grundwasserinfiltration". Das Bild einer neueren TV-Befahrung des IITB vom 13.08.2002 zeigt eine stark beschädigte Muffe mit großem Muffenspalt (Abb. 6-37 rechts). Im Detailausschnitt der

6.9 Messungen in der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg

Teststrecke von 13,5 m bis 17,5 m in Abb. 6-38 ist der Unterschied in den Messsignalen der einzelnen Blickrichtungen je nach Ereignis (Abzweig bei 03:00 - Hohlraum im Scheitelbereich - Muffe) besonders gut zu sehen.



Abb. 6-37: Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5. Bilder einer TV-Befahrung des IITB vom 13.08.2002. Links: Hausanschluss nicht fachgerecht eingebaut bei 7,8 m / 09:00. Mitte: Abzweig verschlossen bei 14,5 m / 09:00. Rechts: Muffe stark beschädigt bei 16,85 m.

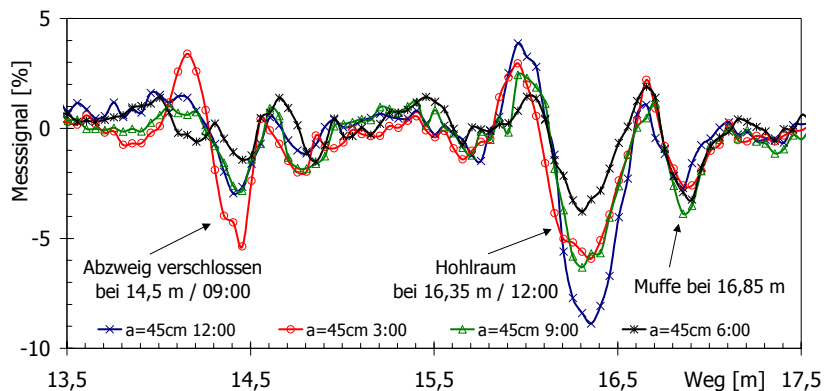


Abb. 6-38: Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S4-S5 mit der γ - γ -Sonde, Detailausschnitt von 13,5 m bis 17,5 m.

Die Rohdaten des Detailausschnitts von Abb. 6-38 wurden mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls aufbereitet und in Abb. 6-39 als Diagramm dargestellt. Abb. 6-40 zeigt die perspektivische Darstellung dieses Detailausschnitts von rechts und links. Der Hausanschluss bei 14,5 m und der Hohlraum im Rohrscheitel bei ca. 16,3 m treten als Merkmal in ihrer räumlichen Lage deutlich heraus. Die Muffen bei ca. 13,8 m, 14,8 m 15,8 m und 16,8 m sind in Abb. 6-38 und Abb. 6-39 ebenfalls zu erkennen. Die stark

beschädigte Muffe bei ca. 3,8 m (Abb. 6-37) zeichnet sich besonders deutlich ab. Nach der Merkmalauswertung erfüllen nur noch der Hausanschluss und der Hohlraum die Kriterien für eine Anomalie (Abb. 6-41).

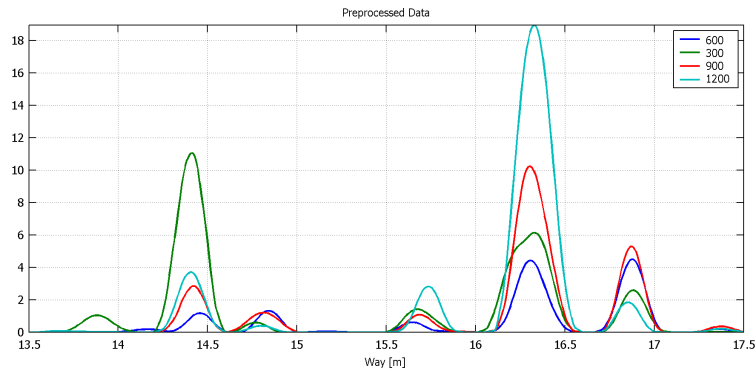


Abb. 6-39: Extrahierte Signalcharakteristika aus den Rohdaten von Abb. 6-38 mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls.

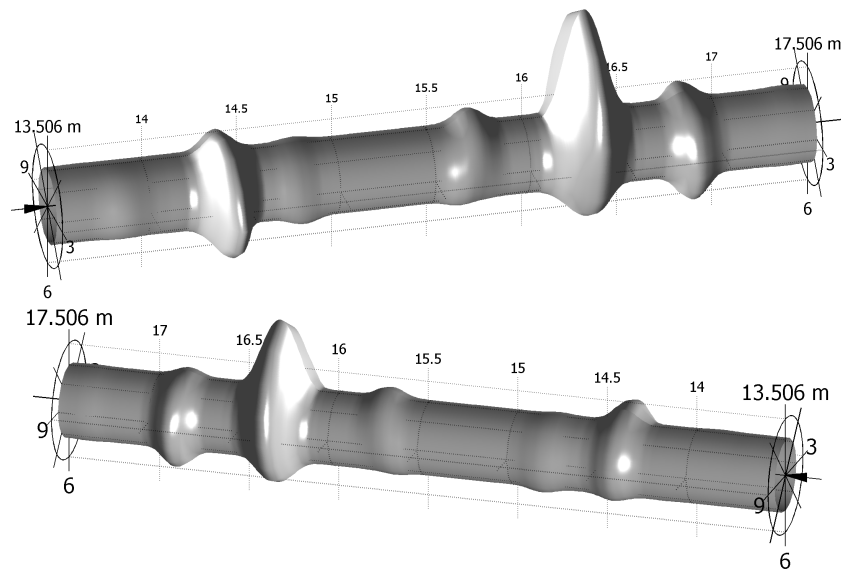


Abb. 6-40: Ansicht von rechts und links einer perspektivische Darstellung der Messergebnisse eines Detailausschnitts der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg nach der Merkmalgenerierung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul.

6.9 Messungen in der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg

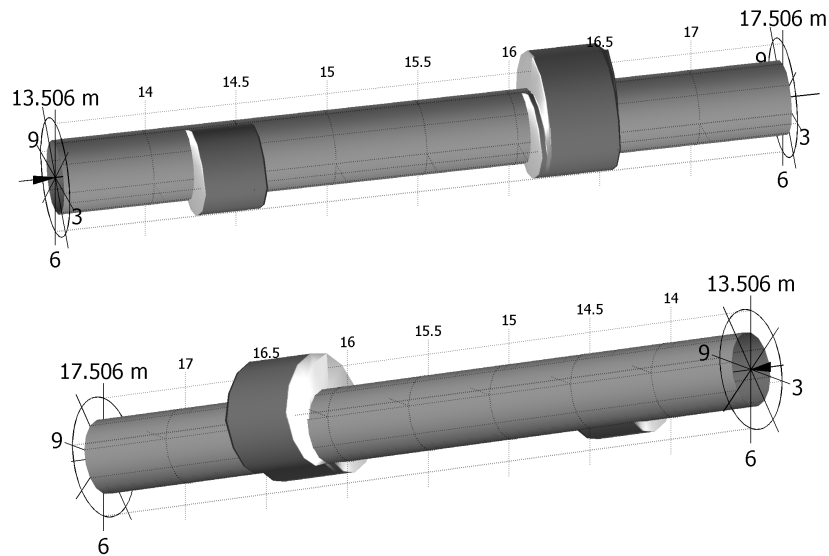


Abb. 6-41: Ansicht von rechts und links einer perspektivischen Darstellung der Messergebnisse eines Detailausschnitts der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg nach der Merkmalauswertung mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul.

Die mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls aufbereiteten Rohdaten der gesamten Haltungslänge von Schacht S 4 bis Schacht S 5 im Kastanienweg sind im Diagramm in Abb. 6-42 dargestellt. Die Hausanschlüsse und der Hohlraum treten sowohl im Diagramm als auch in der perspektivischen Darstellung der gesamten Haltung in Abb. 6-43 (oben) als besondere Signalcharakteristika heraus. Schön zu sehen sind auch in beiden Abbildungen die sich fast über die gesamte Haltungslänge in gleichen Abständen wiederholenden Merkmale der Muffen. Nach der Merkmalauswertung mit dem Diagnosemodul für die γ - γ -Sonde erfüllen nur noch die Hausanschlüsse und der Hohlraum die Kriterien für eine Anomalie (Abb. 6-43 unten). Die räumliche Lage des Hohlraumes im Scheitel des Rohres und der Hausanschlüsse auf der rechten Seite des Kanalrohres in Richtung der Wohnhäuser (vgl. Abb. 6-32) ist anhand der Messergebnisse mit der γ - γ -Sonde eindeutig bestimmt.

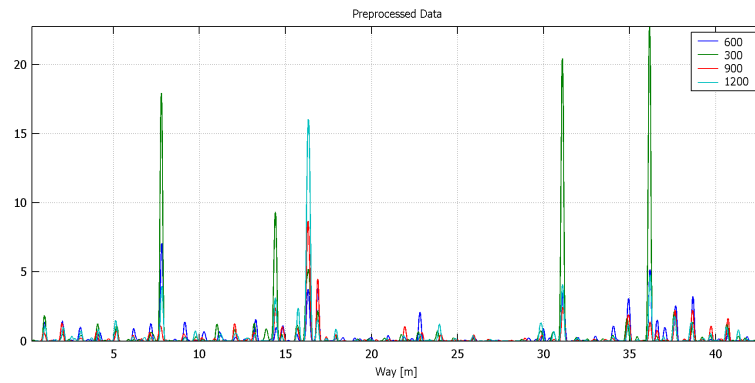


Abb. 6-42: Extrahierte Signalcharakteristika aus den Rohdaten von Abb. 6-33 und Abb. 6-34 mit der Merkmalgenerierungsstufe des Diagnosemoduls.

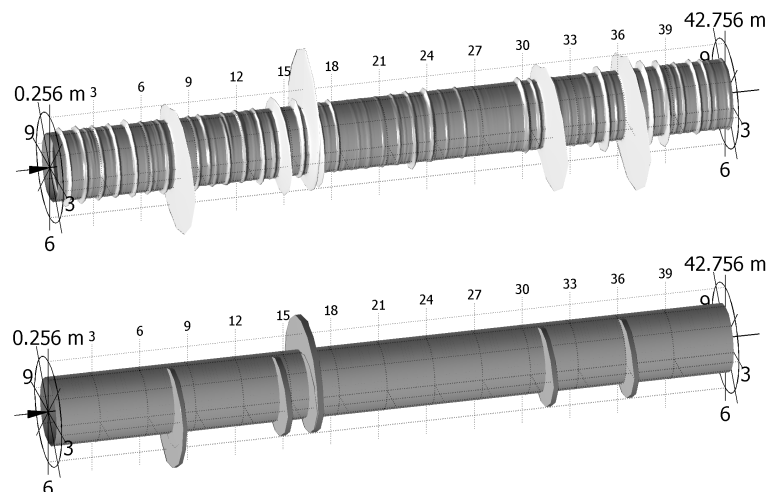


Abb. 6-43: Ansicht von rechts, perspektivische Darstellung der Messergebnisse der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg S 4 - S 5 nach der Merkmalgenerierung (oben) und nach der Merkmalauswertung (unten) mit dem γ - γ -Sonde Diagnosemodul.

7 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG DES MESSVERFAHRENS UND AUSBLICK

7.1 Prinzipielle Eignung des Verfahrens

Die prinzipielle Eignung der für den Einsatz im Kanal adaptierten γ - γ -Sonde zur Detektion von Hohlräumen und Ortung verdeckter Hausanschlüsse konnte sowohl bei den Laborversuchen in der Versuchsrinne im FZU, als auch bei den Geländemessungen in Abwasserkanälen der Stadt Rastatt gezeigt werden. Das Messsignal beim Passieren eines luftgefüllten Hohlraums ist je nach Abstand a zwischen Quelle und Detektor durch einen mehr oder weniger stark ausgeprägten positiven Signalausschlag und einen stets signifikanten negativen Signalausschlag geprägt. Die Position des Hohlraums ist bestimmt über die Position der γ -Quelle im Kanal, wenn das Messsignal den Scheitelpunkt des negativen Signalausschlags erreicht. Bei einem Steinzeugrohr DN 300 betrug der auf das Basissignal normierte Signalausschlag beim Passieren eines Hohlraumes maximal $\pm 15\%$ der Zählrate. Im Durchschnitt liegt der für die Auswertung entscheidende negative Signalausschlag bei 4% bis 7% der Zählrate und ist damit ausreichend für eine eindeutige Detektion des Hohlraums.

7.2 Messgenauigkeit

Die Versuche haben gezeigt, dass auch sehr kleine Hohlräume mit einer Längserstreckung von 10 cm entlang des Kanals eindeutig detektiert werden können (Abb. 6-12). Die geforderte Messgenauigkeit von ± 5 cm für die Ortung von Hausanschlüssen mit DN 100 wurde bei den Laborversuchen im FZU problemlos erreicht. Unter Beachtung der nachfolgend beschriebenen Fehlerquellen und einer in Kapitel 7.4 beschriebenen Weiterentwicklung der γ - γ -Sonde, ist voraussichtlich eine Messgenauigkeit von ca. ± 1 cm erreichbar. Als mögliche Fehlerquellen sind zu beachten:

- Die größte Messungenauigkeit entsteht durch die manuelle Positionierung mit Zugseil und Maßband der γ - γ -Sonde (Kap. 3.2). Die Reibungskräfte zwischen der Rohrwand und den Kufen des Zentrierschlittens erlauben nicht immer eine ruckfreie Bewegung des Schlittens, so dass die gewünschte Positionierung bei Labormessungen im FZU nur mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ cm erreicht werden konnte. Bei Geländemessungen mit durchschnittlichen Haltungslängen von ca. 50 m vergrößert sich dieser Messfehler auf ca. ± 5 cm. Unebenheiten der Rohrwand, In-

krustationen oder Muffenversätze machen eine genaue Positionierung des Zentrierschlittens oft sehr schwer. Hinzu kommen Fehler durch die Dehnung und unterschiedliche Straffung des Maßbandes. Bei dem verwendeten Versuchsaufbau lassen sich diese Fehler nur durch große Sorgfalt des Bedienpersonals minimieren. Da aber jeder Messpunkt immer relativ zu einem festen Bezugspunkt am Rohrende oder Schacht eingemessen wird, addiert sich dieser Fehler nicht auf und wirkt sich nur auf den jeweiligen Messpunkt aus. Bei Geländemessungen ist zu beachten, dass die Positionsangaben in den Protokollen der TV-Befahrungen ebenfalls bereits häufig fehlerbehaftet sind und sich daher nur bedingt zum Abgleich mit dem Messsignal einer γ - γ -Sondenbefahrung eignen.

- Bei Messungen mit verschiedenen Blickrichtungen wird die Interpretation der Messsignale durch eine ungenaue Positionierung der γ - γ -Sonde erschwert. Bei Geländemessungen besteht die Gefahr, dass Messpunkte unterschiedlicher Blickrichtungen miteinander verglichen werden, die aufgrund des Messfehlers von ± 5 cm im Extremfall 10 cm voneinander entfernt sind. Für eine vergleichende Messung mit verschiedenen Blickrichtungen ist es aber wichtig, das Messsignal der einzelnen Blickrichtungen am selben Ort miteinander zu vergleichen um Fehlinterpretationen zu vermeiden.
- Die Schrittweite zwischen den einzelnen Messpunkten ist entscheidend für die Größe des Hohlraumes, der gerade noch detektiert werden kann. Bei einem Hausanschluss DN 100 können bei einer Schrittweite von 10 cm die Messpunkte so ungünstig liegen, dass der negative Signalausschlag für eine zweifelsfreie Ortung zu klein ausfällt. Bei einer Schrittweite von 2,5 cm liegen vier Messpunkte im Bereich des Hausanschlusses, so dass die maximal mögliche Abweichung von der Mitte $\pm 1,25$ cm beträgt. Die Schrittweite ist somit der Aufgabenstellung und der gewünschten Auflösung der Dichteanomalie anzupassen.
- Der Messfehler aufgrund statistischer Schwankungen ist bei einer Messzeit von 1 s sehr klein und Betrag bei Vergleichsmessungen am selben Ort unter gleichen Bedingungen lediglich $\pm 0,12\%$ der Zählrate bezogen auf die durchschnittlich gemessene Zählrate (Tab. 6-1). Unter gleichen Versuchsbedingungen ist damit die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sehr gut.

7.3 Einschränkungen beim Einsatz der γ - γ -Sonde

7.3.1 Zusätzlich notwendige Vorarbeiten

Beim Umgang mit radioaktiven Stoffen ist entsprechend der Strahlenschutzverordnung (2001) eine unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden. Die bei Kanalbefahrungen mit der γ - γ -Sonde einzuhaltenden Sicherheitsmaßnahmen sind ausführlich in Kapitel 3.3 beschrieben und stellen für den Einsatz der γ - γ -Sonde keine wesentliche Einschränkung dar. Der Einsatz der γ - γ -Sonde mit den geplanten Maßnahmen muss lediglich dem zuständigen Gewerbeaufsichtsamt eine Woche vor Messbeginn angemeldet werden.

Da die elektronischen Bauteile des Detektors beim gegenwärtigen Versuchsaufbau lediglich wassergeschützt und nicht wasserdicht sind, ist eine Wasserhaltung dann notwendig, wenn die γ - γ -Sonde bei einer Kanalbefahrung ins Wasser eintauchen würde.

Ablagerungen, Wurzeleinwüchse, Muffenversätze, einragende Anschlusskanäle, Schäden an der Rohrwandung etc. können zu Querschnittsverengungen führen, an denen sich der Zentrierschlitten verklemmen kann. Um eine teure und zeitaufwendige Bergung der Messeinrichtung zu vermeiden, sollte vor jeder Befahrung mit der γ - γ -Sonde eine TV-Befahrung des Kanals durchgeführt werden. Bei der Interpretation der Messergebnisse sind die zusätzlichen Informationen von der TV-Befahrung ohnehin stets mit einzubeziehen, da z.B. Stauwasser in der Kanalsohle oder größere Beschädigungen der Kanalwand großen Einfluss auf das Messsignal der γ - γ -Sonde haben.

7.3.2 Dichtekontrast

Zur Detektion von Hohlräumen und Ortung verdeckter Anschlusskanäle ist ein möglichst großer Dichtekontrast zwischen diesen Bereichen und dem "normalen" Kanalrohr notwendig. Diese Bedingung ist bei der Ortung von Hausanschlüssen normalerweise immer erfüllt, da hier die mehrere Zentimeter starke Rohrwandung entfällt, welche ansonsten für ein hohes Grundsignal verantwortlich ist (Abb. 6-2). Eine Verschlusskappe oder der Inliner streuen im Vergleich zur Rohrwandung deutlich weniger γ -Quanten zum Detektor zurück, so dass trotz der geringen räumlichen Ausdehnung der Anomalie ein signifikanter negativer Signalausschlag entsteht und eine genaue Ortung der Hausanschlüsse möglich ist (Abb. 6-33, Abb. 6-34 und Abb. 6-38).

Bei Kanälen die im Grundwasser liegen ist auch der Hohlraum mit Wasser gefüllt, der Dichtekontrast nimmt dadurch stark ab, eine Detektion des Hohlraumes ist nicht, oder nur unter günstigen Umständen möglich (Kap. 6.7). Bei Kanälen die im Grundwasserschwankungsbereich liegen kann deshalb eine Befahrung mit der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde nur bei Trockenwetterabflussbedingungen durchgeführt werden.

7.3.3 Zeitaufwand

Mit dem hier vorgestellten Versuchsaufbau (Kap. 3) ist für eine Kanalbefahrung mit der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde ein beträchtlicher Zeitaufwand einzukalkulieren. Bei durchschnittlichen Haltungslängen von 50 m, einer Schrittweite von 5 cm und einer Sekunde Messzeit pro Messpunkt sind ca. zwei Stunden für eine Befahrung anzusetzen. Für eine möglichst fehlerfreie und genaue Auswertung der Messergebnisse sind jedoch vier Befahrungen mit unterschiedlichen Blickrichtungen empfehlenswert, so dass allein für die Befahrungen insgesamt acht Stunden anzusetzen sind. Mit den entsprechenden Vor- und Nacharbeiten sind für die Befahrung von 50 m Kanal insgesamt zwei volle Arbeitstage einzurechnen. Eine Lösung dieses Problems wird in Kapitel 7.4 aufgezeigt.

7.3.4 Verdrehung der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde

Ein weiteres Problem ist, dass die Bleiabschirmung am Detektor durch ihr großes Gewicht (ca. 7,5 kg bei 15 mm / 270°) eine starke Unwucht erzeugt und beim Befahren längerer Strecken häufig eine Verdrehung der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde um ihre Längsachse verursacht und die eingestellte Blickrichtung nicht auf der gesamten Haltungslänge beibehalten werden kann. Die Verdrehung der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde kann während der Messung weder korrigiert noch festgestellt werden, da der Versuchsaufbau im derzeitigen Zustand noch keinen Sensor dafür besitzt. Um eine möglichst große Differenz bei den Signalausschlägen der unterschiedlichen Blickrichtungen zu erreichen, sollte die Abschirmung am Detektor so dick wie möglich sein. Allerdings nimmt das Gewicht der Abschirmung mit jedem Millimeter enorm zu, so dass die Handhabung der $\gamma\text{-}\gamma$ -Sonde immer schwieriger wird und die Wahrscheinlichkeit steigt, dass sich der Versuchsaufbau während der Befahrung verdreht. Eine Lösung dieses Problems wird in Kapitel 7.4 aufgezeigt.

7.4 Ausblick

Das γ - γ -Messverfahren ist prinzipiell zur Detektion von Hohlräumen und Ortung verdeckter Hausanschlüsse geeignet, für einen Praxiseinsatz sind jedoch noch einige technische Änderungen notwendig.

Da eine TV-Befahrung zur Interpretation der Messergebnisse der γ - γ -Sonde ohnehin empfehlenswert ist (Kap. 3.2.2 und Kap. 7.3.1) und eine TV-Befahrung auch im Allgemeinen bei der gesetzlich vorgeschriebenen Kanalinspektion durchgeführt wird (Kap. 1.3), ist die Kombination eines TV-Kamerafahrwagens (Abb. 1-1) mit einer γ - γ -Sonde als ideal zu betrachten. Die Positionsbestimmung der γ - γ -Sonde ist nach entsprechender Kalibrierung des Messsignals mit den Positionsangaben des Kamerafahrwagens und dem Bildausschnitt der TV-Kamera sehr genau möglich. Messungen können entweder einzeln an konkreten Messpunkten gestartet, oder bei konstanter Fahrgeschwindigkeit bei laufender Fahrt durchgeführt werden. Bei optimaler Abstimmung der Messzeit auf die Fahrgeschwindigkeit müsste eine Auflösung erreichbar sein, die einer Schrittweite von 2,5 cm bis 5 cm entspricht. Durch die automatische Positionsmessung des Kamerafahrwagens kann somit zu jedem Messwert gleich die entsprechende Position der γ - γ -Sonde in einer Datei abgespeichert werden.

Eine vom Leitstand des Kamerafahrwagens aus ferngesteuerte Einstellung des Abstandes zwischen γ -Quelle und Detektor und eine ferngesteuerte variable Abschirmung am Detektor würden zusätzlich die Messgenauigkeit und den Messkomfort deutlich erhöhen und die Dauer für eine Befahrung erheblich verkürzen. Optimal wäre eine γ - γ -Sonde mit drei oder vier gegeneinander abgeschirmten Detektoren, so dass bei einer Befahrung drei oder vier Blickrichtungen gleichzeitig gemessen werden könnten. Dadurch würde auch der Fehler durch eine falsche Positionsangabe bei mehreren Befahrungen mit unterschiedlichen Blickrichtungen vermieden werden.

Durch die Kombination eines Fräsroboters mit einer entsprechend modifizierten γ - γ -Sonde entfällt beim Auffräsen eines verdeckten Hausanschlusses bei einer Kanalrenovierung mit einem Reliningverfahren das stark fehlerbehaftete Einmessen mit einem Maßband. Mit einer entsprechenden Softwaresteuerung positioniert die γ - γ -Sonde den Fahrwagen des Fräsroboters an der richtigen Position im Kanal. Anschließend kann, ohne dass der Fahrwagen bewegt werden muss, der Fräskopf in Position gebracht und der Anschlusskanal geöffnet werden.

8 LITERATUR

- ATV A 127: Richtlinie für die statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen. - ATV-DVWK-Hauptgeschäftsstelle; Hennef.
- ATV A 139: Richtlinien für die Herstellung von Entwässerungskanälen und -leitungen. - ATV-DVWK-Hauptgeschäftsstelle; Hennef.
- ATV A 142: Abwasserkanäle und -leitungen in Wassergewinnungsgebieten. - ATV-DVWK-Hauptgeschäftsstelle; Hennef.
- ATV-BROSCHÜRE (1998): Abwasser im Klartext. - ATV-DVWK-Hauptgeschäftsstelle; Hennef.
- ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-5.8 (2003): Detektion von Lagerungsdefekten und Hohlräumen in der Umgebung erdverlegter Abwasserkanäle. - in KA - Abwasser, Abfall (50), Nr. 5; Hennef.
- ATV-DVWK-INFORMATION (2001): Zustand der Kanalisation in Deutschland. Ergebnisse der ATV-DVWK-Umfrage 2001. - 8 S.; ATV-DVWK-Hauptgeschäftsstelle; Hennef.
- ATV-MERKBLATT 143-1 (12.1989): Inspektion, Instandsetzung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen. Teil 1: Grundlagen. - 9 S.; Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); Hennef.
- ATV-MERKBLATT 143-2 (04.1999): Inspektion, Instandsetzung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen. Teil 2: Optische Inspektion. - 20 S.; Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); Hennef.
- ATV-MERKBLATT 143-3 (04.1993): Inspektion, Instandsetzung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen. Teil 3: Relining. - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); Hennef.
- ATV-MERKBLATT 143-6 (06.1998): Inspektion, Instandsetzung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen. Teil 6: Dichtheitsprüfung bestehender erdüberschütteter Abwasserleitungen und -kanäle mit Wasser, Luftüber- und -Unterdruck. - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); Hennef.

- ATV-MERKBLATT 143-7 (04.2003): Inspektion, Instandsetzung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen. Teil 7: Reparatur von Abwasserleitungen und -kanälen durch Kurzliner und Innenmanschetten. - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); Hennef.
- ATV-MERKBLATT M 149 (04.1999): Zustanderfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); Hennef.
- ATV-REGELWERK A 139 (Juni 2001): Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); St. Augustin.
- ATV-REGELWERK A 149 (1994): Zustandklassifizierung und Zustandsbewertung von Abwasserkanälen und -leitungen. - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA); St. Augustin (Entwurf).
- BELKNAP, W. B.; DEWAN, J. F.; KIRKPATRICK, C. V.; MOTT, W. E.; PEARSON, A. J. & ROBSON, W. R. (1956): API calibration facility for nuclear logs. - in: Drilling and Production Practice, American Petroleum Institute; **269**.
- BENDER, F. (1985): Angewandte Geowissenschaften. Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. - **3**; 766 S., 585 Abb., 55 Tab.; Enke; Stuttgart
- BERCKHEMMER, H. (1990): Grundlagen der Geophysik. - 201 S.; Wiss. Buchges.; Darmstadt.
- BOHLEBER, A. (1992): Quantifizierung von Bodenwasserbewegungen unter kombiniertem Einsatz von Neutronen- und Gamma-Gamma-Sonde. Untersuchungen am Beispiel des Standortes Weiherbachtal im Kraichgau (Baden-Württemberg). - Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, **18**; 174 S, Karlsruhe.
- BÖLKE, K.-P. (1996): Kanalinspektion. Schäden erkennen und dokumentieren. - 404 S., 230 Abb.; Springer; Berlin, Heidelberg, New York.
- BRADBEER, R. (2000): The Pearl Rover underwater inspection robot. - In: J. BILLINGSLEY (ed), Mechatronics and Machine Vision; p. 255–262, Research Studies Press, UK.
- BRADBEER, R.; HARROLD, S.; LUK, B.-L.; LI, B.; YEUNG, L.F.; & HO, H.W. (2000): A mobile robot for inspection of liquid filled pipes. - Workshop on Service Automation and Robotics; June; City University of Hong Kong.

-
- BUNDESVERBAND DRUCK UND MEDIEN E.V. (BCDM) (gesehen am: 01.08.2003): Umweltlexikon: BAT (best available techniques). Online im Internet: URL: <http://www.bvdm-online.de/uwlexikon/b/bat.nclk>
- BUSCH, K.-F.; LUCKNER, L. & TIEMER (1993): Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 3: Geohydraulik. – 3. neubearb. Aufl. 497 S., 238 Abb., 50 Tab.; Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- CERN (1994): GEANT - Detector Description and Simulation Tool. - CERN Program Library Long Writeup W5013, 428 P; Geneva, Switzerland.
- DACHROTH, W. R. (2002) Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. - 3. erw. u. überarb. Aufl. 681 S. 439 Abb., 113 Tab.; Springer; Berlin, New York, London, Tokio.
- DEUTSCHER, R.; MUNSER, R. & HARTRUMPF, M. (2003): Detektion und Vermessung von Schäden in Abwasserrohren mit einem axialen 3D-Lichtschnittsensor. - In: tm - Technisches Messen 7-8/2003: 338-345; Oldenbourg Verlag; München.
- DIMITRIJEVIĆ, Č. (1972): Praktische Berechnungen der Abschirmung von radioaktiver und Röntgen-Strahlung. – 145 S., 101 Abb., 20 Tab.; Verlag Chemie; Weinheim.
- DIN 1054 (1976): Zulässige Belastung des Baugrunds. - Beuth; Berlin.
- DIN 18123 (1983): Bestimmung der Korngrößenverteilung. - Beuth; Berlin.
- DIN 18128 (1990): Bestimmung des Glühverlustes. - Beuth; Berlin.
- DIN 18129 (1990) Kalkgehaltbestimmung. - Beuth; Berlin.
- DIN 18130-1 (1989): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Laborversuche. - Beuth; Berlin.
- DIN 25426-1 (10.1988): Umschlossene radioaktive Stoffe, Anforderungen und Klassifikation. - Beuth; Berlin.
- DIN 4017-1 (1979) Grundbruchberechnung von lotrecht mittig belasteten Flachgründungen. - Beuth; Berlin.
- DIN 19695 (04.1977): Befördern und Lagern von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonrohren, zugehörigen Formstücken sowie Schachtringen. - Beuth; Berlin.

- DIN 4093 (09.1987): Baugrund; Einpressen in den Untergrund; Planung, Ausführung, Prüfung. - Beuth; Berlin.
- DIN EN 1295-1 (10.1997): Statische Berechnungen von erdverlegten Rohrleitungen unter verschiedenen Belastungsbedingungen. Allgemeine Anforderungen. - Beuth; Berlin.
- DIN EN 1610 (10.1997): Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. - Beuth; Berlin.
- DIN EN 752-5 (11.1997): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Teil 5: Sanierung - Beuth; Berlin.
- DOHMANN, M. [Hrsg.] (1999): Wassergefährdung durch undichte Kanäle. Erfassung und Bewertung. - 306 S.; 87 Abb.; 74 Tab.; Springer; Berlin, New York, Paris.
- DOHMANN, M.; DECKER, J. & MENZENBACH, B. (1995): BMBF-Verbundprojekt: Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung. Teil 1: Untersuchungen zur quantitativen und qualitativen Belastung von Untergrund, Grund- und Oberflächenwasser durch undichte Kanäle. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben 02WA9035. – 145 S.
- DOHMANN, M.; FEYEN, H.-A.; HAUBMANN, R. & RIBE, H. (1993): Kanalsanierung - Vermeidung von Umweltschäden. Zuverlässige Verfahren zur Prüfung, Instandsetzung und Erneuerung bei Liegenschaften des Landes. - [Hrsg.: Landesinstitut für Bauwesen und Angewandte Bauschadensforschung (LBB) im Auftr. des Ministeriums für Bauen und Wohnen des Landes Nordrhein-Westfalen]; 89 S.; WAZ-Druck; Duisburg.
- DVWK Merkblatt 210 (1986): Flusssdeiche. - 42 S. Parey; Hamburg, Berlin.
- EIGENKONTROLLVERORDNUNG - EkVO (20.02.2001): Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr über die Eigenkontrolle von Abwasseranlagen. Baden-Württemberg.
- EISWIRTH, M. (1995): Charakterisierung und Simulation des Schadstofftransports aus Abwasserkanälen und Mülldeponien. - Schr. Lst. f. Angew. Geol. Uni. Karlsruhe, 39: 258 S., Karlsruhe.
- EISWIRTH, M. (2000): Leckortung bei defekten Kanälen. - EntsorgungsPraxis 18 (6): 52-57.

- EISWIRTH, M. (2002): Bilanzierung der Stoffflüsse im urbanen Wasserkreislauf - Wege zur Nachhaltigkeit urbaner Wasserressourcen. - An der Fakultät für Bio- und Geowissenschaften der Universität Karlsruhe angenommene Habilitationsschrift; Karlsruhe.
- EISWIRTH, M.; FREY, C.; HERBST, J.; HESKE, C.; HÖTZL, H.; KUNTZE, H.-B.; KRAMP, J. & MUNSER, R. (2001 a): Sewer Assessment by Multisensor Systems. - IWA 2nd World Water Congress, 15-19 October 2001, Berlin, Germany (on CD).
- EISWIRTH, M.; HERBST, J.; HESKE, C.; HÖTZL, H.; JACUBASCH, A.; KUNTZE, H.-B.; KRAMP, J.; MESCH, F.; MUNSER, R. & SCHNEIDER, T. (2000 a): Schadensdiagnose bei Abwasserkanälen mit Multisensorsystemen. - Tagungsband Rohrleitungsbau Hamburg 2000.
- EISWIRTH, M.; HESKE, C.; BURN, L.S. & DESILVA, D. (2001 b): New methods for water pipeline assessment. - IWA 2nd World Water Congress, 15-19 October 2001, Berlin, Germany (on CD).
- EISWIRTH, M.; HESKE, C.; HELD, I.; HÖTZL, H. & WOLF, L. (2002): Kanal-Zustandserfassung mit geophysikalischen Methoden - DFG-Projekt SAM "Schadensdiagnose bei Abwasserkanälen mit Multisensorsystemen". - 15. Lindauer Seminar "Praktische Kanalisationstechnik Instandhaltung von Kanalisationen", 07.-08.März 2002.
- EISWIRTH, M.; HESKE, C.; HÖTZL, H.; SCHNEIDER, T. & BURN, L. S. (2000 b): Pipe defect characterisation by multi-sensor systems. - Proceedings of the 18th Int. Conf. No-Dig 2000, 15-18 October 2000, Perth, Australia (on CD).
- EISWIRTH, M.; HESKE, C.; HÖTZL, H.; SCHNEIDER, T.; HERBST, J.; MESCH, F.; JACUBASCH, A.; KUNTZE, H.-B.; MUNSER, R. & KRAMP, J. (1999): Schadensdiagnose bei Abwasserkanälen mit Multisensorsystemen. Arbeitsbericht für das 1. und 2. Projektjahr. - DFG-Forschergruppe, Lst. f. Angew. Geol. Uni. Karlsruhe; Karlsruhe.
- EISWIRTH, M., HÖTZL, H., KRAMP, J., LAZAR, C. & MERKLER, G.-P. (1995): Leckagedetektion bei alten Kanälen und Kanalisationsnetzen im Bereich schwankender Grundwasserstände. - Forschungsbericht für BMBF Forschungsvorhaben 02WK9152/0, 25 S., Karlsruhe.
- EISWIRTH, M. & HÖTZL, H. (1998): Schadensdiagnose bei Abwasserkanälen mit Multisensorsystemen. - EntsorgungsPraxis 4/98: 49-53.

- EVANS, R.D. (1955): The Atomic Nucleons. - 972 S; McGraw-Hill; New York.
- FREY, C. W. & KUNTZE, H.-B. (2003): Neuro-Fuzzy-basierte Sensorfusion zur qualifizierten Schadensdiagnose an Abwasserkanälen. - In: tm - Technisches Messen 7-8/2003: 386-397; Oldenbourg Verlag; München.
- FRICKE, S. & SCHÖN, J. (1999): Praktische Bohrlochgeophysik. - 254 S., 31 Tab.; Enke; Stuttgart.
- GORBACHEV, Y. I. (1995): Well Logging. Fundamentals of Methods. - 324 P.; John Wiley & Sons; New York, Toronto.
- HATZSCH, P. (1994): Bohrlochmessungen. - 145 S., 109 Abb., 9 Tab.; Enke; Stuttgart.
- HEARST, J. R. & NELSON, P. H. (1985): Well logging for physical properties. - McGraw-Hill; New York.
- HELD, I. (2003): Detektion und Bewertung von Fremdwasserzutritten in Kanalsystemen. - In: tm - Technisches Messen 7-8/2003: 351-358; Oldenbourg Verlag; München.
- HERBST, J. (2003): Anregung und Messung von Eigenschwingungen zur Beurteilung der Bettungsbedingungen von erdverlegten Abwasserrohren. - In: tm - Technisches Messen 7-8/2003: 370-376; Oldenbourg Verlag; München.
- HERTZBERG, J. & KIRCHNER, F. (1996): Landmark-Based Autonomous Navigation in Sewerage Pipes. - In: Proc. First Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots (EUROBOT '96), IEEE Press, p. 68-73. Kaiserslautern, Germany, October 9-11th.
- HESKE, C. (2003): Hohlraumdetektion in der Umgebung erdverlegter Abwasserkanäle mit Hilfe einer γ - γ -Sonde. - In: tm - Technisches Messen 7-8/2003: 377-385; Oldenbourg Verlag; München.
- JASMUND, K. & LAGALY, G. (1993): Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt - 490 S.; Steinkopff; Darmstadt.
- Jung, P. (1998): Kanalsanierung: Bestandsaufnahme, Planung, Ausführung. - 1. Aufl., 270 S.; Vogel; Würzburg.

- KABBE; REDMANN; DJAWADI; LEHMANN; ORLOWSKY; ELSEN & RÜBEL (2001): Konsortium gläserner Kanal. Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren. - Statusbericht, IKT Gelsenkirchen.
- KANAL MÜLLER GRUPPE (2000): Alles über Abwasserkanäle. Jetzt mit "virtueller Baustelle" zum KM INLINER®-Verfahren (www.kmg.de). - CD ROM; KMG Deutschland GmbH, Schieder-Schwalenberg.
- KEYS, W. S. (1997): A practical Guide to Borehole Geophysics in Environmental Investigations. - 169 P., CRC Press; Florida.
- KIEFER, J. (1981): Biologische Strahlenwirkung. Eine Einführung in die Grundlagen von Strahlenschutz und Strahlenanwendung. – 477°S.; Springer; Berlin, Heidelberg, New York.
- KIRCHNER, F. & HERTZBERG, J. (1997): A Prototype Study of an Autonomous Robot Platform for Sewerage System Maintenance. - *Autonomous Robots* 4(4): p. 319–331.
- KIRKHAM, R.; KEARNEY, P.-D. & ROGERS, K.-J. (1999): PIRAT – A System for Quantitative Sewer Assessment. - In: Proc. Int. Conf. Field and Service Robotics (FSR '99); p. 7–12, CMU, Pittsburgh, PA.
- KNÖDEL, K.; KRUMMEL, H. & LANGE, G. (1997): Geophysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. - **3**, BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; 1063 S. 53 Tab.; Berlin, Heidelberg; Springer.
- KOELZER, W. (1997): Lexikon zur Kernenergie. – 2. Aufl., 221 S.; Forschungszentrum Karlsruhe; Karlsruhe.
- KREKCHI, F. E. (1975): Zur Anwendung von Gamma- und Röntgenstrahlen bei der labormäßigen Dichtebestimmung von Sedimentgesteinen. – 83 S., 37 Abb.; Diss. TU Clausthal.
- KUNTZE, H.B.; HAFFNER, H.; SELIG, M.; SCHMIDT, D.; JANOTTA, K. & LOH, M. (1994): Entwicklung eines flexibel einsetzbaren Roboters zur intelligenten sensorbasierten Kanalinspektion (KARO). - In: Dokumentation 4. Internationaler Kongress Leitungsbau, S 513–528.

- KÜNZEL, F. (2002): Entwicklung und Untersuchung eines sensorbasierten Positionier- und Detektionsalgorithmus für die Inliner-Sanierung von defekten Abwasserrohren. - 133 S.; Dipl.-Arb. Univ. Karlsruhe, Fraunhofer Inst. f. Informations- u. Datenverarbeitung (IITB); Karlsruhe.
- LABO, J. (1987): A practical Introduction to Borehole Geophysics. An Overview of Wireline Well Logging Principles for Geophysicists. - 330 P; Society of Exploration Geophysicists; USA.
- LENKEIT, S. [HRSG.] (1996): Strahlenschutzausbildung. Grundkurs zum Erwerb der Fachkunde im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich. – 550 S.; Forschungszentrum Karlsruhe; Karlsruhe.
- LEO, W. R. (1987): Techniques for nuclear and particle physics experiments. - 351 S; Berlin, Heidelberg; Springer.
- LINDACKERS, K.-H. (1962): Praktische Durchführung von Abschirmungsberechnungen. - 106 S.; Techn. Überw.-Verein Rheinland e.V., Abt. Kernenergie und Strahlenschutz; K. Thiemig KG; München.
- MILITZER, H. & WEBER, F. [Hrsg] (1985): Angewandte Geophysik. Geoelektrik, Geothermik, Radiometrie, Aerogeophysik. – 2 371 S., 208 Abb., 44 Tab.; Springer, Akademie; Wien, New York, Berlin.
- MILITZER, H.; SCHÖN, J. & STÖTZNER, U. (1986): Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau. – 2. Aufl., 418 S., 341 Abb., 53 Tab.; Enke; Stuttgart.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (UVM-BW) [HRSG.] (2000): Leitfaden für kostenminimierende Instandhaltung von Kanalnetzen. Instandhaltung, prognosegestützte Sanierung, Betrieb und Unterhaltung. - 49 S., 27 Abb., 23 Tab., 10 Checklisten; Rösler; Schorndorf, Stuttgart.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MUNLV-NRW) [HRSG.] (1999): Praxisorientierter Leitfaden für die Sanierung von Kanalisationen im ländlichen Raum. - 172 S.; NRW.
- MORTIMER, C. E. (1987): Chemie. Das Basiswissen der Chemie. - 5. völlig neu bearb. u. erw. Aufl.; 660 S., 282 Abb., 341 Formelb. u. Schemata, 118 Tab.; Thieme; New York.

-
- MÜHLHOFER, C (2001): Reparatur durch Injektionsverfahren. – In bbr-Sonderausgabe "Sanierung von Abwasserleitungen".
- MUNSER, R. & HARTRUMPF, M. (2003): Detektion verdeckter Anomalien im Bettungsbereich von Abwasserrohren mit einem Mikrowellen-Rückstreusensor. - In: tm - Technisches Messen 7-8/2003: 359-369; Oldenbourg Verlag; München.
- MUNSER, R.; KUNTZE, H.-B.; HARTRUMPF, M.; & FREY, C.W. (2000): Ein modulares Multisensorsystem für Rohrinspektions- und Rohr-sanierungsroboter. - In: Proc. 16. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme (AMS 2000), Karlsruhe, Germany.
- NEUERT, H. (1966): Kernphysikalische Messverfahren zum Nachweis für Teilchen und Quanten. – 531 S., 539 Abb., 35 Tab.; Braun; Karlsruhe.
- OBWALD, J. (2002): Hydrogeologische und hydrochemische Zustandsbeschreibung Rastatts im Hinblick auf anthropogene Beeinflussung. - 169 S, 52 Abb., 25 Tab.; unveröff. Dipl.-Arb. am Lst. f. Angew. Geol. Uni. Karlsruhe; Karlsruhe.
- PFENNIG, G.; KLEWE-NEBENIUS, H. & SEELMANN-EGGEBERT, W. (1998): Karlsruher Nuklidkarte. – 6. Aufl.; Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Technik und Umwelt.
- PIRSON, S. J. (1963): Handbook of Well Log Analysis. For Oil and Gas Formation Evaluation. – 326 P. Prentice-Hall International, Inc.; London.
- PRINZ, H. (1991): Abriss der Ingenieurgeologie, mit Grundlagen der Boden- und Felsmechanik, des Erd- Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien. - 2. neu bearb. u. erw. Aufl. 466 S., 352 Abb., 74 Tab.; Enke, Stuttgart.
- REUTER, F., KLENGEL, K. J. & PAŠEK, J. (1980): Ingenieurgeologie. – 456 S., 263 Abb., 133 Tab.; Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/M.
- ROME, E.; HERTZBERG, J.; KIRCHNER, F.; LICHT, U.; STREICH, H. & CHRISTALLER, TH. (1999): Towards Autonomous Sewer Robots: The MAKRO ProjectJ. - Urban Water 1; p. 57–70.

- ROME, E.; SURMANN, H.; STREICH, H.; LICHT, U.; & PAAP, K.-L. (2001): A custom IR scanner for landmark detection with the autonomous sewer Robot MAKRO. - In: Proc. 9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS); DEVY, M. & LERASLE, F. (eds.), LAAS-CNRS, Toulouse, p. 457–466; Toulouse, France, July 18–20.
- RÖSER, M. (2001): Untersuchung verschiedener Messmethoden bei Rohrreining-Verfahren - technische und wirtschaftliche Betrachtung. - 106 S; unveröff. Dipl.-Arb. am Inst. f. Maschinenwesen i. Baubetrieb, Uni. Karlsruhe.
- SCHIEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. - 15. neubearb. u. erw. Aufl., 593 S. Enke-Verlag. Stuttgart 1998.
- SCHLUMBERGER (1978): Schlumberger limited Log interpretation charts. - **49**
- SCHLUMBERGER (1982): Well Evaluation Developments. - Continental Europe Well Evaluation Conference publication.
- SCHMIDT, F. K. (1987): Einführung in das Kernphysikalische Praktikum. – Inst. f. Exp. Kernphysik, unveröff. Praktikmunterlagen, Universität Karlsruhe; Karlsruhe.
- SCHMITZ, G. (1996) Grundlagen der Strahlenschutzmesstechnik. - In: LENKEIT, S. [Hrsg]: Strahlenschutz Ausbildung. Grundkurs zum Erwerb der Fachkunde im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich. - Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe.
- SCHNELL, K. (2001): Hydrogeochemische Prozesse bei Weichgelinjektionen - Stoffbilanzierung, potenzielle Langzeitfolgen und Grundwassergefährdungspotenziale. – 204 S.; Schr. Angew. Geol., Nr. 62; Univ. Karlsruhe, Karlsruhe.
- SCHOLL, K.-U.; KEPPLIN, V.; BERNS, K. & DILLMANN, R. (2000): Controlling a Multi-joint Robot for Autonomous Sewer Inspection. - In: Proc. 2000 IEEE/RAS International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2000); IEEE/RAS, Piscataway (NJ); San Francisco, April 24–28.
- SCHÖNHERR, F.; HERTZBERG, J. & BURGARD, W. (1999): Probabilistic Mapping of Unexpected Objects by a Mobile Robot. - In: Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '99) vol. 1, p. 474–481. IEEE Press, Piscataway, NJ.

-
- SCHULER, U. (1997): Bemessung von Erdstoff-Filtern unter besonderer Berücksichtigung der Parameterstreuung. - 170 S.; Diss. a. d. Inst. f. Boden- u. Felsmechanik d. Uni. Karlsruhe; Karlsruhe.
- SCHULZ, R. (2000): Angewandte Geophysik - Neue Geräte und ihre Anwendung. - 188 S.; Geol. Jb. **E 52**, BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Schweizerbart'sche; Stuttgart.
- STAATLICHES GEWERBEAUF SICHTSAMT KARLSRUHE (19.01.2000): GENEHMIGUNG NR.: U/03/006/00 ZUM UMGANG MIT RADIOAKTIVEN STOFFEN. - UNVERÖFF.; KARLSRUHE
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2001): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 1998. - Umwelt Fachserie 19, Reihe 2.1; Metzler und Pöschel; Stuttgart.
- STEIN, D. & NIEDEREHE, W. (1987): Instandhaltung von Kanalisationen. - 350 S., 516 Abb., 56 Tab.; Ernst & Sohn; Berlin.
- STEIN, D. (1999): Instandhaltung von Kanalisationen. - 3. Aufl., 941 S.; Ernst & Sohn; Berlin.
- Strahlenschutzanweisung für den Umgang mit der γ - γ -Sonde (01.03.2000); basierend auf Genehmigung Nr.: U/03/006/00 vom 19.01.2000, unveröff. Lst. f. Angew. Geol., Universität Karlsruhe; Karlsruhe.
- Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) (26. Juli 2001): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen. – Bundesgesetzblatt Jahrgang 2001 Teil I Nr. 38; Bonn.
- TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1961): Die Bodenmechanik in der Baupraxis. - 585 S., 218 Abb.; Springer; Göttingen, Heidelberg.
- UMWELT-LEXIKON (gesehen am 12.08.2003): Stand der Technik. - Online im Internet:
URL:<http://www.umweltlexikon-online.de/fp/archiv/RUBrechtmanagement/StandderTechnik.php>
- VOGEL, H. & KAST, K. (1994): Inner erosion phenomena in covered Karst region as risk to historic buildings. – XIII. ICSMFE, New Delhi, India.
- VOGEL, H. (1999): Dränfähige Stabilisierungsinjektionen in erosions- und sulfationsanfälligen Lockergesteinen. – Diss. a. d. Technischen Universität Darmstadt, Fachb. Geowissenschaften und Geographie; Darmstadt.

- VOGT, H.-G. & SCHULTZ, H. (1992): Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. – 2. vollst. neubearb. Aufl., 428 S., 89 Abb., 40 Tab., 70 Diagr.; Carl Hanser V.; München, Wien.
- VOLKMER, M. (2003): Radioaktivität und Strahlenschutz. - Informationskreis KernEnergie [Hrsg.]; 83 S.; Berlin.
- WASSERGESETZ FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG (WG) (01. Januar 1999)
- WITTMANN, L. (1980): Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien. - 168 S.; Diss. a. d. Inst. f. Boden. u. Felsmechanik d. Uni. Karlsruhe; Karlsruhe.
- WOLF, L. (2003): Anwendung einer segmentierten geoelektrischen Sonde zur Leckagedetektion in Abwasserkanälen. - In: tm - Technisches Messen 7-8/2003: 346-351; Oldenbourg Verlag; München.
- WONIK, T.; GROBE, K. & HÖLSCHER F. (2000): Kurzbeschreibung der vom GGA-Institut eingesetzten geophysikalischen Messmethoden in Bohrungen. - 61 S.; Inst. f. Geow. Gemeinschaftsaufgaben Hannover; Hannover.
- ZIEMS, J. (1968): Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. – 198 S., 76 Abb.; Diss. Fak. f. Bau-, Wasser- und Forstwesen d. T.H. Dresden; Dreseden.
- ZSCHERPE, G. & STEINBRECHER, D. (1997): Bohrlochgeophysik. - In: KNÖDEL, K.; KRUMMEL, H. & LANGE, G. (1997): Geophysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. - **3**, BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; 1063 S. 53 Tab.; Berlin, Heidelberg; Springer.
- ZUBER (Stand 10.03.2003): „Allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und „Stand der Technik“ - Technische Universität Darmstadt, Referat K 2: Arbeitssicherheit und Umweltschutz; Online im Internet:
URL: <http://www.tu-darmstadt.de/k2/allgem/merkbl/regel.html>

Eine umfangreiche und laufend aktualisierte Literatursammlung zu den Themen Kanalstandhaltung, Kanalreinigung, Kanalinspektion und zu Rechtsfragen rund um den Kanal finden Sie auf den Internetseiten der KMG Kanal-Müller-Gruppe GmbH Online im Internet:
URL: http://www.kmg.de/index_de.html

ANHANG

Anhang

ANHANGVERZEICHNIS:

- Anhang 1:** Zeitungsbericht in den Badischen Neusten Nachrichten (BNN) vom 20.08.2001.
- Anhang 2:** Flussdiagramm GEANT mit den einzelnen Unterprogrammen.
- Anhang 3:** Das Steuerungsskript `glog.steer` des Simulationsprogramms GLog
- Anhang 4:** Protokoll einer TV-Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg Haltung S4 - S5 vom 10.10.1996. Kürzel nach ATV M 143-2.

Anhang 1

ANHANG 1

Zeitungsbericht in den Badischen Neusten Nachrichten (BNN)
vom 20.08.2001.



GEFÄHRLICHER ABGRUND: Riesige Mengen Kies wurden unter der Straße vor dem Waldfriedhof über einen defekten Schacht abgeschwemmt. Die Fahrbahndecke fiel zwei Meter in die Tiefe. Foto: Nestler

Im Berliner Ring klafft ein Loch

Defekter Kanalschacht spülte einen zwei Meter tiefen Krater aus

Rastatt (mjr). Buchstäblich vor dem Abgrund stand ein Anwohner im Berliner Ring beim Waldfriedhof. Dort ist vor einigen Tagen der Asphalt komplett eingebrochen, zurückgeblieben ist ein mächtiger Krater von rund zwei Metern Tiefe und einem ebenso großen Durchmesser. Der Anwohner informierte sofort die Stadtverwaltung, diese ließ das gefährliche Loch in der Fahrbahn absperren. Eine Reparatur folgt in einigen Tagen, versichert der Leiter des Tiefbauamts, Jürgen Matheis, gegenüber den BNN.

Ursache für den Einbruch ist nach derzeitigen Erkenntnissen ein undichter Kanalschacht im Untergrund. Das darin fließende Abwasser erzeugte einen Sog und schwemmte den im Untergrund befindlichen Kies nach und nach ab. Im Laufe der Zeit entstand dadurch ein Hohlraum. Die Fahrbahndecke hing gewissermaßen in der Luft, bildete zuerst eine Delle und sackte schließlich komplett ab.

„Passieren kann so etwas eigentlich immer wieder“, erklärt Matheis. Fünf bis zehn kleine-

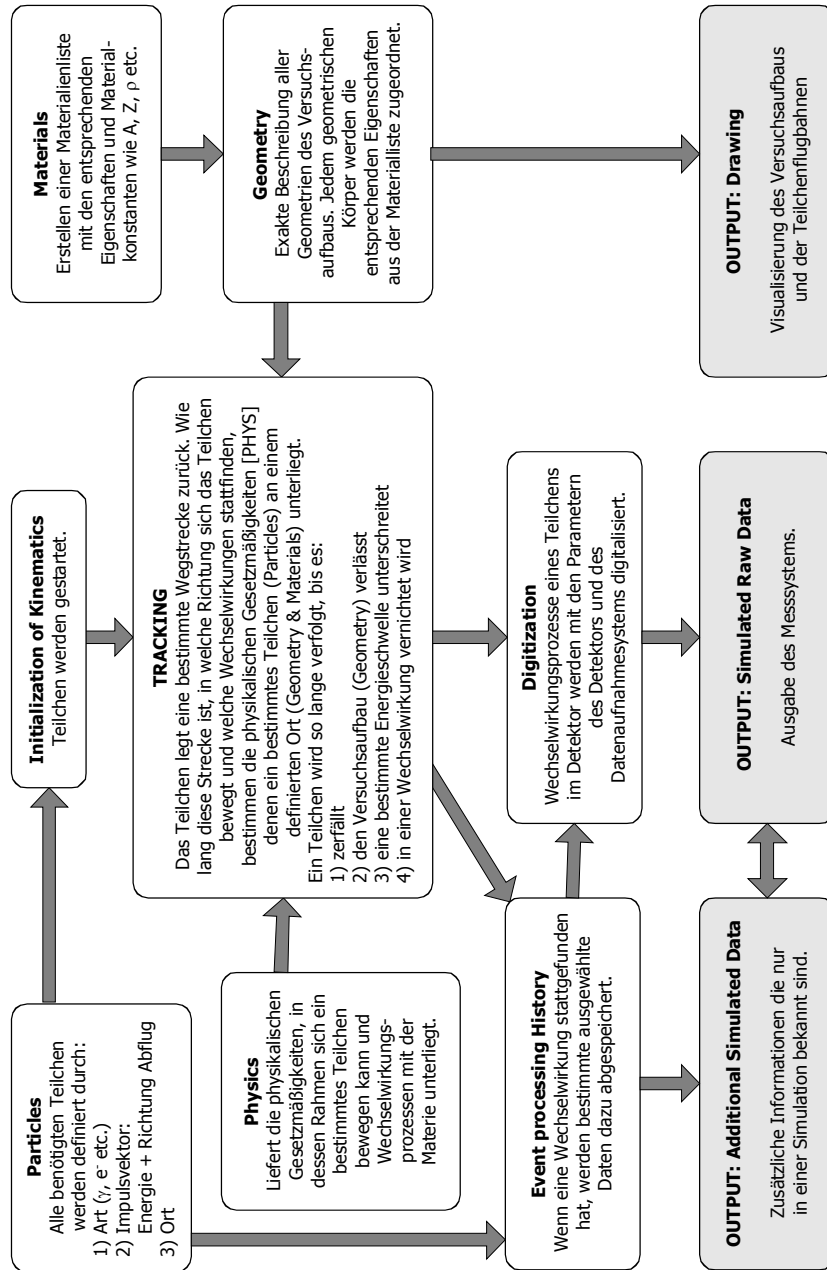
re Einbrüche gebe es pro Jahr. Die Schächte würden routinemäßig alle zehn Jahre kontrolliert. Der Krater im Berliner Ring kann über Wochen oder gar Monate hinweg entstanden sein, schätzt Matheis. Es sei nicht immer gleich feststellbar, welche Abgründe sich unter Rastatts Straßen auftun. Deshalb sollten Bewohner und Passanten Veränderungen in den Asphaltdecken der Polizei melden, appelliert Matheis an die Mithilfe der Bevölkerung.

Ist es auszuschließen, dass in Rastatt womöglich ein ganzer Bus vom Erdboden verschluckt wird, wie dies vor einigen Jahren in München geschehen ist? „Dafür müssen sehr große Hohlräume vorhanden sein, wie etwa U-Bahn-Schächte“, erklärt Matheis. In Rastatt seien solche Hohlräume nirgends unter den Straßen.

Im Berliner Ring wird „so schnell wie möglich“ eine Fremdfirma anrücken und den Schacht reparieren. Danach wird Kies angekarrt, das Loch gestopft und die Fahrbahndecke geschlossen. Der Bauhof könne die Reparatur nicht selbst ausführen, so Matheis.

ANHANG 2

Flussdiagramm GEANT mit den einzelnen Unterprogrammen.



ANHANG 3

Das Steuerungsskript `glog.steer` des Simulationsprogramms GLog

```
C show settings in logfile
LIST
C run number
RUNG 100
C PROB
C x,y,z position of probe in tube (cm)
C z runs along tube
PROB 0. 50. 0.
C SRCE
C type and position of source in probe
C 1: number of particles per event
C 2: energy in MeV
C 3: id (1=gamma)
C 4: distance from szintillator (cm)
C if not aktive, kine card is used (eg. for debugging
etc.)
SRCE 1 0.66 1 30
C KINE : (1=1: single particle generator)
C      x   y   z   ze   az   dx   da   E   dE   ipart
C KINE 1 0.  0.  0.  90.  0.  0.  5.  5.  0.  6.
C shoot straight through the szintillator
C KINE 1 0.  0.  0.  90.  0.  0.  0.  5.  0.  6.
C KINE 1 0.  0.  0.  90.  0.  0.  90.0.00066 0.  1.
SETS 'GGLG'
C TUBE 1: diameter, 2: wall thickness
TUBE 30 2
TRIG 10000000
ANNI 1
BREM 1
PHOT 1
PAIR 1
COMP 1
DRAY 1
LOSS 1
CUTS 1=0.0004 2=0.0004 3=0.0004 4=0.0004 5=0.0004
C CUTS 1=0.00001 2=0.00001 3=0.00001 4=0.00001 5=0.00001
C create particle tracks for interactive version
C VIEW 'JXYZ'
C create debug output
C PRIN 'PART' 'MATE' 'TMED' 'SETS' 'VERT' 'KINE' 'HITS'
C PRIN 'HITS'
STOP
```

ANHANG 4

Protokoll einer TV-Befahrung der Teststrecke Rastatt/Kastanienweg Haltung
S4 - S5 vom 10.10.1996. Kürzel nach ATV M 143-2.

Ort / Straße	Rastatt / Kastanienweg
Datum:	10.10.1996
Start-Zielschacht:	40157878 (S4) - 40157880 (S5)
Länge:	44,20
Nennweite:	300
Material:	STZ

Position [m]	Schaden nach ATV	
	Kürzel	Langtext
6,30	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
7,20	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
7,80	SN-R	Stutzen mangelhaft ausgeführt - Rechts
7,80	HP-R	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs - Rechts
8,10	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
9,00	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
11,20	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
13,10	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
14,50	AU-R	Abzweig verschlossen, undurchlässig - Rechts
14,50	HP-R	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs - Rechts
14,80	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
16,80	WG-U	Sonstiger Schaden Grundwasserinfiltration - Sohle
22,90	WG-U	Sonstiger Schaden Grundwasserinfiltration - Sohle
25,00	LB-U	Lageabweichung Ausbiegung - Unten
26,00	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
27,90	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
28,90	RL-U	Riss längs - Sohle
28,90	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
29,30	RL-U	Riss längs - Sohle
30,40	LB-U	Lageabweichung Ausbiegung - Unten
31,10	LB-U	Lageabweichung Ausbiegung - Unten
31,10	SN-R	Stutzen mangelhaft ausgeführt - Rechts
33,80	RX-G	Scherbenbildung im gesamten Umfang, Anfang
33,90	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
34,80	RX-G	Scherbenbildung im gesamten Umfang, Ende
34,90	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
36,10	AU-R	Abzweig verschlossen, undurchlässig - Rechts
36,10	HP-R	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs - Rechts
37,50	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
38,70	HP--	Abflusshindernis Wurzeleinwuchs
39,70	LB-U	Lageabweichung Ausbiegung - Sohle
42,60	LB-U	Lageabweichung Ausbiegung - Sohle
43,60	LB-U	Lageabweichung Ausbiegung - Sohle

