

Rohrauflegers als Schadensursache vorhanden. Daraus folgt, daß die Angaben, die einer Berechnung zugrunde gelegt werden, insbesondere der Rohrauflegerwinkel von 120° , häufig nicht der Ausführungspraxis auf Deponien entsprechen, siehe auch Hoch et al. (1993). Infolge der extrem hohen Belastungen aus bis zu 60 m Abfallüberschüttung sind starke Verformungen, Verwindungen und Brüche von Sickerwasserleitungen keine Seltenheit. Bild 1.2 zeigt die Verformung eines Sickerwasserrohres aus PE-HD aus einer Kanalbefahrung.

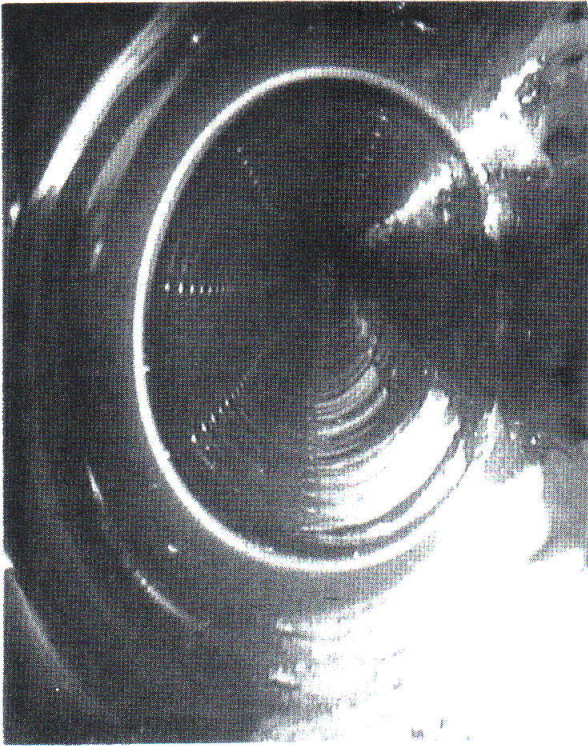


Bild 1.2: Verformung eines Deponiesickerwasserrohres aus einer Kanalbefahrung

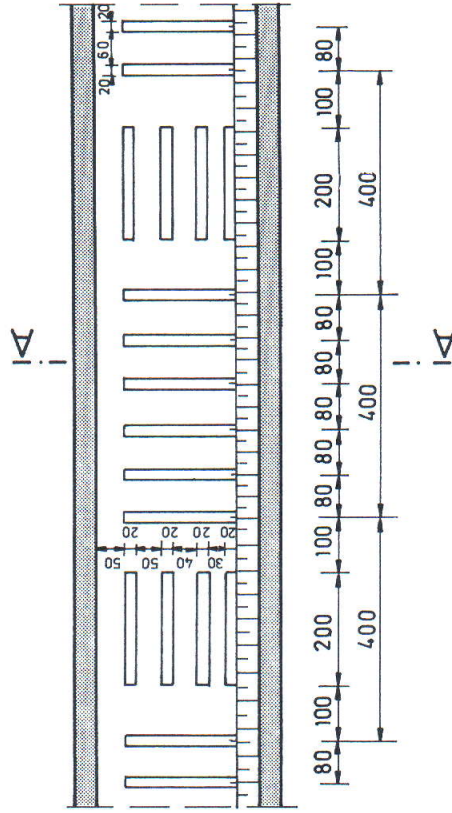
Neben den starken Verformungen der Sickerwasserrohre, werden bei Kanalbefahrungen häufig starke Verwindung der Rohre, nicht lagerechter Einbau der Sickerwasserleitungsöffnungen sowie Kolimation und Verstopfung der Öffnungen beobachtet, was aufwendige Sanierungsmaßnahmen erforderlich macht.

Bei den zunehmend zur Ausführung kommenden Basisabdichtungen in Asphaltbauweise, ist eine Regelausführung entsprechend Bild 1.1 kaum noch ausführbar.

Als eine Möglichkeit, diese Ausführungsprobleme mit runden Sickerleitungsrohren zu umgehen, wurde in einem vom Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg geförderten F+E-Projekt als Alternative der Einbau von rechteckigen bzw. quadratischen Sicker-

profilen untersucht, Kempfert et al. (1996). In Bild 1.3 ist eine mögliche konstruktive Ausbildung von rechteckförmigen Sickerprofilen mit der Anordnung der erforderlichen Eintrittsöffnungen dargestellt.

Sickerprofil aus PE-HD RECHTECKQUERSCHNITT



SCHNITT A-A

Schlitzbild (Beispiel) $l \times b = 200 \times 20$ mm
Festlegung im Einzelfall nach statischen
und deponiespezifischen Erfordernissen

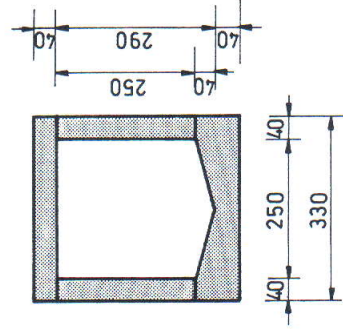


Bild 1.3: Mögliche Ausbildung eines rechteckförmigen Sickerprofils

Nachfolgend sind die wesentlichen Vorteile von rechteckförmigen Sickerprofilen im Vergleich zu kreisförmigen Sickerwasserprofilen zusammengestellt:

- a) Die Abtragung vertikaler Lasten über ein Rechteckprofil mit ebennem Auflager vermeidet die Notwendigkeit eines, nur mit sehr großem Aufwand korrekt herstellbaren, Auflagers in einem Winkel von 120°. Besondere Vorteile ergeben sich bei Ausbildung der Basisabdichtung in Asphaltbauweise, da rechteckförmige Sickerprofile direkt auf die Asphaltabdichtung aufgelegt werden können. Beim Einbau eines Rechteckprofils auf der konventionellen Kombinationsabdichtung entfällt die Verstärkung der mineralischen Abdichtung im Bereich der Sickerprofile, die zur korrekten Einbettung erforderlich ist. Eine evtl. statisch erforderliche Fußverbreiterung ist bei Rechteckprofilen voll integrierbar und bereitet keinen Arbeitsmehraufwand bei der Produktion oder dem Einbau der Profile.
- b) Die Ausbildung relativ breiter, rechteckiger Sickerwassereintrittsschlitze verringert die Gefahr der Brückenbildung in den Eintrittsöffnungen und damit die Verstopfung des Sickerwassersystems. Umgekehrt ist eine Freimachung des großen Eintrittsquerschnitts technisch sehr viel einfacher herbeizuführen als bei kleinen Öffnungen. Sanierungen werden durch die konstruktiv bessere Ausbildung der Schlitze seltener notwendig und, falls erforderlich, kostengünstiger.
- c) Für den Sanierungsfall bringt das Rechteckprofil den Vorteil, daß bei Neueinbringung eines Profils immer Lagerichtigkeit gegeben ist.
- d) Die Ausbildung des Gerinnes als Rechteckprofil verbessert die hydraulischen Eigenschaften, da bei gleichen Fließtiefen gegenüber dem Kreisquerschnitt ein schnellerer Anstieg der Fließgeschwindigkeit zu einer entsprechenden Vergrößerung der Schleppkraft führt, wodurch sich die Gefahr der Ablagerung von Feinteilen verringert.
- e) Übergänge zu den bestehenden Kreisprofilen sind problemlos möglich.
- f) Revisionschächte lassen sich modifizieren bis zur Reduktion auf einen elastischen Knoten.
- g) Das Transportvolumen und der Platzbedarf auf Zwischenlagern sind durch die Stapelbarkeit der Rechteckprofile ein weiterer Vorteil gegenüber Kreisprofilen.
- h) Revisionsgeräte lassen sich besser gestalten.

Das statische Tragverhalten von im Sickerkies eingebetteten, rechteckförmigen Querschnitten ist bekanntlich ungünstiger als bei den bisher üblichen Kreisprofilen. Dies resultiert im wesentlichen daraus, daß sich in den Eckpunkten der Rechteckquerschnitte Biegemomentenspitzen einstellen und gegenüber dem Kreisprofil der Querschnitt weniger gleichmäßig überdrückt ist.

Durchgeführte Voruntersuchungen haben erkennen lassen, daß bei optimaler Querschnittgestaltung Rechteckprofile aus statischer Sicht möglich sind, und die oben beschriebenen Vorteile dieser Profile in der Praxis genutzt werden können. Allerdings sind bei vergleichbaren Querschnittsabmessungen nur geringere Abfallüberschüttungshöhen im Vergleich zum Einbau von kreisförmigen Sickerprofilen möglich.

Gleichzeitig haben die Voruntersuchungen gezeigt, daß eine zuverlässige Beschreibung des Tragverhaltens von Deponiesickerwasserrohren aus PE-HD-Material auch als konventionelles Kreisprofil noch nicht abschließend möglich ist und erheblicher Klärungsbedarf vorliegt. Dies bezieht sich im wesentlichen auf folgende Punkte:

- a) Unschärfe der Berechnungsverfahren;
- b) Materialfragen zum Kurzzeit- und Langzeitverhalten des Kunststoffes;
- c) zulässige Spannungen;
- d) Temperaturfragen;
- e) Verbundverhalten zwischen Sickerschicht und Rohr.

Näheres siehe auch *Hoch et al. (1993)* sowie *Zanzinger et al. (1992)*.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die vergleichende experimentelle und rechnerische Untersuchung zum Tragverhalten von runden und rechteckförmigen Sickerprofilen in Deponien. Eine Anwendungsreife von Rechteckprofilen soll damit geprüft bzw. erreicht werden. Anhand von experimentellen und rechnerischen Untersuchungen soll festgelegt werden, in wieweit rechteckförmige Sickerprofile in statischer Hinsicht möglich sind und wie sich diese im Vergleich zu runden Sickerprofilen im Deponiekörper verhalten. Bei den rechnerischen Untersuchungen wurden numerische und analytische Verfahren verwendet.

2 Modellversuche

2.1 Versuchsaufbau und -programm

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von verschiedenen Sickerprofilen wurden in einem Versuchskasten großmaßstäbliche Modellversuche an Dränageleitungen für Deponien durchgeführt. Die Versuchskastenrandbedingungen wurden als ebener Verformungszustand konzipiert, wobei der Versuchskasten Abmessungen von $L \times B \times H = 1,82 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ aufwies, siehe Bild 2.1. Zur Einleitung einer gleichmäßigen Flächenlast in die Belastungskonstruktion wurde ein Doppel-T-Profil HEB 260 mit einer 10 mm starken Stahlplatte auf 380 mm verbreitert und ausgesteift.

Die Größe und Geometrie der Leitungszone wurde entsprechend *DIN 19 667* ausgebildet. Zum Einsatz kamen Sickerrohre mit einem Mindestquerschnitt von DN 250, die Überschlüttingshöhe des Sickerrohres mit Dränkies war größer als dessen 2-facher Außendurchmesser und die Schichtdicke der Dränanschicht außerhalb der Leitungszone betrug ca. 30 cm. Die in den Versuchen ausgebildeten Abmessungen der Leitungszone sind in Bild 2.1 dargestellt.

Das mineralische Basisabdichtungsmaterial bestand aus Geschiebemergel, der unmittelbar nach der Anlieferung eingebaut und manuell verdichtet wurde. Gemäß *DIN 19 667* kam für die Dränanschicht Dränkies der Fraktion 16/32 mm zum Einsatz. Als Abfallüberschüttung wurde locker gelagerter Sand verwendet.

Das Modell wurde vertikal mit einer gleichmäßigen Flächenlast von bis zu 416 kN/m^2 belastet, was, bei einer angenommenen Abfallwichte von 15 kN/m^3 , einer Abfallüberschüttung von ca. 27,5 m entspricht.

Den Untersuchungen sind 3 Versuchstypen (VT) zugrunde gelegt, die in Tabelle 2.1 dargestellt sind. Zur Bestimmung des E-Moduls für die eingesetzten Kunststoffprofile wurden Scheiteldruckversuche (VT 1), durchgeführt. Um das Langzeitverhalten der Rohre bei entsprechender Belastung und Temperatur zu untersuchen, konnten anhand von Probekörpern die entsprechenden Biege-E-Moduln nach *DIN 53 457* ermittelt und mit den Angaben der Hersteller verglichen werden. Ferner wurden 5 Kurzzeitversuche (VT 2) und ergänzend dazu 2 Langzeitversuche über einen Zeitraum von 7 Tagen (VT 3) an den runden und rechteckigen Sickerprofilen durchgeführt.

Versuchstyp 2 simuliert den in der Praxis üblichen Zustand von in Dränkies eingebetteten Sickerrohren mit Ausführung der Leitungszone gemäß *DIN 18 667*. Es wurden statische

Lasten bis zu 416 kN/m^2 über einen kurzen Zeitraum von ca. 3,5 Stunden aufgebracht und die Verformungen an den runden bzw. quadratischen Profilen gemessen.

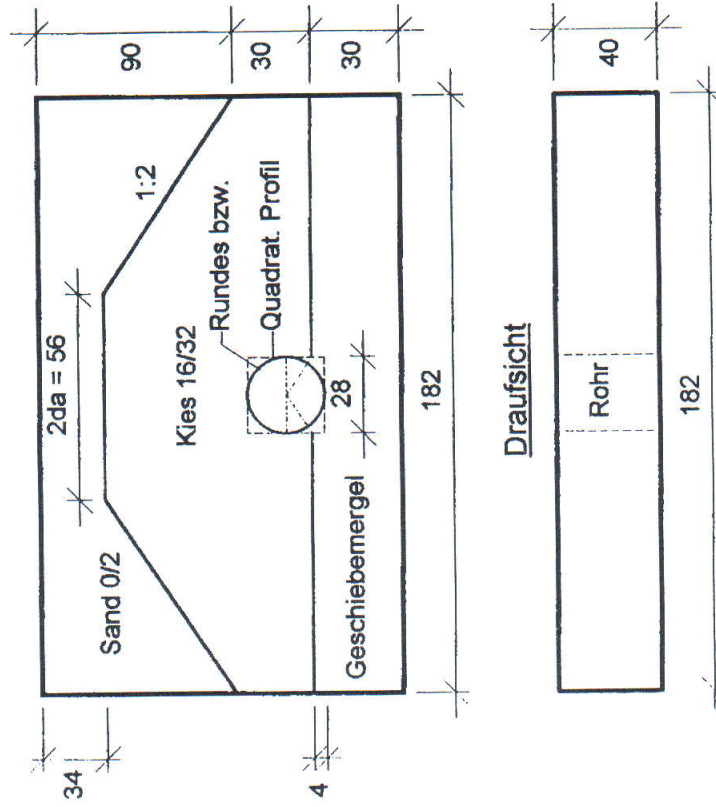


Bild 2.1: Aufbau und Abmessungen des Modellversuchskastens

Ergänzend zu den in VT 1 und VT 2 konzipierten Kurzzeitversuchen von 3,5 Stunden pro Versuch wurden in VT 3 an je einem runden und einem quadratischen Sickerprofil Belastungsversuche über einen Zeitraum von 7 Tagen durchgeführt, die das zeitabhängige Verformungsverhalten infolge Kriechen von PE-HD Sickerprofilen ansatzweise erfaßten.

Bei allen Versuchen wurden folgende Verformungsgrößen gemessen:

- vertikale Verschiebung der Rohrscheitelinnenfläche;
- vertikale Verschiebung der Rohrsohleninnenfläche;
- Verkürzung der vertikalen Rohrachse;

- d) Erweiterung der horizontalen Rohrachse;
- e) Setzung der Kopfplatte.

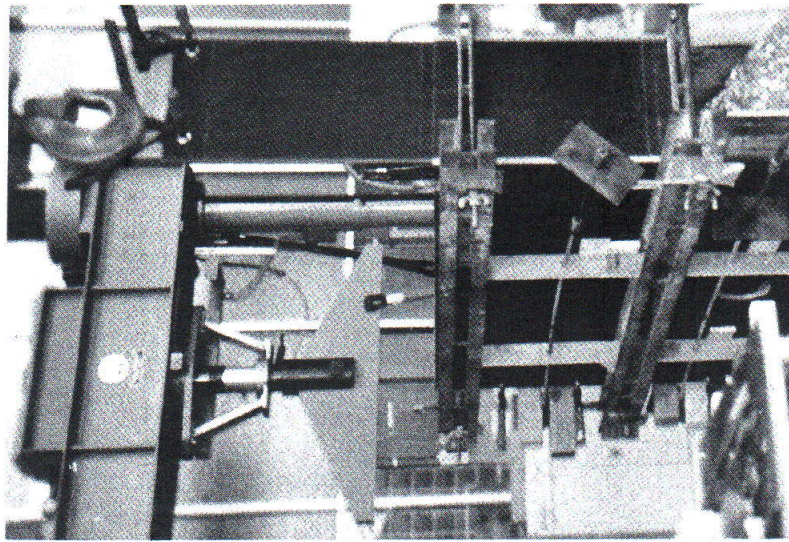


Bild 2.2: Versuchsaufbau mit Versuchskasten

Für die Scheiteldruck- u. Bruchlastversuche wurden Rohre- bzw. Profilstücke der Firma Sijmoma mit einer Länge von 110 bis 145 mm verwendet. Beim "Belastungsversuch Basissickerprofil" betrug die Profillänge 380 mm. Die geometrischen Daten sind nachfolgend in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.1: Versuchstypen und Bezeichnung der Einzelversuche

Versuchstypen	VT	runde Sickerprofile			quadratische Sickerprofile	
		Vollwandig	geloht	geschlitzt	vollwandig	geschlitzt
Scheitel- druckversuche	1	SRV 1	SRL 3	SRS 5	SQV 7	SQS 9
	1	SRV 2	SRL 4	SRS 6	SQV 8	SQS 10
Belastungsversuche Basissickerprofil (Kurzzeit)	2	SRV 11	SRL 12	SRS 13	SQV 14	SQS 15
Belastungsversuche Basissickerprofil (Langzeit)	3			SRS 16		SQSL 17

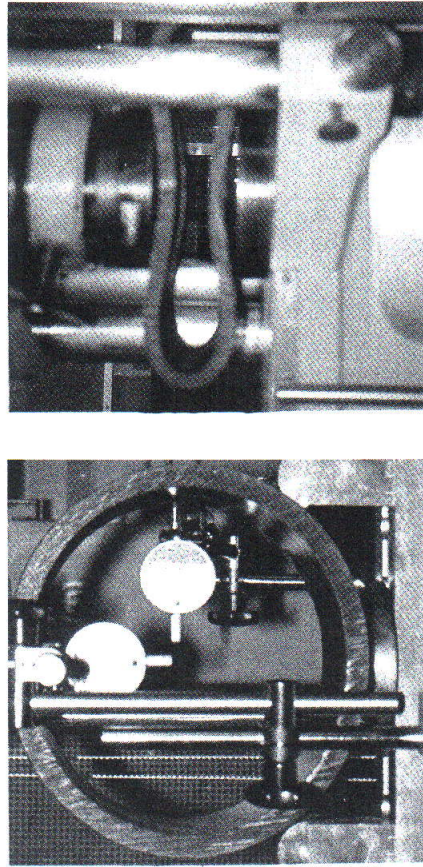
Tabelle 2.2: Geometrische und materialspezifische Varianten der Sickerrohre

Abkürzung	runde Sickerprofile			rechteckförmige Sickerprofile	
	SRV	SRL	SRS	SQV	SQS
Beschreibung	vollwandig	geloht	geschlitzt	vollwandig	geschlitzt
Werkstoff	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Außendurchmesser bzw. Seitenlänge d_s [mm]	280	280	280	280	280
Wandstärke s [mm]	15,9	15,9	15,9	20	20
Schlitzbreite w [mm]	-	Lochdurchmesser 15	12	-	12
Schlitzabstand b [mm]	-	Lochabstand 60	40	-	40
Druckstufe	PN 6	PN 6	PN 6	PN 6	PN 6

2.2 Scheiteldruckversuche

Zur Bestimmung von wirklichkeitsnahen Elastizitätsmoduln der unterschiedlichen Sickerprofile wurden als Vorversuche an jeder Rohrvariante (vollwandig, gelocht, geschlitzt) Scheiteldruckversuche durch mittige Belastung mit einer Linienlast im Rohrscheitel durchgeführt. Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit wurden von jeder Rohrvariante (SRV, SRL und SRS) 2 Probekörper (SRV1/SRV2, SRL3/SRL4 und SRS5/SRS6) unter gleichen Randbedingungen belastet.

Die Versuchsergebnisse ergaben erwartungsgemäß für das vollwandige Rohr die größte Steifigkeit bei den geringsten auftretenden Verformungen. Das geschlitzte Rohr wies bei geringster Steifigkeit die besten hydraulischen Eigenschaften auf und statisch betrachtet, lag das gelochte Rohr zwischen dem vollwandigen- und dem geschlitzten Rohr. Die Ergebnisse der Scheiteldruckversuche sind als vergleichende Darstellung in Abschnitt 3.2 aufgenommen. Bild 2.3 zeigt die Rohre bei Versuchsbeginn und bei Versuchsende.



a) unverformter Zustand

b) verformter Zustand

Bild 2.3: Scheiteldruckversuch am runden vollwandigen Sickerprofil

Analog zu den runden Sickerprofilen erfolgte die Ermittlung der vertikalen Achsverkürzung und der horizontalen Achsverlängerung der quadratischen Profile. Bei gleichem Außenmaß hatten die quadratischen Profile eine Wandstärke von 20 mm im Vergleich zu 15,9 mm der runden Profile.

Auffallend ist, daß Verformungen in der gleichen Größenordnung, bei den quadratischen Profilen erst bei deutlich höheren Lasten auftraten als bei den runden Profilen. Bspw. wurde eine vertikale Verkürzung der Rohrachse von 5,72 mm im quadratischen Vollwandprofil bei einer Last von 130 kN erreicht, wohingegen zur gleichen Verformung beim runden vollwandigen Querschnitt nur eine Last von 2,2 kN erforderlich war. Aus diesem Grund wurden bei den quadratischen Profilen die anfänglichen Belastungsschritte von 0,05 kN auf 2,0 kN erhöht.

2.3 Modellversuche an eingebetteten Sickerprofilen

An eingebetteten Profilen wurden Untersuchungen als Kurzzeit- und Langzeitversuche durchgeführt. In den Kurzzeitversuchen (Versuchsdauer = 1 Tag) wurde die Belastung in Schritten von jeweils 10 kN aufgebracht. Die grafische Darstellung der Ergebnisse enthalten die Bilder 3.3 bis 3.7, zusammen mit den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen. Nachfolgend sind die Ergebnisse zusammenfassend bewertet:

Verkürzung der vertikalen Rohrachse:

- Je höher der E-Modul, desto geringer sind erwartungsgemäß die Verkürzungen der vertikalen Rohrachse; d. h., vollwandige Sickerprofile weisen im Vergleich zu geschlitzten - bzw. gelochten Sickerprofilen geringere Verformungen auf. Dies gilt sowohl für die runden als auch für die quadratischen Sickerprofile.
- Die Verformungen der runden Sickerprofile sind bei gleicher Belastung größer, als die der quadratischen Sickerprofile.

Erweiterung der horizontalen Rohrachse:

- Je höher der E-Modul, desto größer ist die Aufweitung der horizontalen Profilhachse, was gleichermaßen für die runden und für die quadratischen Profile festzustellen ist.
- Die gemessene Aufweitung der horizontalen Profilhachse ist bei den Sickerrohren wesentlich größer als bei den quadratischen Sickerprofilen.
- Das quadratische Vollprofil erfährt eine stärkere Aufweitung der horizontalen Achse als das geschlitzte quadratische Profil, was sich durch die höhere Biegesteifigkeit der Ecken erklären läßt.

An je einem runden und einem quadratischen Sickerprofil wurden ergänzende Langzeitversuche über 7 Tage bei konstanter Belastung durchgeführt. Die Belastung wurde analog zu den

3 Vergleich der Modellversuche mit numerischen Berechnungen zum Tragverhalten von runden und rechteckförmigen Sickerprofilen

3.1 Rechenmodell und Programmsystem

Die in Abschnitt 2 beschriebenen Modellversuche dienen als Grundlage zur Untersuchung des Tragverhaltens von Sickerprofilen im Deponiebau. Umfangreiche Parameterstudien mit unterschiedlichen Eingangsgrößen sind experimentell sehr aufwendig und wurden rechnerisch vorgenommen. Dabei wurde die Finite-Elemente-Methode (FEM) und analytische Berechnungsansätze verwendet. Das numerische Rechenmodell (FEM) wurde an den Modellversuchsergebnissen kalibriert, womit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf praktische Ausführungsbedingungen weitgehend möglich ist.

Die untersuchten Sickerprofile bestehen aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), einem kriechnähigen Material, das unter verschiedenen Randbedingungen Retardations- und Entspannungshänomene zeigt. Die Lastabtragung wird folglich durch das zeit- und temperaturabhängige Spannungs-Dehnungs- und Festigkeitsverhalten von PE-HD beeinflusst. Zur Erfassung dieses Sachverhaltes wurden die zeitabhängigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen näherungsweise in die Berechnungen einbezogen. Dabei wurden für die Standsicherheitsnachweise vereinfacht die Grenzzustände mit den Kurz- und Langzeitmoduln E_k und E_L ohne Berücksichtigung des dazwischen liegenden Kriechvorgangs ermittelt, da hier nur der Anfangs- und Endzustand von Bedeutung waren. Die Einflüsse von Temperatur und Wassereintrittsöffnungen in den PE-HD Sickerprofilen wurden durch entsprechende Abminderungsfaktoren nach *ATV - M 127* pauschal einbezogen. Die Festigkeiten der PE-HD Sickerprofile, die als zulässige Grenzspannungen bezeichnet werden, wurden nach *ATV - M 127* in Kurz- und Langzeitwerte sowie in Biegezug- und Biegedruckwerte unterschieden.

Das i. a. nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Abfall und Boden wurde vereinfacht durch den linear elastisch-idealplastischen Stoffansatz, das Mohr-Coulombsches Bruchkriterium und das Zugbruchkriterium berücksichtigt. Als Programmsystem wurde in der vorliegenden Arbeit das Finite-Elemente-Programm *PLAXIS* verwendet.

3.2 Nachrechnungen der Scheiteldruckversuche

Der tatsächlich vorhandene Elastizitätsmodul der Sickerprofile wurde durch Rückrechnung der in den Scheiteldruckversuchen gemessenen Verschiebungen aus den nach der FEM be-

Kurzzeitversuchen aufgebracht. Die Ergebnisse sind in Bild 2.4 dargestellt. Während der Belastungsphase des runden Sickerprofils kam es durch einen Defekt der Presse zu einem Stillstand für ca. 21 Stunden. Dadurch konnte die Last nicht konstant gehalten werden, was den nicht kontinuierlichen Verlauf der vertikalen und horizontalen Verformungskurven für das runde Sickerprofil erklärt. Die Versuche am rechteckigen Sickerprofil zeigten größere Verformungen, sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung. Die Erweiterung der horizontalen Achse war beim quadratischen Profil ca. doppelt so groß wie beim runden Profil. Beim quadratischen Profil wurde die Verkürzung der vertikalen Achse mit dem ca. 10-fachen Betrag der Achsverkürzung des runden Profils bestimmt. Der Kriechvorgang selbst vertiefte bei beiden Profilen tendenziell gleich.

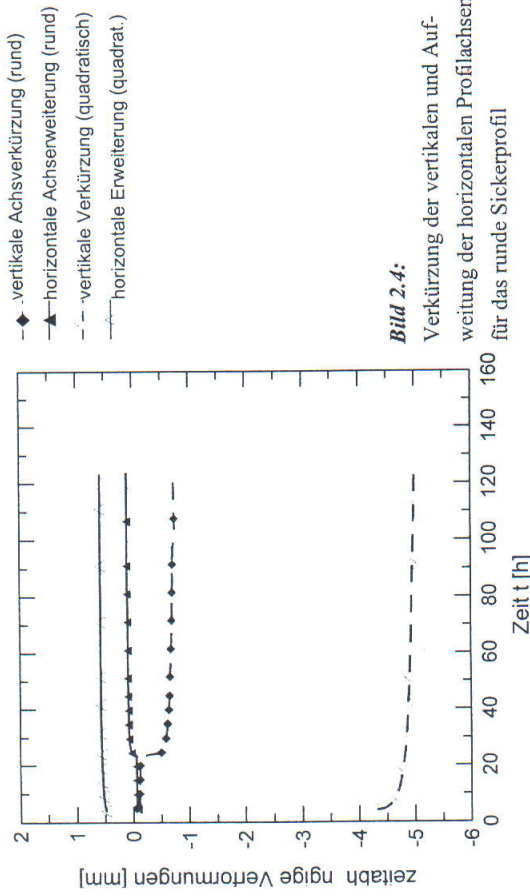
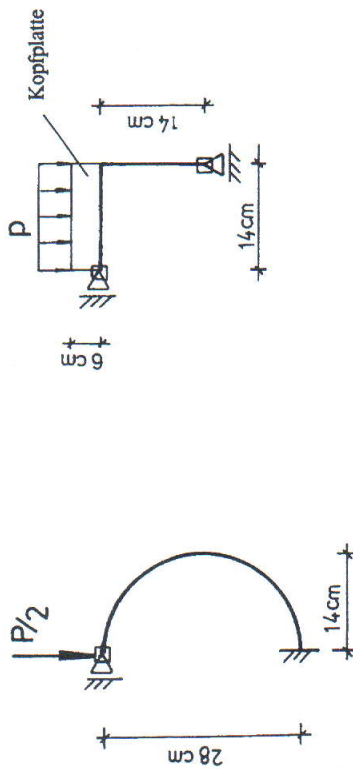


Bild 2.4: Verkürzung der vertikalen und Aufweitung der horizontalen Profilachsen für das runde Sickerprofil

rechneten Ergebnissen ermittelt. Dieser Wert entspricht dem Kurzzeitrechenwert nach *ATV - M 127*, da die Dauer der Scheiteldruckversuche nur ca. 3,5 Stunden betrug.

Wie in Abschn. 2.1 beschrieben, wurden die Lasten bei den Scheiteldruckversuchen an den PE-HD Sickerprofilen durch eine mittige Linienlast im Scheitel aufgebracht. Zur Nachrechnung wurden die Sickerprofile durch das FE-Rechenmodell mit Balken-Elementen nachgebildet, siehe Bild 3.1a. Aus Symmetriegründen wurde eine Hälfte des runden Sickerprofils mit den Randbedingungen unverschieblicher, nicht drehbarer Sohlpunkt und vertikal verschieblicher, horizontal unverschieblicher, nicht drehbarer Scheitelpunkt angenommen.



a) rundes Sickerprofil

b) quadratisches Sickerprofil

Bild 3.1: Rechenmodelle für die Scheiteldruckversuche

Bei den quadratischen Sickerprofilen erfolgte die Vorgehensweise analog zu den runden Sickerprofilen, allerdings ergaben sich zwei Symmetrieebenen, da die Lasten durch eine Kopfplatte auf die Oberseite des Sickerprofils aufgebracht wurden, siehe Bild 3.1b. Zum Aufbau des Rechenmodells war daher nur ein Viertel des Sickerprofils erforderlich.

In Tabelle 3.1 sind die Angaben über die betrachteten Rechenfälle zusammengestellt. Die angenommenen E-Moduln wurden aufgrund *ATV - M 127* abgeschätzt bzw. zurückgerechnet. Die Poissonzahl ν hat einen untergeordneten Einfluß auf die Berechnungsergebnisse und wurde deshalb in der Berechnung einheitlich mit einem Wert von 0,2 angenommen.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der Rechenfälle für Scheiteldruckversuche

Rechenfall	Versuch Nr.	Sickerprofil	Wanddicke s [mm]	Rechenmodell	E [MN/m ²]	ν [-]	E·A [kN/m]	E·I [kN·m ² /m]
S-1	SRV1/ SRV2	rund vollwandig	15,9	Kurzzeit	900	0,2	14310	0,30
S-2	SRL3/ SRL4	rund geloht	15,9	Kurzzeit	800	0,2	12720	0,27
S-3	SRS5/ SRS6	rund geschlitzt	15,9	Kurzzeit	750	0,2	11925	0,25
S-4	SQV7/ SQV8	quadratisch vollwandig	20,0	Kurzzeit	900	0,2	18000	0,60
S-5	SQS9/ SQS10	quadratisch geschlitzt	20,0	Kurzzeit	750	0,2	15000	0,50

Für die Scheiteldruckversuche an runden Sickerprofilen wurden drei Berechnungen, Fall S-1 bis S-3, zur Untersuchung von vollwandigen, gelohten und geschlitzten Wandungen, durchgeführt.

In Tabelle 3.2 sind die berechneten und gemessenen Vertikalstauchungen und Horizontaldehnungen der PE-HD Sickerprofile einander gegenübergestellt. Für die runden Sickerprofile wurde eine gute Übereinstimmung erzielt, was zeigt, daß die abgeschätzten E-Moduln in der Größenordnung der wirklichen Werte liegen.

Ausgehend von übereinstimmenden E-Moduln wurde die Nachrechnung für die quadratischen Sickerprofile durchgeführt, jeweils für volle und geschlitzte Wandungen (Rechenfall S-4 und S-5, siehe Tabelle 3.1). Im Vergleich zu den runden Sickerprofilen sind die Abweichungen der Rechenergebnisse von den Versuchsergebnissen für die quadratischen Sickerprofile deutlich größer, siehe Tabelle 3.2.

Während sich für die Vertikalstauchung größere Rechenwerte als Meßwerte ergaben, wurde für die Horizontaldehnungen ein umgekehrtes Ergebnis erzielt. Begründen läßt sich dieses Verhalten durch den inhomogenen Steifigkeitsbereich in den Ecken der quadratischen Sickerprofile, der durch Schweißen entsteht und den Grund für das mechanisch nichtlinierere Verhalten der quadratischen Sickerprofile unter Beanspruchung darstellt. Für runde Sickerprofile

treten diese Probleme nicht auf, da mit der Fertigungstechnik ein gleichmäßiges rundes PE-HD Sickerprofil ohne Schweißnaht möglich ist.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse und der Scheiteldruckversuchsergebnisse

Rechenfall	Versuch Nr.	max. Last [kN]	Sicker-Profil	vertikale Stauchung		horizontale Dehnung	
				FEM [mm]	Versuch [mm]	FEM [mm]	Versuch [mm]
S-1	SRV1/ SRV2	3,8	Rund vollwandig	11,6	11,3	10,5	8,8
S-2	SRL3/ SRL4	3,8	Rund gelocht	12,9	12,5	11,7	10,0
S-3	SRS5/ SRS6	3,4	Rund geschlitzt	12,3	12,1	11,2	10,0
S-4	SQV7/ SQV8	130	Quadratisch vollwandig	8,3	5,2	2,8	5,2
S-5	SQS9/ SQS10	115	Quadratisch geschlitzt	8,6	7,6	2,5	5,3

In Tabelle 3.3 sind die zur Nachrechnung verwendeten Elastizitätsmoduln den Rechenwerten nach ATV - M 127 für Kurzzeit bei einer Temperatur von 20°C gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, daß sich die beiden größenordnungsmäßig anpassen.

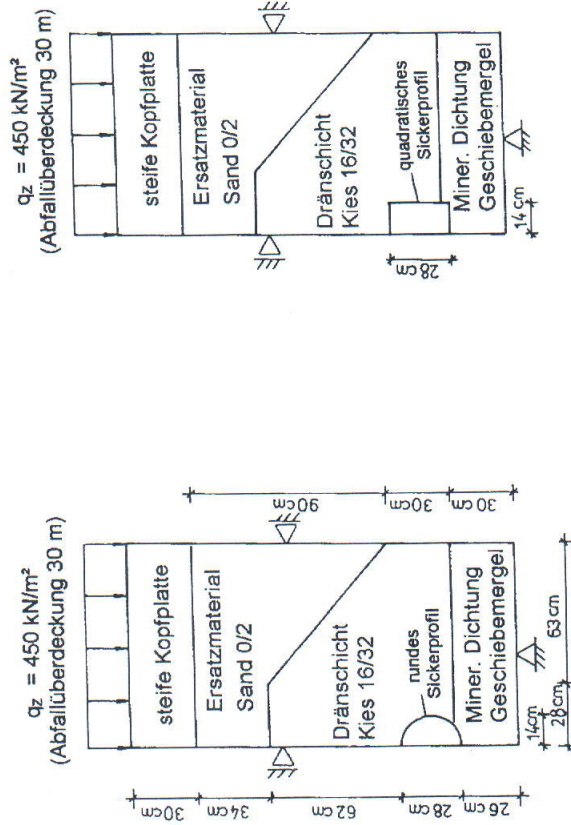
Tabelle 3.3: Gegenüberstellung der E-Moduln aus Nachrechnung der Scheiteldruckversuche und ATV- M 127

Sickerprofil	E_{kurz} [MN/m ²]	A_{E2} [-]	A_{E3} [-]	f_w [-]	E nach ATV- M 127 [MN/m ²]	E nach Nachrechnung [MN/m ²]
Vollwandig	1000	1,0	1,0	1,0	1000	900
gelochte Wandung	1000	1,0	1,0	0,9	900	800
geschlitzte Wandung	1000	1,0	1,0	0,7	700	750

3.3 Nachrechnungen der Modellversuche

3.3.1 Rechnerische Randbedingungen und Kenngrößen

Der starre Versuchskasten stellt in Rohrlängsrichtung einen ebenen Verformungszustand dar. Reibung zwischen den Innenwänden des Versuchskastens und dem Boden wurde durch Schmierung der Kastenwandung weitgehend ausgeschaltet. In Bild 3.2 sind zusammenfassend die Berechnungsausschnitte, die Randbedingungen, die Bodenschichten und die Lastannahmen des zweidimensionalen Rechenmodells abgebildet.



a) rundes Sickerprofil

b) quadratisches Sickerprofil

Bild 3.2: Berechnungsausschnitt, Randbedingungen, Bodenschichten und Lastannahme für die numerischen Berechnungen

Zur Diskretisierung der in Bild 3.2 dargestellten Berechnungsausschnitte wurden Dreieckselemente verwendet. Die Sickerprofile wurden durch Balkenelemente nachgebildet. Das Verhalten zwischen Dränschicht und Sickerprofil wurde durch das sogenannte „Interface element“ berücksichtigt.

Der Nachrechnung der Modellversuche wurden die in Abschnitt 3.2 ermittelten Werte der Elastizitätsmoduln für PE-HD Sickerprofile, siehe Tabelle 3.3 und 3.5, zugrunde gelegt. Eine Abmilderung der Werte zur Berücksichtigung von Temperatureinflüssen war nicht erforderlich, da die Modellversuche bei ca. 20°C durchgeführt wurden.

In den Modellversuchen wurden drei Bodenarten: Geschiebemergel (als Basisdichtung), Kies 16/32 (als Dränschicht) und Sand 0/2 locker gelagert (als Ersatzmaterial für Abfall) verwendet. Der i.a. spannungsabhängige E-Modul wurde für den hier verwendeten Stoffansatz vereinfacht bilinear gewählt, wobei der mittlere zu erwartende Spannungsbereich abgeschätzt wurde, Tabelle 3.4 zeigt die verwendeten Berechnungsparameter.

Tabelle 3.4: Bodenmechanische Berechnungsparameter

Bodenart	γ [kN/m ³]	E_s [kN/m ²]	E [kN/m ²]	ν [-]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	ψ [°]
min. Abdichtung	18,0	6000	2500	0,40	30,0	25,0	0,0
Kies 16/32	20,0	22000	16000	0,30	0,0	35,0	0,0
Sand 0/2	18,0	12000	7000	0,35	0,0	30,0	0,0

3.3.2 Rechenschritte und untersuchte Fälle

Entsprechend der Durchführung der Modellversuche waren für jeden Rechenfall zwei Berechnungsschritte vorgesehen. Im ersten Rechenschritt wurde der Spannungszustand des Versuchskörpers unter Beanspruchung durch Eigengewicht ermittelt. Die sich daraus ergebenden Verschiebungen wurden zu Null gesetzt, da der verformte Eigengewichtszustand als Basis für die im Modellversuch gemessenen Verschiebungen diente. Ausgehend von diesem Primärzustand, wurde im zweiten Rechenschritt die Belastung schrittweise bis 450 kN/m² gesteigert.

Es erfolgten insgesamt 6 Berechnungen zur Nachrechnung der Modellversuche und der vergleichenden, rechnerischen Untersuchung der runden und quadratischen Sickerprofile. Tabelle 3.5 gibt die Zuordnung der Rechenfälle zu den entsprechenden Modellversuchen und den angenommenen Kenngrößen für die PE-HD Sickerprofile an.

Tabelle 3.5: Zusammenstellung der Rechenfälle für Modellversuche

Rechenfall	Versuch Nr.	Sickerprofil	Wanddicke s [mm]	Abfallüberdeckung [m]	Versuchsdauer [h]	Rechenmodell	E [MN/m ²]	ν
M-1	SRV11	rund vollwandig	15,9	27,5	0,5	Kurzzeit	900	0,2
M-2	SRL12	rund gelocht	15,9	27,5	2,5	Kurzzeit	800	0,2
M-3	SRS13	rund geschlitzt	15,9	27,5	2,6	Kurzzeit	750	0,2
M-3a	-	rund geschlitzt	20,0	27,5	-	Kurzzeit	750	0,2
M-4	SQV14	quadratisch vollwandig	20,0	27,5	2,6	Kurzzeit	900	0,2
M-5	SQS15	quadratisch geschlitzt	20,0	27,5	2,6	Kurzzeit	750	0,2

3.3.3 Gegenüberstellung der Rechen- und Modellversuchsergebnisse

Rechenfall M-1 (SRV11)

Es ergaben sich deutlich größerer Verschiebungen im Versuch als aus den Berechnungsergebnissen, siehe Bild 3.3, da der Versuchskasten beim ersten Versuch, SRV11, infolge nicht ausreichender Steifigkeit ausgebaut ist. Dadurch bedingt konnte sich der ebene Verformungszustand nicht einstellen. Für die Folgeversuche wurde der Versuchskasten zusätzlich mit Ummantelungen verstärkt.

Rechenfall M-2 (SRL12)

In Bild 3.4 sind die Rechen- und Versuchsergebnisse des Modellversuches an einem gelochten Sickerprofil, SRL12, einander gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, daß sowohl die Meßergebnisse der First- und Sohlsetzungen sowie der horizontalen Profildehnung, als auch die Setzung der Kopfplatte mit den Werten aus dem Berechnungsmodell gut übereinstimmen.

Ergebnisse der Fe Berechnung

- Setzung der Kopfplatte
- - - Firstesetzung des Basisrohrrohrs
- - - Setzung der Basisrohrsohle
- - - Horizontale Dehnung des Basisrohrs

Modellversuchsergebnisse

- Firstesetzung des Basisrohrs
- Setzung der Basisrohrsohle
- + Horizontale Dehnung des Basisrohrs
- Setzung der Kopfplatte

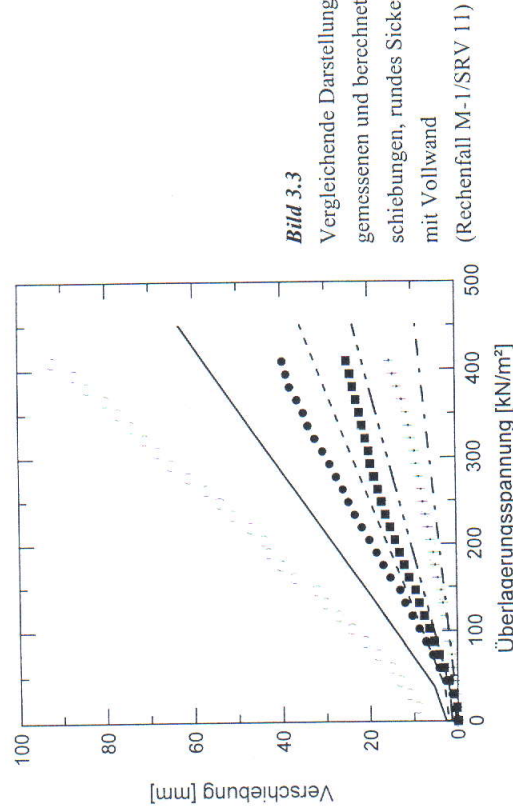


Bild 3.3
Vergleichende Darstellung der gemessenen und berechneten Verschiebungen, rundes Sickerprofil mit Vollwand
(Rechenfall M-1/SRV 11)

Rechenfall M-3 (SRS13)

In Bild 3.5 ist eine vergleichende Darstellung der Rechen- und Modellversuchsergebnisse für ein rundes, geschlitztes Sickerprofil, SRS13, wiedergegeben. Dabei konnte ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und gerechneten Verschiebungen für die Firstsetzung und die Setzung der Kopfplatte festgestellt werden, während Abweichungen der gemessenen Sohlsetzungen und Horizontaldehnungen von den gerechneten Werten auftraten.

Rechenfall M-4 (SQV14)

Im Rechenfall M-4 ist der Modellversuch SQV14, an einem vollwandigen, quadratischen Sickerprofil, untersucht. Wie in Bild 3.6 gezeigt ist, ergab sich gute Übereinstimmung zwischen rechnerischen und gemessenen Werten. Nur für die Firstsetzung treten Abweichungen auf.

Rechenfall M-5 (SQS15)

Für das quadratische, geschlitzte Sickerprofil konnte eine gleiche Tendenz wie im Rechenfall M-4 beobachtet werden, siehe Bild 3.7.

Ergebnisse der Fe Berechnung

- Setzung der Kopfplatte
- - - Firstesetzung des Basisrohrrohrs
- - - Setzung der Basisrohrsohle
- - - Horizontale Dehnung des Basisrohrs

Modellversuchsergebnisse

- Firstesetzung des Basisrohrs
- Setzung der Basisrohrsohle
- + Horizontale Dehnung des Basisrohrs
- Setzung der Kopfplatte

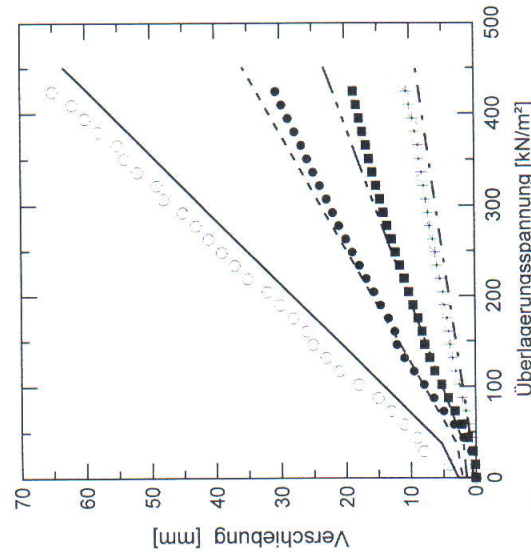


Bild 3.4:
Vergleichende Darstellung der gemessenen und berechneten Verschiebungen, rundes gelochtes Sickerprofil
(Rechenfall M-2/SRL12)

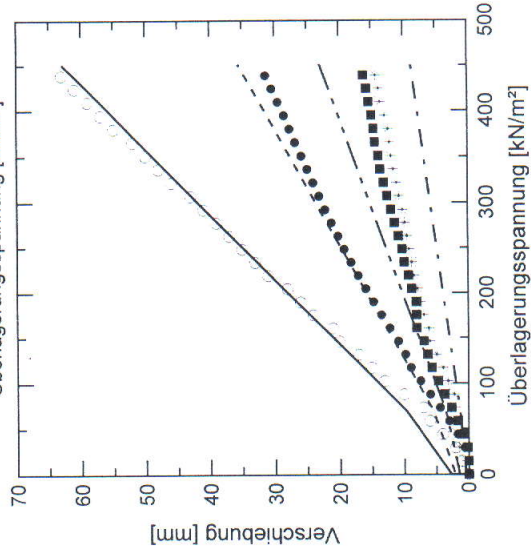


Bild 3.5:
Vergleichende Darstellung der gemessenen und berechneten Verschiebungen, rundes geschlitztes Sickerprofil
(Rechenfall M-3/SRS13)

3.3.4 Vergleich der Berechnungsergebnisse zwischen runden und quadratischen Sickerprofilen

Im folgenden wird das Tragverhalten des runden und des quadratischen Sickerprofils unter den im Modellversuch angenommenen Randbedingungen mit den Ergebnissen der FEM verglichen (Rechenfall M-3a und M-5). Exemplarisch sind die Berechnungsergebnisse bei einer Abfallüberdeckung von 30 m zusammengestellt.

Die gerechneten Spannungen und die Zonen der Festigkeitsüberschreitungen in den Bodenschichten sind vergleichend für das runde und das quadratische Sickerprofil in den Bildern 3.8 und 3.9 dargestellt. Erwartungsgemäß treten größere Spannungskonzentrationen und Zonen der Festigkeitsüberschreitungen beim quadratischen Sickerprofil auf. Auffällig ist die Zone der Festigkeitsüberschreitung in der Bodenschicht an der Vertikalwand, die aus der Abminderung der horizontalen Spannungen in diesem Bereich resultiert. Im Vergleich dazu ergibt sich beim runden Sickerprofil nur eine wesentlich geringere Horizontalspannungsverminderung, folglich keine Festigkeitsüberschreitungen in demselben Bereich.

Die Beanspruchung der Sickerprofile ist in den Bildern 3.10 und 3.11 vergleichend wiedergegeben. Erwartungsgemäß stellt sich beim runden Sickerprofil ein günstigeres Belastungsbild ein, wobei im Vergleich zum quadratischen Sickerprofil rechnerisch deutlich geringere Biegemomente (Maximalwert 0,36 kNm/m in der Sohle) und etwas höhere, aber gleichmäßigere Normalkräfte (Maximalwert 82 kN/m in der Ulme) ermittelt wurden. In Tabelle 3.6 sind die rechnerisch ermittelten Verschiebungen und maximalen Schnittgrößen der runden und quadratischen Sickerprofile zusammengestellt.

Tabelle 3.6: Zusammenstellung der Rechenergebnisse bis $q_z = 450 \text{ kN/m}^2$

Rechenfall	Sickerprofil	E [MN/m ²]	ν [-]	Wanddicke s [kN/m]	Firstsetzung [mm]	Sohlsetzung [mm]	horiz. Versch. [mm]	max. M [kN.m/m]	max. N [kN/m]
M-3a	rund	750	0,2	20,0	35,5	22,9	8,8	0,36	82
M-5	quadra.	750	0,2	20,0	39,9	13,8	0,8	1,94	70

Ergebnisse der Fe Berechnung

- Setzung der Kopfplatte
- - - Firstsetzung des Basisrohrrohrs
- · - Setzung der Basisrohrsohle
- - - Horizontale Dehnung des Basisrohrs

Modellversuchsergebnisse

- Firstsetzung des Basisrohrs
- Setzung der Basisrohrsohle
- Horizontale Dehnung des Basisrohrs
- Setzung der Kopfplatte

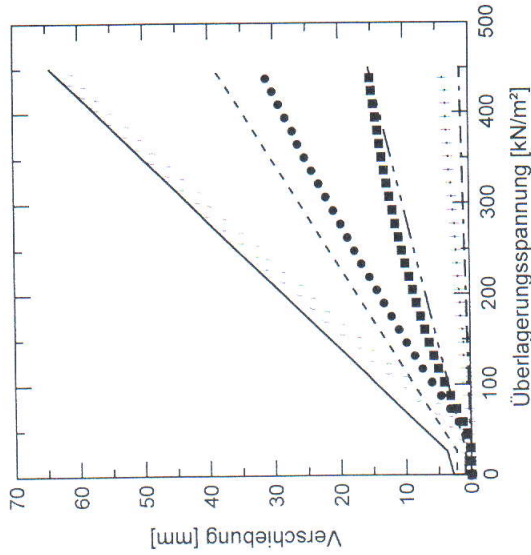


Bild 3.6: Vergleichende Darstellung der gemessenen und berechneten Verschiebungen, quadratisches Sickerprofil mit Vollwand (Rechenfall M-4/SQV14)

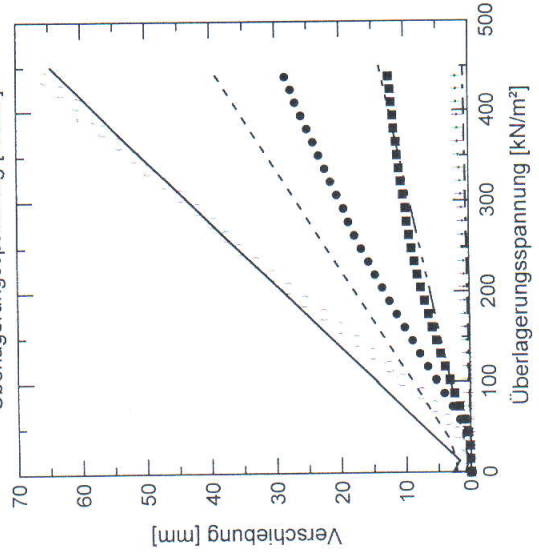


Bild 3.7: Vergleichende Darstellung der gemessenen und berechneten Verschiebungen, quadratisches geschlitztes Sickerprofil (Rechenfall M-5/SQS15)

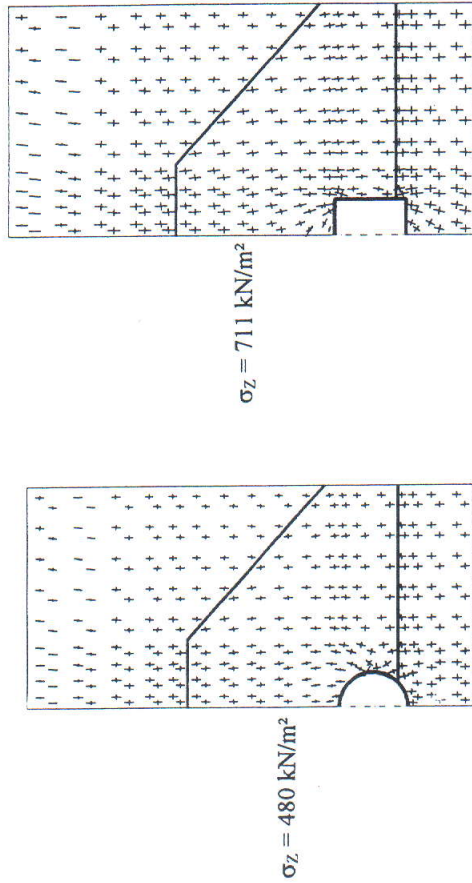
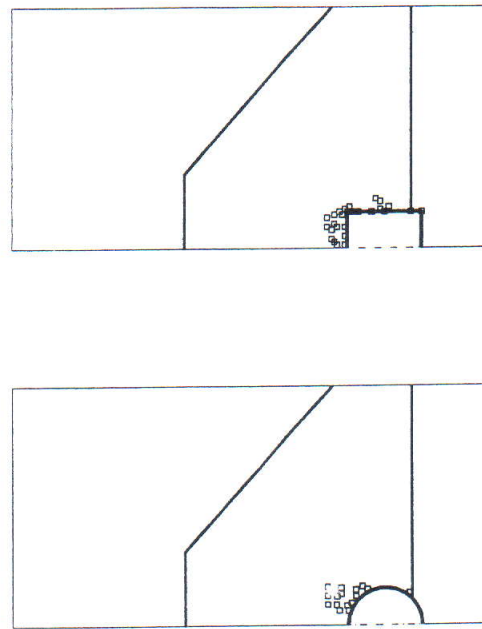


Bild 3.8: Vergleichende Darstellung der gerechneten Spannungen in den Böden, rundes und quadratisches Sickerprofil (geschlitzt), Rechenfall M-3a und M-5



□ Plastic Mohr-Coulomb point

Bild 3.9: Vergleichende Darstellung der Zonen der Festigkeitsüberschreitungen in den Böden, rundes und quadratisches Sickerprofil (geschlitzt), Rechenfall M-3a und M-5

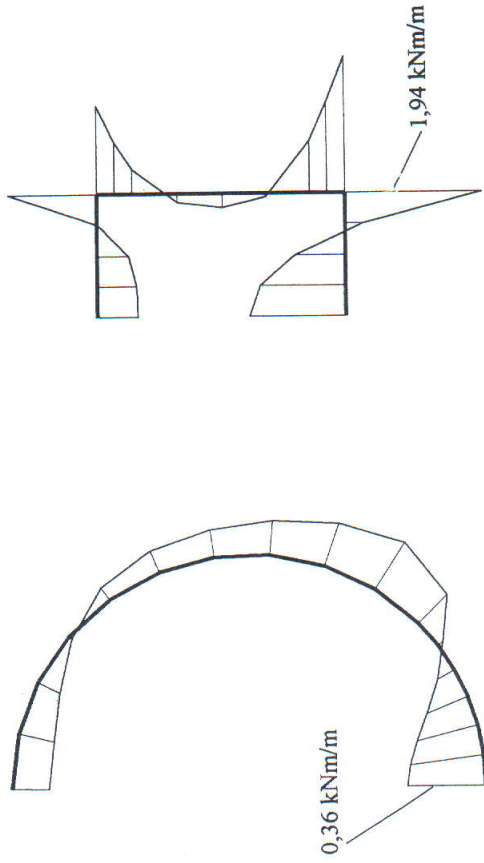


Bild 3.10: Vergleichende Darstellung der gerechneten Biegemomente des Sickerprofils, rundes und quadratisches Sickerprofil (geschlitzt), Rechenfall M-3a und M-5

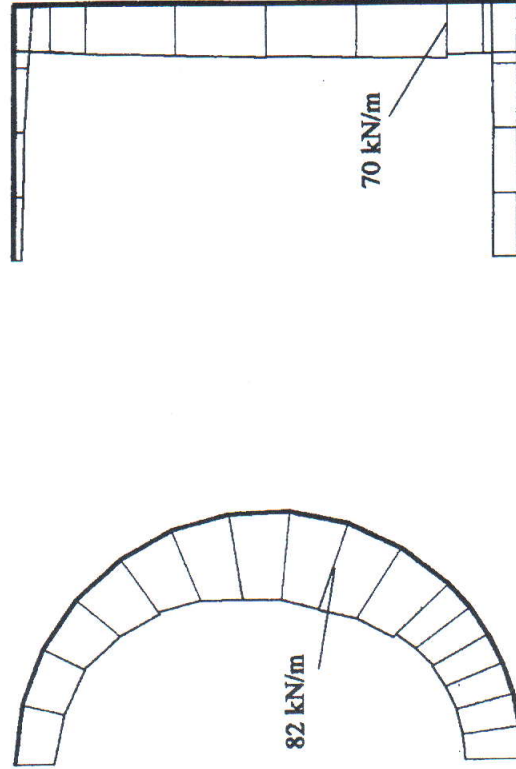


Bild 3.11: Vergleichende Darstellung der gerechneten Normalkräfte des Sickerprofils, rundes und quadratisches Sickerprofil (geschlitzt), Rechenfall M-3a und M-5

Die Ergebnisse der Nachrechnung und der vergleichenden rechnerischen Untersuchung zum Tragverhalten des runden und quadratischen Sickerprofils können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Sowohl für die runden als auch für die quadratischen Sickerprofile ergibt sich beim Vergleich der Rechenergebnisse mit den gemessenen Verschiebungen aus den Modellversuchen gute Übereinstimmung.
- Die vergleichenden rechnerischen Untersuchungen nach der FEM ergaben, daß unter den gleichen Randbedingungen wie im Modellversuch, das runde Sickerprofil erwartungsgemäß ein statisch günstigeres Tragverhalten im Vergleich zum quadratischen Profil aufweist, da das runde Sickerprofil maßgeblich durch gleichmäßigere Normalkräfte entlang der Wand beansprucht wird. Die sich dabei einstellende Biegebeanspruchung beim runden Sickerprofil ist deutlich kleiner als beim quadratischen Profil. Darüber hinaus herrscht beim runden Profil im seitlich stützenden Bodenbereich ein günstigerer Spannungszustand, da nur geringere Spannungskonzentrationen und Zonen der Festigkeitsüberschreitung im Boden auftreten als beim quadratischen Profil.

4 Vergleichende Berechnungen für praktische Ausführungen im Deponiebau

4.1 FEM - Berechnungen

4.1.1 Variante - Mineralische Basisabdichtung

Mit dem an den Modellversuchen kalibrierten Berechnungsmodell wurden Berechnungen für praktische Ausführungen von Sickerprofilen im Deponiebau vorgenommen. Der gewählte Berechnungsausschnitt ist in Bild 4.1 dargestellt, wobei die Auflagerung zunächst auf die mineralische Abdichtung erfolgte und der Kurzzeitzustand untersucht wurde. Der bei der Nachrechnung verwendete E-Modul für geschlitzte Sickerprofile ist $E = 750 \text{ MN/m}^2$.

Zur Nachbildung der Lastabtragung im Bereich der Sickerprofile wurde ein im Vergleich zum Modellversuch viel größerer Berechnungsausschnitt mit der Breite von 5 m und der Höhe von ca. 6 m gewählt. Mit diesem Berechnungsausschnitt konnte der Einfluß der Hauptspannungsdrehungen oberhalb der Böschung der Dränschicht infolge des wesentlich niedrigeren Verformungsmoduls von Abfall erfaßt werden.

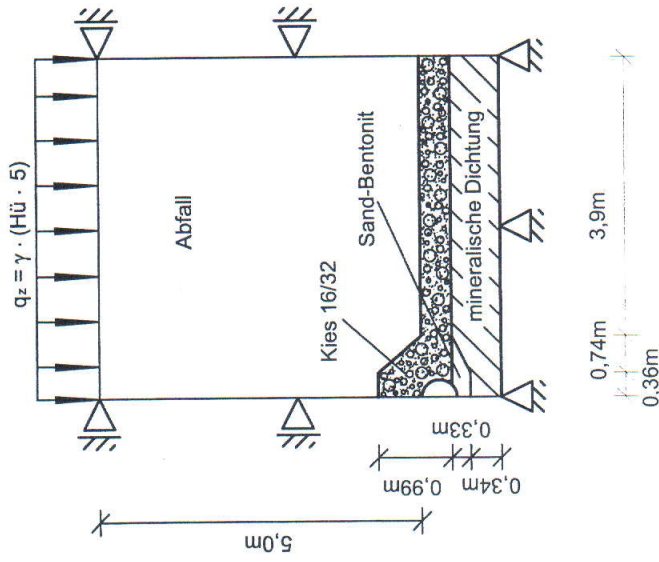


Bild 4.1:

Berechnungsausschnitt, Bodenschichten und Lastannahme zur Berechnung der Sickerprofile unter Ausführungsbedingungen

Die Abfalllast oberhalb des Berechnungsausschnitts wurde durch eine von der Abfallüberdeckung H_0 abhängige Flächenlast berücksichtigt. Die angenommenen Randbedingungen sind in Bild 4.1 dargestellt. Die gewählten bodenmechanischen Kenngrößen für Basisabdichtungsmaterialien, Dränschichten sowie Abfall sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Bodenmechanische Berechnungsgrößen

Bodenart	γ [kN/m ³]	E_s [kN/m ²]	E [kN/m ²]	ν [-]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	ψ [°]
Abfall	15,0	1000	470	0,4	5	27,5	0,0
min. Abdichtung	18,0	6000	2500	0,40	30,0	25,0	0,0
Kies 16/32	20,0	22000	16000	0,30	0,0	35,0	0,0
Sand-Bentonit	18,0	12000	7000	0,35	0,0	30,0	0,0

Bilder 4.2 und 4.3 stellen die berechneten Hauptspannungen in den Abfall- und Bodenschichten bei einer Abfallüberdeckung von 30 m dar. Sowohl bei den runden als auch bei den quadratischen Sickerprofilen tritt eine Drehung der Hauptspannungstrajektorie im Abfallkörper oberhalb der Böschung der Dränschicht auf, während die Berechnungsergebnisse der Modellversuche immer eine vertikale Spannungstrajektorie in diesem Bereich ergeben, vgl. Bild 3.8. Diese Drehung hat eine günstige Wirkung auf die Lastabtragung bei runden Sickerprofilen, da die rechnerisch ermittelte Biegebeanspruchung unter dieser Bedingung kleiner ist als die im Modellversuch (0,29 kNm/m zu 0,36 kNm/m, siehe Tabelle 4.2), und die maximale Normalkraft fast unverändert bleibt. Im Vergleich dazu muß die Vertikalwand des quadratischen Sickerprofils deutlich mehr Normalkraft aufnehmen als im Modellversuch, obgleich ein geringeres Biegemoment ermittelt wurde (94 kN/m zu 70 kN/m, siehe Tabelle 4.2).

Daraus ergibt sich, daß die Lastabtragung von Sickerprofilen unter praktischen Ausführungsbedingungen im Vergleich zu den Modellversuchen im Ergebnis noch günstigere Verhältnisse für das runde Sickerprofil ergibt. Im Gegensatz dazu wurden für quadratische Profile in den Modellversuchen deutlich kleinere Normalkräfte an der Vertikalwand bestimmt als sich unter praktischen Ausführungsbedingungen ergeben würden.

Tabelle 4.2: Gegenüberstellung der berechneten Schnittgrößen M und N
Modellversuche - praktische Ausführungsbedingung

Sickerprofil	Wanddicke [mm]	max. M Modellversuch [kNm/m]	max. M Ausführung [kNm/m]	max. N Modellversuch [kN/m]	max. N Ausführung [kN/m]
rund	15,9	0,36	0,29	82	80
quadratisch	20,0	1,94	1,69	70	94

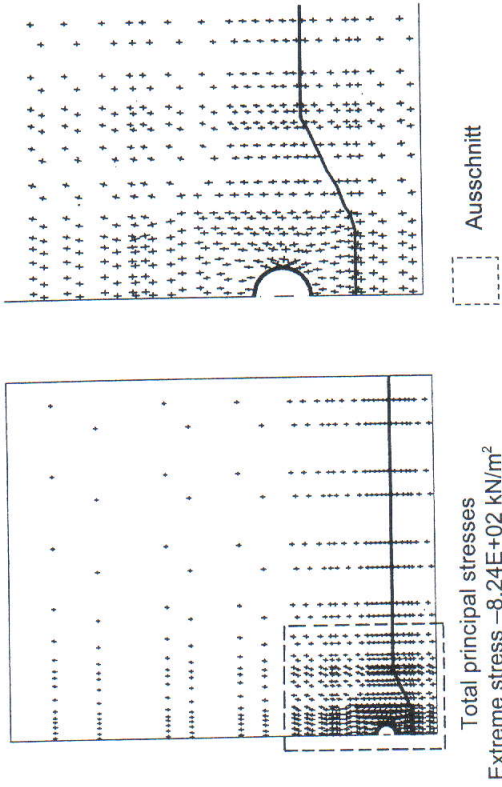


Bild 4.2: Hauptspannungen in den Boden- und Abfallschichten unter Ausführungsbedingungen mit mineralischer Dichtung und rundem Sickerprofil, $H_0 = 30$ m, (Kurzzeitverhalten)

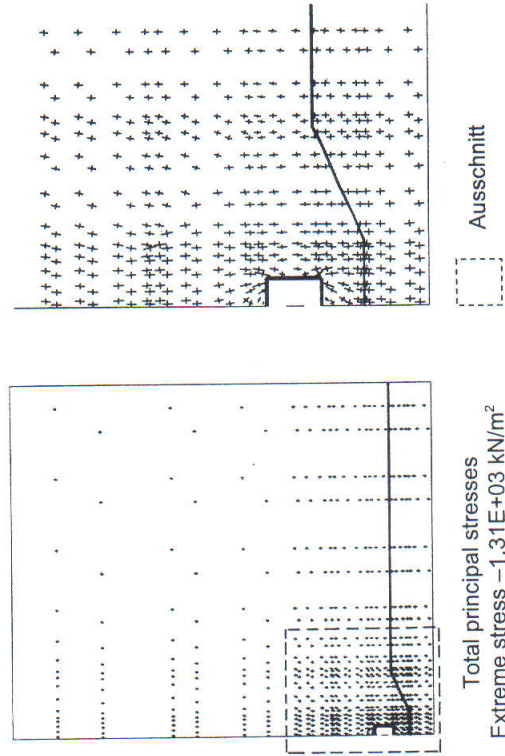


Bild 4.3: Hauptspannungen in den Boden- und Abfallschichten unter Ausführungsbedingungen mit mineralischer Dichtung und quadratischem Sickerprofil, $H_0 = 30$ m, (Kurzzeitverhalten)

4.1.2 Variante - Asphaltbasisabdichtung

In gleicher Vorgehensweise wie in Abschn. 4.1.1 wurde das Kurzzeitverhalten des runden und quadratischen Sickerprofils bei Auflagerung auf einer Asphaltbasisabdichtung numerisch untersucht. Die Berechnungsparameter sind in Tabelle 4.3 und die berechneten Ergebnisse vergleichend in Bild 4.4 wiedergegeben.

Wie bei der mineralischen Abdichtung treten bei der Asphaltabdichtung ähnliche Tendenzen bzgl. der plastischen Spannungsumlagerungen in den Böden sowie der zeitabhängigen Abminderung der Schnittgrößen im Sickerprofil auf. Während im Bereich des Kämpfers eine Lastumleitung vom Sickerprofil zur Asphaltabdichtung hin auftritt, wurde gleichzeitig eine große Spannungskonzentration in der Asphaltabdichtung beobachtet. Da die Asphaltabdichtung wesentlich steifer ist, als die mineralische Dichtung, dient sie hier als starrer Auflager für das Sickerprofil. Daraus ergibt sich eine beträchtliche Entlastung des Sickerprofils im Sohlbereich im Vergleich zur mineralischen Dichtung.

Tabelle 4.3: Bodenmechanische Kenngrößen für Berechnung mit Asphaltbasisabdichtung

Bodenart	γ [kN/m ³]	E_s [kN/m ²]	E [kN/m ²]	ν [-]	c' [kN/m ²]	φ' [°]	ψ [°]
Abfall	15,0	1000	470	0,4	5	27,5	0,0
Asphaltbeton	23,0	-	2000000	0,25	-	-	-
Kies 16/32	20,0	22000	16000	0,30	0,0	35,0	0,0
Sand-Bentonit	18,0	12000	7000	0,35	0,0	30,0	0,0

Werden die Spannungen in den Böden beim quadratischen und beim runden Profil verglichen, so ist eine höhere Spannungskonzentration unterhalb der vertikalen Wand beim quadratischen Profil zu erkennen, siehe Bild 4.4. Die kritischen Biegedruck- und Biegezugbeanspruchungen treten hier nicht im unteren Eckpunkt der vertikalen Wand auf, wie bei der mineralischen Dichtung, sondern im oberen Eckpunkt. Wie bei der mineralischen Dichtung ergibt sich eine deutlich höhere, aufnehmbare Abfallüberdeckung vom runden Profil gegenüber dem quadratischen Sickerprofil.

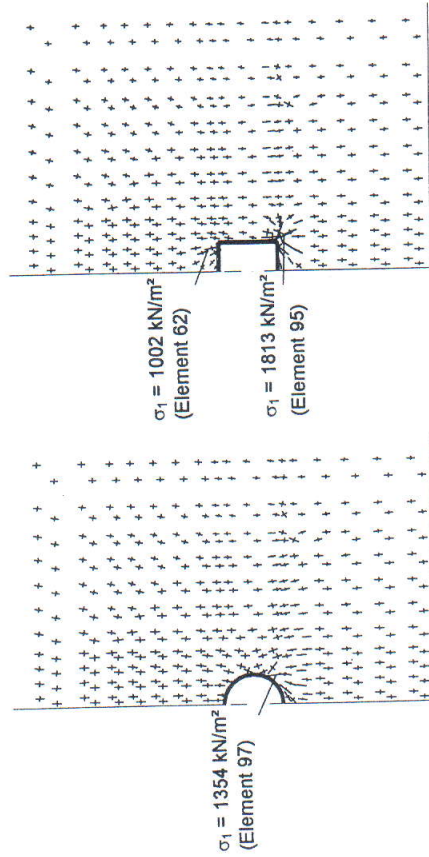


Bild 4.4: Vergleichende Darstellung der Hauptspannungen in den Boden- und Abfallschichten unter Ausführungsbedingungen bei Asphaltabdichtung,
 $H_0 = 30$ m (Kurzzeit)

Vergleicht man die Schnittgrößen im quadratischen Sickerprofil bei Auflagerung auf einer mineralischen Dichtung und einer Asphaltabdichtung, so kann festgestellt werden, daß gegenüber der Auflagerung auf der mineralischen Dichtung die Anwendung des quadratischen Sickerprofils bei der Asphaltabdichtung zu bevorzugten Ergebnissen ist. Es treten deutlich kleinere Schnittgrößen im Sickerprofil auf als bei der Auflagerung auf der mineralischen Dichtung.

4.2 Stabzugberechnungen

4.2.1 Berechnungsgrundlagen

Ausgehend von den in Abschn. 4.1 abgeleiteten Belastungsansätzen für quadratische Sickerprofile in Abhängigkeit der Abfallüberdeckungshöhe H_0 wurden die Beanspruchungen anhand eines ebenen Stabwerksystems, das die Schnittgrößen in einem Stabwerk auf der Grundlage der linearen Elastizitätstheorie bestimmt, berechnet. Durch Variation der Querschnittswerte wurden Anwendbarkeit und Anwendungsgrenzen von quadratischen und runden Sickerprofilen im Deponiebau auf der Basis von aufnehmbaren Grenzspannungen inf. Biegung und Normalkraft vergleichend untersucht.

Zur Festlegung der zulässigen Spannungen für Sickerprofile aus PE-HD wird auf *Zanzinger, et al. (1992)* verwiesen und die zulässigen Spannungen im Sickerprofil aus Biegedruck bzw. Biegezug getrennt für Kurz- und Langzeitbeanspruchung ermittelt. Grundlage war die Streckspannung von 21 N/mm^2 bei 20°C für PE-HD, *DIN 53 455*. Durch die Völligkeit der Biege-spannungsverteilung, hervorgerufen durch das nichtlineare Spannungs-Dehnungsverhalten des PE-HD-Werkstoffes, kommt die Erhöhung der Streckspannung um 15 % in Ansatz gebracht werden und die „Kurzzeit“-Grenzspannung nahm folgenden Wert an:

$$\text{grenz } \sigma_k = 21 \cdot 1,15 = 24,2 \text{ N/mm}^2$$

Zur Bestimmung der „Langzeit“-Grenzspannung wurde die Entfestigung durch Einfluß von:

- Standzeit (Abminderungsfaktor A_{e1});
- Modien (Abminderungsfaktor A_{e2}) und
- Temperatur (Abminderungsfaktor A_{e3}) nach der Beziehung

$$\text{grenz } \sigma_L = \text{grenz } \sigma_k / (A_{e1} \cdot A_{e2} \cdot A_{e3})$$

berücksichtigt. Für den Medieneinfluß wurde ein Faktor $A_{e2} = 1,1$ angenommen. Die Abminderungsfaktoren A_{e1} und A_{e3} können aus entsprechenden Zeitstandversuchen in Abhängigkeit von den Temperaturbedingungen ermittelt werden, da hier jedoch keine materialspezifischen Untersuchungen vorlagen, wurden die Kurvenscharen der Zeitstanddruckversuche nach *DIN 8075* für PE-HD-Werkstoffe zu Grunde gelegt. Die Bestimmung der Abminderungsfaktoren A_{e1} und A_{e3} ist in der Bild 4.5 gezeigt.

Der Abminderungsfaktor aus Temperatur- und Zeiteinfluß ergab sich aus dem Verhältniswert der Vergleichsspannung bei 20°C und einer Standzeit von 1 h zur Vergleichsspannung bei einer Dauertemperatur von 40°C von 50 Jahren zu:

$$A_{e1,3} = 12,0 / 3,6 = 3,3$$

Die „Langzeit“-Grenzspannung betrug damit

$$\text{grenz } \sigma_L = 24,2 / (1,1 \cdot 3,3) = 6,6 \text{ N/mm}^2$$

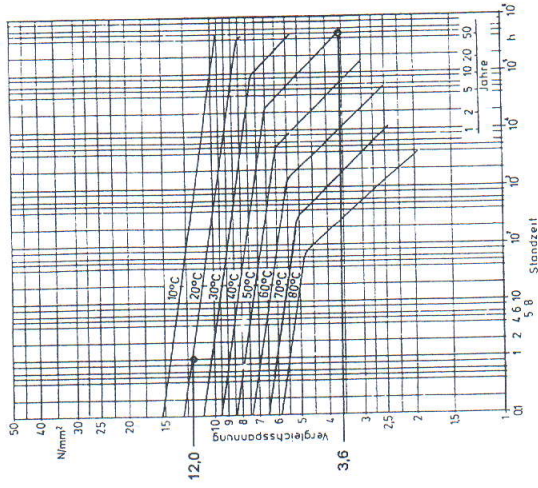


Bild 4.5:

Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polyethylen hoher Dichte nach *DIN 8075*

In Anlehnung an die *ATV - A127* wurden die zulässigen Spannungen für Biegedruck und Biegezug unter Einbeziehung eines einheitlichen Sicherheitsbeiwertes $\gamma = 2,5$ bestimmt:

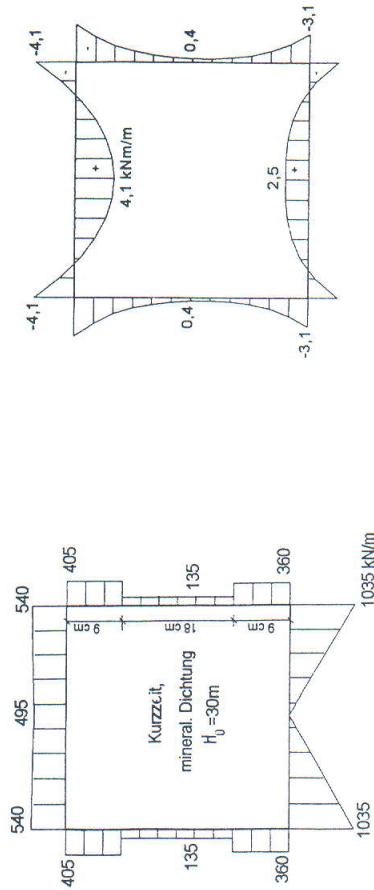
$$\text{zul. } \sigma_k = \text{grenz } \sigma_k / \gamma = 24,2 / 2,5 = 9,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{zul. } \sigma_L = \text{grenz } \sigma_L / \gamma = 6,6 / 2,5 = 2,6 \text{ N/mm}^2$$

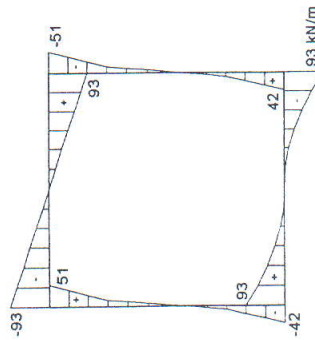
4.2.2 Variante - Mineralische Basisabdichtung

4.2.2.1 Vergleichende Untersuchung

Zum Vergleich mit den Ergebnissen aus der FEM-Berechnung wurden die mit der ebenen Stabstatik berechneten Schnittgrößen für eine Abfallüberdeckungshöhe von $H_U = 30 \text{ m}$ dargestellt. Zugrunde gelegt wurde das System mit einem quadratischen Profil im Kurzzeitzustand, dessen Wandstärke konstant mit $32,3 \text{ mm}$ bei einer Steifigkeit von $E_{e,k} = 700 \text{ MN/m}^2$ angenommen wurde. Bild 4.6 zeigt das idealisierte Belastungsbild und die berechneten Schnittgrößen.



Belastungsbild



Querkraftverlauf

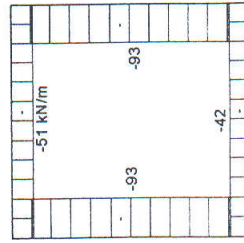


Bild 4.6: Berechnungsergebnisse mit der Stabzugmethode

In Tabelle 4.4 ist eine Gegenüberstellung der berechneten Schnittgrößen aus der Stabzugmethode und der FEM enthalten, wobei nur die maximalen Spannungen aus Biegemomenten und Normalkräften von Bedeutung waren.

Tabelle 4.4: Vergleich der max. Schnittgrößen aus der Stabzugmethode und der FEM

Schnittgrößen	Berechnungsergebnisse aus	
	Stabzugmethode	FEM
max. Biegemoment [kNm/m]	4,1	3,6
max. Normalkraft [kN/m]	93	110

Aus Tabelle 4.4 geht hervor, daß sich aus der Stabzugmethode größere Biegemomente und kleinere Normalkräfte ergaben als nach der FEM und die Abweichungen bei ca. ± 15 % liegen.

4.2.2.2 Möglichkeiten der Querschnittsoptimierung bei quadratischen Sickerprofilen

Die Spannungen im Sickerprofil ergeben sich aus der Formel

$$\sigma_{Bz,D} = \frac{M}{W} \pm \frac{N}{A}$$

Die größten Biegemomente traten grundsätzlich in den Ecken der quadratischen Sickerprofile auf und können durch eine Querschnittsverstärkung in diesem Bereich (Vouten) reduziert werden. Im folgenden wurde der Einfluß von verstärkten Ecken im quadratischen Sickerprofil auf das Tragverhalten untersucht.

Exemplarisch wurde ein quadratisches Sickerprofil mit einer Kantenlänge von 360 mm betrachtet. Die Wandstärke ist mit 30 mm angenommen, wobei im Bereich der Querschnittsecken lokal die Materialdicke schrittweise von 30 auf 60 mm erhöht wurde. Für verschiedene Abfallüberschüttungshöhen wurden jeweils die Schnittgrößen und die daraus resultierenden maximalen Biegespannungen berechnet und getrennt für die Kurzzeit- und Langzeitbelastung in den Bildern 5.3 und 5.4 grafisch dargestellt.

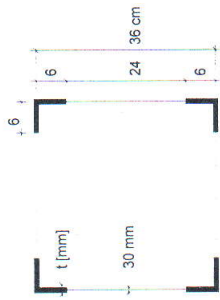
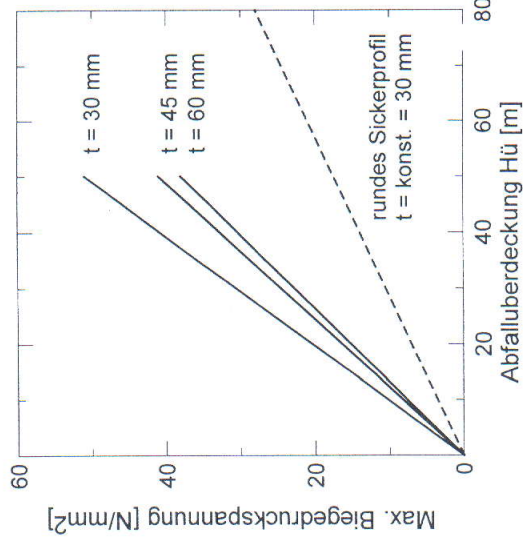


Bild 4.7:
Maximale Biegespannung bei verschiedenen Querschnittstypen für Sickerprofile, Kurzzeitbelastung, mineralische Dichtung

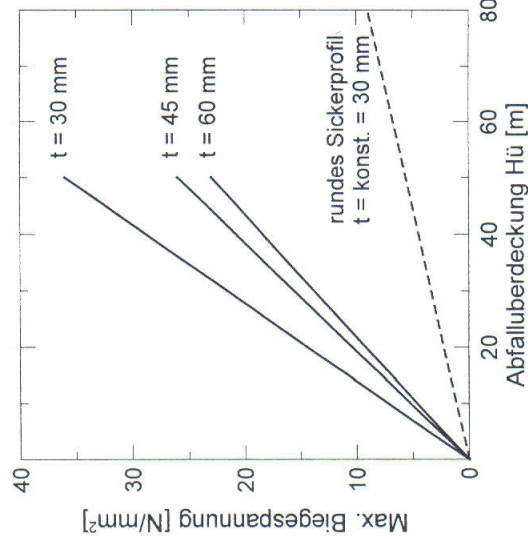


Bild 4.8:
Maximale Biegespannung bei verschiedenen Querschnittstypen für Sickerprofile, Langzeitbelastung, mineralische Dichtung

Vergleichsweise wurden die Beanspruchungen eines runden Profils (Durchmesser 360 mm) in den Bildern 4.7 und 4.8 mit angegeben, aus denen hervor geht, daß durch eine Querschnittsverstärkung im Eckbereich der quadratischen Profile die maximalen Spannungen zwar verringert werden, jedoch stets über den Maximalspannungen eines runden Sickerprofils liegen. Bei einer Verstärkung $t = 45$ mm treten die maximalen Spannungen für Kurz- und Langzeitbelastung in der Mitte der oberen Querschnittswand auf, wobei das Material im Eckbereich nur noch gering beansprucht wird. Die in den Bildern 4.7 und 4.8 gezeigte Abnahme der maximalen Spannungen bei $t > 45$ mm resultiert aus der Zunahme des Biegemoments an den steifen Querschnittsecken, was mit einer entsprechenden Entlastung der unverstärkten Querschnittswände verbunden ist. Eine weitere Verstärkung der Ecken hat auf die maximalen Biegespannungen im Feld keinen nennenswerten Einfluß mehr, so daß die Grenzen einer wirtschaftlichen Querschnittsoptimierung bei $t = 60$ mm erreicht sind. Verallgemeinert läßt sich daraus ableiten, daß in einem quadratischen Sickerprofil auf mineralischer Dichtung durch die Anordnung von Vouten die maximalen Biegespannungen in der horizontal liegenden oberen Querschnittswand (Profildicke) maßgebend werden.

4.2.3 Variante - Asphaltbasisabdichtung

Entsprechende Untersuchungen wurden für ein quadratisches Sickerprofil mit einer Asphaltbasisabdichtung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4.9 und 4.10 dargestellt. Im Vergleich zu einer mineralischen Abdichtung führt die Asphaltabdichtung zu einer steiferen Bettung des Sickerprofils, was mit einer ungleichmäßigeren Verteilung der Beanspruchungen verbunden ist. Wie aus den Ergebnissen der FE-Berechnung und den daraus abgeleiteten idealisierten Belastungsbildern hervorgeht, konzentrieren sich die anzunehmenden Lasten auf das Sickerprofil im Eckbereich, während insbesondere die horizontalen Querschnittswände entlastet werden. Da dieses Belastungsbild zu größeren Eckmomenten führt, wirkt sich eine Querschnittsverstärkung in diesem Bereich etwas günstiger aus, als bei einem Sickerprofil mit mineralischer Dichtung. Die maximalen Biegespannungen treten bei einer Eckverstärkung von $t = 45$ mm noch in den Querschnittsecken auf; erst eine weitere Verstärkung ($t = 60$ mm) führt zu größeren und damit maßgebenden Spannungen außerhalb des verstärkten Eckbereichs. Obwohl die Möglichkeiten einer Querschnittsoptimierung bei der Asphaltabdichtung etwas günstiger bewertet werden können, führt ein quadratisches Sickerprofil auch in diesem Fall zu einer gleichmäßigeren Materialausnutzung und daher zu geringeren zulässigen Abfallüberdeckungen als ein rundes Profil.

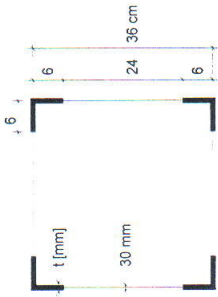
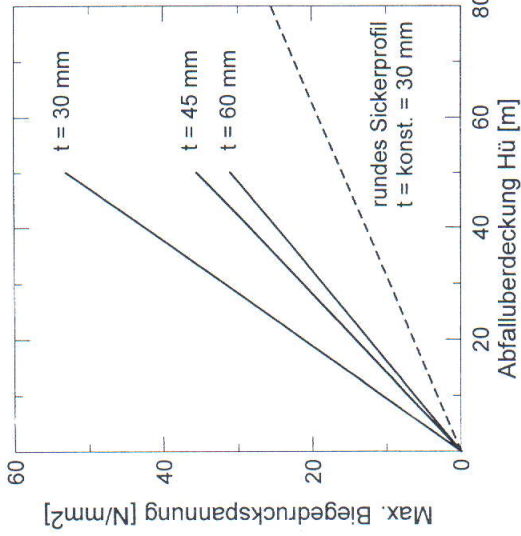


Bild 4.9:
Maximale Druckspannung bei verschiedenen Querschnittstypen für Sickerprofile, Kurzzeitbelastung, Asphaltabdichtung

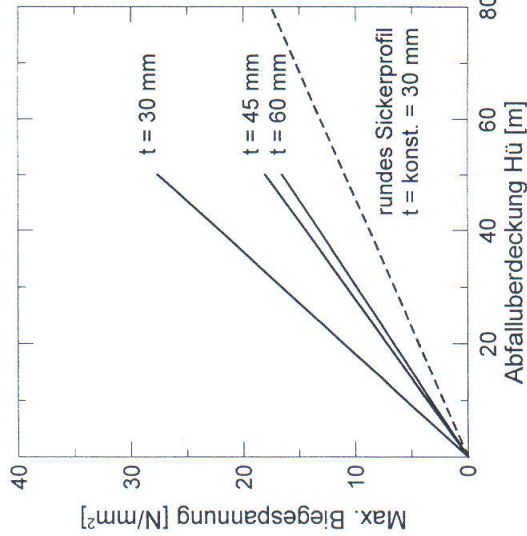


Bild 4.10:
Maximale. Druckspannung bei verschiedenen Querschnittstypen für Sickerprofile, Langzeitbelastung, Asphaltabdichtung

Die mögliche Abfallüberdeckungshöhe eines quadratischen Sickerprofils mit verstärkten Querschnittsecken ist in Bild 4.11 gezeigt. Für verschiedene quadratische Profile wurde die Überdeckungshöhe schrittweise erhöht, bis an einer Stelle im Querschnitt die Grenzspannung erreicht wurde. Es sei darauf hingewiesen, dass in der so ermittelten maximalen Überdeckungshöhe zunächst kein Sicherheitsbeiwert enthalten ist, da dieser sich noch in der Diskussion befindet. Entsprechende Kurven ließen sich finden, wenn anstatt der Grenzspannung die zul. Biegespannung zugrunde gelegt wird. Das würde zu einer Reduzierung der Höhen in Bild 4.11 um den Faktor 2,5 führen. Neben der Querschnittsdicke t im Eckbereich wird das Maß „a“ aus Bild 4.11 variiert.

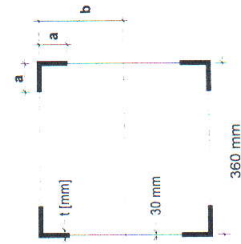
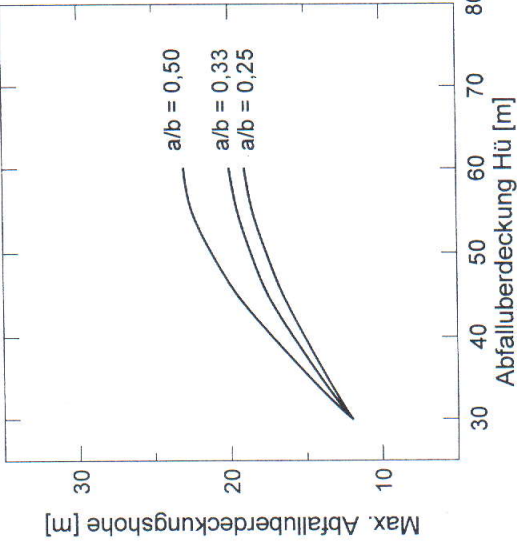


Bild 4.11:
Maximale Abfallüberdeckungshöhe für verschiedene quadratische Sickerprofile Asphaltabdichtung, Langzeitbeanspruchung

Aus Bild 4.11 geht weiterhin hervor, daß die max. Überdeckungshöhe eines quadratischen Profils im vorliegenden Fall durch die geeignete Ausbildung von lokalen Querschnittsverstärkungen etwa verdoppelt werden kann. Ohne Verstärkung ergibt sich eine max. Überdeckungshöhe von 12 m, bei einer Verstärkung auf $t = 60$ mm und $a/b = 0,5$ ergibt sich eine Überdeckungshöhe von 22 m. Ungeachtet dessen verhält sich ein quadratisches Sickerprofil im Vergleich zu einem runden Querschnitt aus statischer Sicht ungünstiger. Bei einem runden Sickerprofil mit einem Durchmesser von 360 mm und einer Wandstärke von 30 mm aus demselben Material wäre eine max. Überdeckungshöhe von 66 m, also die dreifache Höhe, möglich. Diese Angaben beziehen sich, wie ausgeführt, auf eine Überschnittungshöhe ohne Sicherheitsbeiwert.

5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Auf der Grundlage von Erfahrungen bei der Überwachung von Deponiemaßnahmen wurde festgestellt, daß sich die planmäßige Ausführung von Entwässerungen mit PE-HD Rohren teilweise als problematisch erweist. Dies findet insbesondere darin seine Begründung, daß oftmals die in den Deponierichtlinien geforderten Einbaubedingungen der runden Sickerprofile nicht in der geforderten Weise in die Praxis umgesetzt werden und die Auflagerung der runden Sickerprofile, besonders bei Asphaltabdichtungen, Schwierigkeiten bereitet bzw. mit Zusatzmaßnahmen verbunden ist. Die Herstellung eines definierten Rohrauflegers von 120° unter der Rohrsohle ist mit erheblichen ausführungstechnischen Schwierigkeiten verbunden und gelingt in der Praxis häufig nicht, siehe hierzu auch *Hoch et al. (1993)*.

In der vorliegenden Arbeit wurden Lösungsvarianten mit rechteckförmigen Sickerprofilen für den Deponiebau untersucht. Dabei wurde als erste Untersuchungsstufe der Vergleich im statischen Tragverhalten zwischen einem herkömmlichen runden und einem möglichen neu zu entwickelnden, rechteckförmigen Profil für Deponiesickerleitungen aus PE-HD durchgeführt.

Als Grundlage für vergleichende numerische Berechnungen wurden Modellversuche im Maßstab 1:1 an runden und an quadratischen, vollwandigen und geschlitzten Sickerprofilen ausgeführt. Zur Bestimmung der Materialparameter wurden zunächst Scheiteldruckversuche gefahren, gefolgt von Versuchen an eingebetteten Sickerprofilen. Es wurden das Kurzzeitverhalten mit einer Versuchsdauer von 1 Tag getestet und ergänzend dazu an je einem runden und einem quadratischen Profil das Langzeitverhalten über eine Versuchsdauer von 7 Tagen.

Anhand der Versuchsergebnisse wurden numerische Rechenmodelle nach der FEM kalibriert und eine rechnerische Übertragung der Fragestellung auf Verhältnisse in einer Deponie vorgenommen. Auflagerbedingungen waren dabei die herkömmliche mineralische Basisabdichtung sowie eine Asphaltbasisabdichtung. Weiterhin erfolgten Berechnungen mit der Stabzugmethode. Zusammenfassend ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Zwischen den Versuchsergebnissen und den Berechnungen nach der FEM konnte mit den üblichen Stoffkenngrößen für das Material der Sickerprofile und den umgebenden Boden gute Übereinstimmung erzielt werden.
- Durch die Berechnungen mit der FEM wurde bestätigt, daß sich das runde Sickerprofil im Vergleich zu dem quadratischen Sickerprofil mechanisch günstiger verhält. Spannungskonzentrationen und Festigkeitsüberschreitungen im Boden sind für die runden Profile, wie erwartet, immer kleiner als für die quadratischen Sickerprofile. Während in einem runden Profil die Beanspruchungen zum überwiegenden Teil durch Normalkräfte aufge-

nommen werden können, führt die senkrechte Belastung auf die ebenen Querschnittswände eines quadratischen Profils vorrangig zu Biegemomenten. Insbesondere in den horizontalen Querschnittswänden treten dadurch große Biegespannungen auf, die eine Begrenzung der zulässigen Auflast bzw. der möglichen Abfallüberschüttungshöhe erfordern.

- Selbst bei Anordnung von Profilverstärkungen kann ein rechteckförmiges Profil rechnerisch etwa nur 30% an Abfallüberschüttung aufnehmen im Vergleich zu einem runden Profil.
- Neben den größeren Biegespannungen sind in einem quadratischen Profil auch größere Verformungen zu erwarten, die im Versagensfall zu einem Eindringen der Querschnittswände führen können. Entgegen einem runden Profil bewirken diese Verformungen unmittelbar eine Zunahme der Biegemomente in den allseitig überdrückten Querschnittswänden (Theorie II Ordnung). Zur Vermeidung einer instabilen Gleichgewichtslage wären daher für quadratische Sickerprofile strengere Verformungsbegrenzungen zu definieren, als für runde Profile.

- Berücksichtigt man die aus praktischen Erfahrungen bekannten unvollständigen Auflagerbedingungen bei runden Profilen, so ist realistisch etwa ein Überschüttungsverhältnis von 1:2 (Rechteckprofil zu rundem Profil) zu erwarten.

Somit bleibt festzuhalten, daß auch bei optimierter Querschnittsgestaltung der rechteckförmigen Profile erwartungsgemäß deutliche Nachteile im Tragverhalten gegenüber runden Sickerwasserprofilen vorhanden sind. Die Nachteile werden bei der Ausführung von Asphaltabdichtungen etwas abgeschwächt. Demgegenüber stehen die in Abschnitt 1 aufgelisteten betrieblichen und ausführungstechnischen Vorteile. Besonders bei Deponien mit geringen Überschüttungshöhen oder als Entwässerung auf Zwischenabdichtungen können nach den hier durchgeführten Untersuchungen rechteckförmige Sickerprofile eingesetzt und die damit verbundenen Vorteile genutzt werden.

6 Literatur

- Arbeitsblatt ATV - A127 (1988)*: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen. 2. Auflage, Abwassertechnische Vereinigung e.V.
- DIN 4266 Teil 1 (1992)*: Sickerrohre für Deponien, aus PVC-U, PE-HD und PP Anforderungen, Prüfung und Überwachung
- DIN 8075 (1987)*: Rohre aus PE-HD, Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung
- DIN 19 667 (1991)*: Dränung von Deponien, Technische Regeln für Planung, Bauausführung und Betrieb
- DIN 53 457 (1988)*: Prüfung von Kunststoffen
- Hoch, A. / Lotner, U. / Zanzinger, H., (1993)*: Statische Berechnung von Rohrleitungen in Sickerwassersystemen bei Abfalldeponien. Müll und Abfall, 1/1993
- Kempfert, H.-G. / Hu, Y. / Ott, E. / Zaeske, D. (1996)*: Sickerwasserleitungen aus PE-HD für Deponien als Rechteckquerschnitt. Statische und experimentelle Untersuchungen. Forschungsbericht des Fachgebietes Geotechnik der Universität Gh Kassel
- Merklblatt ATV - M127, Teil 1 (1996)*: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungsleitungen für Sickerwasser aus Deponien. Ergänzung zum Arbeitsblatt ATV-A 127, Abwassertechnische Vereinigung e.V.
- Reuter, E. / Prein, Th. (1988)*: Untersuchung zur Standsicherheit von Dränageleitungen in Mülldeponien. Veröffentlichung des Institutes für Grundbau der Technischen Universität Braunschweig
- Reuter, E. / Prein, Th. (1989)*: Untersuchung zur Standsicherheit von Dränageröhren in Mülldeponien. 5. Nürnberger Deponieseminar, LGA
- Stiegeler, R., (1995)*: Beanspruchung erdverlegter flexibler Rohrleitungen. Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss. Schriftenreihe der Universität München, Heft 21
- TA Siedlungsabfall, Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (1993)*: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen sowie ergänzende Empfehlungen zur TA Siedlungsabfall des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bundesanzeiger 6/1993
- Zanzinger, H. (1992)*: Das Verhalten von PE -HD-Rohren an der Deponiebasis, Ergebnisse eines großmaßstäblichen Modellversuchs. Veröffentlichung des LGA-Grundbauinstitutes, Nürnberg

Zanzinger, H. / Gartung, E. / Hoch, A. (1992): Grundsatzuntersuchung über die statische Berechnung von Rohrleitungen in Sickerwasserentsorgungssystemen bei Abfalldeponien. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Heft 61