

VERTIKALDRÄNAGE – ÜBERLEGUNGEN ZU EINSATZ UND BEMESSUNG

JAN RETZLAFF

Colbond Geosynthetics GmbH, Obernburg

ABSTRACT:

The consolidation of weak soils is a long-term process, which may be accelerated by the use of Prefabricated Vertical Drains (PVDs). Extensive laboratory tests and measurements on construction sites have shown the function and the effect of PVDs in speeding up consolidation. In special cases a combination of vertical drainage with vacuum-consolidation or electrokinetic soil improvement may be necessary. Well-tried installation techniques and practical design methods have made this kind of soil improvement also economically viable in Europe, not only for large projects such as those in South East Asia or Japan.

KURZFASSUNG:

Die Konsolidierung setzungsempfindlicher Böden ist ein langwieriger Prozess. Durch den Einsatz von geosynthetischen Vertikaldränagen kann dieser Vorgang beschleunigt werden. Umfangreiche Untersuchungen in Laboren und Messungen auf Baustellen beleuchten die Funktionalität und die beschleunigende Wirkung von geosynthetischen Streifendrängern. In Kombination mit Vakuumkonsolidierung oder Elektroosmose kann die Konsolidierungsbeschleunigung mit Vertikaldränagen speziellen Anforderungen angepasst werden. Ausgereifte Einbauverfahren und die Entwicklung effizienter Bemessungsmethoden haben diese Form der Baugrundverbesserung nicht nur für große Projekte, wie sie beispielsweise in Südostasien und Japan durchgeführt werden, sondern auch für Baumaßnahmen in Europa wirtschaftlich interessant gemacht.

1 EINLEITUNG

Die Idee von direkten, kurzen und wirtschaftlichen Verkehrswegen und das Ziel dabei natürliche Ressourcen effektiv zu nutzen stellt Bauherren, Planer und Ausführende oft vor die Aufgabe auch unwegsames Gelände zu überbauen. In diesem Zusammenhang ist in einigen Fällen die Tragfähigkeit des Untergrundes zu gering und es wird nach einer technischen Möglichkeit gesucht, die Abhilfe schaffen kann. Unter bestimmten Randbedingungen ist dafür die Vertikaldränage eine Lösung.

Vertikaldränagen, wie Sandsäulen, Rohr- oder Streifendränagen werden mit dem Ziel eingesetzt, die meist sehr langwierige Konsolidierung von Bodenschichten zu beschleunigen. Das Verfahren selbst ist nicht neu. Die Wirkungsweise von Vertikaldränagen ist bekannt und die Einflussfaktoren können mit den üblichen Bemessungsverfahren weitgehend berücksichtigt werden. Besonders in der letzten Zeit sind Fragen zu den Einsatzmöglichkeiten, den verwendeten Materialien, den Einbauverfahren und der Bemessung von vertikalen Streifendrängern wieder aktuell geworden. Die Antworten auf einige dieser Fragen sollen hier zusammenfassend dargestellt werden.

2 EINSATZMÖGLICHKEITEN UND WIRKUNGSWEISE

2.1 Konsolidierung und Untergrund/Unterbau

Für viele Baumaßnahmen, insbesondere auch im Verkehrswegebau ist das Zeit-Setzungs-Verhalten des Untergrundes/Unterbaus im zeitlichen Bauablauf zu berücksichtigen.

Während der Konsolidierung verändert der Boden seinen Lagerungszustand. Ein Großteil der damit verbundenen Volumenänderung ist vom Porenwasserdruck abhängig und wird durch Setzungen messbar. Durch den Einsatz von Vertikaldränagen kann Einfluss auf den Abbau überschüssigen Porenwassers genommen werden. Grundsätzlich kann dadurch bei allen Böden, die zu Setzungen neigen die Konsolidierung beschleunigt werden. Besonders wirtschaftlich ist der Einsatz, wenn in großer Mächtigkeit weiche, zusammenpressbare Bodenschichten mit geringer Durchlässigkeit sondiert wurden.

Da der Porenwasserdruck lediglich in der Phase der Primärsetzungen entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Konsolidierung hat, kann auch nur dieser Abschnitt des Gesamtprozesses beeinflusst werden. Auf die Sekundärsetzungen, das sogenannte Kriechen des Bodens hat die Vertikaldränage keine Auswirkungen.

In der Stufe der Primärsetzungen, die sich unmittelbar an die Sofort-/Initialsetzungen anschließt, wird ungebundenes Porenwasser aufgrund zunehmenden Drucks aus den belasteten Bereichen des Bodens herausgepresst.

Ohne den Einsatz von Vertikaldränagen wird der Porenwasserüberdruck durch das Ableiten von Porenwasser an die Oberfläche des belasteten Bereichs abgebaut. Diese langen vertikalen Dränagewege werden durch Vertikaldränagen in kurze horizontale Wege zwischen den einzelnen Dränagen umgewandelt, so dass auch die horizontale Schichtung des Bodens den Wasserfluss gegenüber der vertikalen Strömungsrichtung begünstigt. Entwässert wird in eine zuvor auf der zu konsolidierenden Fläche aufgebaute, gut durchlässige Sandschicht. Aus der Sandschicht wird das Wasser über eine Vorflut abgeführt.

Die zusätzliche Belastung, die den Porenwasserüberdruck aufbaut und so für ein hydraulisches Gefälle sorgt, wird in der Regel durch Auflasten in Form von Dammschüttungen erzeugt. Dies ist, wie in [FGSV 542] beschrieben, Voraussetzung für ein funktionierendes System von Vertikaldränagen.

Bei der Überhöhung von Dämmen als zusätzliche Auflast ist die Standsicherheit desselben auf dem wenig tragfähigen Untergrund/Unterbau zu beachten. Die Last des Dammes darf nicht so groß sein, dass sie einen Grundbruch erzeugt bzw. ungewollt den Boden seitlich verdrängt und so zu einem Geländebruch führt. Um die Standsicherheit des Erdbauwerkes gewährleisten zu können, werden die Überschüttungen stufenweise vorgenommen.

Die Auswirkungen der einzelnen Schüttungen und letztendlich eine angemessene Gesamthöhe der zusätzlichen Auflast ist abhängig von der Zeit, die abgewartet werden kann, bis die Setzungen eingetreten sind, die langfristig gesehen, ohne Vorbelastung, auftreten würden.

Sowohl die Funktion der Vertikaldränagen, als auch der Grad der Konsolidierung lassen sich mit Messungen des Porenwasser-

druckes untersuchen. Durch solche Messungen des Porenwasserdruckes in Abhängigkeit von der Zeit und der Tiefe ist die beschleunigende Wirkung von Vertikaldränagen auch von unabhängigen Institutionen, wie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und aktuelle Baustellenmessungen, nachgewiesen und anerkannt.

Unter dem Einfluss der Setzungen ist es möglich, dass trotz des Fortschreitens der Konsolidierung ein erhöhter Porenwasserdruck gemessen wird. Ein Abgleichen des gemessenen Porenwasserdrucks und der ermittelten Setzungen kann so Aufschluss über den tatsächlichen Verlauf und den Grad der Konsolidierung geben. Zudem können dadurch Messfehler korrigiert werden. Eine am Ende flach verlaufende Setzungskurve ist Indiz für das Ende der Primärsetzungen, die abgeschlossen sind, sobald der Porenwasserüberdruck abgebaut wurde.

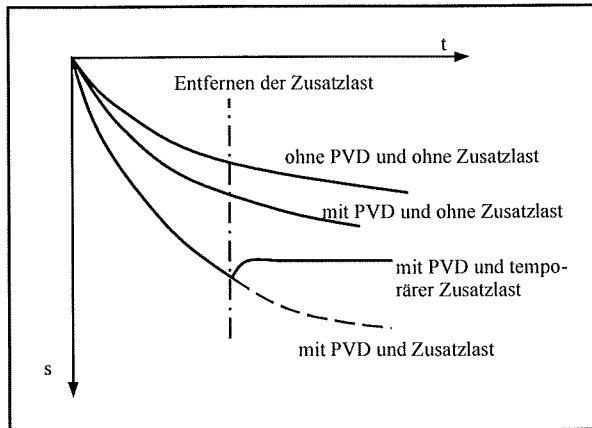


Abbildung 2.1 - 1 Kombinationen PVD/Zusatzlast

2.2 Vakuumkonsolidierung

Beim Einsatz von Vertikaldränagen kann das Entwässern des Bodens zusätzlich durch das Erzeugen von Unterdruck im Bereich des zu konsolidierenden Bodens unterstützt werden. Dazu wird der meist sehr weiche Boden mit einer Sandschicht, durch die das ausgepresste Wasser problemlos abfließen kann, überschüttet und dann mit einer Folie oder Dichtungsbahn abgedeckt. Die Vakuumkonsolidierung erfordert eine gute und großflächige Abdichtung des zu entwässernden Bereiches. Den Randzonen der Abdichtung ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Vakuumpumpen erzeugen den erforderlichen Unterdruck und können so die für die Beschleunigung der Konsolidierung erforderliche Auflast ganz oder teilweise ersetzen.

Diese Alternative zur Überschüttung ist sicher dann zu überlegen, wenn der anstehende Untergrund/Unterbau bei großen Auflasten versagen könnte oder der Aufwand für den Transport von zusätzlichem Bodenmaterial unverhältnismäßig hoch ist.

In der Baupraxis wird diese Kombination wegen der relativ hohen Kosten selten angewandt.

2.3 Elektroosmose

Eine weitere Kombinationsmöglichkeit zur Unterstützung der Vertikaldränage ist die Elektroosmose. Hier können durch das Ausrüsten von Streifendrängern mit Kupferlitze die Vorteile der flexiblen Geokunststoffe im Verlauf der Konsolidierung genutzt werden. Da das Porenwasser durch das Anlegen einer Gleichspannung im Boden zielgerichtet zu den als Kathode fungierenden Streifendrängern fließt und über diese abgeführt wird, ist so eine weitere Beschleunigung der Konsolidierung möglich. In den Boden eingetriebene Metallstäbe werden als Anode geschaltet. Interessant ist diese Kombination, wenn langsam entwässernde Böden in ihrem Verhalten beeinflusst werden sollen.

3 PREFABRICATED VERTICAL DRAINS

3.1 Aufbau der Prefabricated Vertical Drains (PVDs)

Bei den industriell vorgefertigten Streifendrängern handelt es sich um flache synthetische Sickerkerne, die allseitig von einem Geotextil eingeschlossen sind. Typische Breiten liegen zwischen 95 mm und 100 mm mit Dicken von ca. 3 mm bis 5 mm.

Es gibt verschiedene Formen von Sickerkernen, z.B. perforierte Kastenprofile, Trapezprofile, Filamentstrukturen u.a. mit denen Wasserableitvermögen von $30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ bis $90 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ möglich sind.

Es ist an den Herstellern, nachzuweisen, dass das Produkt den in speziellen Anwendungsfällen gestellten Anforderungen an geosynthetische Streifendrängern entspricht. Dafür sind umfangreiche Untersuchungen der verschiedenen Eigenschaften erforderlich.

Im einzelnen sind dies:

- die Filterstabilität des Dränfilters
- die chemische und biologische Beständigkeit
- das Wasserableitvermögen und
- die mechanische Festigkeit

Die mechanische Festigkeit und das Wasserableitvermögen von geosynthetischen Streifendrängern sind im Zusammenhang mit dem Einbau und den Beanspruchungen, denen der Streifendrängern während der Setzungen in der Konsolidierungsphase ausgesetzt ist, zu sehen. Diese Beanspruchungen erfordern eine hohe Flexibilität des Materials, worin auch einer der wesentlichen Vorteile gegenüber anderen Formen der Vertikaldränage, wie Sandsäulen, zu sehen ist. Diese können gerade bei großen Verformungen im Boden abscheren und so den Abfluss des Porenwassers unterbrechen.

Da als oberer Richtwert für die Beeinflussung der Konsolidierung bis zu 2 Jahre veranschlagt werden, muß unabhängig von den Schubverformungen die hohe Ableitkapazität des Drängers über diesen Zeitraum hinaus gewährleistet werden. In vielen Fällen wird bereits nach einem halben oder einem Jahr ein Konsolidierungsgrad von 90 % erreicht. Für solche Fälle können die Materialspezifikationen über einen kürzeren Zeitraum auch höheren Anforderungen genügen.

3.2 Wasserableitvermögen

Zur Ermittlung des Wasserableitvermögens einzelner Streifendrängern wurden in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Delft Durchlässigkeitstests entwickelt, die als Standard anerkannt sind. Dabei werden zwei Arten von Untersuchungen unterschieden. Zum einen sind es Messungen des glatt ausgelegten Materials und zum anderen wird mit einer speziellen Vorrichtung der Streifendrängern geknickt und so sein Verhalten im verformten Zustand, wie im Boden simuliert und untersucht.

Bei diesen Triaxialversuchen wird ein Muster des Streifendrängers in einen Schlauch aus einer wasserdichten Latexmembran gezogen und in der Druckzelle der Messeinrichtung platziert. Der horizontale Druck des Erdreiches gegen den Streifendrängern kann durch den Zellendruck simuliert werden. Dadurch braucht die Konsolidierungszeit, in der sich in der Natur der Erddruck gegen den Streifendrängern aufbaut, für den Test nicht abgewartet zu werden. Damit man sich einen Eindruck vom Langzeitverhalten des geosynthetischen Drängers machen kann, wird der Druck innerhalb des Versuchsaufbaus wöchentlich um 100 kPa von 50 kPa bis 350 kPa erhöht. Das Durchlassvermögen wird dann am Anfang einer jeden Woche, direkt nach dem Einstellen der Laststufe und am Ende einer jeden Woche, unmittelbar vor dem Einstellen der nächsten Laststufe gemessen. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die Belastungen in den ersten Wo-

chen den entscheidenden Einfluss auf die Funktion des Dräns haben.

Die hydraulischen Verhältnisse aus dem Feld werden mit Durchflussmessungen bei charakteristischen Durchflussmengen von 2,5 ml/s bis 15 ml/s modelliert. Um auch die Viskosität des Wassers zu berücksichtigen, werden diese Messungen bei Temperaturen von 10 °C und 20 °C vorgenommen.

Wichtig ist, dass das hohe Wasserableitvermögen der Streifendrängs auch dann erhalten bleibt, wenn diese während der Konsolidierungsphase stark verformt werden. Für diese Messungen wurde eine Vorrichtung entworfen, mit der der Streifendräng von leichten Verbiegungen bis hin zu scharfen Knicken verformt werden kann ohne dass er zerstört wird.

Die damit durchgeführten Vergleichsmessungen erlauben Rückschlüsse auf das produktspezifische Verhalten von geosynthetischen Streifendrängs unter Einbaubedingungen.

4 EINBAU

Aus einer Vielzahl von möglichen Einbauverfahren, wie Rammen, Vibrieren, Einspülen und Einpressen, hat sich das Letztere als die am häufigsten angewendete Methode herauskristallisiert. Beim üblicherweise verwendeten Einbaugerät handelt es sich um eine Sonderanfertigung eines 20 bis 30 m hohen Führungsgestänges mit einer beweglichen Lanze, die auf einem hydraulischen 40-Tonnen-Bagger angebracht ist.

Mit der stählernen Rechtecklanze in der der vorgefertigte Streifendräng läuft, wird die Vertikaldränage in dreieckiger Rasteranordnung eingebaut.

Durch die Rechtecklanze, deren Querschnitt auf ein Minimum beschränkt ist, wird der Boden selbst nur gering beeinflusst und Schmiereffekte werden weitgehend verhindert.

Wenn die zu konsolidierende Bodenschicht sehr inhomogen und von Kieslinsen oder Ähnlichem durchsetzt ist, dann kann in Kombination von Pressen und Vibrieren die Lanze eingetrieben werden. Unter besonderen Umständen kann auch eine stärkere, stabilere rhombische Lanze verwendet werden.

Wie weit die Lanze in den Boden gepresst werden muss, hängt von der Mächtigkeit der zu konsolidierenden Bodenschicht ab. Größenordnungen für Deutschland und Mitteleuropa liegen meist zwischen 6 m und 20 m. Es gibt in Südostasien aber auch Anwendungsfälle, in denen Streifendrängs bis in eine Tiefe von über 50 m eingebaut werden. Die Einpresstiefe kann an modernen Einbaugeräten computergesteuert kontrolliert und protokolliert werden.

Der Streifendräng wird gut 0,20 m in die wasserundurchlässige oder tragfähige Schicht unterhalb des oberen, wenig tragfähigen Untergrundes/Unterbaus gebracht und dort mit einer Metallplatte verankert.

Es gibt auch andere Verfahren, den Streifendräng im Untergrund zu halten und so ein Herausziehen zusammen mit der Lanze zu verhindern. Die Ankerplatte hat sich jedoch als unkompliziert und zuverlässig erwiesen.

Um Materialverschnitt zu verhindern, d.h. am Ende nur eine einzige Restrolle übrig zu behalten, besteht bei geosynthetischen Streifendrängs die Möglichkeit das Ende einer Rolle mit dem Anfang der nächsten zu verbinden. Untersuchungen haben gezeigt, dass durch das Zusammentackern der Enden eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt werden kann, die das Wasserableitvermögen der Streifendrängs kaum beeinflusst. Die Tackerklammern sind parallel zur Fließrichtung anzuordnen.

Die in der Anschlussstelle übereinander geschlagenen Vliesstoffe verhindern ein Zusetzen der Kernstruktur des Streifendrängs, wobei beide Vliesstreifen des Rollenendes außen liegen.

5 BEMESSUNG

Ziel der Bemessung ist es die einzelnen Parameter für die in einem dreieckigen Raster angeordneten vertikalen Streifendrängs zu ermitteln. Diese Anordnung in gleichseitigen Dreiecken ist die Effizienteste, weil die einzelnen Streifendrängs einen nahezu zylindrischen Wirkungsbereich haben.

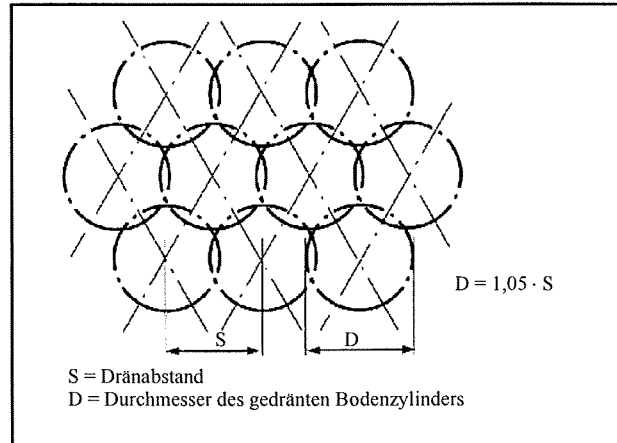


Abbildung 4 – 1 Anordnung der Streifendrängs

Für die flachen Streifendrängs kann der wirksame Drängdurchmesser d_w mit:

$$d_w \approx \frac{2 \cdot b_w}{\pi} \cdot f$$

$$f_{rho} = \frac{\pi}{4}$$

ermittelt werden. Der in Untersuchungen der Technischen Universität Delft ermittelte, zusätzliche Faktor f berücksichtigt bei rhombischen Lanzen den möglichen Schmiereffekt, der durch den größeren Querschnitt hervorgerufen werden kann. In der Regel wird mit einer Rechtecklanze eingebaut, so dass der Faktor $f = 1$ ist und für einen 10 cm breiten Streifendräng der wirksame Drängdurchmesser 6 cm beträgt.

Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Setzungen kann in Anlehnung an [FGSV 542] erfolgen.

Es gibt aber auch die Möglichkeit, nach der von Kjellmann aufgestellten Gleichung, die Ausdruck für die Auswirkungen vertikaler Drängagen auf den Konsolidierungsprozess ist, den Zeitraum der Konsolidierung zu ermitteln.

$$t = \frac{D^2}{8 \cdot c_h} \cdot \left[\ln \left(\frac{D}{d_w} \right) - \frac{3}{4} \right] \cdot \ln \frac{1}{1-U}$$

- t = Konsolidierungszeitraum [a]
- D = Durchmesser des gedrängten Bodenzylinders [m]
- c_h = horizontaler Konsolidierungskoeffizient [m^2/a]
- d_w = wirksamer Drängdurchmesser des PVD [m]
- U = durchschnittlicher Konsolidierungsgrad [-]

Diese Gleichung kann für produktspezifische Planungsdiagramme verwendet werden, die den erforderlichen Zusammenhang zwischen dem Konsolidierungsgrad, dem Konsolidierungszeitraum und dem Konsolidierungskoeffizienten herstellen, so dass es möglich ist, den erforderlichen Abstand zwischen den Streifendrängs im dreieckigen Raster zu ermitteln.

Bei der Bemessung von Vertikaldrängagen ist der Übergang zu angrenzenden Bereichen, insbesondere der Anschluss an beste-

hende Bauwerke zu berücksichtigen. Hier ist der Dränabstand so zu variieren, dass ein allmähliches Anpassen der Setzungen zu bereits bestehenden Bauflächen erreicht wird. Aber auch innerhalb des Baufeldes sollte der Dränabstand gegebenenfalls dem Baugrund angepasst werden, damit unterschiedliche Setzungen vergleichmäßig werden.

Da Bemessungen immer nur so gut sind, wie sie in der Baupraxis umgesetzt werden können und für die Bestimmung des richtigen Materials und die Kalkulation des Bauablaufes eindeutige Ausschreibungsunterlagen erforderlich sind, empfehlen sich die Hinweise des STLK LB Geotextilien und Geogitter im Erdbau, die voraussichtlich noch in diesem Jahr vom Arbeitskreis 5.15 der FGSV zu einem Merkblatt zusammengefasst herausgegeben werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Geosynthetische Streifendrains ermöglichen in vielen Fällen die Vorwegnahme von langandauernden Setzungen. Ihr Einsatz ist technisch plan- und ökonomisch kalkulierbar und hat sich vielfach bewährt.

Mit der Beschreibung der Wirkungsweise und Hinweisen zur Bemessung in Normen und Regelwerken hat sich diese Methode zu einem anerkannten Verfahren entwickelt. Interessant sind Tendenzen, die zeigen, dass PVDs auch bei kleineren Baumaßnahmen kostengünstig eingebaut werden und so einen zügigen Bauablauf ermöglichen.

7 LITERATUR

- Centre of Civil Engineering Research and Codes (Hrsg.): Building on soft soils; Design and construction of earthstructures both on and into highly compressible subsoils of low bearing capacity. CUR Report 162, Rotterdam: Balkema, 1996
- Elzen, L.W.A. van der; Atkinson, M.S.: Accelerated consolidation of compressible low permeable subsoils by means of Colbondrain®. Colbond Geosynthetics bv, Arnhem
- FGSV 542: Merkblatt über Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund. Köln: 1988
- Oostveen, J.P.; Troost, G.H.: Discharge index tests on vertical drains. In Geotextiles, Geomembranes and Related Products Den Hoedt (Hrsg.), Rotterdam: Balkema, 1990
- Senneset, K.; Acar, Y.B.: A glimpse at electrokinetic soil improvement. Symposium on Geotechnical Engineering, Singapore, 13.-15.12.1995

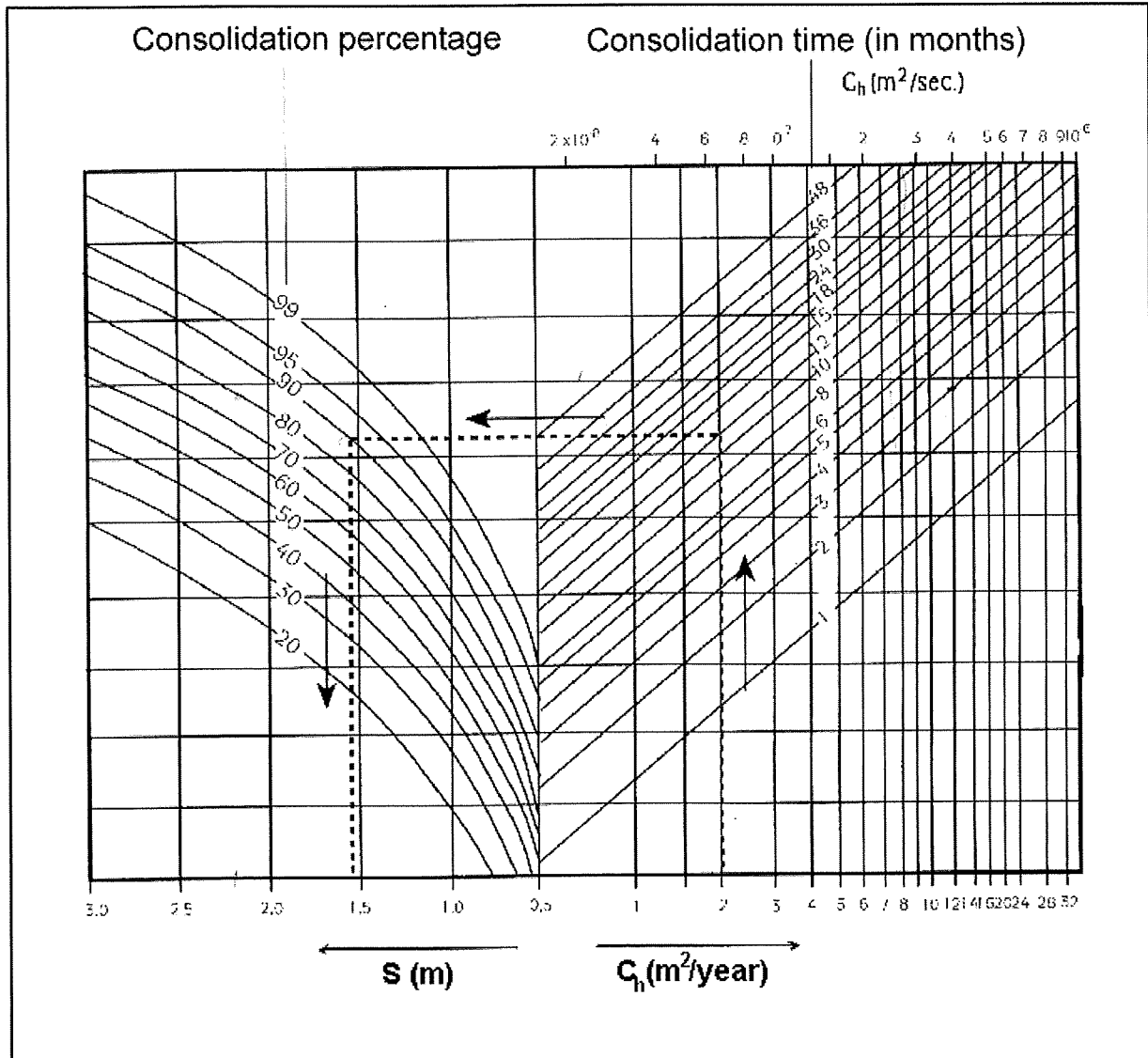


Abbildung 4 – 2 Planungsdiagramm für Colbondrain® CX 1000/10 (Breite 10 cm) nach [Elzen]