Herstellung und Einbau von Bettungsmaterial aus vorhandenen Böden

Von Norbert Markwardt und Steffen Trinks

1 Einleitung

Sowohl für die Übertragungsnetzbetreiber als auch für die Verteilnetzbetreiber sind aktuell und zukünftig deutlich vermehrt Netzausbaumaßnahmen notwendig. Wegen der gesetzlichen Vorgaben und wegen der größeren Akzeptanz in der öffentlichen Wahrnehmung werden in diesem Zusammenhang zukünftig deutlich häufiger erdverlegte Kabel eingesetzt werden.

Erdverlegte Kabel (sowohl Höchstspannungs- (380-kV) als auch Hochspannungskabel (110-kV)) werden in der Regel in Schutzrohren verlegt. Die Schutzrohre sind im Bereich der offenen Bauweise in einem „geeigneten“ Bettungsmaterial zu verlegen/einzubetten.

Während in der Vergangenheit steinfreier reiner Sand praktisch ohne bindige Anteile als geeignetes Bettungsmaterial galt, werden aktuell und auch zukünftig Bettungsmaterialien aus schwach schluffigem bzw. schwach lehmigem Sand als Bettungsmaterial verwendet. Diese Böden haben aufgrund ihres Ton- und Schluffanteils von z.B. ca. 15 - 20 Masse% auch im trockenen Zustand einen höheren Wassergehalt und daraus resultierend eine höhere Wärmeleitfähigkeit.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Herstellung und dem Einbau von Bettungsmaterialien aus vorhandenen d.h. natürlichen Böden. Es werden einerseits kurz die allgemeingültigen bodenkundlichen Zusammenhänge dargestellt. Anderseits erfolgt eine ausführliche Darstellung der Vorgehensweise bzgl. der Herstellung und des Einbaus von Bettungsmaterialien bei der Planung und dem Bau von verschiedenen 380 kV und 110 kV Kabeln, die die beiden Autoren im Rahmen ihrer gutachterlichen Tätigkeiten betreut haben.

2 Bodenkundliche Zusammenhänge zu Kabeln und Bettung

Bild 1 zeigt die in offener Bauweise verlegten Schutzrohre eines 110 kV Kabels bestehend aus 2 Systemen (Flachverlegung und Dreieck gebündelt).

Bild 1: Verlegung der Schutzrohre, Einbau des Bettungsmaterials, Einbau der Kabelschutzabdeckung und Ausrollen der Kabelwarnbänder

Neben dem mechanischen Schutz für die eingebetteten Rohre dient das umgebende Bettungsmaterial primär auch dazu, die durch den Betrieb des Kabels in Abhängigkeit von der Stromlast entstehende Wärme möglichst gut abzuführen, um die Leitertemperaturen zu reduzieren. Von den Bodenmineralien hat Quarz eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, deshalb ist zunächst ein hoher Sandanteil wichtig. Damit aber der Wärmefluss in der mineralischen Bodenmatrix ungehindert möglich ist, ist im Hinblick auf die mineralische Zusammensetzung ein guter Kontakt zwischen den Sandkörnern erforderlich. Dafür sorgen die kleinen Ton- und Schluffanteile, die sozusagen Verbindungsstellen zwischen den Sandkörnern bilden.

Während bei hoch anstehendem Grundwasser (Kabel/Schutzrohre liegen im Grundwasser) die Austrocknungsgefahr des Bettungsmaterials von nachgeordneter Bedeutung ist, besteht bei grundwasserfernen Bedingungen die Gefahr der Austrocknung.

Bodenkundliches Grundlagenwissen sind insb. auch die Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem Austrocknungsverhalten und der Wiedervernässung von Böden im oberflächennahen Bereich (z.B. 0 - 2 m unter GOK) z.B. für Fragestellungen zur Grundwasserneubildung unter Berücksichtigung der vertikalen Bodenfeuchteverteilung in jahreszeitlichen Verlauf.

In der Bodenkundlichen Kartieranleitung [1] sind in diesem Zusammenhang zwei ganz wesentliche/markante Punkte definiert, die die bodenartenspezifische Bandbreite der Wassergehalte

beim permanenten Welkepunkt (ausgetrockneter Boden/Bettungsmaterial) und bei Feldkapazität (erdfeuchter Boden) in der ungesättigten Bodenzone quantifizieren.

Der permanente Welkepunkt ist gemäß [1] der Wassergehalt eines Bodens, bei dem landwirtschaftliche Kulturen irreversibel welken. Dieser Wassergehalt kennzeichnet also einen Boden bzw. ein Bettungsmaterial in einem sehr trockenen Zustand. Unter Berücksichtigung der Trockenrohdichte (g/cm³) – nachfolgend auch TRD genannt – wird der Wassergehalt in Vol% angeben.

Die Feldkapazität FK ist gemäß [1] der Wassergehalt eines Bodens, den dieser entgegen der Schwerkraft durch die Bindungskräfte halten kann. Dieser Wassergehalt kennzeichnet also einen Boden bzw. ein Bettungsmaterial in einem feuchten Zustand.

Die wassergehaltsabhängige Wärmeleitfähigkeit eines Bettungsmaterials (W/mK) – nachfolgend auch WLF genannt – wird maßgeblich auch von dessen Verdichtung bestimmt. Der Wärmetransport findet hauptsächlich in der mineralischen Festphase statt. Die höchsten TRD werden erzielt, wenn ungleichförmige Sieblinien vorliegen (Fullerfunktion). Schwach schluffige/schwach lehmige Sande sind mit ca. 15 - 20 Masse-% Feinanteil am besten verdichtbar. Diese Böden sind dann quasi selbstverdichtend und man erreicht beim erdfeuchten Einbau TRD von > 1,85 (g/cm³), während bei reinen Sanden zumeist weniger als 1,7 (g/cm³) erzielt werden.

In dem Kap. 3 werden die durchgeführten Arbeiten bzgl. der Herstellung und des Einbaus des Bettungsmaterials dargestellt und im Hinblick auf eine Optimierung der Strombelastbarkeit einer 110 kV Trasse bewertet.

3 Durchgeführte Arbeiten bei der Herstellung und dem Einbau des Bettungsmaterials

Der Einbau des Bettungsmaterials aus vorhandenen Böden kann grundsätzlich wie folgt durchgeführt werden:

1. im Trassenverlauf vorhandene Böden sind als Bettungsmaterial geeignet und können als Bettungsmaterial verwendet werden
2. im Trassenverlauf vorhandene Böden sind als Bettungsmaterial zunächst nicht geeignet (z.B. zu hoher Tongehalt bis ca. 17 Masse%); durch Mischen mit sandigen Böden kann geeignetes Bettungsmaterial hergestellt werden (Sandbeimischung)
3. vorhandene Böden z.B. mit einem Tongehalt von > 17 Masse-% sind nicht als Bettungsmaterial geeignet (Bodenaustausch!)

Es ist eine sorgfältige Verdichtung zwischen den Schutzrohren und oberhalb der Schutzrohre erforderlich, um eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit zu erzielen (s. Bild 2).

Bild 2: Messung der Wärmeleitfähigkeit (Nadelsensor), Entnahme eines Stechzylinders und einer Bodenprobe zur Bestimmung der Trockenrohdichte, des Wassergehalts, der Körnung und der Wärmeleitfähigkeit im Labor

Um eine gute Verdichtung des Bettungsmaterials zwischen und neben den Schutzrohren sowie oberhalb der Schutzrohre zu erreichen, wird die folgende Vorgehensweise empfohlen:
Nachdem das geeignete, steinfreie Bettungsmaterial mit der Baggerschaufel bis auf OK Schutzrohre eingebaut worden ist, erfolgt ein 2-malige Verdichtung mit entsprechend kleinen Rüttelplatten zwischen und neben den Schutzrohren.

Durch die o.g. sorgfältige Verdichtung erfolgt die Verdichtung des Bettungsmaterials zunächst in vertikaler Richtung. Es ist auch davon auszugehen, dass durch die dynamische Verdichtung mit der kleinen Rüttelplatte in dem Bereich direkt neben den Leerrohren das Bettungsmaterial auch seitlich in den Zwickelbereich (Bereich seitlich UK Leerrohr oberhalb Grabensohle) gepresst wird.

Nach dem Verdichten zwischen und neben den Leerrohren wird das zuvor bis auf OK Leerrohre eingebaute Bettungsmaterial auf mehrere cm unterhalb OK Leerrohre „zusammengepresst“.

Es muss gewährleistet sein, dass die erforderliche Verdichtung spätestens nach diesem Arbeitsgang erreicht worden ist. Nach dem weiteren Aufbringen des Bettungsmaterials bis auf mindestens 35 - 40 cm oberhalb OK Leerrohre und dem anschließenden Verdichten mit der großen Rüttelplatte erfolgt keine weitere nennenswerte Verdichtung zwischen den Leerrohren – incl. Zwickelbereich. Das Bettungsmaterial „stützt“ sich über „Gewölbewirkung“ insb. bei

geringen lichten Weiten zwischen jeweils 2 Leerrohren ab und der Bereich darunter erfährt keine weitere Verdichtung.

Sofern der anstehende Boden aufgrund eines zu hohen Tonanteils bzw. zu hohen Sandanteils nicht geeignet ist, kann durch Mischen mit sandigen bzw. bindigen Böden geeignetes Bettungsmaterial hergestellt und dann eingebaut werden.

Die Bilder 3 und 4 zeigen die Herstellung eines geeigneten Bettungsmaterials mit Hilfe eines Trommelsiebs. Hier wurde aus dem anstehenden Boden mit einem Tonanteil in dem Bereich von 9 - 12 Masse% durch das Mischen mit einem Sandboden in dem Verhältnis von 1:1 das Bettungsmaterial hergestellt.

Bei der Planung des Mischungsverhältnisses ist zu beachten, dass insb. bei höheren Tonanteilen das Überkorn nicht nur aus den abgesiebten Steinen, sondern auch zu einem beträchtlichen Anteil aus kleineren und größeren „Tonkugeln“ besteht.

Sofern der anstehende Boden aufgrund eines zu hohen Tonanteils nicht geeignet ist, ist ein Bodenaustausch erforderlich.

Bild 3: Hergestelltes Bettungsmaterial; im Hintergrund abgetrenntes Überkorn

Bild 4: Abgetrenntes Überkorn bei der Herstellung des Bettungsmaterials

Bild 6 zeigt die Auswertung zur Messung der Wärmeleitfähigkeit eines Bettungsmaterials.

Zum besseren Verständnis zeigt Bild 5 vorab eine Prinzipskizze des Versuchsaufbaus zur Messung der Wärmeleitfähigkeit WLF.

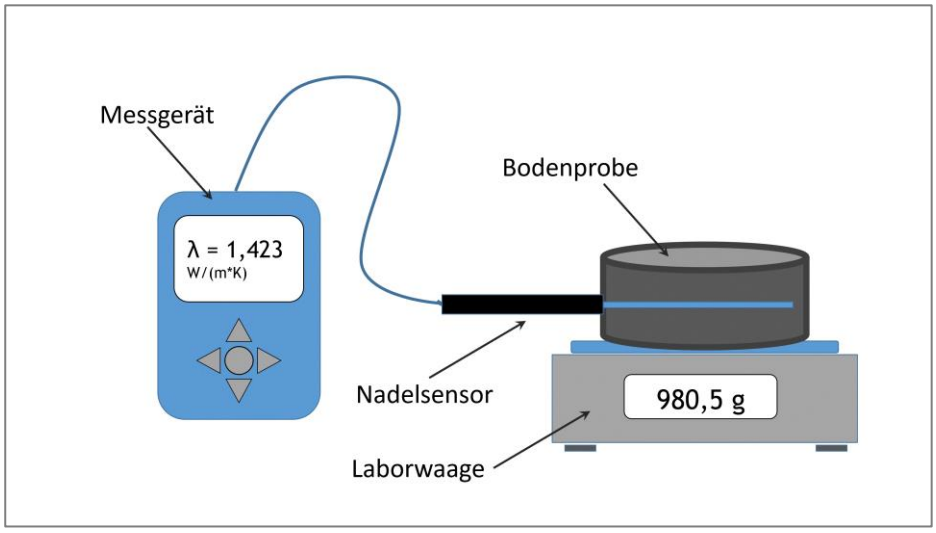
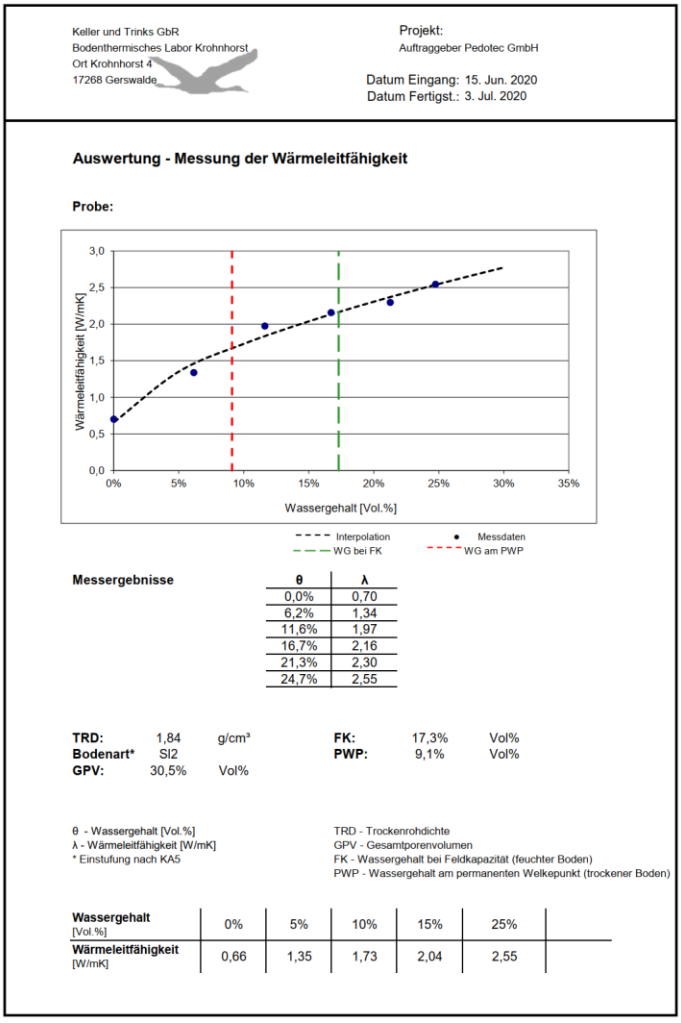


Bild 5: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus zur Messung der Wärmeleitfähigkeit

Die Probe wurde in einem Zylinder (425 cm^3) mit der vorgegebenen Trockenrohdichte eingebaut. Anschließend erfolgte die Aufsättigung der Probe bis zur Wassersättigung; danach die Austrocknung auf verschiedene Wassergehalte der Probe bei Raumtemperatur. Abschließend erfolgte die vollständige Austrocknung im Trockenschrank (Wassergehalt = 0 Vol%). Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte mit einem Nadelsensor.



Keller und Trinks GbR
Bodenthermisches Labor Krohnhorst
Ort Krohnhorst 4
17268 Gerswalde

Projekt:
Auftraggeber Pedotec GmbH

Datum Eingang: 15. Jun. 2020
Datum Fertigst.: 3. Jul. 2020

Auswertung - Messung der Wärmeleitfähigkeit

Probe:

Messergebnisse

θ	λ
0,0%	0,70
6,2%	1,34
11,6%	1,97
16,7%	2,16
21,3%	2,30
24,7%	2,55

TRD: 1,84 g/cm³ **FK:** 17,3% Vol%
Bodenart* Sl2 **PWP:** 9,1% Vol%
GPV: 30,5% Vol%

θ - Wassergehalt [Vol.%]
λ - Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
* Einstufung nach KA5

TRD - Trockenrohdichte
GPV - Gesamtporenvolumen
FK - Wassergehalt bei Feldkapazität (feuchter Boden)
PWP - Wassergehalt am permanenten Welkepunkt (trockener Boden)

Wassergehalt [Vol.%]	0%	5%	10%	15%	25%	
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,66	1,35	1,73	2,04	2,55	

Bild 6: Auswerteprotokoll zur Bestimmung der wassergehaltsabhängigen Wärmeleitfähigkeit eines Bettungsmaterials

Rot markiert sind die Wärmeleitfähigkeiten bei den o.g. Werten des PWP und grün markiert die Werte bei der FK.

Anhand der in Bild 6 dargestellten Werte einer Probe wird exemplarisch erläutert, wie die wasser- und dichteabhängige WLF für die Probe mit dem im Rahmen der Dissertation von Trinks [3] entwickelten Cable Earth Verfahren bestimmt wird.

Die gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit sind bei einer Trockenrohdichte TRD = 1,84 g/cm^3 in Bild 6 als blaue Punkte eingetragen. Die gestrichelte Linie zeigt die mit einem Modell berechneten WLF, um einen kontinuierlichen Verlauf der WLF von vollkommen ausgetrocknet bis wassergesättigt abbilden zu können.

Der rote Strich in Bild 6 entspricht dem gemessenen Wert des permanenten Welkepunkts. Der Schnittpunkt mit der gestrichelten Linie entspricht der so ermittelten Wärmeleitfähigkeit beim PWP.

In gleicher Weise wurde mit dem Wassergehalt und mit der Wärmeleitfähigkeit bei Feldkapazität verfahren (grüner Strich in Bild 6).

Als wesentliches Ergebnis in Bezug auf eine Erhöhung der Strombelastbarkeit von 110 kV und 380 kV Kabeln ist festzustellen, dass ein Bettungsmaterial aus vorhandenen bzw. durch Mischen hergestellten schwach schluffigen/schwach lehmigen Böden auch im trockenen Zustand eine hohe bis sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist.

Über die Optimierung der Strombelastbarkeit einer 110 kV Trasse wurde bereits in [4] berichtet.

Aktuell werden für diese Trasse einerseits die Ergebnisse des Monitorings mittels Lichtwellenleiter (LWL) mit Bezug zu den Untersuchungen bei der Herstellung und dem Einbau des Bettungsmaterials detailliert ausgewertet. Darüberhinaus wird in Kürze aufbauend auf [5] ein weiteres Monitoring an repräsentativen Trassenabschnitten mittels Thermo- und Feuchtefühler installiert.

Nach derzeitigem Kenntnisstand (Messungen mittels LWL und Berechnungen der Leitertemperaturen mit dem Cable Earth Modell) ist davon auszugehen, dass aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Bettungsmaterials die im Rahmen der Planung angenommene Bemessungsstromlast (s.a. [4]) deutlich erhöht werden kann, da auch unter diesen Bedingungen die Leitergrenztemperaturen deutlich unterschritten werden.

4 Zusammenfassung

Für die aktuell und zukünftig vermehrt zu bauenden Erdkabel ist im Hinblick auf eine Erhöhung der Strombelastbarkeit ein Bettungsmaterial aus schwach schluffigen/schwach lehmigen Böden von wesentlicher Bedeutung.

Es wurden zunächst die grundsätzlichen bodenkundlichen/bodenmechanischen Zusammenhänge bzgl. der Wechselwirkung Boden/Kabel bzw. Boden/Schutzrohr insb. unter Berücksichtigung einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit des Bettungsmaterials dargestellt und bewertet.

Im Anschluss daran erfolgte die Darstellung und Bewertung der Untersuchungen zur Herstellung und dem Einbau des Bettungsmaterials, die u.a. im Zusammenhang mit dem Bau eines 110-kV Kabels durchgeführt worden sind.

Als wesentliches Ergebnis in Bezug auf eine Erhöhung der Strombelastbarkeit von 110 kV und 380 kV Kabeln ist festzustellen, dass ein Bettungsmaterial aus vorhandenen bzw. durch Mischen hergestellten schwach schluffigen/schwach lehmigen Böden auch im trockenen Zustand eine hohe bis sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist.

Es wurde auf die aktuellen und zukünftigen Untersuchungen (Messungen mittels LWL, Installation von Thermo- und Feuchtefühlern und Berechnungen der Leitertemperaturen mit dem Cable Earth Modell) hingewiesen.

5 Literatur

[1] Ad-hoc AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover 2005

[2] ASTM (2000): Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. ASTM 5334-00

[3] Trinks, S. (2010): Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel. Bodenökologie und Bodengenese, 42. Technische Universität Berlin, Dissertation

[4] Markwardt, Trinks, Wessolek: Optimierung der Strombelastbarkeit von 110-kV-Kabeln Wechselwirkung Boden und Kabel, FNN-Fachkongress Netztechnik 6.-7. Dezember 2017

[5] Trüby, P: Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen, Gutachten im Auftrag der Amprion GmbH, 2014, https://www.amprion.net/Dokumente/Dialog/Downloads/Studien/Erdkabel/anlage_23_-_gutachten_terra_planta.pdf, Zugriff am 05.11.2019

Autoren:

Dr.-Ing. Norbert Markwardt
pedotec GmbH, Berlin

Tel.: 030 4361762
E-Mail:
n.markwardt@pedotec.de
Internet:
www.pedotec.de

Dr.-Ing. Steffen Trinks
Keller & Trinks GbR,
Bodenthermisches Labor
Krohnhorst

Tel.: 01636282417
E-Mail:
steffen.trinks@mail.de