

# Eine ingenieurtechnische Betrachtung des Projekts Steinhäule

Thomas Böhm, LyondellBasell Industries, Frankfurt am Main  
Matthias Haese, Frank & Krah Wickelrohr GmbH, Wölfersheim  
Jochen Obermayer, FRANK GmbH, Mörfelden-Walldorf

## Einleitung

Neue Reinigungsverfahren zur Abwasseraufbereitung machen es heute möglich und notwendig, die Abwässer noch besser als bisher zu reinigen. Künftig wird vor allem die Rückhaltung der schwer abbaubaren und ökologisch kritischen Reststoffe, wie Arzneimittelrückstände, Chemikalien usw., im Mittelpunkt der angestrebten Qualitätsverbesserungen stehen.

Eine große Rolle spielen in Zukunft auch die Vorgaben der Europäischen Union, die eine einheitliche europäische Regelung im Bereich des Gewässerschutzes und der Anlageneignung vorsieht.

Um diese Aufgaben technisch und qualitativ bewältigen zu können, bedarf es einer Kapazitätsausweitung der bisherigen Betriebsfläche beim Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“. Es werden weitere Klärbecken und eine Filteranlage benötigt, die dem Zweckverband den Ausbau des Klärwerkes entsprechend dem jeweiligen Stand der Technik ermöglichen [1].

Frei verlegte Druckrohrleitungen mit einem Innendurchmesser von DN 1000 bis DN 1400 für die unterirdischen Denitrifikationsbecken mit vielen Sonderbauteilen erforderten eine detaillierte technische Vorplanung hinsichtlich der statischen Auslegungen und der konstruktiven Gestaltung der Rohrleitungen.

In Zusammenarbeit mit einer Verlegefirma und Ingenieurbüros wurden für dieses Anwendungsbeispiel gewickelte Großrohre aus PE 100 zur Abwasseraufbereitung verlegt.

## Zweckverband

### Klärwerk Steinhäule im Kurzportrait

#### Einzugsgebiet der Kläranlage

Unweit der Donau, unterhalb des Kraftwerks „Böfinger Halde“, im sogenannten „Steinhäule“ auf Pfulher Gemarkung, befindet sich das Klärwerk, das nach seiner Lage benannt wurde. Träger ist der Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“, zu dem sich die Städte Ulm, Neu-Ulm, Senden und Blaubeuren sowie die Gemeinden Berghülen, Blaustein, Dornstadt, Illerkirchberg, Illerrieden, Schnürpflingen und Staig zusammengeschlossen haben. Das aus dem Einzugsgebiet zugeleitete Abwasser wird – gemäß den gesetzlichen Vorschriften und behördlichen Entscheidungen – behandelt, gereinigt und dem Wasserkreislauf durch Ableitung in die Donau wieder zugeführt [1].

#### Seit 1957 eine gemeinsame Kläranlage

Erst beim Bau des Donaukraftwerks „Böfinger Halde“ ergaben sich klare Vorstellungen zum Standort der Kläranlage.

Die genaue Lage konnte nur unterhalb der Wehranlage bzw. der aufgestauten Donau sein, wo mit Hilfe des neuen Zuleiters ein Betrieb mit natürlichem Gefälle möglich war. So kam es zu dem für die Entwicklung der Städte so günstigen Standort im „Steinhäule“. 1957 ging – nach zweijähriger Bauzeit – die gemeinsame mechanische Sammelkläranlage für Ulm / Neu-Ulm in Betrieb.

## Klärwerk Steinhäule – Eine wichtige Aufbereitungsanlage in der Region

Die Anlage umfasst eine Fläche von 11 Hektar. Das Abwasser von rund 400.000 Einwohnerwerte im Einzugsgebiet des Zweckverbands Klärwerk Steinhäule fließt täglich durch die Kanalisation in das Klärwerk an der Donau. Eine Wassermenge von rund 80.000 bis 100.000 m<sup>3</sup> ist pro Tag zu reinigen. Rund 40 Prozent davon stammen aus Industrie und Gewerbe. Beim Klärprozess fallen täglich ca. 20 – 40 Tonnen Schlamm (Trockensubstanz) an, die der thermischen Verwertung zugeführt werden. Der Reinigungsprozess vom Abwasserzulauf bis zum Ablauf des geklärten Wassers dauert rund zehn Stunden. Zum Vergleich: Die Donau würde dazu mit ihren Selbstreinigungskräften etwa zehn Tage benötigen.

## Anforderungen an die Baumaßnahme – Projektbeschreibung

Der Neubau von Denitrifikationsbecken umfasste acht Kaskaden mit Zu- und Ablaufkanälen. Jede Kaskade hatte ein Volumen von 2.400 m<sup>3</sup> aufzuweisen.

Folgendes Anforderungsprofil lag für das frei verlegte und unterirdische Rohrleitungssystem vor:

- ▶ Druckrohrleitungen mit einem Innendurchmesser von DN 1000 bis DN 1400 für eine flexible Wasserführung und -verteilung
- ▶ Die unterirdischen Rohrleitungen beinhalteten Sonderbauteile wie Abzweigungen, Schieber, Wandeinbindungen und Reduktionen
- ▶ Durchflussleistung: 55 bis 70 m<sup>3</sup>/min
- ▶ Betriebstemperaturen: 5 und 20 °C
- ▶ zulässiger Betriebsdruck/Systemdruck: max. 1,5 bar
- ▶ Nutzungsdauer: 50 Jahre.

## Auswahl des Rohrwerkstoffes

### PE 100 – Idealer Werkstoff für dieses Projekt

Die ursprüngliche Planung für den Neubau der Kläranlage sah als Rohrwerkstoff Edelstahl vor. Die wirtschaftlichen und technischen Vorzüge von Rohrsystemen aus PE 100 im Versorgungsbereich waren dem Betreiber der Kläranlage und den beteiligten Ingenieurbüro seit mehreren Jahren bekannt.

So wurde das Kunststoffrohr in der Ausschreibung neben Edelstahl als Grundposition aufgenommen.

### Wirtschaftlichkeit von PE 100

Druckrohre und Formteile aus PE 100 bieten durch ihr relativ niedriges spezifisches Gewicht von  $0,960 \text{ g/cm}^3$  deutliche Vorteile in der Handhabung und Verlegung. Dies wirkt sich positiv auf die anfallenden Einbaukosten aus. Gewinkelte Druckrohre mit einer Nennweite größer DN 800 sind durch ein flexibles Produktionsverfahren kostengünstig herstellbar [2].

### Technische Vorteile von PE 100

Dies sind im Besonderen die gute chemische Widerstandsfähigkeit, die hohe Betriebssicherheit, die geringe Neigung zu Verkrustungen, das deutlich günstigere Abriebverhalten im Vergleich zu traditionellen Rohrwerkstoffen (nach dem Darmstädter Verfahren) sowie die Schweißbarkeit, die eine dauerhafte Dichtigkeit des Systems gewährleistet [2]. Unter Umweltgesichtspunkten ist die geringe benötigte Energiemenge zur Herstellung von Rohren aus PE 100 sowie die Möglichkeit des Recyclings zu nennen [3].

### Nachweis der Langzeitfestigkeit

Rohrsysteme aus PE 80 und PE 100 haben sich durch ihre Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit für den Transport von Gas, Wasser, Abwasser und grundwassersegefährdenden Medien seit mehreren Jahrzehnten bewährt.

Inzwischen steht mit der ISO 9080 eine internationale Norm für thermoplastische Kunststoffe zur Verfügung, die ein Extrapolationsverfahren beschreibt, mit dessen Hilfe wissenschaftlich fundierte Aussagen zur Langzeitfestigkeit von thermoplastischen Rohrwerkstoffen gemacht werden können.

Dieses Extrapolationsverfahren hat im Herbst 2006 eine glanzvolle Bestätigung erfahren. Im Oktober 1956 eingebaute Rohrproben aus Labormengen der früheren Hoechst AG in Frankfurt haben bei  $20 \text{ °C}$  dem Innendruck bis heute standgehalten und damit die Richtigkeit des Arrhenius-Ansatzes bestätigt [4].

Den Herstellern und Anwendern von Rohrsystemen stehen mit Hostalen GM 5010 T3 black (PE 80), Hostalen CRP 100 black (PE 100) und Hostalen CRP 100 RESIST CR black (PE 100) drei Polyethylen PE-HD Werkstoffe zur Verfügung. Diese multimodalen PE-HD Werkstofftypen stellt die Lyondell-Basell am Produktionsstandort Wesseling am Rhein als Rohrwerkstoff der dritten Generation in einer mehrstufig arbeitenden Polymerisationsanlage nach dem ACP Prozess her [2].

### Rohr- und Formteilerstellung

Die Firma FRANK GmbH mit Sitz in Mörfelden blickt auf eine über 40 jährige Erfahrung mit PE-Rohrwerkstoffen zurück und zählt zu den größten Wickelrohrherstellern in Europa mit Niederlassungen in Polen und Neuseeland.

Die benötigten Druckrohre, Bögen und Abzweige wurden bei den beiden Tochterunternehmen der Frank GmbH in Wölfersheim hergestellt. Dank flexibler und modernster Fertigungseinrichtungen bei der Wickelrohrherstellung können in

Wölfersheim kundenspezifische Rohrdimensionen in PE und PP bis DN 3500 mm problemlos hergestellt werden.

Um die Installationskosten vor Ort zu verringern, wurden ganze Segmente (Rohr mit Formteil) in Wölfersheim vorgefertigt. Die Bauteile hatten Sonderlängen zwischen 4 und 8 Metern und wurden auf Tiefladern an die Baustellen gebracht.

Die statische Berechnung der Druckrohre, Bögen, und Festflanschkonstruktionen erfolgte bei Frank Deponietechnik in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Pörtl. Überprüft wurden die Berechnungen von der LGA in Nürnberg sowie von Dr.-Ing. Dietmar H. Maier, Karlsruhe. Die Lagerpunkte wurden vom Ingenieurbüro Brandolini & Seitz, Ulm berechnet.

Bei der Rohrerstellung unterscheidet man zum einen die strangextrudierten Rohre (Druckrohre und korrigierte Rohre) nach DIN 8074/75 und zum anderen die gewickelten Rohre nach DIN 16961, die hauptsächlich im Nennweitenbereich ab 600 mm eingesetzt werden.

### Herstellung von strangextrudierten Rohren

Die plastifizierte PE-Formmasse wird im Düsenkopf zum Rohr geformt. Das noch weiche Kunststoffrohr wird anschließend durch eine Kalibrierung geführt und über Vakuum auf den gewünschten Außendurchmesser gebracht. Die nachfolgenden Wasserbecken kühlen das Rohr ab und sorgen für die notwendige Formstabilität. Am Ende der Verfahrenseinheit

## Qualität, die Maßstäbe setzt

Rohre und Fittings für die anspruchsvolle Installation



Bänninger Kunststoff-Produkte GmbH  
Bänningerstraße 1 | D-35447 Reiskirchen  
Telefon (06408) 89-0 | Fax (06408) 6756  
[www.baenninger.de](http://www.baenninger.de) | [info@baenninger.de](mailto:info@baenninger.de)



steht der Abzug, über dessen Geschwindigkeit die Wanddicke des Rohres beeinflusst werden kann. Auf diese Weise kann ein „Endlos-Rohr“ produziert werden, das mit entsprechenden Sägevorrichtungen auf die gewünschte Länge gekürzt werden kann (Bild 1).

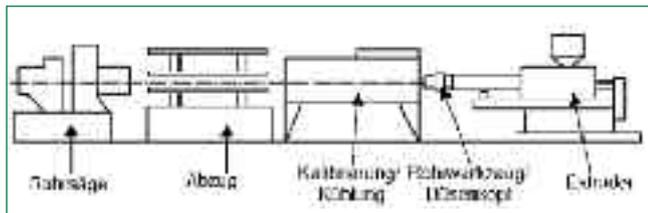


Bild 1: Produktionsverfahren für strangextrudierte Rohre nach DIN 8074

### Herstellung von Wickelrohren

Wickelrohre werden mit einem auf Schiene fahrbaren Extruder hergestellt. Die PE- oder PP-Formmasse wird im schmelzförmigen Zustand als fortlaufendes, überlappendes Band spiralförmig auf eine Metalltrommel aufgewickelt. Über einen Coextruder kann eine zweite, funktionale und/oder inspektionsfreundliche Innenschicht aufgebracht werden.

Als Kalibrierung dient eine Metalltrommel, die den Innendurchmesser (DN) des Rohres bestimmt. Die Kühlung der Rohre erfolgt langsam über ein Gebläse. So können Eigenspannungen, die durch die Volumenschwindung und den Produktionsprozess verursacht werden, reduziert werden.

Durch mehrlagiges Übereinanderwickeln der Formmasse und Variieren der aufgetragenen Materialmenge können unterschiedliche Wanddicken ausgeführt werden (Bild 2).



Bild 2: Herstellung der Wickelrohre bei der FRANK & Krah GmbH nach PAS 1065 / DIN 16961

Die Wickelrohrproduktion ermöglicht außerdem einen simultanen Aufbau der Rohre mittels Hohlkammerprofilen. Diese werden mit einem Schmelzeband umhüllt und auf die Grundlage aufgewickelt. Es entsteht somit eine einheitliche, homogene Verbindung.

Die Profilierung kann in unterschiedlichen Größen und Abständen aufgewickelt werden und ergibt somit eine Vielzahl von möglichen Varianten. Eine Optimierung des Rohraufbaus für die jeweilige Einbausituation mit den entsprechenden Belastungen ist somit möglich (Bild 3).

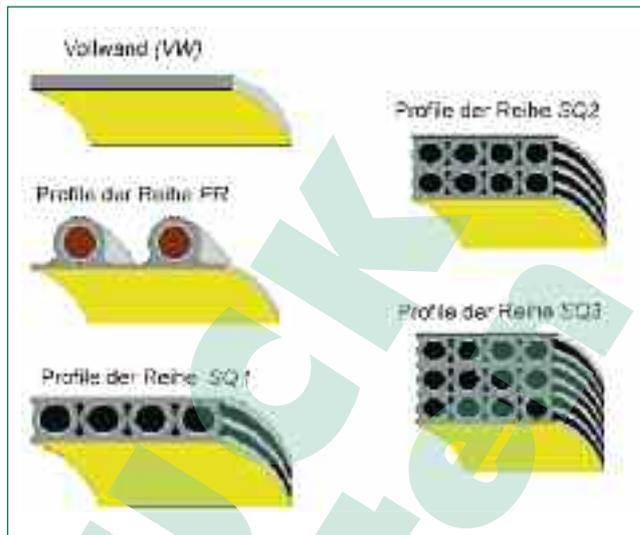


Bild 3: Profile bei Wickelrohren [5]

### Ingenieurtechnische Betrachtung und Durchführung der Baumaßnahme

Aufgrund der Anforderungen an die Baumaßnahme waren detaillierte technische Vorplanungen hinsichtlich der statischen Auslegungen und der konstruktiven Gestaltung der Rohrleitungen unter Berücksichtigung der Freiverlegung notwendig.

Hier sind insbesondere die Belastung aus möglichem Innendruck, thermischer Ausdehnung mit notwendigen Festpunkt-konstruktionen sowie Stützweitenabstände zu betrachten.

Entsprechende statische Kennwerte für PE 100 wurden vom Rohstoffhersteller zur Verfügung gestellt.

#### Belastung durch Innendruck

Bei der Auslegung von Rohren größerer Dimension muss in jedem Fall der Innendruck berücksichtigt werden. Hier ist zu unterscheiden zwischen dauerhaftem Betriebsdruck und dem kurzzeitig auftretenden Prüfdruck. Zur Berechnung der notwendigen Mindestwanddicke ( $s_{min}$ ) wird die Kesselformel verwendet (Bild 4).

$$s_{min} = \frac{p \cdot d}{20 \cdot \sigma_{zul} + p}$$

$s_{min}$	Mindestwanddicke [mm]
$p$	Betriebsüberdruck [bar]
$d$	Rohraußendurchmesser [mm]
$\sigma_{zul}$	Berechnungsspannung [N/mm <sup>2</sup> ]

Bild 4: Kesselformel zur Berechnung der Rohrwanddicke [5]

#### Temperaturabhängige Längenausdehnung

Ein weiterer Einflussfaktor bei sehr langen Rohrstrecken sind Temperaturschwankungen, die zu Längenänderungen des Systems führen. Die Größe der Längenänderung wird beeinflusst durch den Längenausdehnungskoeffizienten (auch linearer

Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  genannt), der das Verhalten eines Stoffes im Verhältnis zur Temperatur beschreibt (Bild 5).

Die Längenausdehnung bei Temperaturschwankungen wiederum ist relevant für die Wahl der Auflager und die feste Einbindung der Rohre bei Wanddurchführungen. Ein Lasteintrag in die Edelstahlschieber durch Ausdehnung der Rohre musste auf jeden Fall verhindert werden, da die konstruktive Betrachtung ergeben hatte, dass die gehäuselosen Plattenschieber keine Axialkräfte aus den Rohrleitungen aufnehmen dürfen.

$$\Delta L_T = \alpha \cdot \Delta L \cdot \Delta T$$

- $\Delta L_T$  Längenänderungen infolge Temperaturänderung [mm]
- $\alpha$  Linearer Ausdehnungskoeffizient [mm/mK]
- L Rohrlänge [m]
- $\Delta T$  Temperaturdifferenz [K]

Bild 5: Formel zur Berechnung der Längenänderung durch Temperaturdifferenz [5]

#### Konstruktion im Bereich der Schieber

Da die gehäuselosen Schieber keine Längskräfte aus der Rohrleitung aufnehmen können, wurde eine Konstruktion mit Fest-



Bild 6: Geflanschtes Rohr mit FF-Stück aus Edelstahl und Kraftumleitung um den Plattenschieber

punkt und Ausbaustück (FF-Stücke aus Edelstahl) gewählt, um eine lastfreie Lagerung der Schieber zu erreichen (Bild 6).

Die Rohrenden wurden mit einer gefrästen Nut versehen und fest auf ein Auflager montiert. Durch diese Festpunktkonstruktion konnten die Kräfte aus der temperaturabhängigen Längenausdehnung aufgenommen und um den angeflanschten Plattenschieber herumgeleitet werden.

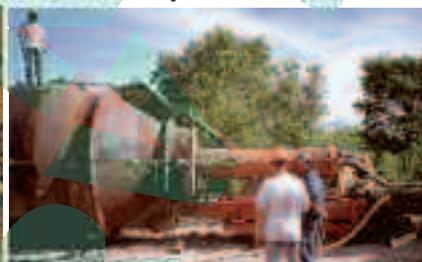
#### Statische Berechnungen

Die statische Berechnung und Auslegung des Rohrleitungssystems war sehr aufwändig. Mit den üblichen numerischen

Pionier im grabenlosen Leitungsbau seit 1962



Erdraketen • Rammen • HDD-Spülbohrtechnik • Berstlining-Technik



Die richtige Verlegetechnik für alle Kunststoffrohre

TRACTO-TECHNIK GmbH & Co. KG • Postfach 4020 • 57356 Lennestadt  
Tel.: 02723/8080 • www.tracto-technik.de • Email: marketing@tracto-technik.de



45 Jahre Erfahrung

Verfahren nach DVS 2210-1 konnten die Bereiche der Rohrleitung ohne Formteile nachgewiesen werden. Insbesondere die Nachweise für Innendruckbelastung, Festpunktkräfte infolge temperaturabhängiger Längenausdehnung sowie die Stützweiten konnten so berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Nachweise führten dann zur konstruktiven Gestaltung der geraden Rohre zwischen den Formteilen. Es zeigte sich, dass die Rohrleitung aus PE 100 mit den gleichen Stützabständen verlegt werden kann wie eine Edelstahlleitung. Ein deutlich erhöhter Rechenaufwand musste allerdings aufgrund der hohen Wärmeausdehnung von PE ( $\alpha = 0,18 \text{ mm/m} \cdot \text{K}$ ) geführt werden. Wie bereits beschrieben führte dann auch dieser Nachweis zu der Gestaltung der Festpunkte im Bereich der Schieber mit Kraftumleitung und spannungsfreiem Einbau der Schieber.

### Gesonderte Finite-Elemente-Berechnung der Formteile

Die Formteile wie T-Stücke, Bögen, Reduktionen und Festflansche mussten gesondert betrachtet werden. Diese Formteile wurden alle aus vollwandigem Wickelrohr (VW) hergestellt, so dass die erforderliche Wanddicke genau produziert werden konnte. Der Nachweis wurde mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FE-Methode) geführt. Mit dieser Methode können Problemstellungen aus den verschiedensten Disziplinen berechnet werden. Sie haben gemeinsam, dass das Bauteil in eine große Zahl kleiner, aber endlich (finit) vieler Elemente unterteilt wird. Auf diesen Elementen werden dann

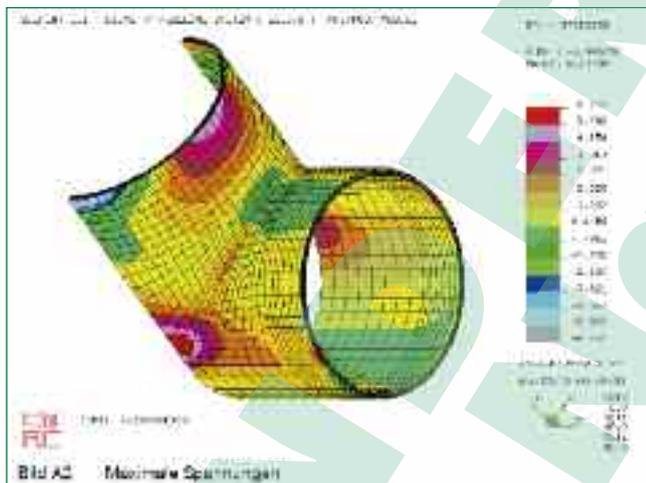


Bild 7 (Maximale Spannungen): Finite-Elemente-Modell T-Stück DN 1400, LGA Nürnberg [6]

die Kräfte definiert, die am Bauteil angreifen. So kann für jede Geometrie die erforderliche Wanddicke bestimmt werden. Untersucht wurden bei den 90°-Abzweigen unter anderem die Verformung und die maximalen Spannungen über das FE-Modell (Bild 8). Insgesamt treten sehr hohe Spannungen auf, am stärksten greifen diese jedoch an den Außenseiten der Abwinkelung an. Auch die Verformung der fest einbetonierten Abzweige in Folge der Wärmeausdehnung wurde so berechnet.

Die stärksten Verformungskräfte wirken ebenfalls an den Außenseiten der Abwinkelung (Bild 8). Aus diesen Gründen

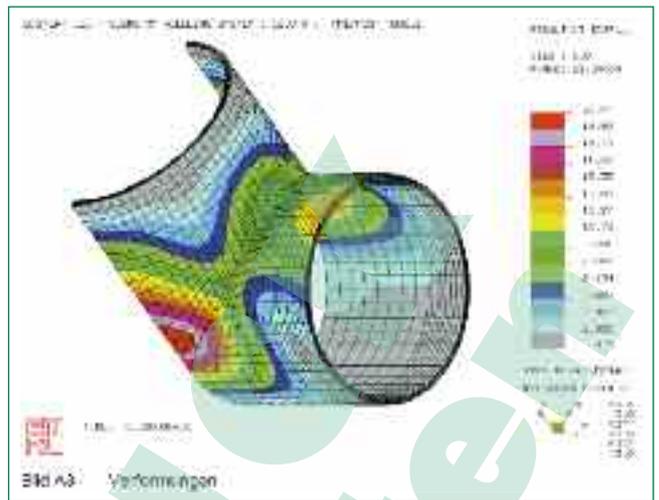


Bild 8 (Verformungen): Finite-Elemente-Modell T-Stück DN 1400, LGA Nürnberg [6]

mussten die 90°-Abzweige mit deutlich größerer Wanddicke (Vollwanddicke von 42 mm) ausgeführt werden als das gerade Rohr.

### Durchführung der Baumaßnahme

Als Ergebnis der Überlegungen, Berechnungen und Analysen wurde am 23.07.2006 mit der Verlegung der Rohre und Formteile aus PE 100 im Installationsgang zwischen den Denitrifikationsbecken begonnen. Die gesamte Installation wurde in nur 2 Monaten erfolgreich abgeschlossen (Bild 9).

Die gewonnenen Erfahrungen beim Neubauprojekt Steinhäule können für Folgeprojekte verwendet werden und zeigen, dass PE 100 im Anlagenbau mehr als eine Alternative zu Edelstahl ist.



Bild 9: Überblick über den Installationsgang mit verlegten Leitungen DN 1000, DN 1200, DN 1400

### Literatur

- [1] Klärwerk Steinhäule: Internet Home Page
- [2] J. Hess, Th. Böhm, „Gewickelte Großrohre aus Polyethylen erschließen neue Einsatzmöglichkeiten“, 3R international (43) Heft 4-5/2004
- [3] Fiedler, M., „Praxisbericht: Erfahrungen mit PEHD Vollwandrohren“, 3. Göttinger Abwassertage 2003
- [4] U. Schulte, „Von der Idee zum Erfolg: 50 Jahre Rohrsysteme aus HDPE“, KRV Nachrichten, Heft 10/2006
- [5] Katalog Fa. FRANK GmbH, Kunststoff-Rohrsysteme 2003“
- [6] LGA Bautechnik GmbH, Institut für Statik, Nürnberg