

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie

Informationen  
aus den  
Bund/Länder-  
Arbeitsgruppen  
der Staatlichen  
Geologischen Dienste

---

Informationen aus den Bund/Länderarbeitsgruppen  
der Staatlichen Geologischen Dienste

PERSONENKREIS GEOTHERMIE  
über die ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie

**Ergebnisse des  
Methoden- und Messgerätevergleichs  
„Wärmeleitfähigkeitsmessungen“  
der Staatlichen Geologischen Dienste**

Hof, im Januar 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	9
<b>2. Zweck und Zielsetzung des Methoden- und Messgerätevergleichs</b> .....	9
<b>3. Messgeräte im Methodenvergleich</b> .....	10
3.1. Optical-Scanning Messmethode.....	10
3.1.1. Messmethode.....	10
3.1.2. TCS-Messgerät.....	11
3.2. Linien-Quellen-Theorie.....	13
3.2.1. Messmethode.....	13
3.2.2. Messgeräte mit Voll- und Halbraumsonden .....	15
3.2.2.1. TK 04 Messgerät mit Voll- und Halbraumsonden.....	15
3.2.2.2. KD2-Pro Messgerät mit Vollraumsonden.....	16
3.2.2.3. SolidTherm Messgerät mit Vollraumsonden .....	17
3.2.2.4. LfU TM Messgerät mit Vollraumsonden.....	19
<b>4. Vorbereitung und Durchführung des Methodenvergleichs</b> .....	21
4.1. Teilnehmer des Methodenvergleichs .....	21
4.2. Konzeption des Methodenvergleichs .....	21
4.3. Probenkörper im Methodenvergleich .....	24
4.4. Durchführung der Messungen mit TCS-Messgerät .....	25
4.5. Durchführung der Messungen mit Messgeräten mit Vollraumsonden.....	27
4.5.1. Durchführung der Messungen mit dem TK 04 Messgerät .....	27
4.5.2. Durchführung der Messungen mit dem KD2-Pro Messgerät.....	28
4.5.3. Durchführung der Messungen mit dem SolidTherm Messgerät.....	30
4.5.4. Durchführung der Messungen mit dem LfU TM Messgerät .....	31
4.6. Wassersättigung der Probenkörper.....	32
4.7. Messprotokolle.....	33
<b>5. Auswertung der Messergebnisse</b> .....	33
<b>6. Ergebnisse des Methodenvergleichs</b> .....	36
6.1. Messergebnisse der TCS-Messgeräte .....	39
6.1.1. Vergleich der TCS-Messgeräte .....	41
6.1.2. Reproduzierbarkeit der TCS-Messwerte.....	41
6.1.3. Vergleich der TCS-Messmodi.....	42
6.1.4. Einfluss der Standards beim TCS-Messgerät .....	43
6.1.5. Einfluss der Oberflächengeometrie eines Probenkörpers.....	45
6.2. Einfluss des Sättigungsgrades auf die Messergebnisse.....	46
6.3. Einfluss der Raumtemperatur und Luftfeuchte auf Messergebnisse .....	47
6.4. Vergleich der Messergebnisse der Referenzprobenkörper und der laborspezifischen Probenkörper – laborspezifische Effekte .....	48
6.5. Messergebnisse der Messgeräte mit Voll- und Halbraumsonden.....	49
6.5.1. Messergebnisse mit den Messgeräten mit Vollraumraumsonde .....	51
6.5.2. Messergebnisse mit den KD2-Pro Messgeräten .....	52
6.6. Vergleich der Messgeräte .....	55
<b>7. Zusammenfassung und Empfehlungen</b> .....	59
<b>8. Literatur</b> .....	63
<b>ANHANG</b> .....	65

<b>1. Referenzprobenkörper – TCS-Messgerät</b> .....	65
1.1 PE-Körper (Quader) - Referenzkörper .....	65
1.2 PE-Körper (Zylinder) – flache Seite - Referenzkörper .....	66
1.3 PE-Körper (Zylinder) – gekrümmte Seite - Referenzkörper .....	67
1.4 Glaskörper - Referenzkörper .....	68
1.5 Tonstein - Referenzkörper.....	69
1.6 Anhydrit – flache Seite - Referenzkörper.....	70
1.7 Anhydrit – gekrümmte Seite - Referenzkörper.....	71
1.8 Basalt - Referenzkörper.....	72
1.9 Kalkstein – Referenzkörper.....	73
1.10 Glimmerschiefer – alle Messergebnisse - Referenzkörper.....	74
1.11 Glimmerschiefer – Seite 1 - Referenzkörper.....	75
1.12 Glimmerschiefer – Seite 2 - Referenzkörper.....	76
1.13 Glimmerschiefer – Seite 3 - Referenzkörper.....	77
1.14 Flaserkalk - Referenzkörper .....	78
1.15 Redwitzit - Referenzkörper .....	79
1.16 Tonschiefer - Referenzkörper.....	80
1.17 Tonschiefer – Referenzkörper Messungen auf Seite 1- 3 .....	81
1.18 Diabas – Referenzkörper .....	82
1.19 Rhät-Sandstein – trocken - Referenzkörper.....	83
1.20 Rhät-Sandstein – gesättigt - Referenzkörper.....	84
1.21 Buntsandstein – trocken - Referenzkörper.....	85
1.22 Buntsandstein – gesättigt - Referenzkörper.....	86
<b>2. Laborspezifische Probenkörper – TCS-Messgerät</b> .....	87
2.1 Glimmerschiefer – alle Messwerte - Laborspezifische Probenkörper .....	87
2.2 Glimmerschiefer – Seite 1 - Laborspezifische Probenkörper .....	88
2.3 Glimmerschiefer – Seite 2 - Laborspezifische Probenkörper .....	89
2.4 Glimmerschiefer – Seite 3 - Laborspezifische Probenkörper .....	90
2.5 Flaserkalk – Laborspezifische Probenkörper .....	91
2.6 Redwitzit – Laborspezifische Probenkörper .....	92
2.7 Tonschiefer – Laborspezifische Probenkörper .....	93
2.8 Tonschiefer – Messungen auf Seite 1-3 Laborspezifische Probenkörper .....	94
2.9 Diabas – Laborspezifische Probenkörper.....	95
2.10 Rhät-Sandstein – trocken – Laborspezifische Probenkörper .....	96
2.11 Rhät-Sandstein – gesättigt – Laborspezifische Probenkörper .....	97
2.12 Buntsandstein – trocken – Laborspezifische Probenkörper .....	98
2.13 Buntsandstein – gesättigt – Laborspezifische Probenkörper .....	99
<b>3. Referenz- und laborspezifische Probenkörper – Messgeräte mit Vollraumsonden</b> .....	100
3.1 PE-Zylinder .....	100
3.2 Anhydrit .....	101
3.3 Anhydrit – Messgerät KD2-Pro - Vollraumsonde SH-1 .....	102
3.4 Anhydrit – Messgerät KD2-Pro - Vollraumsonde TR-1.....	103
3.5 Rhät-Sandstein - trocken.....	104
3.6 Rhät-Sandstein – gesättigt.....	105
3.7 Buntsandstein - trocken .....	106
3.8 Buntsandstein - gesättigt.....	107

3.9 Geschiebemergel B26 .....	108
3.10 Geschiebemergel B27 .....	109
3.11 Geschiebemergel BU 1 .....	110
3.12 Klei .....	111
3.13 Löss .....	112
3.14 Ton.....	113
3.15 Quarzsand - trocken.....	114
3.16 Quarzsand - gesättigt.....	116
3.17 Glasperlen .....	118
<b>4. Vergleich Messgeräte .....</b>	<b>119</b>
4.1 PE-Zylinder.....	119
4.2 Buntsandstein - trocken .....	120
<b>5. Vergleich Anisotrop.....</b>	<b>121</b>
5.1. Tonschiefer.....	121
5.2. Glimmerschiefer.....	122
<b>6. Beschreibung Probenkörper .....</b>	<b>123</b>
6.1 PE Körper – quadratisch.....	123
6.2 PE Körper - zylindrisch.....	124
6.3 Glaskörper .....	125
6.4 Tonstein .....	126
6.5 Anhydrit.....	127
6.6. Basalt .....	128
6.7 Kalkstein .....	129
6.8 Glimmerschiefer .....	130
6.9 Flaserkalk .....	131
6.10 Tonalit (Redwitzit).....	133
6.11 Tonschiefer.....	134
6.12 Diabas .....	135
6.13 Rhätsandstein (Sandstein RoL).....	136
6.14 Buntsandstein (Sandstein BS) .....	137
6.15 Geschiebemergel B26.....	138
6.16 Geschiebemergel B27 .....	139
6.17 Geschiebemergel BU 1 .....	140
6.18 Klei.....	141
6.19 Löss.....	142
6.20 Ton.....	143
6.21 Quarzsand.....	144
6.22 Glasperlen .....	145
<b>7. Messprotokolle .....</b>	<b>147</b>
7.1 TCS – Messprotokoll.....	147
7.2 Sonden - Messprotokoll.....	149

## Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Schematischer Aufbau des TCS-Messgerätes .....	11
Abbildung 2: TCS-Messgerät.....	12
Abbildung 3: SolidTherm Messgerät mit Vollraumsonde.....	19
Abbildung 4: LfU TM Messgerät mit Vollraumsonden.....	20
Abbildung 5: Ablaufschema des Methodenvergleichs .....	22
Abbildung 6: Proben im ringförmigen Verfahren.....	23
Abbildung 7: Proben im sternförmigen Verfahren.....	23
Abbildung 8: Konzeption der Messungen mit dem TCS-Messgerät.....	26
Abbildung 9: Konzeption der Messungen mit der KD2-Pro Messgerät.....	29
Abbildung 10: Einbringen der Bohrlöcher für die Vollraumsonde des Solid Therm Messgerätes.....	31
Abbildung 11: LfU TM Messgerät.....	32
Abbildung 12: Erklärung der Boxplot-Darstellungen.....	34
Abbildung 13: Beispielhafte Erklärung der Pareto-Diagramm-Darstellung.....	35
Abbildung 14: Beispielhafte Erklärung der Subgroup-Plot-Darstellung .....	36
Abbildung 15: Übersicht über alle Messwerte für die unterschiedlichen Probenkörper (trocken, lagerfeucht, gesättigt) .....	38
Abbildung 16: Messwerte der unterschiedlichen Probenkörper ermittelt mit den TCS- Messgeräten .....	40
Abbildung 17: Vergleich zwischen den 3 Messreihen der Referenzprobenkörper Messwerte der TCS-Messgeräte - alle Messungen mit angepassten Standards .....	42
Abbildung 18: Subgroup-Plot - Vergleich der mittleren Abweichung der Wärmeleitfähigkeitswerte zwischen TD/TC- und TC-Modi.....	43
Abbildung 19: Einfluss des Standards auf Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte am Beispiel des Standards 3,91. Subgroup-Plot der relativen Abweichung der Wärmeleitfähigkeitswerte zwischen angepassten und weniger geeigneten Standard. ....	44
Abbildung 20: Vergleich der Wärmeleitfähigkeitswerte bei Verwendung verschiedener Standardpaare am Beispiel des PE-Quaders .....	45
Abbildung 21: Vergleich der Medianwerte an gekrümmter und flacher Oberfläche.....	46
Abbildung 22: Box-Plots der TCS- Messwerte für die getrockneten und gesättigten Probenkörper (keine Sortierung Ref- / Lab-Körper).....	47
Abbildung 23: Übersicht und Vergleich der TCS-Messungen von lagerfeuchten, trockenen und gesättigten Referenz-Probenkörpern mit den laborspezifischen Probenkörpern.....	48
Abbildung 24: Messwerte für die Probenkörper nach der Linien-Quellen-Theorie Methode .....	51
Abbildung 25: Pareto-Diagramm – Häufigkeitsverteilung der geräteeigene Fehlerangabe der KD2-Pro Messwerte [%-Häufigkeit = Teilmenge / Gesamtmenge * 100].....	53
Abbildung 26: Vergleich der mittleren Standardabweichungen und Varianzen der unterschiedlichen Messgeräte .....	55

<b>Abbildung 27: Relative mittlere Abweichung vom Wärmeleitfähigkeitsmittelwerten aller Materialien [in %] bei Einsatz unterschiedlicher Messgeräte (TCS/ Sonden) und Standards bzw. Sondentypen.....</b>	<b>56</b>
<b>Abbildung 28: Vergleich der Messergebnisse unterschiedlicher Messgeräte am Beispiel des PE-Zylinders. ....</b>	<b>57</b>
<b>Abbildung 29: Vergleich der Messergebnisse der unterschiedlichen Messgeräte am Beispiel des Buntsandsteins.....</b>	<b>58</b>
<b>Abbildung 31: Übersicht über einige Proben im Ringversuch "Wärmeleitfähigkeiten" der SGD (Foto: LfU BY) .....</b>	<b>123</b>
<b>Abbildung 32: Foto PE-Körper – quadratisch (Probenkörper Nr. 1) (Foto: LGB-RP) .....</b>	<b>124</b>
<b>Abbildung 33: Foto PE-Körper – zylindrisch (Probenkörper Nr. 2) (Foto: LGB-RP).....</b>	<b>125</b>
<b>Abbildung 34: Foto Glaskörper (Probenkörper Nr. 3) (Foto: LGB-RP) .....</b>	<b>126</b>
<b>Abbildung 35: Foto Tonstein (Probenkörper Nr. 4) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>127</b>
<b>Abbildung 36: Foto Anhydrit (Probenkörper Nr. 5) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>128</b>
<b>Abbildung 37: Foto Basalt (Probenkörper Nr. 6) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>129</b>
<b>Abbildung 38: Foto Kalkstein (Probenkörper Nr. 7) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>130</b>
<b>Abbildung 39: Foto Glimmerschiefer (Probenkörper Nr. 8) (Foto-LGB-RP).....</b>	<b>131</b>
<b>Abbildung 40: Foto Flaserkalk (Probenkörper Nr. 9) (Foto-LGB-RP).....</b>	<b>132</b>
<b>Abbildung 41: Foto Tonalit (Redwitzit) (Probenkörper Nr. 10) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>133</b>
<b>Abbildung 42: Foto Tonschiefer (Probenkörper Nr. 11) (Foto-LGB-RP).....</b>	<b>134</b>
<b>Abbildung 43: Foto Diabas (Probenkörper Nr. 12) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>135</b>
<b>Abbildung 44: Foto Rhätsandstein (Probenkörper 13) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>136</b>
<b>Abbildung 45: Foto Buntsandstein (Probenkörper Nr. 14) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>137</b>
<b>Abbildung 46: Foto Geschiebemergel B26 (Probenkörper Nr. 15) (Foto-LGB-RP, LfU-BY) .....</b>	<b>138</b>
<b>Abbildung 47: Geschiebemergel B27 (Probenkörper Nr. 16) (Foto-LGB-RP, LfU-BY).....</b>	<b>139</b>
<b>Abbildung 48: Foto Geschiebemergel BU 1 (Probenkörper Nr. 17) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>140</b>
<b>Abbildung 49: Foto Klei (Probenkörper Nr. 18) (Foto-LGB-RP) .....</b>	<b>141</b>
<b>Abbildung 50: Foto Löss (Probenkörper Nr. 19) (Foto-LGB-RP).....</b>	<b>142</b>
<b>Abbildung 51: Foto Ton (Probenkörper Nr. 20) (Foto LGB-RP).....</b>	<b>143</b>
<b>Abbildung 52: Foto Quarzsand (Probenkörper Nr. 21) (Foto-LGB-RP).....</b>	<b>145</b>
<b>Abbildung 53: Foto Glasperlen (Probenkörper Nr. 22) (Foto-LGB-RP).....</b>	<b>146</b>
<b>Abbildung 54: Vorlage des TCS Messprotokolls – Beschreibung der Probenart; Probenaufbereitung, verwendete Standards und Wärmeleitfähigkeit des laboreigenen Referenz-/Eichkörpers. ....</b>	<b>147</b>

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1: Technische Spezifikationen des TCS-Messgerätes.....</b>	<b>13</b>
<b>Tabelle 2: Technische Spezifikationen des TK 04 Messgerätes .....</b>	<b>16</b>
<b>Tabelle 3: Technische Spezifikationen des KD2-Pro Messgerätes mit unterschiedlichen Vollraumsonden .....</b>	<b>17</b>
<b>Tabelle 4: Technische Spezifikationen des SolidTherm Messgerätes (Herstellerangaben) .....</b>	<b>19</b>
<b>Tabelle 5: Technische Spezifikationen des LfU TM Messgerätes .....</b>	<b>20</b>
<b>Tabelle 6: Teilnehmer am Methodenvergleich Wärmeleitfähigkeitsmessungen der SGD..</b>	<b>21</b>
<b>Tabelle 7: Materialien und Probenkörper im Methodenvergleich .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabelle 8: Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Messgeräten und Zustand der Probenkörper.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabelle 9 Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Teilnehmer und Zustand des Probenmaterials. ....</b>	<b>50</b>
<b>Tabelle 10: Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Messgerät, Sondentyp und Zustand des Probenmaterials .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabelle 11: Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Vollraumsondentypen der KD2-Pro Messgeräte.....</b>	<b>53</b>

## Abkürzungsverzeichnis

DK	= Direktorenkreis
HLS	= Halbraumsonde
SGD	= Staatliche Geologische Dienste
TCS	= Thermal-Conductivity-Scanner
VLS	= Vollraumsonde
WLF	= Wärmeleitfähigkeit

## Abkürzungen der Probenkörper

_l	= lagerfeucht
_s	= gesättigt
_t	= trocken
An	= Anhydrit
Ba	= Basalt
BS	= Buntsandstein
Di	= Diabas
Fst	= Flaserkalkstein
Gk	= Glaskörper
GM	= Geschiebemergel

GP = Glasperlen  
GS = Glimmerschiefer  
Kst = Kalkstein  
PE\_Q = Polyethylen Quader  
PE\_Z = Polyethylen Zylinder  
QS = Quarzsand  
Ref = Referenzprobenkörper  
Rw = Redwitzit  
Sst = Rhät-Sandstein  
TS = Tonschiefer  
Tst = Tonstein



## 1. Einleitung

Der Personenkreis (PK) Geothermie hat über die ad-hoc-AG Geologie nach dem Beschluss des Bund-Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) und des Direktorenkreises (DK) auf der gemeinsamen Sitzung am 13./14. September 2011 in Naumburg den Auftrag zur Erstellung eines Statusberichtes zu den Wärmeleitfähigkeitsmessungen der Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) und zur Vorbereitung und Durchführung eines Ringversuchs zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Messungen von Wärmeleitfähigkeiten und der Charakterisierung der Messwertstrebungen in den SGD erhalten. Die ad-hoc-AG Geologie übernimmt die formale Aufsicht über das Projektmanagement. Zur Herbstsitzung 2012 des DK und BLA-GEO wurde vom PK Geothermie ein Statusbericht zu den Wärmeleitfähigkeitsmessungen in den SGD und im LIAG vorgelegt. Nachfolgend wurde mit der Vorbereitung des Ringversuches begonnen und ein Bericht zur Durchführung des Ringversuches zur Herbstsitzung 2013 des DK und BLA-GEO erstellt. Die Durchführung des Ringversuches erfolgte Ende 2013 bis Mitte 2014. Die Ergebnisse des Ringversuches werden in diesem weiteren Bericht zusammengefasst und ausgewertet.

## 2. Zweck und Zielsetzung des Methoden- und Messgerätevergleichs

Der Statusbericht zu den Wärmeleitfähigkeitsmessungen in den SGD und im LIAG hat ergeben, dass unterschiedliche Messmethoden, Messgeräte und Probenaufbereitungsverfahren in den verschiedenen SGD und im LIAG Anwendung finden. Die Messmethoden und Messgeräte sind nicht normiert oder standardisiert.

Nach DIN 38402 Teil 41 (1984-5) sind Ringversuche geeignet, quantitative Aussagen über die Zuverlässigkeit oder Präzision von Analyseverfahren zu gewinnen. Die Präzision ist gemäß DIN ISO 5725 definiert als „Ausmaß der gegenseitigen Annäherung zwischen unabhängigen Ermittlungsergebnissen, die unter festgelegten Bedingungen gewonnen sind.“

Die Abfrage der Situation der Wärmeleitfähigkeitsmessung in den SGD und im LIAG hat ergeben, dass zwei verschiedene Messmethoden (Optical-Scanning und Linien-Quellentheorie) zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten zur Anwendung kommen. Basierend auf diesen Messmethoden sind fünf unterschiedliche Messgeräte im Einsatz.

Besonderen Einfluss auf die Größenordnung der Wärmeleitfähigkeit hat der Wassergehalt. Trockene Materialien weisen niedrigere Wärmeleitfähigkeiten, gesättigte Materialien in der Regel höhere Wärmeleitfähigkeiten auf. Die Einstellung des Wassergehaltes in den Proben erfolgt in den Laboratorien der SGD und im LIAG nach verschiedenen Verfahren.

Die angeführten Faktoren können zu unterschiedlichen Messwerten führen und müssen im Rahmen des Ringversuches erfasst werden. Hinzu kommen allgemeine Unsicherheiten durch,

- das ausführende Personal,
- die Probenaufbereitung,
- die Kalibrierung der Geräte,
- die Umgebung (Temperatur, Luftbewegungen, etc.),
- die Anisotropie von Materialien,

- die Messdurchführung,
- die Auswertung,
- die statistischen Verfahren für die Auswertung.

Das Prinzip eines Ringversuches besteht darin, dass identische Proben von mehreren Laboratorien unabhängig voneinander nach einheitlichen, standardisierten und normierten Messmethoden analysiert werden. Im Idealfall werden Messergebnisse in der gleichen Größenordnung erzielt und eine Vergleichbarkeit der Messwerte ist gegeben.

Im Rahmen des Ringversuches der SGD und des LIAG stehen keine normierten Messgeräte und Messmethoden zur Verfügung. Die Rahmenbedingungen zur Durchführung des Ringversuches wurden für den Ringversuch definiert, ohne im Vorfeld abschätzen zu können, in wie weit dies Auswirkungen auf die Messmethode, die Durchführung der Messungen und die Messergebnisse hat. Deshalb haben die Untersuchungen im Rahmen dieses Versuches eher den Charakter eines Methoden- und Messgerätevergleichs.

### **3. Messgeräte im Methodenvergleich**

Insgesamt sind fünf verschiedene Messgeräte zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei den teilnehmenden Laboratorien im Einsatz. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten von Festgesteinen findet überwiegend der Thermal Conductivity Scanner (TCS) der Firma Lippmann und Rauen GbR nach der Messmethode Optical-Scanning Verwendung. Vier unterschiedliche Messgeräte mit Vollraumsonden werden zur Zeit bei den SGD und dem LIAG betrieben, die in der Regel für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinen geeignet sind. Für die im Ringversuch beteiligten Messgeräte mit Vollraumsonden stellt die angewendete Messmethode der Linien-Quellen-Theorie die Grundlage dar. Die Geräte unterscheiden sich in der Konstruktion und Dimensionierung der Vollraumsonde, die in die Probe eingestochen wird. Die Dimension der Vollraumsonde gilt es bei der Durchführung des Methodenvergleiches zu berücksichtigen und erfordert eine entsprechende Aufbereitung der Probenkörper, insbesondere der Festgesteinsproben. Für das beim LIAG betriebene Messgerät TK04 stehen zusätzlich zu der Vollraumsonde zwei Halbraumsonden zur Verfügung: Eine Standard-Halbraumsonde und eine Mini-Halbraumsonde. Die angewendete Messmethode für das Messgerät mit Halbraumsonden ist die Linien-Quellen-Theorie.

#### **3.1. Optical-Scanning Messmethode**

##### **3.1.1. Messmethode**

Die Grundlagen für die Optical-Scanning-Messmethode wurden von Prof. Y. Popov entwickelt (Popov, 1983, Popov et al., 1983, Popov et al., 1985, Popov, 1995). Die Messung erfolgt mit einer fokussierten, mobilen und kontinuierlich arbeitenden Wärmequelle, die zusammen mit zwei Infrarot-Temperatursensoren einen ebenen oder zylindrischen Probenkörper abfährt. Die Wärmequelle und die Temperatursensoren bewegen sich mit gleicher relativer Geschwindigkeit und mit gleichem Abstand zueinander entlang der Probenkörper (siehe Abbildung 1).

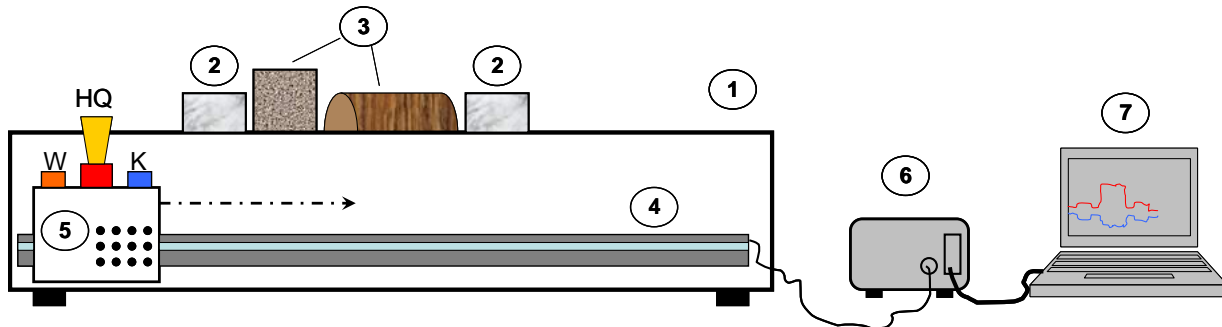
Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  werden zwei Standards mit bekannten Wärmeleitfähigkeiten im Bereich der Wärmeleitfähigkeit der Probenkörper mit gemessen. Mit Hilfe der Temperatursensoren erfolgt die Messung der Temperaturdifferenz  $\Theta$  zwischen kaltem und aufgeheiztem Zustand. Der Vergleich zwischen der durch die Wärmequelle erhöhten Temperaturen der Standards  $\Theta_R$  mit den erhöhten Temperaturen von einer oder mehreren Proben mit unbekannter Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 1) ergibt die Wärmeleitfähigkeit. Popov et al. (1999) beschreibt den maximalen Temperaturanstieg durch die Beziehung:

$$\Theta = \frac{Q}{2\pi\chi\lambda}$$

mit:  $\Theta$  : Temperaturdifferenz [°C bzw. K]  
 $X$  : Entfernung zwischen Wärmequelle und Temperatursensor [m]  
 $\lambda$  : Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $Q$  : Heizleistung der Wärmequelle [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

Das Verhältnis von  $\Theta$  und  $\Theta_R$  wird dabei durch die gemessenen elektrischen Spannungen  $U$  und  $U_R$  bestimmt, die sich proportional verhalten:

$$\lambda = \lambda_R * \left( \frac{\Theta_R}{\Theta} \right) = \lambda R * \left( \frac{U_R}{U} \right)$$



**Abbildung 1: Schematischer Aufbau des TCS-Messgerätes**

mit folgenden Teilen: **1** Messplattform zum Platzieren von Standards und Gesteinsproben; **2** Standards; **3** Gesteinsprobenkörper; **4** Elektro-mechanischer Scanner mit Schrittmotor; **5** Optische Einheit mit Heizquelle (HQ) und zwei Infrarotsensoren für die kontaktlose Messung der Temperaturen vor (Sensor K) und nach der Erwärmung (Sensor W); **6** Elektronische Steuereinheit und Transformator; **7** Rechner mit Auswertesoftware (Abbildung in Anlehnung an Lotz, 2004).

### 3.1.2. TCS-Messgerät

Mit dem in Abbildung 1 und 2 dargestellten Thermal-Conductivity-Scanner (TCS)-Messgerät wird nach der Optical-Scanning-Messmethode die Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Das TCS-

Messgerät zeichnet sich im Vergleich zu den anderen Messgeräten mit Vollraum- oder Halbraumsonde durch eine einfache Bedienung und eine hochaufgelöste, kontaktlose, schnelle Messung im Wärmeleitfähigkeitsbereich von 0,2 bis 25 W/(m\*K) aus. Mit dem TCS-Messgerät können bis zu 60 Proben pro Stunde gemessen werden. Die Software zur Vorbereitung, Steuerung und Auswertung der Messung ist intuitiv und einfach zu bedienen. Für die Messung ist keine aufwendige Probenpräparation notwendig. Um Reflektionen auf der Probenoberfläche und eine gleichmäßige Wärmeadsorption zu gewährleisten muss auf der Probenoberfläche entlang des Messprofils ein Streifen mit schwarzer Farbe aufgetragen werden. Nach Herstellerangaben ist die Probengeometrie für das Erzielen belastbarer Messergebnisse nicht relevant. Die Messung auf Bohrkern-Mantelflächen sollte möglich sein. Im Methodenvergleich und durch eingehende Untersuchungen im Vorfeld des Methodenvergleiches erwies sich dies allerdings als problematisch. Mit dem TCS-Messgerät erfolgt die Erfassung von Profilen der thermischen Eigenschaften entlang der Proben. Diese Spezifikationen ermöglichen die Messung von anisotropen Proben. Damit ist die Messung und Bestimmung von Mittelwerten und lokalen Werten der thermischen Eigenschaften (Wärme- und Temperaturleitfähigkeit) sowie von Inhomogenitätsfaktoren möglich. Die Berechnung von Mittelwerten und Qualitätsfaktoren wird automatisch vorgenommen.



**Abbildung 2: TCS-Messgerät**

Durch Umbau mit einem Zusatzmodul ist mit dem TCS-Messgerät neben der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit die Messung der Temperaturleitfähigkeit möglich. Der Umbau sieht den Austausch des hinteren Temperaturfühlers (siehe Abbildung 1 Bauteil W) für die Detektion der Temperaturen nach Aufheizung vor. Stattdessen kommen zwei senkrecht zur Bewegungsrichtung der optischen Einheit nebeneinander platzierte Temperaturfühler zum Einsatz. Außerdem werden zwei Standards mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten für die Messung verwendet. Die Messgenauigkeit im Modus „Temperaturleitfähigkeitsmessung“ ist im Vergleich zur Messung im Modus „Wärmeleitfähigkeitsmessung“ geringer (vergl. Tabelle 1).

Hersteller des TCS-Messgerätes ist die Firma Lippmann & Rauen GbR (<http://www.tcscan.de/>). TCS-Messgeräte sind beim LGB-RP, HLU, GD-NRW; LIAG und LfU-BY im Einsatz.

**Tabelle 1: Technische Spezifikationen des TCS-Messgerätes**

<b>Messbereich Wärmeleitfähigkeit</b>	0,2 bis 25 W/(m*K)
<b>Messgenauigkeit Wärmeleitfähigkeit</b>	3 %
<b>Messbereich Temperaturleitfähigkeit</b>	0,6 bis 3,0 * 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
<b>Messgenauigkeit Temperaturleitfähigkeit</b>	5 %
<b>Produktivität</b>	bis zu 60 Proben pro Stunde (abhängig von den Probendimensionen)
<b>Probendimensionen</b>	mindestens 30 mm Länge (mit beliebiger Geometrie). Maximale Scan-Länge nach Kundenwunsch, z.B. 500 mm
<b>Probenvorbereitung</b>	weder Sägen noch Polieren notwendig, Messung auf ebenen und Zylinder-Mantelflächen möglich, z.B. Bohrkerne
<b>Steuerung</b>	Notebook oder Desktop PC mit Windows, Software mit Online-Hilfefunktionen und intuitiver Benutzeroberfläche. Läuft auf allen Windows Versionen ab WIN95

### 3.2. Linien-Quellen-Theorie

#### 3.2.1. Messmethode

Das Messprinzip der Linienquelle und die mathematische Formulierung der Linienquelle im Vollraum wird in verschiedenen Veröffentlichungen beschrieben (siehe u.a. Blackwell, 1954; Jaeger, 1956; Erbas, 2001). Die grundlegende Annahme für das Messprinzip ist ein idealer thermischer Leiter (Linienquelle) mit unendlicher Länge und näherungsweise verschwindend geringem Durchmesser, der in einem homogenen isotropen Vollraum (Probenkörper) liegt. Dieser thermische Leiter wird mit einer konstanten Wärmemenge pro Längeneinheit und Zeiteinheit beschickt. Erbas (2001) beschreibt in Analogie zu Blackwell (1954) und Kristiansen (1982) die Versuchsanordnung mathematisch wie folgt:

$$T(\underline{r}, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E^1\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right)$$

mit:	$T(\underline{r}, t)$	:	Temperatur an der Stelle $\underline{r}$ , zurzeit $t$ [°C bzw. K]
	$q$	:	konstante Heizleistung pro Längeneinheit [W * m <sup>-1</sup> ]
	$\lambda = \kappa\rho c$	:	Wärmeleitfähigkeit des Vollraums [W * m <sup>-1</sup> * K <sup>-1</sup> ]
	$\kappa$	:	Temperaturleitfähigkeit [m * s <sup>-2</sup> ]
	$\rho$	:	Dichte [kg * m <sup>-3</sup> ]
	$c$	:	spezifische Wärme der Quelle [J * kg <sup>-1</sup> * K <sup>-1</sup> ]
	$t$	:	Zeit [s]

$r = |\underline{r}|$  : radialer Abstand von der Quelle [m]  
 $E^1(x) = Ei$  , es ist  $Ei(x)$  die Integralexponentialfunktion:

$$Ei(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^u}{u} du, x > 0$$

Durch die Reihenentwicklung von  $E^1(r^2/(4\kappa t))$  erhält man:

$$T(\underline{r}, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) + \frac{r^2}{4\kappa t} - \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right)^n}{n!} \right]$$

mit:  $\gamma$  : Euler'sche Konstante (0,5772156649...)

Vernachlässigt man die Summanden höherer Ordnung für sehr große Werte von t, d.h. kleine Werte von  $r^2/(4\kappa t)$ , so ergibt sich als Näherung für große Heizzeiten:

$$T(\underline{r}, t) \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ -\ln\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) - \gamma \right] = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln(t) + \ln\left(\frac{4\kappa}{r^2}\right) - \lambda \right], \left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) \ll 1$$

Das Temperaturverhalten der Quelle selbst ergibt sich für große Zeiten ( $t \rightarrow \infty$ ) zu (Kristiansen, 1982):

$$T_Q(t) \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + const.$$

Das Prinzip der Linienquelle mit einem unendlichen thermischen Leiter ist ein idealisierter Ansatz, der in der Praxis nicht abzubilden ist. Deshalb wird eine näherungsweise realer Beschreibung der Messapparatur mit einer zylindrischen Quelle erreicht, die Erbas (2001) ausführlich erläutert.

Mittlerweile existieren verschiedene Messgeräte mit Vollraumsonden, die nach dem Prinzip der Linienquelle bzw. zylindrischen Quelle funktionieren. Der Aufbau der Messapparatur und der Messvorgang sind bei jedem Gerät ähnlich. Die Vollraumsonde besteht aus einem dünnen Metallröhrchen, in dem sich ein Heizdraht und ein Temperatursensor oder mehrere Temperatursensoren befinden. Für die Durchführung der Messung wird die Vollraumsonde in das Probenmaterial eingebracht. Bei Lockermaterialien kann dies durch vorsichtiges Einstechen erfolgen. Für die Untersuchung von festen Materialien muss eine Bohrung erstellt werden. Deren Durchmesser muss dabei geringfügig größer sein als der des Messensors. Der Messvorgang wird mit einer kontinuierlichen Aufheizung des Messensors gestartet. Während der Heizdauer erfolgt die Messung der Temperaturänderung im Probenkörper. Trägt man die Temperatur gegen den Logarithmus der Heizdauer auf, so ist der Bereich, in dem die anfänglichen Kontaktwiderstände überwunden sind, an der Linearität der Kurvensteigung erkennbar. Unten stehende Gleichung bildet die Grundlage zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Probe aus der verwendeten Heizleistung (Q) und der inversen Steigung in diesem Zeitbereich (Jaeger, 1956).

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} * \frac{t_2 - t_1}{T(t_2) - T(t_1)}$$

Mit:	$\lambda$	:	Wärmeleitfähigkeit des Vollraums [W * m <sup>-1</sup> * K <sup>-1</sup> ]
	$Q$	:	Heizleistung der Wärmequelle [W m <sup>-1</sup> ]
	$T(t_1)$	:	Temperatur zum Zeitpunkt $t_1$ [°C bzw. K]
	$T(t_2)$	:	Temperatur zum Zeitpunkt $t_2$ [°C bzw. K]

Mit der Halbraumlinienquelle wird auf einer gesägten und möglichst ebenen und planparallelen Oberfläche der Probe gemessen. Die Linienquelle ist dabei fest in einem Plexiglasblock eingeklebt, so dass sie an der Grenze zweier Halbräume liegt. Die Wärmeleitfähigkeit von Plexiglas beträgt annähernd null W/(m\*K) (Plexiglas = 0,16 W/(m\*K)), so dass fast die gesamte produzierte Wärme von dem anderen Halbraum, dem Probenkörper, aufgenommen wird. Für die Auswertung nach oben stehender Gleichung verdoppelt sich dabei die anzusetzende Heizleistung. Die Richtung der bestimmten Wärmeleitfähigkeit ist bei der Linienquelle nicht eindeutig zuzuordnen. Vielmehr ist das Ergebnis der Messung ein skalarer Wert, der eine Integration der Wärmeleitfähigkeit aus der Ebene senkrecht zur Quellenachse am Ort der Temperaturerfassung darstellt. Die Eindringtiefe des Temperaturfeldes der Halbraumlinienquelle soll dabei für gesteinstypische Wärmeleitfähigkeiten bei 2 bis 3 cm liegen (vgl. Erbas, 1985 in Pribnow, 1994).

### 3.2.2. Messgeräte mit Voll- und Halbraumsonden



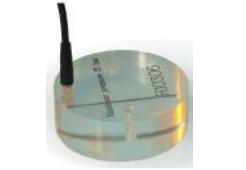

#### 3.2.2.1. TK 04 Messgerät mit Voll- und Halbraumsonden

Das TK 04 Messgerät der Herstellerfirma Teka (<http://www.te-ka.de>) ist mit einer Vollraumsonde (VLS) mit 2 mm Durchmesser und 65 mm Länge, einer Vollraumsonde für den Geländeeinsatz mit 6 mm Durchmesser und 300 mm Länge, einer Halbraumsonden (HLS) mit 88 mm Durchmesser und 30 mm Höhe sowie einer Mini-Halbraumsonde mit 50 mm Durchmesser und 30 mm Höhe ausgerüstet. Das TK 04 Messgerät ist für die Messung der Wärmeleitfähigkeiten von Festkörpern wie Bodenproben, Gesteine, Plastik, Glas, Keramik oder Holz sowie Pulver, Lockermaterialien und viskosen Flüssigkeiten im Wärmeleitfähigkeitsbereich von 0,1 bis 10 W/(m\*K) geeignet. Das TK04 Messgerät verwendet ein absolutes Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Es sind daher keine Kalibrier- oder Referenzmessungen erforderlich. Zur gelegentlichen Verifizierung der Messgenauigkeit verfügt das TK 04 Messgerät über einen Labor-Standard. Weitere Referenz-Materialien sind als Zubehör erhältlich. Die Auswertesoftware ist umfangreich und intuitiv bedienbar.

Der Auswertung liegt ein analytisches Verfahren in Anlehnung an die theoretische Lösung der Wärmeleitungsgleichung für eine konstant beheizte, allseits vom Probenmaterial umgebene Linienquelle zu Grunde. Eine Näherungslösung dieser Gleichung wird an die gemessene Temperaturkurve gefittet und die Wärmeleitfähigkeit aus den Fit-Koeffizienten berechnet. Während das herkömmliche Näherungsverfahren den Temperaturverlauf in halblogarithmischer Darstellung als linear betrachtet, berücksichtigt die für das TK 04 Messgerät entwickelte Näherung höherer Ordnung die charakteristische nichtlineare Kurvenform realer

Temperaturkurven. Damit erreicht das Verfahren eine sehr gute Genauigkeit von  $\pm 2\%$ . Das TK 04 Messgerät mit Voll- und Halbraumsonde wird ausschließlich am LIAG verwendet.

**Tabelle 2: Technische Spezifikationen des TK 04 Messgerätes**

				
Sensor	Standard-VLS	Feld-VLS	Standard-HLS	Mini-HLS
Messzeit	80 sec	120 sec	80 sec	60 sec
Wiederholungsmessungen	99	99	99	99
Messgenauigkeit	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 2\%$	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 5\%$	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 2\%$	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 5\%$
Messbereich	0,1 bis 10 W/(m*K)	0,6 bis 4 W/(m*K)	0,3 bis 10 W/(m*K)	0,3 bis 3 W/(m*K)
Nadelgeometrie	65 cm Nadellänge; 2 mm Durchmesser	300 mm Nadellänge; 6 mm Durchmesser	30 mm Höhe; 88 mm Durchmesser	30 mm Höhe; 50 mm Durchmesser
Proben-Dimension	mindestens 70 mm Länge, Durchmesser mindestens 30 mm			
Proben-vorbereitung	Um die Standard-VS (Vollraum-Laborsonde) in ein festes Probenmaterial einzubringen, ist eine lange schmale Bohrung (2 mm im Durchmesser, 65 mm lang) erforderlich. Bei weichen Materialien kann die Nadelsonde vorsichtig (ohne Kraftaufwand!) direkt in die Probe gesteckt werden			
Steuerung	Die Software des TK 04 Messgerätes läuft unter MS Windows, eine Mehrbenutzer-Lizenz für eine unbegrenzte Anzahl Arbeitsplätze ist im Lieferumfang enthalten. Die Module für Messung / Auswertung und Grafik / Qualitätskontrolle können unabhängig voneinander installiert und verwendet werden.			

### 3.2.2.2. KD2-Pro Messgerät mit Vollraumsonden





Das KD2-Pro Messgerät der Firma Decagon Devices (<http://www.decagon.com/>) verfügt über vier verschiedene Vollraumsonden mit spezifischen Einsatzbereichen (siehe Tabelle 3). Der bevorzugt für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten und Isoliermaterialien im Bereich von 0,2 bis 2 W/(m\*K) konstruierte Vollraumsensor KS-1 ist 60 mm lang und 1,3 mm im Durchmesser. Der Vollraumsensor KS-1 wird bei kurzer Heizdauer mit einer sehr geringen Wärmemenge im Verlauf der Messung beaufschlagt, was eine Beeinflussung der Messung durch starker thermischer Konvektion in Flüssigkeiten unterbindet. Deshalb ist der Sensor gemäß Herstellerangaben nur bedingt für granulare Materialien wie Böden, Sedimente oder Pulver geeignet. Mit der 100 mm langen und 2,4 mm im Durchmesser Vollraumsonde TR-1 ist nach Herstellerangabe die Messung von Bodenmaterial, Sedimenten und granularem Material bis hin zu leicht verfestigten Materialien möglich. Im Vergleich zur Sonde KS-1 weist die TR-1 Sonde einen geringeren Kontaktwiderstand bei gleichzeitig längerer Heizdauer auf. Der Messbereich liegt mit 0,2 bis 4 W/(m\*K) deutlich höher. Die dritte einfach Vollraumsonde RK-1 ist 60 mm lang und hat mit 3,9 mm einen vergleichsweise großen Durchmesser. Aufgrund der Geometrie und der Stabilität ist die Sonde vorwiegend für feste Materialien konzipiert. Für die Verwendung der RK-1 Sonde ist das Anfertigen eines Lochs im Probenmaterial erforderlich. Der



Messbereich von 0,2 bis 6 W/(m\*K) entspricht den Wärmeleitfähigkeiten fester Materialien beispielsweise von Festgesteinen. Die aus zwei parallel angeordneten 1,27 mm Durchmesser starken Edelstahlröhrchen bestehende Vollraumsonde SH-1 erlaubt neben der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Messbereich von 0,2 bis 2 W/(m\*K) die Messungen der Temperaturleitfähigkeit und Wärmekapazität.

Das KD2-Pro Messgerät wird von den Geologischen Diensten BSU; LGB RP; GDfB und LfU Bayern verwendet.

**Tabelle 3: Technische Spezifikationen des KD2-Pro Messgerätes mit unterschiedlichen Vollraumsonden**

				
Sensor	KS-1	TR-1	RK-1	SH-1
Messzeit	60 sec	5 min	10 min	2 min
Messgenauigkeit	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 5\%$ von 0,2 – 2 W/(m*K) $\pm 0,01$ W/(m*K) von 0,02 – 0,2 W/(m*K)	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 10\%$ von 0,2 – 4 W/(m*K) $\pm 0,02$ W/(m*K) von 0,1 – 0,2 W/(m*K)	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 10\%$ von 0,2 – 6 W/(m*K) $\pm 0,02$ W/(m*K) von 0,1 – 0,2 W/(m*K)	Wärmeleitfähigkeit: $\pm 10\%$ von 0,2 – 2 W/(m*K) $\pm 0,01$ W/(m*K) von 0,02 – 0,2 W/(m*K); Diffusivität: $\pm 0,01$ W/(m*K) von 0,02 bis 0,2 W/(m*K); Wärmekapazität: $\pm 10\%$ bei Wärmeleitfähigkeiten über 0,1 W/(m*K)
Messbereich	K: 0,02 bis 2 W/(m*K) R: 50 bis 5000 °C cm/W	K: 0,02 bis 2 W/(m*K) R: 25 bis 1000 °C cm/W	K: 0,1 bis 6 W/(m*K) R: 17 bis 1000 °C cm/W	K: 0,02 bis 2 W/(m*K) R: 50 bis 5000 °C cm/W; 0,1 bis 1 mm <sup>2</sup> /s Diffusivität; 0,5 bis 4 mJ/(m <sup>3</sup> *K)
Kabellänge	0,8 m	0,8 m	0,8 m	0,8 m
Einsatzbereich	-50 bis 150°C	-50 bis 150°C	-50 bis 150°C	-50 bis 150°C
Nadelgeometrie	6 cm Nadellänge; 1,27 mm Durchmesser	10 cm Nadellänge; 2,4 mm Durchmesser	6 cm Nadellänge; 3,9 mm Durchmesser	3 cm Nadellänge; 1,27 mm Durchmesser; 2 Nadeln

### 3.2.2.3. SolidTherm Messgerät mit Vollraumsonden

Das SolidTherm Messgerät wird vom GeoTec Büro Prof. Dr. Buntebarth, Technologiezentrum in Clausthal-Zellerfeld, hergestellt und ist für die Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit im Labor konzipiert. Es ist besonders geeignet, mittlere thermische

Leitfähigkeiten von inhomogenem Material (z. B Gesteinsproben) auf einer Länge von ca. 30 mm an der unteren Vollraumsondenspitze zu erfassen und ist speziell für die Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von inhomogenen Stoffen wie Gesteine oder Baustoffe einsetzbar.

Die Vollraumsonde besteht aus einer Messspitze mit einem Durchmesser von 5,0 mm und einer Länge von ca. 30 cm. Sie besteht aus einem dünnen Rohr mit 0,2 mm Wandstärke. Die unteren 40 mm enthalten den Temperatursensor und das Heizelement. Damit die Wärmeübertragung möglichst schnell und gleichmäßig auf dem gesamten Zylindermantel erfolgt und die Temperatur auf dem Zylindermantel gemittelt wird, besteht dieser untere Teil aus Silber.

Dieses Gerät wurde insbesondere für die Messung von inhomogenem grobkörnigen Material konzipiert, so dass die Temperaturmessung nicht punktförmig sein darf. Sie wird im untersten Teil des Sensors auf der Oberfläche des Zylinders von etwa 30 mm Länge und 5 mm Ø gemittelt. Wird eine bestimmte Spannung an die Heizung im Sensor angelegt, erwärmt sich dieser und gibt die Heizleistung an die Umgebung, d. h. an den Prüfkörper ab. Nach einiger Zeit ist ein stationärer Zustand erreicht, bei dem keine weitere Temperaturerhöhung am Sensor erfolgt. Bei diesem Gleichgewicht, bei dem die zugeführte Wärme aus der Heizung ( $Q_H$ ) gleich der in den Prüfkörper abgeführten Wärmemenge ist, stellt die Temperaturerhöhung im Sensor ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit dar:

$$Q_H dF dt = K \Delta T / \Delta r dF dt$$

$$K = Q_H \Delta r / \Delta T \quad (1)$$

Darin sind  $Q_H$  der Wärmefluss aus der Heizung,  $F$  die Fläche,  $t$  die Zeitdauer und  $r$  der Abstand von der Sondenmitte. Weil der Gradient  $\Delta T / \Delta r$  wegen der Randeffekte der Heizung auch von der Länge abhängt, ist die einfache Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit  $K$  nach Gleichung (1) nicht möglich. Sie wird über eine vereinfachte Funktion als Lösung der Wärmeleitungsgleichung ermittelt, die nicht für beliebige Temperaturerhöhungen und damit beliebig angewandte Leistungen gilt. Deshalb werden spezielle Bedingungen festgelegt, unter denen die Messung erfolgen soll. Die Temperaturerhöhung soll  $1,00 \pm 0,01$  Grad betragen und die Messdauer liegt bei jeweils 120 s, während der ein quasistationärer Zustand für Wärmeleitfähigkeiten zwischen 1 und  $6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  erreicht wird.

Wie schnell der stationäre Zustand der Wärmeleitung erreicht wird, hängt von der Temperaturleitfähigkeit ab, die direkt proportional zur Temperaturänderung ist:

$$\partial T / \partial t = \kappa \text{ div grad } T \quad (2)$$

Darin sind  $\kappa$  die Temperaturleitfähigkeit,  $T$  die Temperatur und  $t$  die Zeit. Gleichung (2) lässt sich analytisch unter den gegebenen Bedingungen nicht lösen, sondern wird numerisch mit Methoden der finiten Differenzen bearbeitet.

Die SolidTherm Vollraumsonde wird ausschließlich an der TLUG zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Locker- und Festgesteinsproben verwendet.



**Abbildung 3: SolidTherm Messgerät mit Vollraumsonde.**

**Tabelle 4: Technische Spezifikationen des SolidTherm Messgerätes (Herstellerangaben)**

<b>Messsensoren</b>	1 Nadelsonde mit 30 cm Länge und 5 mm Durchmesser
<b>Messbereich Wärmeleitfähigkeit</b>	Vollraum-Sonden: 1 bis 6 W/m*K
<b>Messgenauigkeit Wärmeleitfähigkeit</b>	Messgenauigkeit ca. $\pm 3\%$
<b>Produktivität</b>	Dauer einer Einzelmessung: 120 Sekunden (Zeit zum Temperaturausgleich zwischen den Messungen: 10 bis 15 Minuten)
<b>Proben-Dimensionen</b>	Prüfkörper: mindestens 10 cm x 10 cm x 10 cm
<b>Probenvorbereitung</b>	Bei festem Probenmaterial muss eine Bohrung mit 7 cm Länge und ca. 5,1 mm Durchmesser angefertigt werden. Bei Lockergesteinen wird die Sonde direkt in die Probe gesteckt.
<b>Steuerung</b>	Steuerungsprogramm unter MS-Windows; Ergebnisse werden als csv-Datei gespeichert und können in Tabellenkalkulationsprogrammen geöffnet werden.

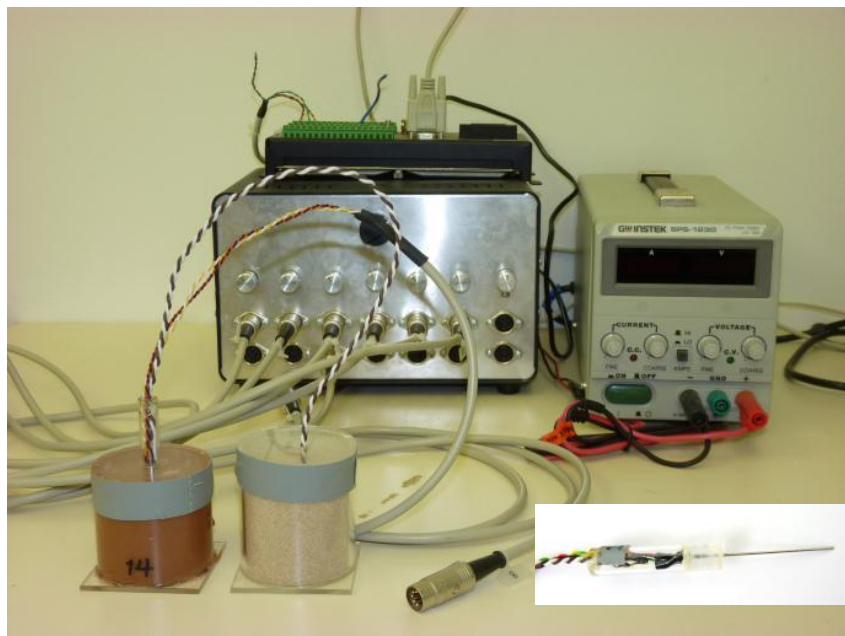
#### **3.2.2.4. LfU TM Messgerät mit Vollraumsonden**

Am LfU in Bayern wurde durch Dr. T. Momose (Tarnawski et al., 2009) ein Messgerät mit Vollraumsonden zur Messung der Wärmeleitfähigkeiten von Lockergesteinen und Böden konstruiert (Abbildung 4). Der Messbereich des LfU TM Messgerätes umfasst 0,1 bis 10 W/(m\*K). Das Messprinzip beruht auf einer empirischen Methode, die ein Fitting der

Messergebnisse an eine Referenzmessung erfordert. Dem Verfahren liegt keine analytische Lösung zugrunde, die ohne Vergleichsmessungen absolute Werte liefert. Die Konstruktion der Vollraumsonden umfasst ein 1 mm starkes Edelstahlröhrchen mit innenliegenden Heiz- und Messdrähten. Der Heizdraht ist ein hochleitender Konstantandraht, eine Legierung aus Kupfer, Nickel und Mangan. Die Temperaturmessung erfolgt punktuell mit einem Sensor. Insgesamt können 14 Vollraumsonden gleichzeitig betrieben werden, was den Probendurchsatz im Vergleich zu den anderen Messgeräten mit Vollraumsonden deutlich erhöht. Die Kalibrierungs- und Referenzmessung erfolgt an reinem Quarzsand und ist für jede Sonde separat durchzuführen.

**Tabelle 5: Technische Spezifikationen des LfU TM Messgerätes**

<b>Messsensoren</b>	14 Nadelsonden mit 5 cm Länge und 1 mm Durchmesser
<b>Messbereich</b> <b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Vollraum-Sonden: 0,1 bis 10 W/(m*K)
<b>Messgenauigkeit</b> <b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Messgenauigkeit ca. $\pm 5\%$ ; Fehlerberechnung über Bestimmtheitsmaß $R^2$ der Aufheiz- und Abkühlungstemperatur
<b>Produktivität</b>	Dauer einer Messung: 5 Minuten (Eine Messung umfasst viele Einzelmesswerte)
<b>Probendimensionen</b>	mindestens 60 mm Länge, Durchmesser mindestens 30 mm
<b>Probenvorbereitung</b>	Um die Vollraumsonde in ein festes Probenmaterial einzubringen, ist eine lange schmale Bohrung ( $> 1$ mm im Durchmesser, 60 mm lang) erforderlich. Bei weichen Materialien kann die Nadelsonde vorsichtig (ohne Kraftaufwand!) direkt in die Probe gesteckt werden. Das Probenmaterial wird in kleine Plexiglasbehälter eingefüllt.
<b>Steuerung</b>	Steuerungsprogramm unter MS-Windows; Ergebnisse werden als Textdatei gespeichert und können in MS-Excel dargestellt werden.



**Abbildung 4: LfU TM Messgerät mit Vollraumsonden.**

Die Stromstärken und Spannungssteuerung erfolgt über einen Labornetzgerätregler und einen Messgerätekontroller. Die Ansteuerung findet unter MS-Windows statt und die Messergebnisse werden via Textdatei in MS-Excel geladen.

Aufgrund der geringen Stabilität des nur 1 mm starken Edelstahl Röhrchens der Vollraumsonde ist das Messgerät bevorzugt für wenig verfestigte Materialien geeignet, die keine groben Komponenten enthalten.

## 4. Vorbereitung und Durchführung des Methodenvergleichs

### 4.1. Teilnehmer des Methodenvergleichs

Am Methodenvergleich haben das Landesamt für Umwelt – Geologischer Dienst in Bayern, der Geologische Dienst für Bremen, die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt in Hamburg, das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, der Geologische Dienst in Nordrhein-Westfalen, das Landesamt für Geologie und Bergbau in Rheinland-Pfalz, die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie und das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik in Hannover mit dem im jeweiligen Labor verfügbaren Messgeräten teilgenommen (siehe Tabelle 6).

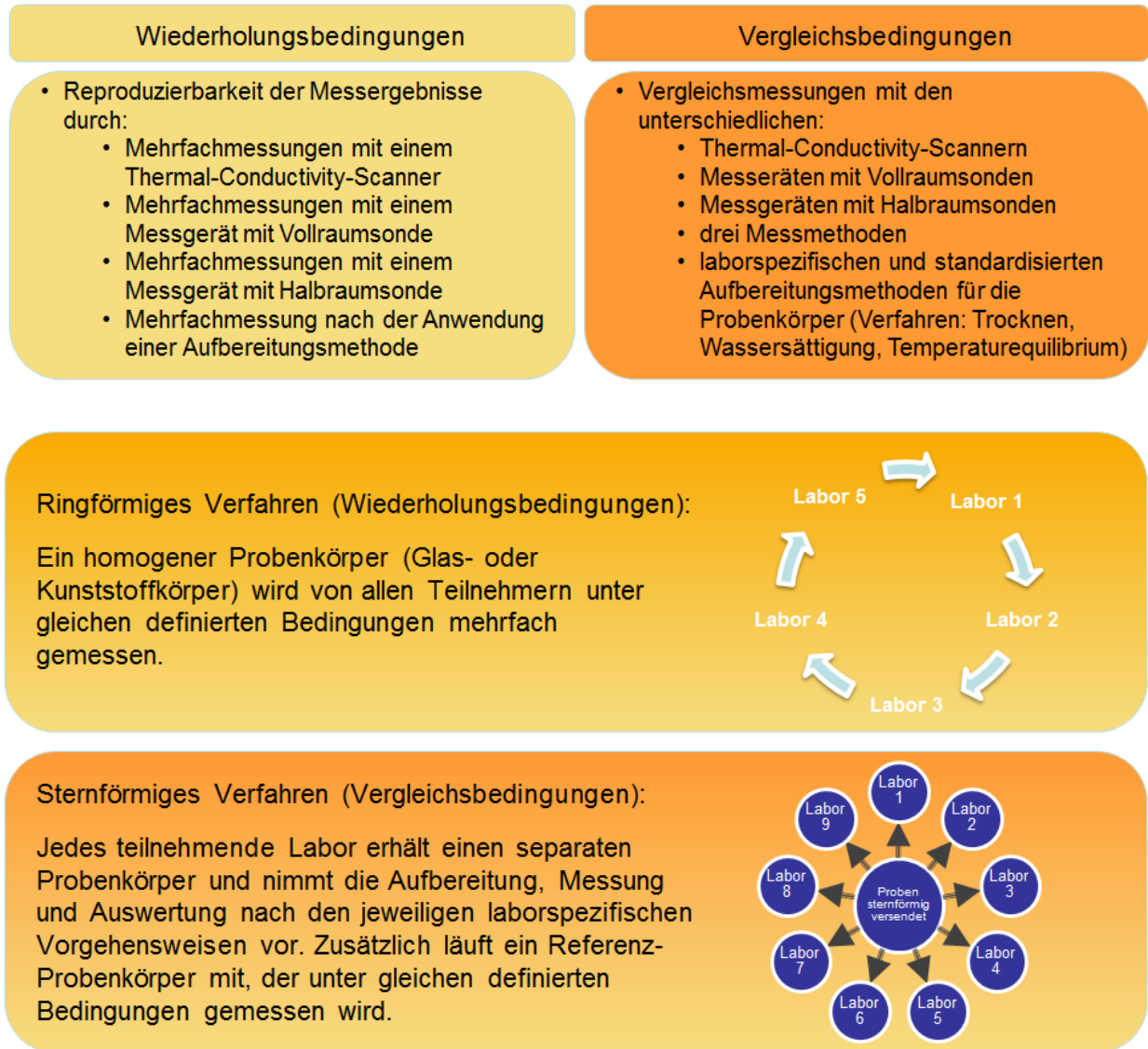
**Tabelle 6: Teilnehmer am Methodenvergleich Wärmeleitfähigkeitsmessungen der SGD**

Kürzel	Klartext	Bundesland	Messgerät
<b>1. LfU</b>	Landesamt für Umwelt	Bayern	TCS, LfU TM, KD2-Pro
<b>2. GfB</b>	Geologischer Dienst für Bremen	Bremen	KD2-Pro
<b>3. BSU</b>	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt	Hamburg	KD2-Pro
<b>4. HLUg</b>	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie	Hessen	TCS
<b>5. GD NRW</b>	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen	Nordrhein-Westfalen	TCS
<b>6. LGB RP</b>	Landesamt für Geologie und Bergbau	Rheinland-Pfalz	TCS, KD2-Pro
<b>7. TLUG</b>	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie	Thüringen	SolidTherm
<b>8. LIAG</b>	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik	Bund/Länder	TCS, TK 04

### 4.2. Konzeption des Methodenvergleichs

Im Statusbericht zu den Wärmeleitfähigkeitsmessungen (PK Geothermie 2012) wurden die unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren, Messgeräte und Messmethoden in den SGD und im LIAG erfasst und beschrieben. Nachfolgend wurde der Methodenvergleich auf diese unterschiedlichen Ausgangssituationen konzipiert.

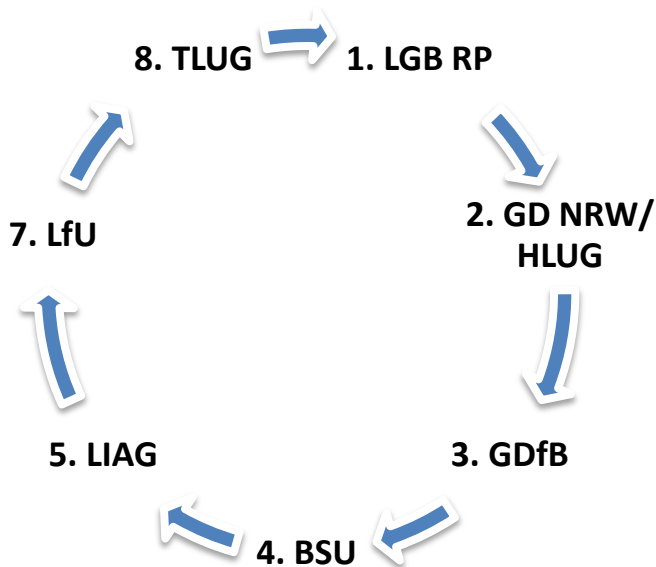
Der Methodenvergleich wird in ein „ringförmiges“ und ein „sternförmiges“ Verfahren aufgeteilt. Mit Hilfe des „ringförmigen“ Verfahrens werden Messgerät spezifische Unsicherheiten erfasst. Das zweite, „sternförmige“ Verfahren sieht die Untersuchung von Unsicherheiten und Abweichungen im Vergleich zwischen laborspezifischen Probenaufbereitungsverfahren, Messgeräten und Messmethoden vor.



**Abbildung 5: Ablaufschema des Methodenvergleichs**

Ringförmiges Verfahren (ringförmig versandte Proben)

Von jedem Probekörper, der im ringförmigen Verfahren den Methodenvergleich durchläuft, ist ein Exemplar vorhanden. Der erste Teilnehmer (LGB-RP) nimmt die Beschriftung und Anzeichnung des Messbereiches vor. Diese Probekörper werden nur lagerfeucht bzw. trocken gemessen. Die Trocknung erfolgt nach der Standard-Methode. Nach Abschluss der Messungen werden die Probekörper an den nächsten Teilnehmer weitergesendet.

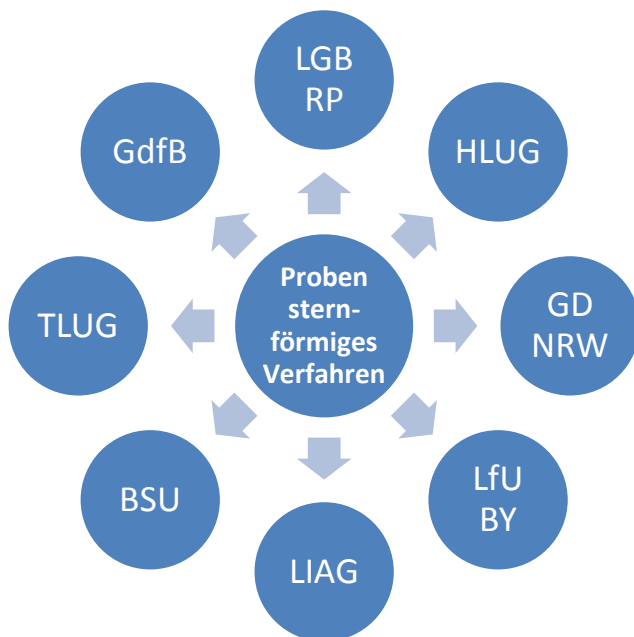


Lfd.-Nr.	Material
1	PE-Körper
2	PE-Körper
3	Glaskörper
4	Tonstein
5	Anhydrit
6	Basalt
7	Kalkstein
8	Glimmerschiefer
15	Geschiebemergel 26
16	Geschiebemergel 27
17	Geschiebemergel BU 1
18	Klei
20	Ton

**Abbildung 6: Proben im ringförmigen Verfahren.**

Sternförmiges Verfahren

Im sternförmigen Verfahren des Methodenvergleichs werden jedem teilnehmenden Labor ein „eigener – laborspezifischer“ Probenkörper und ein „ringförmig“ durchlaufender Referenz-Probenkörper zugesendet.



Lfd.-Nr.	Material
9	Flaserkalk (Devon)
10	Granit (Redwitzit)
11	Tonschiefer
12	Diabas (Devon)
13	Sandstein (RoL)
14	Sandstein (BS)
19	Löss
21	Quarzsand (BM)
22	Glasperlen

**Abbildung 7: Proben im sternförmigen Verfahren**

Die Anzeichnung des Messbereichs und die Vorbereitung für den „eigenen – laborspezifischen“ Probenkörper erfolgt durch die jeweiligen Teilnehmer. Gemessen werden die Proben abhängig von der Beschaffenheit des Probenkörpers im lagerfeuchten Zustand oder nach der Trocknung oder nochmals nach der Wassersättigung. Probenvorbereitung und Messung werden nach den spezifischen Verfahren im jeweiligen Labor vorgenommen.



Eine Probe in diesem „sternförmigen“ Verfahren dient als zusätzlich mitlaufender Referenz-Probenkörper. Beschriftung und Anzeichnung des Messbereiches erfolgt durch den ersten Teilnehmer LGB RP. Dieser Referenzkörper wird von allen Teilnehmern nach einer einheitlichen Methode getrocknet sowie Wasser gesättigt.

#### 4.3. Probenkörper im Methodenvergleich

Im Methodenvergleich sind 49 Probenkörper enthalten. Diese umfassen natürliche Gesteine, künstliche Materialien und Baustoffe. Die Auswahl erfolgte nach den geologischen und thermischen Eigenschaften im Hinblick auf die zu untersuchenden Fragestellungen.

In Tabelle 7 sind die im Methodenvergleich enthaltenen Probenkörper aufgelistet. In den Spalten „TCS“, „VLS“, und „HLS“ erfolgt eine Einstufung der Eignung der jeweiligen Probenkörper für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS), den Messgeräten mit Vollraumsonde (VLS) oder den Messgeräten, die eine Halbraumsonde (HLS) verwenden. In den Spalten „Stern“ und „Ring“ ist vermerkt, welches Verfahren die Probenkörper im Methodenvergleich durchlaufen.

**Tabelle 7: Materialien und Probenkörper im Methodenvergleich**

Lfd.-Nr.	Material	Qu	Form	TCS	VLS	HLS	Anzahl	Stern	Ring	Trocken (T), gesättigt (S), lagerfeucht (L)
1	PE-Körper	HE	Q 8x8x8 cm	x	x	x	1		X	L
2	PE-Körper	HE	H=14, Ø=13 cm	x	x	x	1		X	L
3	Glaskörper	HE	Q 5x5x5 cm	x	-	x	1		X	L
4	Tonstein	BY	halb Bohrkern; L=9 cm	x	-	x	1		X	L
5	Anhydrit	TH	H=12,5, Ø=13 cm	x	x	x	1		X	L
6	Basalt	RP	Q 10x10x10 cm	x	-	x	1		X	T
7	Kalkstein	RP	Q 10x10x10 cm	x	-	x	1		X	T
8	Glimmerschiefer	BY	Q 5,8x5,8x5,8 cm	x	-	x	1		X	T
9	Flaserkalk (Devon)	BY	Q 7x7x7 cm	x	-	x	5	X	X	T
10	Granit (Redwitzit)	BY	Q 7x7x7 cm	x	-	x	5	X	X	T
11	Tonschiefer	BY	Q 7x7x7 cm,	x	-	x	5	X	X	T
12	Diabas (Devon)	BY	Q 7x7x7 cm, Q10x10x10 cm	x	-	x	5	X	X	T
13	Sandstein (RoL)	BY	Q 10x10x10 cm	x	x	x	5	X	X	T + S
14	Sandstein (BS)	RP	Q 10x10x10 cm	x	x	x	5	X	X	T + S
15	Geschiebemergel 26	HH	Bohrkern	-	x	-	1		Y	L
16	Geschiebemergel 27	HH	Bohrkern	-	x	-	1		Y	L
17	Geschiebemergel BU 1	BE	Bohrkern	-	x	-	1		Y	L
18	Klei	HH	Bohrkern	-	x	-	1		Y	L
19	Löss	RP	Stechzylinder	-	x	x	2		Y	pF 2,5
20	Ton	RP	Stechzylinder	-	x	x	1		Y	pF 2,5
21	Quarzsand (BM)	BY	Inlinerrohre	-	x	x	2		Y	T + S
22	Glasperlen	HH	0,75-1,00 mm	-	x	x	2		Y	T + S

pF 2,5 = Einstellung des Wassergehaltes auf Feldkapazität.

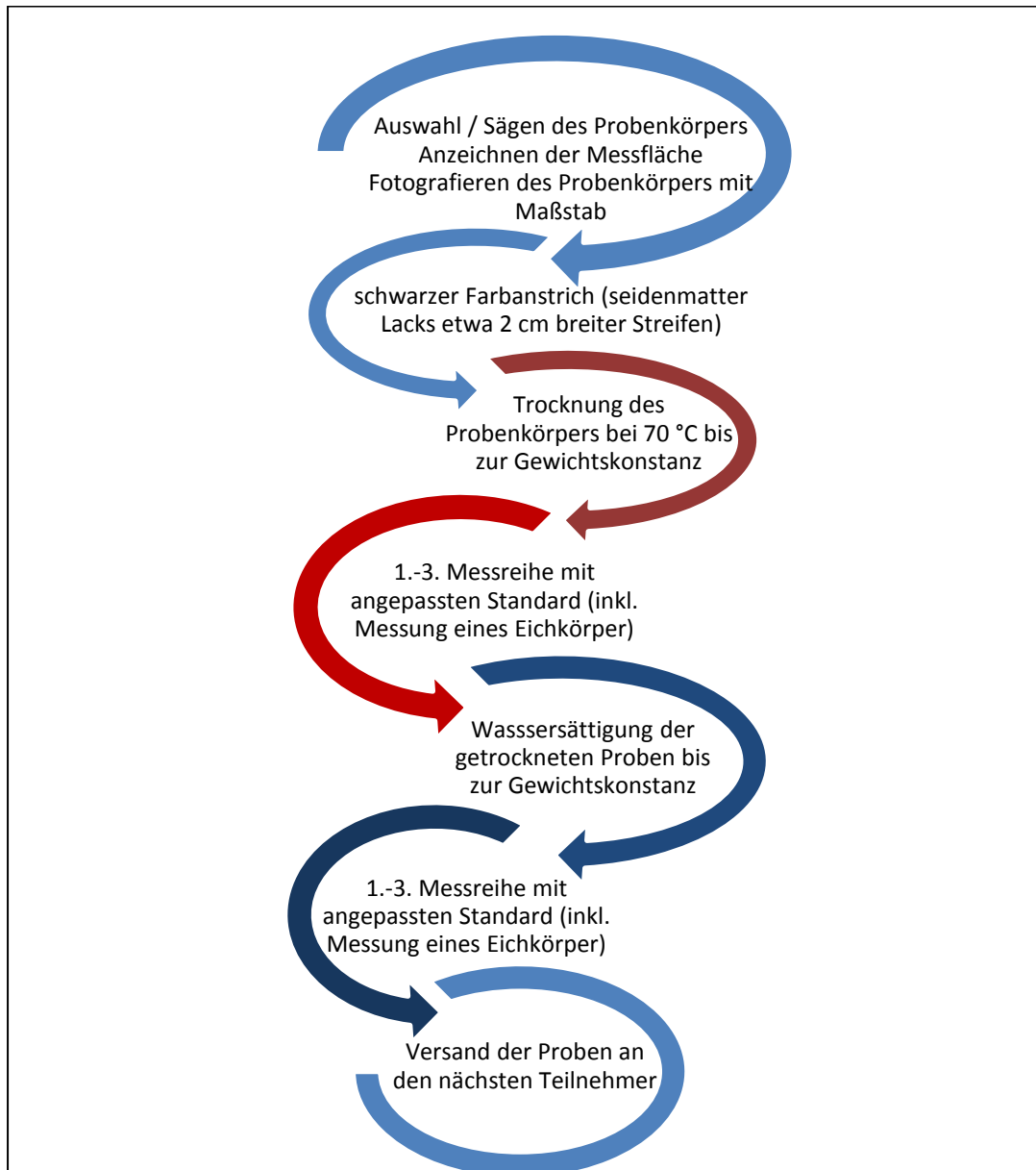


#### 4.4. Durchführung der Messungen mit TCS-Messgerät

Die Durchführung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem TCS-Messgerät erfolgt in jedem Labor ein wenig anders. Deshalb fand im Vorfeld des Methodenvergleichs eine Standardisierung der Durchführung statt. Im Verlauf des Methodenvergleichs und nach der Auswertung haben sich neue Erkenntnisse hinsichtlich der Anforderungen an die Durchführung ergeben.

Für den Methodenvergleich sollten die Messungen nach folgendem Ablauf vorgenommen werden:

- Auswahl bzw. Vorbereitung des Probenkörpers: Der Durchmesser und die Länge des Probenkörpers sollten mindestens 5 cm betragen. Das Probenmaterial muss fest sein. Material, das zum Absanden oder Zerfallen neigt, kann auf den Messtisch des TCS nicht aufgelegt werden und würde den Aufbereitungsprozess mit Trocknung und Wassersättigung nicht überstehen.
- Es empfiehlt sich, plane ebene Oberflächen zu messen. Deshalb sind Bohrkerne zuvor durchzusägen. Die Richtung der Sägefläche ist überwiegend parallel zur Bohrkernlängsachse, kann aber in Abhängigkeit zur Fragestellung senkrecht zur Bohrkernlängsachse, parallel zur Schieferung, Schichtung, zum Gefüge, o.ä. wählt werden.
- Die Probenkörper sollten zur Temperierung am Vortag der Messung in den Messraum gebracht werden.
- Im nächsten Schritt ist ein Fotografieren des unbehandelten Probenkörpers mit Maßstab vorgesehen.
- Danach erfolgt das gleichmäßige Auftragen eines schwarzen, nicht glänzenden (seidenmatten) Lacks (möglichst auf Wasserbasis) entlang der vorgesehenen Messstrecke. Die Breite des Farbaufstrichs sollte etwas breiter als die Öffnung des Sensorspalt im Messtisch sein (ca. 2 cm).
- Die Trocknung der Proben erfolgt für die Referenzkörper bei 70 C° im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz. Anschließend sollten die Probenkörper auf Raumtemperatur abkühlen.
- Die Auswahl der Standards ist entsprechend der zu erwartenden Wärmeleitfähigkeit der Probenkörper vorzunehmen. Zu Beginn jeder Messung wird der TCS kalibriert. In der Software findet sich unter Menüpunkt „Sensors“ die Funktion „adjust sensor“. Entsprechend den Hinweisen wird der Standard mit der höheren Wärmeleitfähigkeit auf den Temperatursensor für die Messung des angeregten Temperaturfeldes gelegt („sensor hot“). Nach dem Durchlaufen der Kalibrierung wird der Standard auf den Temperatursensor für den kalten Zustand gelegt („sensor cold“) und die Kalibrierung aktiviert.
- Anschließend werden die Standards auf dem Scanner am Beginn der Messstrecke und am Ende der gewählten Messstrecke derart positioniert, dass die schwarze Lackierung des Standards genau über dem Spalt im Messtisch liegt. Für die Ausrichtung über dem Spalt wird ein Spiegel verwendet.



**Abbildung 8: Konzeption der Messungen mit dem TCS-Messgerät.**

- Es ist vorteilhaft einen Referenzkörper bei jeder Messung oder nach einer gleichbleibenden Anzahl von Messungen aufzulegen und zu messen. Dabei können mögliche Messfehler festgestellt werden.
- Die Positionierung der Probenkörper und gegebenenfalls des Referenzkörpers wird mit dem schwarzen Streifen über dem Spalt im Messtisch mit Zuhilfenahme des Spiegels vorgenommen (in Analogie zu den Standards).
- Dann kann die Messung mit dem Befehl „Measure“ gestartet werden.
- Als Ergebnis der Messungen erhält man zwei Temperatur-Weg-Kurven mit mindestens 3 Signalen:
  - Signal 1 = Standard 1
  - Signal 2 = (Gesteins-)probe
  - Signal 3 = Standard 2

- Die blaue, untere Kurve wird von dem (kalten) Sensor vor der Wärmequelle, die rote Obere vom (warmen) Sensor hinter der Wärmequelle erzeugt. In Abhängigkeit der Anzahl der aufgelegten Proben- und Referenzkörpern werden entsprechend viele Signale erzeugt.
- Schwankungen im Signal der Gesteinsprobe zeigen eventuelle Inhomogenitäten in der Probe an (z.B. Mineraleinschlüsse mit deutlich höheren Wärmeleitfähigkeiten oder Risse, die deutlich geringere Signale erzeugen).
- Nach der Messung muss die Position der Standards und die der Proben über die grafische Abteilungsfunktion eingetragen werden. Im Kontextfeld für die Probe kann jede Messreihe für eine Probe unter einer eigenen Datei gespeichert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, unter „More details“ weitere Parameter zu speichern (Beschaffenheit der Probenoberfläche, Messrichtung, Wassergehalt, Bemerkungen).
- Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Probe wird ein auszuwertender Messbereich des Signals der Probe gewählt, welcher charakterisierend für seine Struktur ist. Dabei ist darauf zu achten, dass der Anfang und das Ende des Signals nicht verwendet wird, da hier sogenannte „Randeffekte“ (Peaks) auftreten können.
- Als Ergebnis erhält man Minimum, Mittelwert und Maximum der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sowie eine Standardabweichung und einen Homogenitätsfaktor.

#### **4.5. Durchführung der Messungen mit Messgeräten mit Vollraumsonden**

Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit mit der Vollraumsonde sind in Abhängigkeit der Dimension der Messsonde entsprechende Bohrungen in feste Materialien einzubringen. In die nicht verfestigten Materialien können die Sonden anschließend eingestochen werden. In den quaderförmigen Festgesteinen werden nach Möglichkeit Bohrungen auf drei senkrecht zu einander stehenden Probenkörperflächen eingebracht. Die Anfertigung der Bohrungen kann insbesondere für die geringen Durchmesser der Vollraumsonden des KD2 Pro Messgerätes und das WLF-Gerät in Bayern nur mit Spezialbohrern erfolgen.

##### **4.5.1. Durchführung der Messungen mit dem TK 04 Messgerät**

Im Folgenden wird die Probenvorbereitung für die Voll- und Halbraumsonde exemplarisch am TK 04 Messgerät der Firma TeKa beschrieben. Das Probenmaterial sollte am Tage vor der Messung ins Labor gebracht werden, damit die Temperatur der Probe sich an die Raumtemperatur im Labor angleichen kann.

Um die Vollraumsonde in ein festes Probenmaterial einzubringen, ist eine Bohrung von 2 mm im Durchmesser und 70 mm in der Länge erforderlich. Da der Durchmesser einer solchen Bohrung nie vollkommen konstant ist, kann für den Messvorgang ein Kontaktmittel verwendet werden, um einen guten Kontakt zwischen Sonde und Probe sicherzustellen. Bei weichen Materialien wird die Nadelsonde vorsichtig und ohne Kraftaufwand direkt in die Probe gesteckt. Ein Vorbohren und die Verwendung von einem Kontaktmittel entfallen. Der erforderliche Mindestdurchmesser der Proben beträgt ca. 30 mm, die Mindestlänge 75 mm. Für weiterführende Informationen siehe <http://www.te-ka.de/de/unternehmen/download.html>.

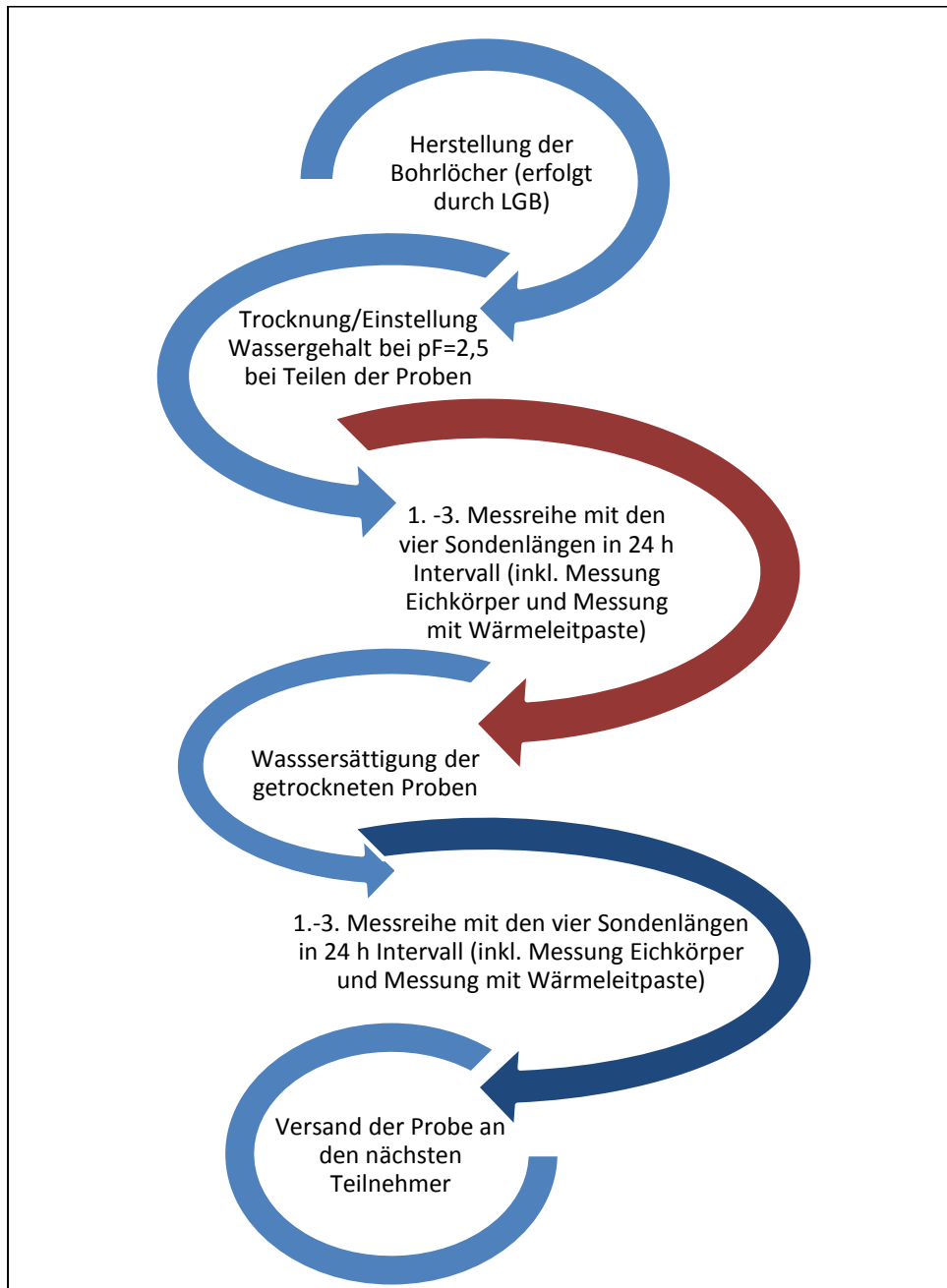
Für Messungen mit der Halbraumsonde wird eine ebene und glatte Fläche zum Aufsetzen der Sonde benötigt. Festmaterialien sollten gesägt und anschließend gegebenenfalls geschliffen werden. Die Firma TeKa empfiehlt die Körnung 400. Der Probendurchmesser sollte mindestens dem Durchmesser der Sonde entsprechen (88 mm für die Standard- und 50 mm für die Mini-Halbraumsonde). Die Mindest-Probendicke beträgt ca. 15 mm. Um einen guten Kontakt zwischen der Sonde und der Proben-Oberfläche zu erreichen, sollte ein Anpressdruck von ca. 5 bis 10 bar ausgeübt werden. Der Maximaldruck von 10 bar / 1,7 kN darf nicht überschritten werden, da dies die Sonde beschädigen würde. Ein Messplatz mit hydraulischer Handpumpe und Manometer ist als Zubehör zum TK04-Messgerät erhältlich. Falls die Ankopplung (Kontakt) zwischen Probe und Sonde nach dem Polieren noch nicht ausreichend ist, wird die Verwendung eines Kontaktmittels empfohlen. Für weiterführende Informationen siehe <http://www.teka.de/de/unternehmen/download.html>.

#### **4.5.2. Durchführung der Messungen mit dem KD2-Pro Messgerät**

Die Durchführung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem KD2-Pro Messgerät richtet sich weitgehend nach der Beschaffenheit des Probenmaterials und des verwendeten Sondentyps. Für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse fand in der Vorbereitung zum Methodenvergleich eine Standardisierung der Durchführung statt. Der Messablauf für die einzelnen Sondentypen wurde in Anlehnung an die Herstellerangaben konzipiert (Abbildung 9). Aus den Ergebnissen des Methodenvergleichs konnten jedoch weitere Erkenntnisse zur Durchführung der Messung mit dem KD2-Pro Messgerät gewonnen werden. Diese Empfehlungen sind dem Kapitel 8 zu entnehmen.

Für den Methodenvergleich sind die Messungen nach folgendem Ablauf vorzunehmen:

- In einem ersten Schritt werden die unbehandelten Probenkörper mit Maßstab durch das LGB fotografiert.
- Danach erfolgt die Erstellung der Bohrlöcher durch das LGB. Für die Doppelsonde SH-1 liegt dem Gerät eine Bohrschablone bei. Die Bohrungen haben nach Herstellerangaben einen Abstand von mindestens 15 mm zum Außenrand des Probenkörpers einzuhalten. Versuchsbedingt wird eine zusätzliche Bohrung für den Sondentyp TR1 zur Durchführung von Messungen mit Wärmeleitpaste erstellt.
- Dem Gerät liegen vier Messsonden mit unterschiedlichem Durchmesser, unterschiedlicher Länge, unterschiedlichem Messumfang sowie unterschiedlicher Messgenauigkeit bei (s. Kap. 3.2.3).
- Begonnen wird mit der Doppel-Nadel-Sonde SH-1. Anschließend werden die Messungen in Abhängigkeit von der Probenbeschaffenheit mit den Nadel-Sonden TR-1, KS-1 und RK-1 durchgeführt.
- Darüber hinaus werden vor jedem Messdurchgang der Luftdruck und die Lufttemperatur gemessen und notiert. Es ist darauf zu achten, dass sich die Temperatur der Nadel ausreichend an die Lufttemperatur angepasst hat (Empfehlung Hersteller: 15 bis 20 Minuten).



**Abbildung 9: Konzeption der Messungen mit der KD2-Pro Messgerät.**

- Zu Beginn jeder Messung ist der Messfühler mit seiner vollen Länge, mindestens aber zu Zweidrittel der Sondenlänge, in den Probenkörper einzuführen. Im Bedienungs Menü ist die Sondenart zu wählen.
- Eine Kalibrierung des Gerätes vor Messbeginn ist laut Herstellerangaben nicht notwendig. Vor der Durchführung eines Messdurchganges wird der Messfühler in den jeweils vorgesehenen, dem Gerät beiliegenden Eichkörper gesteckt. Damit lässt sich die Abweichung des gemessenen Wertes zu dem auf dem Eichkörper aufgedruckten Wert vergleichen.
- Anschließend wird durch eine Auswahl im Bedienungs Menü mit der eigentlichen Messung begonnen. Die Sonde heizt sich über ein definiertes Zeitintervall automatisch

mit einer bestimmten, auf die Sondenart abgestimmten Temperatur, auf und kühlt anschließend wieder ab.

- Die Messdauer variiert je nach Sondenart zwischen 1 und 10 Minuten.
- Bei jeder Messung werden folgende Parameter bestimmt:
  - Wärmeleitfähigkeit  $K$  [ $W/(m \cdot K)$ ]
  - Spezifische Wärmekapazität  $C$  [ $M \cdot J/(m^3 \cdot K)$ ]
  - Temperaturleitfähigkeit  $D$  [ $mm^2/s$ ]
  - Thermischer Widerstand  $\rho$  [ $^{\circ}C \cdot cm/W$ ]
  - $r^2$ -Korrelations-Koeffizient  $Err$  []: Maß für die Güte der Messung (Abweichung Rechenmodell-Messung): sehr gutes Messergebnis nach Herstellerangaben 1,0000, gut  $>0,9990$ , akzeptabel  $>0,9950$ ; darunter sollten Messung nochmals wiederholt werden; diese Werte werden im Versuch jedoch bei weitem nicht erreicht)
  - Messtemperatur  $Tem$  [ $^{\circ}C$ ]
- Die Temperatur des Probenmaterials sollte über die gesamte Messdauer so konstant als möglich sein. Der aktuelle Messteilschritt (Heizphase/Kühlphase), die Start-Temperatur, die aktuelle Temperatur, die verbleibende Zeit in Form eines Fortschrittbalkens sowie die Messwerte werden auf einem Display angezeigt. Danach lassen sich nach dem Ende einer Messung die Werte im Gerät mit einem Kürzel abspeichern, um nach Ende der Messungen wieder über ein Datenverbindungskabel am Rechner ausgelesen zu werden.
- Zum Ende eines jeden Messdurchganges sollte an den Festgesteinsproben noch eine Messung unter Verwendung der dem Messgerät beiliegenden Wärmeleitpaste „Arctic Silver“ in dem hierfür vorgesehenen Bohrloch durchgeführt. Hierbei wird auf den Messfühler die Paste aufgetragen und die Sonde in das Bohrloch bis zum Anschlag eingeführt. Daten zur Paste lassen sich aus dem Gerät beiliegenden Datenblatt entnehmen.

Um ein statistisch belastbares Messergebnis zu erreichen ist eine dreifache Wiederholung der Messungen erforderlich. Der Abstand zwischen den einzelnen Messdurchgängen beträgt für den Methodenvergleich 24 Stunden; für die eigentliche Messpraxis ist laut Herstellerangaben die Einhaltung eines Abstandes von mindestens 15 Minuten sinnvoll.

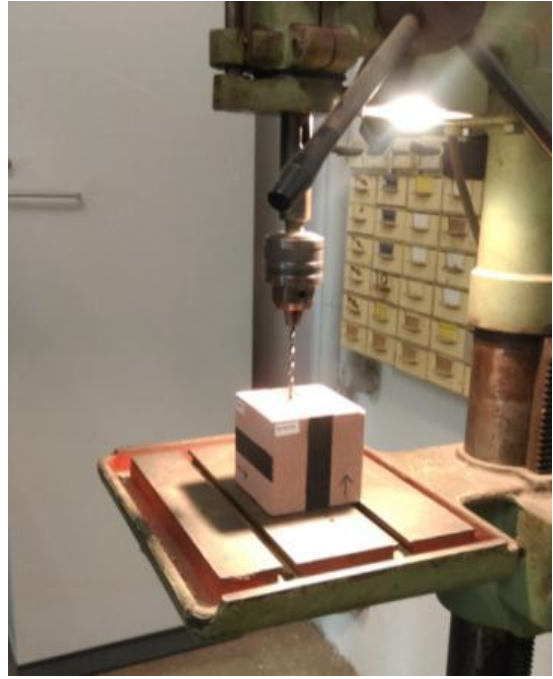
#### **4.5.3. Durchführung der Messungen mit dem SolidTherm Messgerät**

Damit die Stab-Messsonde in die Materialprobe eingeführt werden kann, muss vor der Messung zunächst ein passgenaues Bohrloch gebohrt werden.

Der Bohr-Durchmesser liegt zwischen 5 mm bis maximal 5,2 mm bei einer Länge von 7 cm. Die Gesteinsprobe muss eine Mindestgröße von 10 cm (Durchmesser und Höhe) aufweisen. Bei der Bohrung ist darauf zu achten, dass schon nach kleinen Bohrfortschritten das Bohrmehl aus der Bohrung entfernt wird, um eine ungewollte Aufweitung zu vermeiden. Dies gilt insbesondere für harte Gesteine. Zum Bohren von Hartgestein wurden Diamant-Sacklochbohrer und Hartmetall-Bohrer verwendet.

Am Messtag sollte das Messgerät bereits zwei Stunden vor der eigentlichen Messung eingeschaltet werden, damit es sich gleichmäßig auf Betriebstemperatur erwärmen kann. Grundsätzlich ist während der Messung auf eine möglichst hohe Konstanz der Umgebungstemperatur zu achten. Zu Beginn jedes Messtages ist mit Hilfe eines mitgelieferten Glaskörpers eine Kalibriermessung vorzunehmen.

Um den Übergangswiderstand zwischen Sondenmantel und Probenwand zu minimieren, muss der Hohlraum wärmeleitend überbrückt werden. Bei der Messung von dichten, nichtporösen Materialien kann Wasser verwendet werden. Bei porösen Materialien ist ein gelartiges, schlecht fließfähiges Kontaktmittel (z. B. dick angerührter Tapetenkleister) zu verwenden. Damit wird verhindert, dass das Kontaktmittel unter Umständen schnell und tief in die Probe eindringt, wodurch sich das Messergebnis deutlich verfälschen würde.



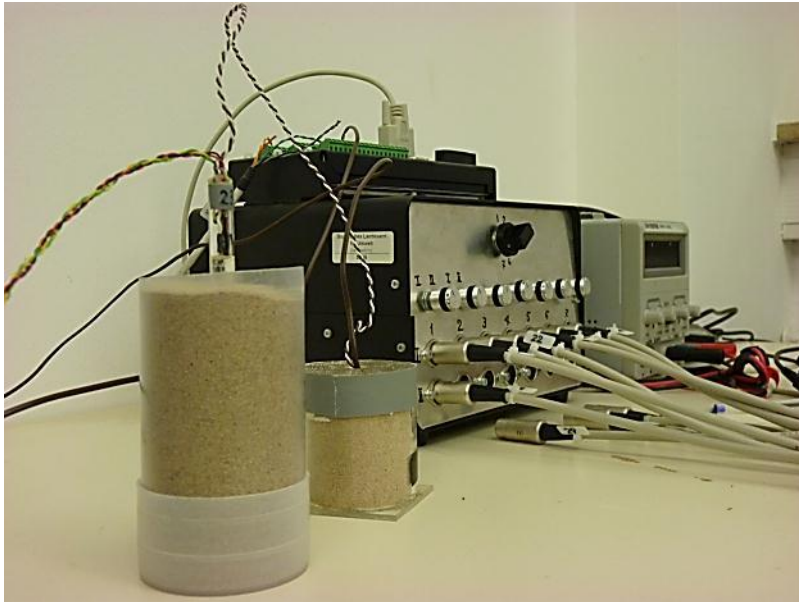
**Abbildung 10: Einbringen der Bohrlöcher für die Vollraumsonde des Solid Therm Messgerätes.**

#### **4.5.4. Durchführung der Messungen mit dem LfU TM Messgerät**

Vor jeder Messung ist zunächst jede Sonde einzeln zu kalibrieren. Für die Kalibrierung wird reiner Quarzsand als Referenz verwendet. Die Sonde sollte am Tage vor der Messung in die Probe eingebracht werden, damit eine Temperaturangleichung von Probe und Referenz an die Raumtemperatur gewährleistet werden kann. Minimale Temperaturdifferenzen führen dabei zu signifikanten Schwankungen und Unsicherheiten der Wärmeleitfähigkeitswerte.

Die Temperatur des Probenmaterials sollte über die gesamte Messdauer (4 Minuten) so konstant als möglich sein. Der aktuelle Messteilschritt (Heizphase/Kühlphase), die Start-Temperatur, die aktuelle Temperatur und die verbleibende Zeit werden über eine Grafik angezeigt.

Die Stromstärken und die Spannungssteuerung sind entsprechend der Materialbeschaffenheit und der zu erwartenden Wärmeleitfähigkeit der Probe einzustellen. Die Datenübertragung erfolgt über einen Labornetzgerätregler und einen Messgerätekontroller. Mittels der Software LoggerNet 3.4.1 können die Temperaturverläufe abgefragt und via Textfile in eine Excel-Tabelle überführt werden. Aus den Temperaturmessdaten der Aufheiz- und Abkühlungsphase wird dann die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  beider Temperaturkurven wird als Maß für die Güte der Messung verwendet. Für aussagekräftige Messergebnisse sind  $R^2 > 0,9990$  sowohl für die Aufheiz- als auch Abkühlungstemperatur erforderlich. In der Regel wird die Wärmeleitfähigkeit einer Probe aus drei Messungen (mit  $R^2 > 0,9990$ ) im Abstand von 60 min pro Messreihe bestimmt.



**Abbildung 11: LfU TM Messgerät**

#### **4.6. Wassersättigung der Probenkörper**

Der Methodenvergleich sieht die Messung der Wärmeleitfähigkeit an Probenkörper im trockenen und gesättigten Zustand vor. Das Verfahren zur Einstellung der beiden Zustände wird im Folgenden erklärt. Einige Probenkörper wie der PE-Probenkörper, der Glas-Probenkörper, der Tonstein, die Geschiebemergel oder der Klei werden unter lagerfeuchten Bedingungen gemessen. Das bedeutet, dass der Wasser- und Feuchtegehalt dieser Proben nicht verändert wird bzw. nicht veränderbar ist.

Die Trocknung der Referenzprobenkörper ist nach DIN EN 1936 (1999) „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität“ bei  $70 \pm 5 \text{ °C}$  bis zur Massenkonstanz vorzunehmen. Die Massenkonstanz wird erreicht, wenn die Differenz zwischen zwei Folgewägungen im Abstand von  $24 \pm 2 \text{ h}$  nicht größer als 0,1 % der Masse des Probekörpers ist. Für die Abkühlung auf Raumtemperatur vor der Wärmeleitfähigkeitsmessung sind die Probekörper in einem Exsikkator aufzubewahren, bis die Raumtemperatur erreicht wird.

Für die Probenkörper, die im sternförmigen Verfahren untersucht werden, erfolgt die Trocknung nach dem Labor spezifischen Verfahren des jeweiligen Teilnehmers.

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von gesättigten Gesteinsproben ist die Einstellung einer 100%-igen Wassersättigung erforderlich. Damit ist eine Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte unter definierten Wassergehalten gegeben. Das Verfahren zur absoluten Wassersättigung wird für die Referenzprobenkörper nach dem in der DIN EN 13755 (2008) „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck“ beschriebenen Verfahren ausgeführt. Die Probenkörper werden im definierten Abstand von mindestens 15 mm in einen Behälter gestellt. Danach wird Leitungswasser mit einer Temperatur von  $20 \pm 10 \text{ °C}$  bis zur halben Höhe des Probenkörpers



hinzu gegeben. Nach  $60 \pm 5$  Minuten erfolgte eine erneute Zugabe von Leitungswasser bis der Wasserspiegel drei Viertel der Höhe der Probenkörper erreicht hat. Nach  $120 \pm 5$  Minuten ist die vollständige Auffüllung mit Wasser bis  $25 \pm 5$  mm über die Probenkörperoberkanten durchzuführen. Nach  $48 \pm 2$  Stunden sind die Probenkörper aus dem Wasser zu nehmen, zügig mit einem feuchten Tuch abzuwischen und anschließend innerhalb von einer Minute mit 0,01 g Genauigkeit zu wägen. Im Anschluss werden die Proben wieder in das Wasserbad gestellt und die Wägung alle  $24 \pm 2$  Stunden wiederholt, bis die Massenkonstanz eingetreten ist. Die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Wägungen darf nicht mehr als 0,1 % der ersten der beiden Massen betragen. Alle Messwerte sind zu protokollieren.

Für die Probenkörper, die im sternförmigen Verfahren im Methodenvergleich untersucht werden, erfolgt die Wassersättigung nach dem Labor spezifischen Verfahren des jeweiligen Teilnehmers.

Insgesamt kann der Prozess der Wassersättigung für einige Gesteine problematisch sein. Wenig verfestigte Gesteine neigen zum „Absanden“ oder Zerfallen.

#### **4.7. Messprotokolle**

Die Ergebnisse des Methodenvergleiches wurden in unterschiedlichen Protokollen erfasst und zum Zwecke der Auswertung zusammengeführt. Für die Erfassung der Messwerte mit dem TCS-Messgerät wurden einheitliche Messprotokolle angefertigt (siehe Anhang 7.1 TCS – Messprotokoll). Zusätzlich wurden die Messwertefiles und Statistikfiles, die bei jeder Messung vom TCS-Messgerät erzeugt werden, gesammelt. Für die Messgeräte mit Vollraumsonden existieren keine vorgefertigten Protokolle. Die Datensammlung erfolgte in freier Tabellenform (siehe 7.2 Sonden - Messprotokoll). Die Messprotokolle sollten folgende Informationen enthalten:

- Beschreibung der Probenaufbereitung (Trocknung/ Sättigung)
- Datum und Uhrzeit der Messung
- Angabe des verwendete Gerätes (TCS/ Sonde) und Standards
- Messraumbedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte)
- Angabe der Messwerte eines laboreigenen Eichkörpers

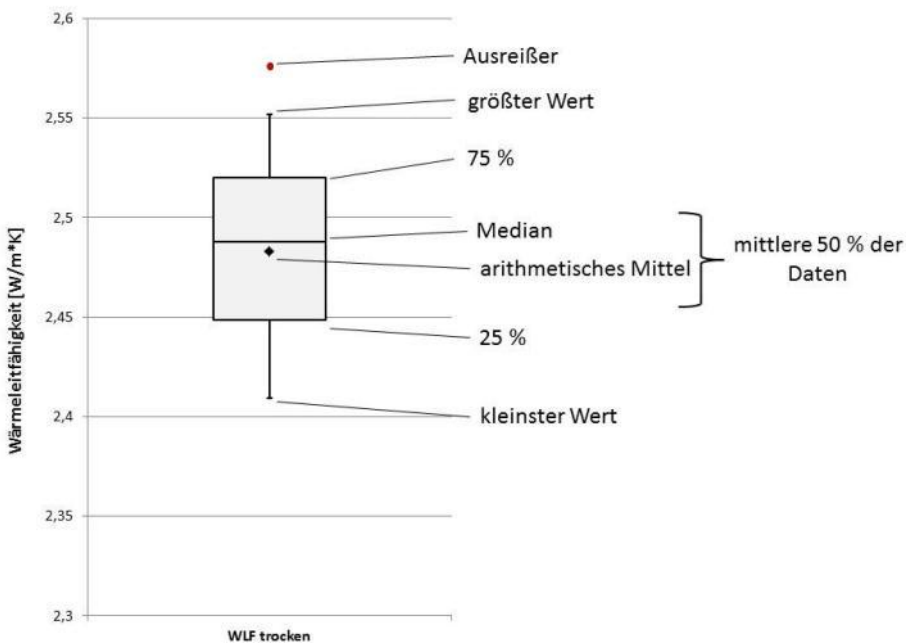
### **5. Auswertung der Messergebnisse**

Die Messwerte liegen nach Abschluss des Methodenvergleiches in Messprotokollen in unterschiedlichen Formaten vor. Für die Auswertung werden die Daten in laborübergreifende Tabellen überführt.

Eine erste, grobe Identifikation von Ausreißern erfolgte im Rahmen der Zusammenstellung der Messwerttabellen aus den Messprotokollen. Unplausible Messwerte, die deutlich von den anderen Messwertkollektiven abweichen, werden von der statistischen Analyse ausgeschlossen.

Anhand der mittleren Abweichung der G-Faktoren (= Quotient aus Standardabweichung und dem Mittelwert) und der Inhomogenitätswerte (= Koeffizient aus dem Maximum, Minimum und dem Mittelwert) potentieller Fehlmessungen wurde eine statistische Verifizierung der Rohdaten

vorgenommen. Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik und der Boxplot-Darstellungen wurden verwendet, um die Messreihen erneut auf Ausreißer zu prüfen.



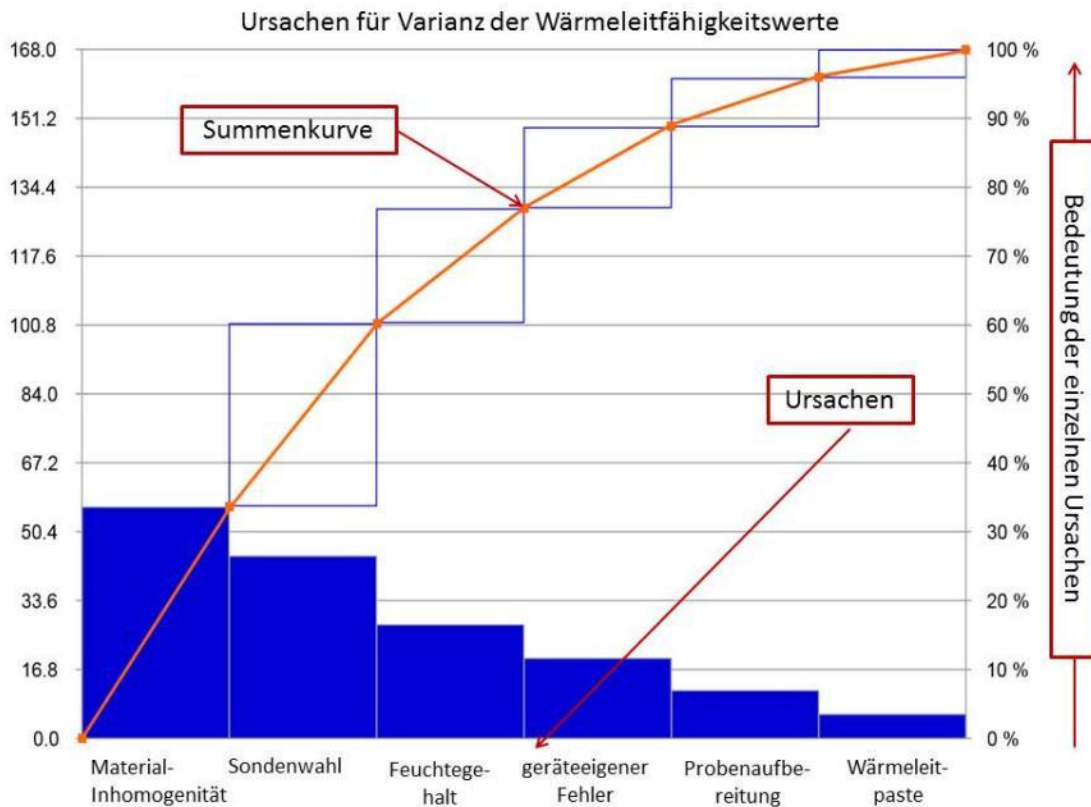
**Abbildung 12: Erklärung der Boxplot-Darstellungen.**

Bei dem ursprünglich als Ringversuch geplanten Methodenvergleich handelt es sich um keinen „klassischen“ Ringversuch bei dem unter normierten, definierten und standardisierten methodischen und apparativen Bedingungen ein Verfahren analysiert wird, sondern um den Vergleich von verschiedenen Methoden, Geräten und Verfahren. Deshalb finden die „klassischen“ Auswerteroutinen für einen Ringversuch wie diese beispielsweise in der DIN 38402 Teil 41 (1984-5) beschrieben werden, keine Anwendung.

Die Auswertung erfolgt mittels einfacher statistischer Methoden, wie der Betrachtung des Maximums, Minimums, Mittelwerts, Medians, der Standardabweichung und der Quantile. Die Darstellung der Messwerte, Messwertverteilung erfolgt in Boxplots (Abbildung 12). Die Auswertung der Messwerte wurde mit Excel und SPSS durchgeführt.

Für gesamtheitliche Betrachtungen ist die Anzahl der vorliegenden Messwerte für eine abgesicherte statistische Betrachtung ausreichend. Die Anzahl der Messwerte liegt zwischen einigen Zehnern und einigen Hundert.

Anders verhält es sich für die Untersuchung von spezifischen Problemen. Beispielsweise existiert für die Bewertung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mit einem TCS-Messgerät an einem Referenzprobenkörper oder die Abweichung der Wärmeleitfähigkeitswerte zwischen flacher und gekrümmter Probenkörperoberfläche nur eine sehr begrenzte Anzahl von Messwerten. Die statistische Auswertung und die Erstellung von Boxplots mit wenigen Messwerten ist mit starken Unsicherheiten behaftet. Für die Analyse systematischer Fehler und Phänomene wurden daher ausschließlich umfangreichere Messreihen genutzt, die eine statistisch belegbare Aussage zulassen. Die Darstellung erfolgte in Pareto-Diagrammen (Abbildung 13) und Subgroup-Plots (Abbildung 14).

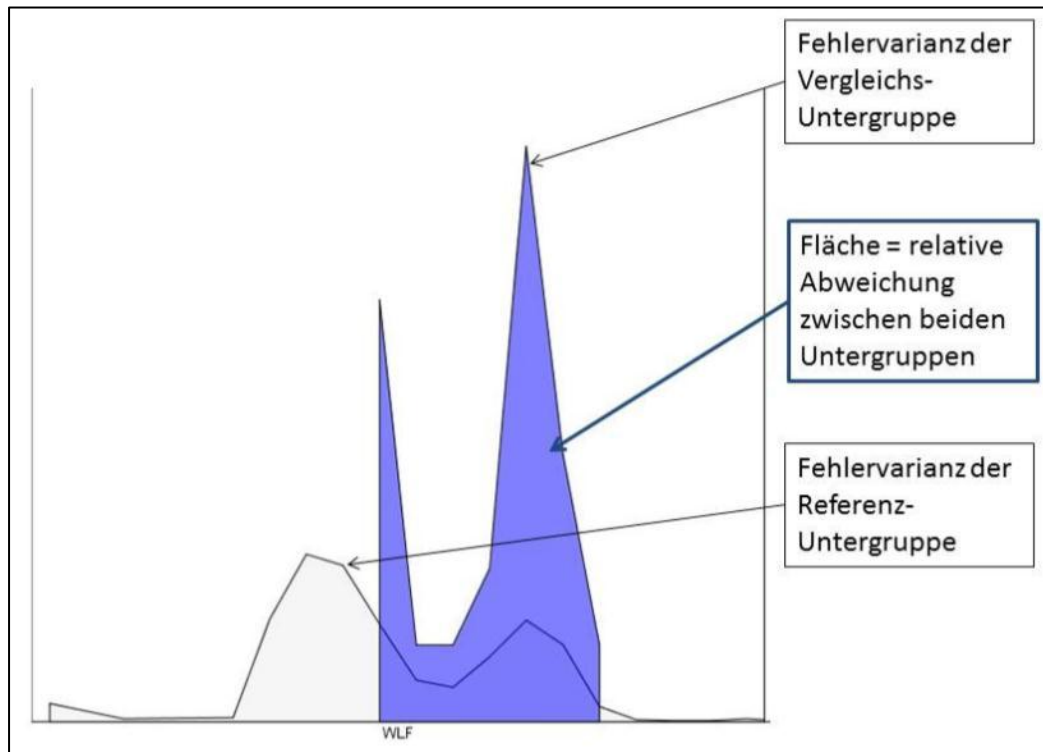


**Abbildung 13: Beispielhafte Erklärung der Pareto-Diagramm-Darstellung**

Ein Pareto-Diagramm ist ein Säulendiagramm, das Problemursachen nach ihrer Bedeutung ordnet. Die einzelnen Werte werden der Größe nach geordnet wiedergegeben. Die Darstellung beruht auf dem Paretoprinzip, nach dem die meisten Auswirkungen eines Problems (80 %) häufig nur auf eine kleine Anzahl von Ursachen (20 %) zurückzuführen sind. Mit Hilfe eines Pareto-Diagramms können aus vielen möglichen Ursachen eines Problems diejenigen herausgefiltert werden, die den größten Einfluss haben. Die Bedeutung einer Ursache kann direkt aus dem Diagramm abgelesen werden. Um das Pareto-Diagramm zu erstellen, wird aus der absoluten Häufigkeit (der entsprechenden Messgröße) jeder Fehlerkategorie deren prozentualer Anteil ermittelt (1):

$$\% \text{-Häufigkeit} = \text{Teilmenge} / \text{Gesamtmenge} * 100 \text{ (1)}$$

Die Kategorien werden absteigend nach ihrer Bedeutung sortiert und dann auf der waagerechten Achse von links nach rechts aufgetragen. Über jede Fehlerkategorie wird eine Säule gezeichnet, deren Höhe der Häufigkeit des Auftretens entspricht. Werden die Säulen von links nach rechts aufeinander gestapelt, ergibt sich die Pareto-Kurve. Ein Vergleich mehrerer Pareto-Diagramme mit jeweils anderem Maß für die Auswirkungen ermöglicht es Problemursachen nach verschiedenen Kriterien zu beurteilen.



**Abbildung 14: Beispielhafte Erklärung der Subgroup-Plot-Darstellung**

Subgroup-Plots dienen zur Darstellung von Kontrasten zwischen zwei Untergruppen (Abbildung 14). Die statistische Analyse beruht auf dem Grundgedanken, die Streuung auf Basis der Messwerte (Fehlervarianz) mit derjenigen zu vergleichen, die durch die unterschiedliche Stichprobenzugehörigkeit erzeugt werden. Die Kontraste werden durch Koeffizientenvektoren definiert und über eine Linearkombination dieser Vektoren geprüft. Ein Vektor besteht aus so vielen Werten wie Faktorstufen (Gruppen) vorhanden sind. Der Subgroup-Plot ist eine dimensionslose Darstellung und gibt die relative Abweichung („Kontrast“) zweier Untergruppen wieder. Damit können Differenzen eines Hauptkriteriums zwischen zwei Untergruppen sowie die Auswirkung dessen auf das Ergebnis analysiert und dargestellt werden.

## 6. Ergebnisse des Methodenvergleichs

Im Rahmen des Methodenvergleichs Wärmeleitfähigkeitsmessungen der SGD wurden 2.728 Messungen der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Mit dem Thermal-Conductivity-Scanner (TCS) nach der Optical-Scanning Messmethode wurden insgesamt 1.875 Wärmeleitfähigkeitswerte ermittelt. Davon wurden 225 Messungen an Probenkörper im lagerfeuchten Zustand, 1.178 an Probenkörpern im getrockneten Zustand und 472 Messungen an Probenkörpern im gesättigten Zustand vorgenommen. Mit Messgeräten, die mit Vollraumsonden ausgestattet sind und nach der Messmethode Linien-Quellen-Theorie arbeiten, wurden insgesamt 779 Messungen durchgeführt. Darunter sind 146 Messergebnisse von Probenkörpern im gesättigten Zustand, 451 im lagerfeuchten Zustand und 175 im trockenen Zustand. Im Rahmen des Methodenvergleichs kam ein Messgerät mit einer Halbraumsonde zum Einsatz. Mit diesem

Gerät wurden 70 Wärmeleitfähigkeitswerte ermittelt, 41 im lagerfeuchten Zustand und 29 im getrockneten Zustand der Probenkörper. Einen Überblick über die Messungen mit den unterschiedlichen Geräten gibt Tabelle 8.

**Tabelle 8: Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Messgeräten und Zustand der Probenkörper**

TCS		Zustand der Probenkörper			Gesamtsumme
		gesättigt	lagerfeucht	trocken	
Teilnehmer	GD NRW	58	36	152	246
	HLUG	24	24	84	132
	LfU	188	108	586	882
	LGB, RP	170	34	174	378
	LIAG	32	23	182	237
<b>Gesamtsumme</b>		472	225	1178	1875

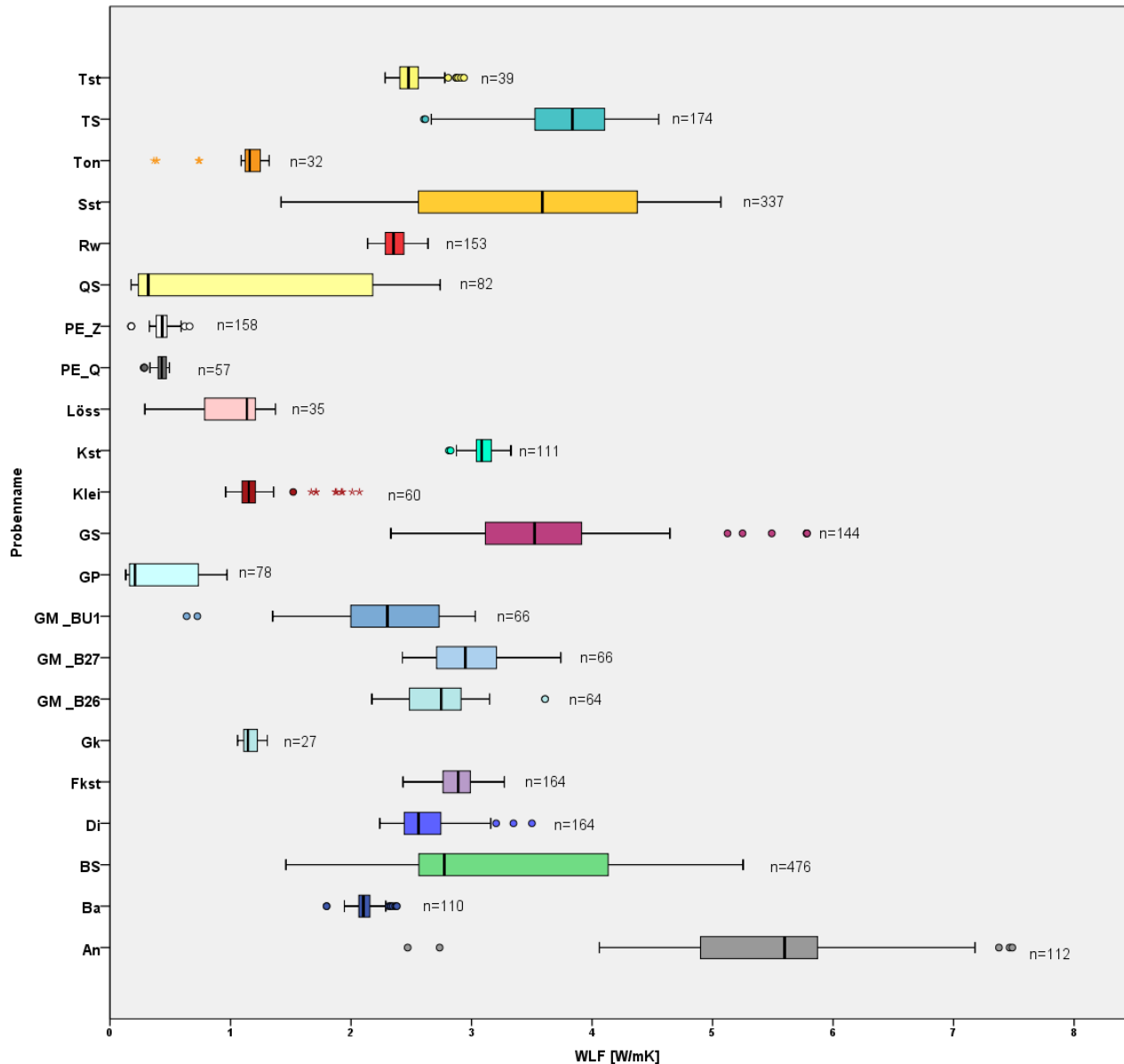
  

Voll- und Halbraumsonden		Zustand der Probenkörper				Gesamtsumme
		gesättigt	lagerfeucht	pF 2,5	trocken	
Teilnehmer	GDfB	42	79	0	39	160
	BSU	18	72	0	30	120
	LfU	10	98	0	33	141
	LGB, RP	52	102	11	45	210
	LIAG	4	71	0	33	108
	TLUG	20	70	0	24	114
<b>Gesamtsumme</b>		146	492	11	204	853

In Abbildung 15 sind Boxplots der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte der unterschiedlichen Probenkörper im Methodenvergleich dargestellt. An Hand der Boxplots ist folgendes ersichtlich:

- Im Methodenvergleich wurden Probenkörper von Materialien mit sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten verwendet. Die Probenkörper aus Polyethylen und die Glasperlen (PE\_Z, PE\_Q und GP) weisen Wärmeleitfähigkeiten unter 1 W/(m\*K) auf. Im Wertebereich um 1 W/(m\*K) sind Wärmeleitfähigkeiten der Probenkörper aus Ton, Löss, Klei und der Glaskörper (GK) angesiedelt. Typische Wärmeleitfähigkeiten im Bereich zwischen 2 und 3 W/(m\*K), wie diese bei natürlichen Gesteinen auftreten, haben der Tonstein (Tst), Rhät-Sandstein im trockenen Zustand (Sst), Redwitzit (Rw), Kalkstein (Kst), Geschiebemergel (GM 26, GM 27, GM BU1), Flaserkalkstein (Fkst), Diabas (DI), Buntsandstein im trockenen Zustand (BS) und Basalt (Ba). Im nächst folgenden Intervall mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen 3 und 4 W/(m\*K) liegen die Messergebnisse der Probenkörpern des Tonschiefers (TS) und Glimmerschiefers (GS). Sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten von größer 4 W/(m\*K) konnten bei den gesättigten Sandsteinen, dem Anhydrit (An) und an bestimmten Seiten des Glimmerschiefers (GS) ermittelt werden.

- Im Methodenvergleich wurden Materialien mit gering streuenden Wärmeleitfähigkeitswerten gemessen: Die Polyethylen-Probenkörper (PE-Z, PE-Q), der Tonstein (Tst), der Ton (Ton), der Redwitzit (Rw), der Kalkstein (Kst), der Klei (Klei), der Glaskörper (GK) und der Basalt (Ba). Die geringe Spannweite der Wärmeleitfähigkeitswerte im Boxplot deutet auf ein homogenes Material hin. Anisotropieeffekte und intraspezifische Porositätsinhomogenität treten nicht auf. An diesen Probenkörpern wurden geringe Abweichungen der Messergebnisse festgestellt. Diese Varianz ist durch die Messmethode, die eingesetzten Messgeräte oder durch die individuelle Aufbereitungsmethode bedingt.



**Abbildung 15: Übersicht über alle Messwerte für die unterschiedlichen Probenkörper (trocken, lagerfeucht, gesättigt)**

- Große Spannbreiten der Wärmeleitfähigkeiten treten beim Tonschiefer (TS), Rhät-Sandstein (Sst), Quarzsand (QS), Glimmerschiefer (GS), Buntsandstein (BS) und Anhydrit (An) auf.
- Die große Streuung der Wärmeleitfähigkeitswerte beim Quarzsand (QS), Rhät-Sandstein (Sst) und Buntsandstein (BS) begründen sich durch die Messung der Probenkörper unter trockenen und gesättigten Bedingungen. Die Variation der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte beim Tonschiefer (TS), Glimmerschiefer (GS) und Anhydrit (An) werden durch Effekte starker Anisotropie und Inhomogenität des Materials verursacht. Die Messung des Anhydrits erfolgte im lagerfeuchten Zustand. Die Wärmeleitfähigkeitswerte des Anhydrits sind daher sowohl auf Differenzen im Feuchtezustand und der Inhomogenität zurückzuführen. Transport und Lagerung des Probenkörpers können demnach die Wärmeleitfähigkeit im lagerfeuchten Zustand signifikant beeinflussen.
- Deutliche Streuungen der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte sind zudem bei den Geschiebemergeln (GM 26, GM 27, GM BU1) sowie beim Löss (Löss) festzustellen. Bei diesen Probenkörpern modifizieren sowohl die Inhomogenität des Materials als auch lagerbedingte Feuchteverluste die Wärmeleitfähigkeit.

Das hier angewandte Konzept eines Methodenvergleiches gibt erstmalig einen Einblick in die Datengewinnung und Evaluierung von Wärmeleitfähigkeitswerten auf nationaler Ebene. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Methodenvergleich konnten Probleme und Unsicherheiten der einzelnen Messverfahren herausgestellt und allgemeingültige Empfehlungen abgeleitet werden. Zentrale Aspekte und Ergebnisse der einzelnen Messmethoden werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

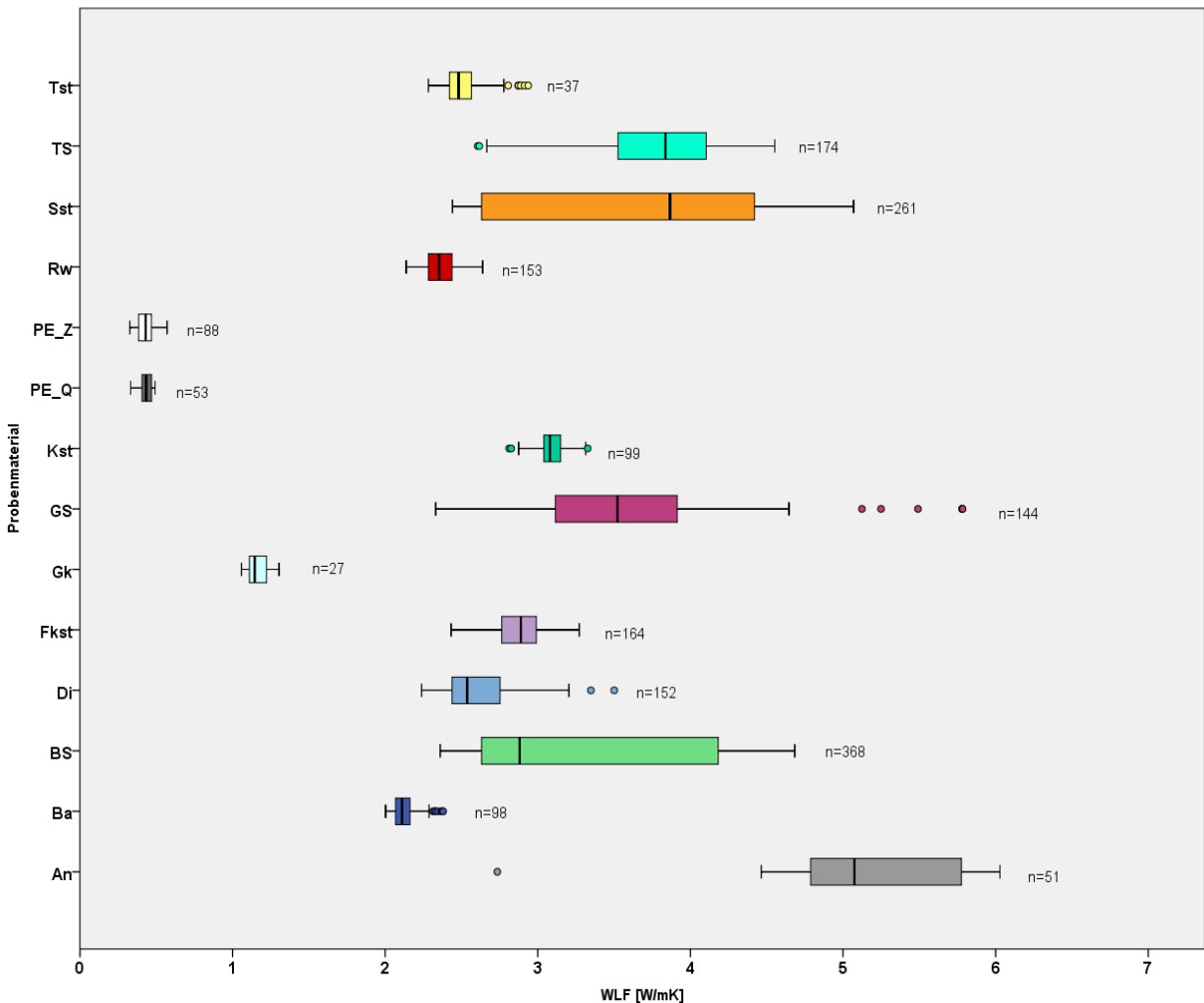
### 6.1. Messergebnisse der TCS-Messgeräte

Im Methodenvergleich wurde mit fünf TCS-Messgeräten in unterschiedlichen Laboratorien die Wärmeleitfähigkeitsmessung an den Probenkörpern ermittelt. Im Wesentlichen handelt es sich bei den Probenkörpern um feste Materialien. Der Großteil der Probenkörper sind natürlich vorkommende Gesteine. Die Probenkörper wurden größtenteils unter trockenen und gesättigten Bedingungen gemessen. Zur Erfassung der Wiederholungs- und Vergleichsbedingungen wurden die Wärmeleitfähigkeiten an Referenzprobenkörper und laborspezifischen Probenkörper gemessen. Die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeitswerte (Abbildung 16) von festen Materialien, die mit den TCS-Messgeräten nach der Optical-Scanning-Messmethode im Rahmen des Methodenvergleiches ermittelt wurden, zeigen folgende Charakteristika:

- Homogene Materialien wie das PE-Material (PE\_Z, PE\_Q), der Glaskörper (Gk), der Tonstein (Tst), der Kalkstein (Kst), der Basalt (Ba) und der Redwitzit (Rw) zeigen geringe Spannweiten der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte.
- Inhomogene Materialien, wie der Tonschiefer (TS), Rhät-Sandstein (Sst), Glimmerschiefer (GS), Buntsandstein (BS) weisen große Spannbreiten der Wärmeleitfähigkeitswerte auf.
- Die im Methodenvergleich enthaltenen Sandsteine besitzen eine hohe Porosität und damit ein großes Wasseraufnahmevermögen. Der Einfluss der Wassersättigung auf die

Wärmeleitfähigkeit ist hinreichend bekannt und wurde erneut durch die Messergebnisse belegt. Auch bei den Messungen der Sandsteinprobenkörper im trockenen und gesättigten Zustand ist eine starke Streuung der Wärmeleitfähigkeiten festzustellen.

- Bei den Probenkörpern Tonschiefer (TS), Glimmerschiefer (GS) und Anhydrit (An) wirkt sich zusätzlich die Inhomogenität und Anisotropie der Materialien aus.



**Abbildung 16: Messwerte der unterschiedlichen Probenkörper ermittelt mit den TCS-Messgeräten**

Die Ergebnisse der TCS-Messgeräte zeigen generell eine hohe Reproduzierbarkeit durch die einzelnen Laboratorien. Jedoch bestätigen die Streuungsmaße, dass die Angabe von absoluten Wärmeleitfähigkeiten eines spezifischen Probenmaterials mit starken Unsicherheiten (>5%) behaftet sein kann. Neben den Material bedingten Ursachen konnten fünf zentrale Einflussparameter herausgearbeitet werden:

- Modi des TCS (*single TC* und *combined TC/TD Modus*)
- Standards
- Beschaffenheit der Messfläche
- Sättigungsverfahren
- Messbedingungen (Luft- und Raumtemperatur)



### 6.1.1. Vergleich der TCS-Messgeräte

Ein Ziel des Methodenvergleichs ist die Erfassung der Wiederholungsbedingungen für eine Messmethode. Wiederholungsbedingungen lassen sich am besten durch Messungen an homogenen Referenzprobenkörpern verifizieren, die unter gleichen Bedingungen untersucht werden (siehe 4.2). Die Unterschiede in den Probenaufbereitungsverfahren lassen sich mit laborspezifischen Probenkörpern ermitteln.

Folgende Beobachtung konnten gemacht werden:

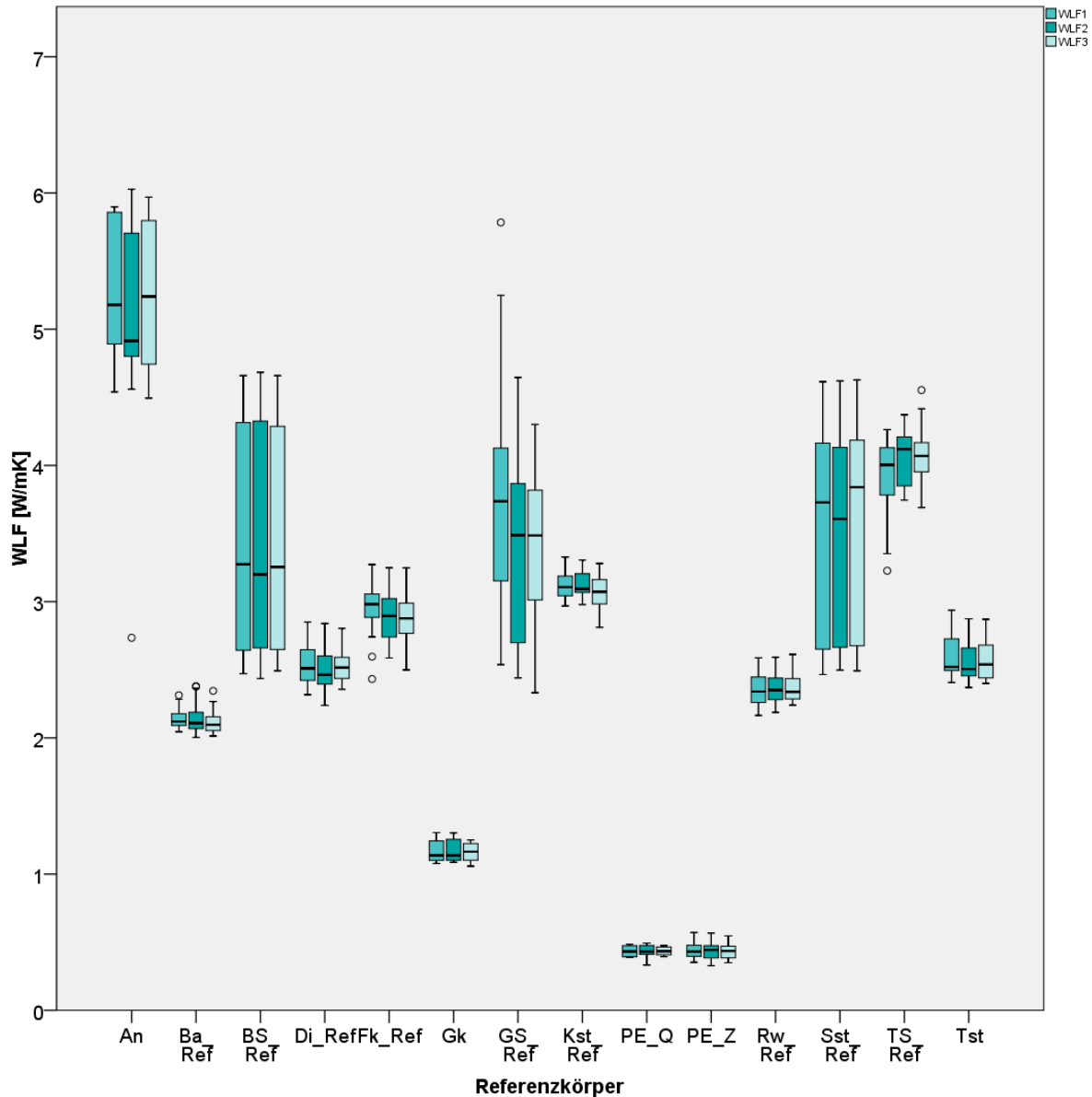
- Die Messungen mit den TCS-Messgeräten des LGB-RP, HLUG, GD-NRW und LfU Bayerns wurden im Modus „Wärmeleitfähigkeit (TC-Modus)“ durchgeführt.
- Am LIAG wurde der Modus „Temperaturleitfähigkeitsmessung (TD/TC)-Modus“ verwendet, der wie in Kapitel 6.2.4 beschrieben, mit einer höheren Messunsicherheit behaftet ist. Dies hat zur Folge, dass die Messwerte im Vergleich zu den Messergebnissen im TC-Modus stärker streuen (vergl. Anhang 1.11, 1.12, 1.19).
- Die Messergebnisse des TCS-Messgeräts des LfU Bayern liegen systematisch über den Messergebnissen der anderen TCS-Geräte (vergl. Anhang 1.1, 1.4, 1.8, 1.9, etc.). Dies trifft insbesondere auf Messungen mit dem Standard 3,91 W/(m\*K) zu. Hier ist eine erneute Kalibrierung des Messgerätes durch den Hersteller erforderlich.
- Das Messgerät des HLUG erzeugt im Vergleich zu den anderen TCS-Messgeräten unter Verwendung des Standards 0,709 W/(m\*K) eine große Streuung (vergl. Anhang 1.1 und 1.2).
- Die Verwendung von Standards mit Wärmeleitfähigkeiten weit außerhalb der Wärmeleitfähigkeit des Probenkörpers können zu deutlichen Unterschätzungen oder Überschätzungen der Wärmeleitfähigkeit eines Probenkörpers und zu einer starken Streuung der Messwerte führen (vergl. Anhang 1.11, 1.17, 2.11, 2.12).

### 6.1.2. Reproduzierbarkeit der TCS-Messwerte

Gemäß des „Berichtes für die Vorbereitung und Durchführung des Methodenvergleich Wärmeleitfähigkeitsmessungen“ (2013) ist festgelegt, dass im Abstand von einem Tag die Wärmeleitfähigkeit jedes Referenzprobenkörpers bzw. laborspezifischen Probenkörpers dreimal bestimmt werden soll. Die Ergebnisse für alle Messungen an den Referenzprobenkörpern sämtlicher TCS-Messgeräte sind in Abbildung 17 geordnet nach dem ersten, zweiten und dritten Messdurchgang dargestellt. Die Darstellung bezieht sich auf den arithmetischen Mittelwert eines jeden Labors pro Messreihe und beinhaltet die Korrektur der Standardabweichung und Varianz der Messwerte.

Der Vergleich der drei Messreihen bestätigt die hohe Reproduzierbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte mit dem TCS-Messgerät. Alle arithmetischen Mittel der Wärmeleitfähigkeitswerte liegen im Bereich der vom Gerätehersteller angegebenen 3 % Abweichung. Stärkere Streuungseffekte lassen sich jedoch bei den Probenkörpern Tonschiefer (TS\_Ref) und Glimmerschiefer (GS\_Ref) infolge ausgeprägter Anisotropie der Probenmaterialien erkennen. Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Parameter Messanzahl, Median, Standardabweichung und Varianz bei der

Fehlerbetrachtung, bekräftigt, dass die Anzahl an notwendigen Messwiederholungen stark von den Materialeigenschaften abhängig ist. Differenzierte Raumbedingungen, Vorgehensweisen bei der Messung oder Auswahl der Standards haben erheblichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeitswerte (siehe folgende Kapitel).

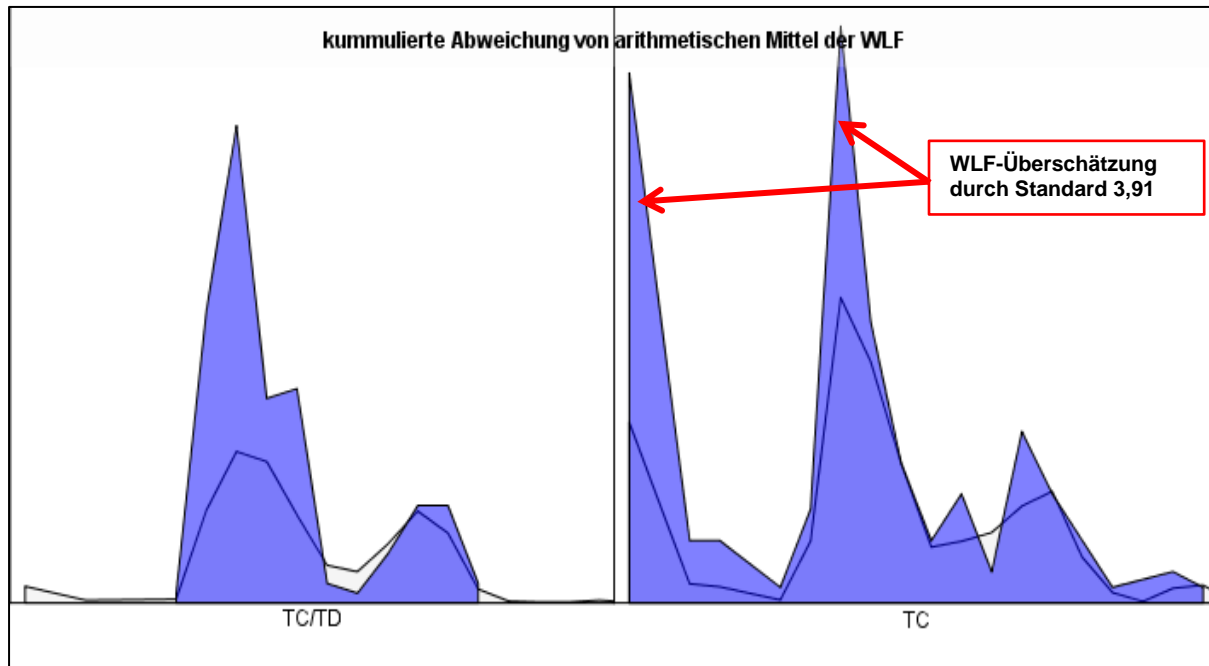


**Abbildung 17: Vergleich zwischen den 3 Messreihen der Referenzprobenkörper  
Messwerte der TCS-Messgeräte - alle Messungen mit angepassten Standards**

### 6.1.3. Vergleich der TCS-Messmodi

Die Fehlergenauigkeit des TCS-Messgerätes wird vom Hersteller mit 3 % (für den TC-Modus) und 5 % (für den kombinierten TD/TC-Modus) angegeben. Diese 3 % bzw. 5 % schließen alle systematischen Abweichungen ein.

Ein Vergleich der Messwerte beider Modi des TCS-Messgerätes (TD/TC: Kombinationsmodus der gleichzeitigen Wärmeleitfähigkeits- und Temperaturleitfähigkeitsmessung; TC: nur Wärmeleitfähigkeitsmessung) macht deutlich, dass für eine genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Probenkörpers ausschließlich der TC-Modus verwendet werden sollte.



**Abbildung 18: Subgroup-Plot - Vergleich der mittleren Abweichung der Wärmeleitfähigkeitswerte zwischen TD/TC- und TC-Modi**

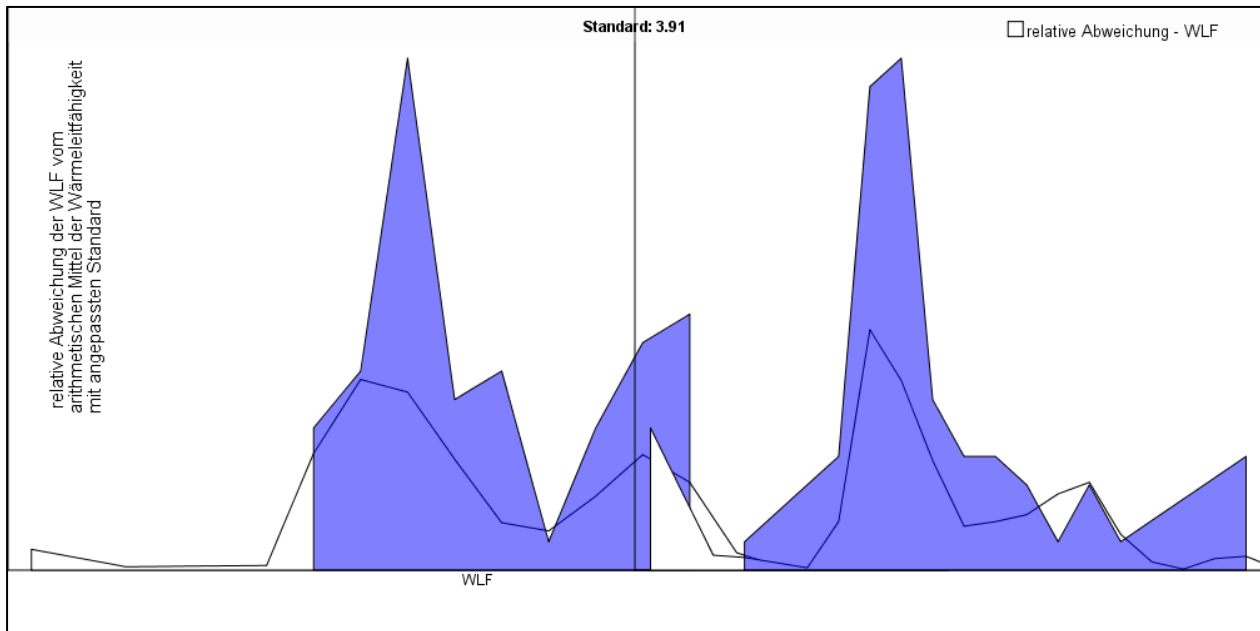
Zwischen beiden Modi können innerhalb einer Messreihe eines spezifischen Probenkörpers Abweichungen von bis zu 15 % auftreten. Generell ist im kombinierten TC/TD Modus eine Unterschätzung der Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials im Vergleich zum TC-Modus zu beobachten. Besonders bei inhomogenen Materialien ist der kumulierte Fehler der Messwerte durch Verwenden des TD/TC-Modus für die Messung und durch die materialbedingte Streuung als problematisch zu bewerten.

Im Methodenvergleich zeigte sich, dass diese Fehlerabweichung der Wärmeleitfähigkeit von 3 % für homogene, trockene Probenkörper reproduzierbar ist. Bei stark anisotropen oder inhomogenen Materialien kann diese Fehlerabweichung nicht eingehalten werden. Hier sind Abweichungen von bis zu 8 % realistisch. Die Verifizierung der Reproduzierbarkeit der Messwerte mit dem TCS-Messgerät ist daher anhand homogener trockener Materialien möglich.

#### 6.1.4. Einfluss der Standards beim TCS-Messgerät

Laut Bedienungsanleitung für das TCS-Messgerät erfolgt die Auswahl des zu verwendenden Standards in Anlehnung an die Wärmeleitfähigkeit des Probenkörpers. Dabei ist der ausgewählte Messmodus (TC oder TC/TD) zu beachten. Im TC-Modus („Wärmeleitfähigkeitsmessung“) sollte die Wärmeleitfähigkeit der beiden ausgewählten Standards etwa der des Probenkörpers entsprechen. Im TC/TD-Modus (kombinierte „Wärme- und Temperaturleitfähigkeit“) ist es erforderlich, dass die Wärmeleitfähigkeit des Probenkörpers

zwischen der Wärmeleitfähigkeit der beiden unterschiedlichen Standards liegt. Die Spanne zwischen beiden Standards sollte möglichst eng gewählt werden und sich am Wert des Probenkörpers orientieren. Zu beachten ist, dass die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturleitfähigkeit eines Probenkörpers teilweise verschiedene Messbereiche erfordern.

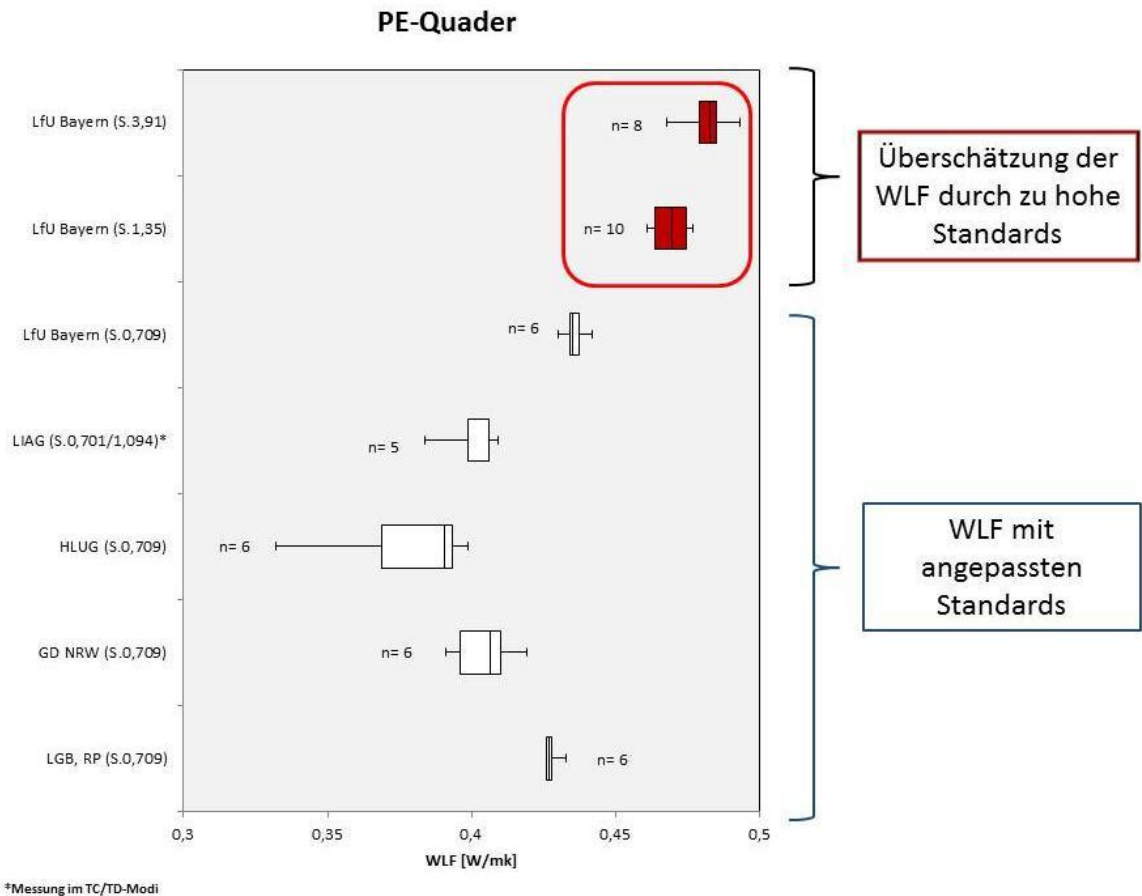


**Abbildung 19: Einfluss des Standards auf Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte am Beispiel des Standards 3,91. Subgroup-Plot der relativen Abweichung der Wärmeleitfähigkeitswerte zwischen angepassten und weniger geeigneten Standard.**

Für die Messungen im TC-Modus zeigte sich, dass bei Einsatz von Standards mit wesentlich höherer bzw. niedrigerer Wärmeleitfähigkeit als jene des Probenkörpers signifikante Über- bzw. Unterschätzungen der Wärmeleitfähigkeit auftreten (vergl. Abbildung 19). Die Ergebnisse des Subgroup-Plots manifestieren die statistische Grenze zwischen angepassten und nicht angepassten Standards bei 23,3 %. Das bedeutet, dass eine Differenz der Wärmeleitfähigkeit zwischen Standard und Probenkörper von mehr als 23,3 % zu einer signifikanten Über- bzw. Unterschätzungen der Wärmeleitfähigkeit des Probenkörpers führt. Folglich treten bei einer unangemessenen Wahl der Standards Über- bzw. Unterschätzungen der Wärmeleitfähigkeit von bis zu 12 % auf.

Diese Fehlerbetrachtung lässt sich besonders deutlich am Beispiel des PE-Körpers (Quader) im Methodenvergleich nachvollziehen. Die Wärmeleitfähigkeit des homogenen Referenzkörpers ist signifikant von den verwendeten Standardpaaren abhängig.

Die TCS-Messungen am LfU Bayern wurden mit drei verschiedenen Standardpaaren durchgeführt. Differenzen der Wärmeleitfähigkeit aufgrund verschiedener TCS-Messgeräte oder starker Materialinhomogenität können ausgeschlossen werden. Demnach ist die Varianz der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten ausschließlich durch die Standardwahl begründet.

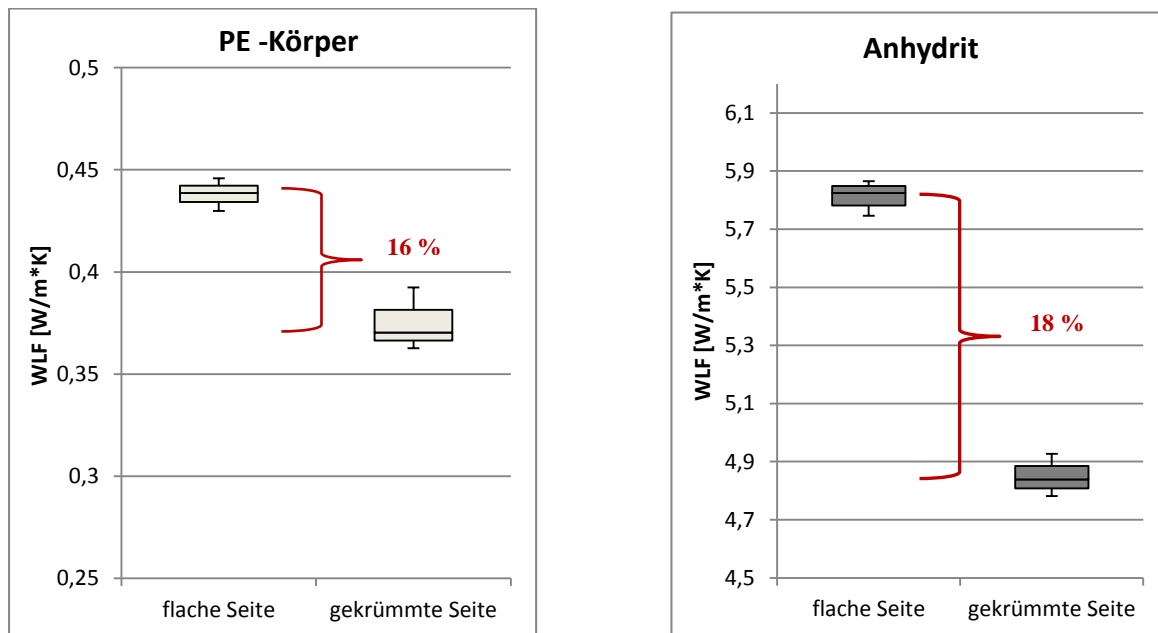


**Abbildung 20: Vergleich der Wärmeleitfähigkeitswerte bei Verwendung verschiedener Standardpaare am Beispiel des PE-Quaders**

### 6.1.5. Einfluss der Oberflächengeometrie eines Probenkörpers

Bei der Vorbereitung des Methodenvergleichs wurden bei der Messung der Wärmeleitfähigkeiten mit dem TCS-Messgerät Abweichungen zwischen den Messwerten an Probenkörpern mit flachen und gekrümmten Oberflächen festgestellt. Im Methodenvergleich sind der Probenkörper des PE-Zylinders (siehe Anhang 1.2 und 1.3) und des Anhydrits (siehe Anhang 1.6 und 1.7) für weitergehende Untersuchung dieser Abweichungen geeignet.

Grundsätzlich fällt eine stärkere Streuung der Messwerte bei Messungen der Wärmeleitfähigkeit mit dem TCS-Messgerät auf gekrümmten Oberflächen auf, die durch eine größere Spannweite der Messwerte in den Boxplots ersichtlich ist (siehe Anhang 1.3 und 1.7). Die Abweichungen der Messwerte zwischen der flachen und der gekrümmten Oberfläche des PE-Zylinders betragen im Durchschnitt 16 %. Beim Anhydrit ist die Abweichung in absoluten Zahlen problematisch, da eine starke Inhomogenität des Materials die Variation der Messergebnisse zu stark überlagert. Jedoch lässt sich auch hier eine deutliche Tendenz erkennen (Abbildung 211).



**Abbildung 21: Vergleich der Medianwerte an gekrümmter und flacher Oberfläche**

Es konnte deutlich gezeigt werden, dass die Oberflächengeometrie einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse hat. Bei Messungen an gekrümmten Oberflächen kann davon ausgegangen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit um mindestens 15 % unterschätzt wird.

## 6.2. Einfluss des Sättigungsgrades auf die Messergebnisse

Der Wassergehalt einer Probe hat starken Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Besonders ersichtlich ist dies bei den Sandstein-Probenkörpern. Im Boxplot des Rhät-Sandsteins und des Buntsandsteins in Abbildung 22 wird die Größenordnung deutlich. Der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeiten der trocknen Rhät-Sandsteinproben liegt bei 2,5 W/(m\*K) (siehe Anhang 1.19 und 2.10), während die gesättigten Proben im Mittel Wärmeleitfähigkeiten von 4,3 W/(m\*K) (siehe Anhang 1.20 und 2.11) aufweisen.

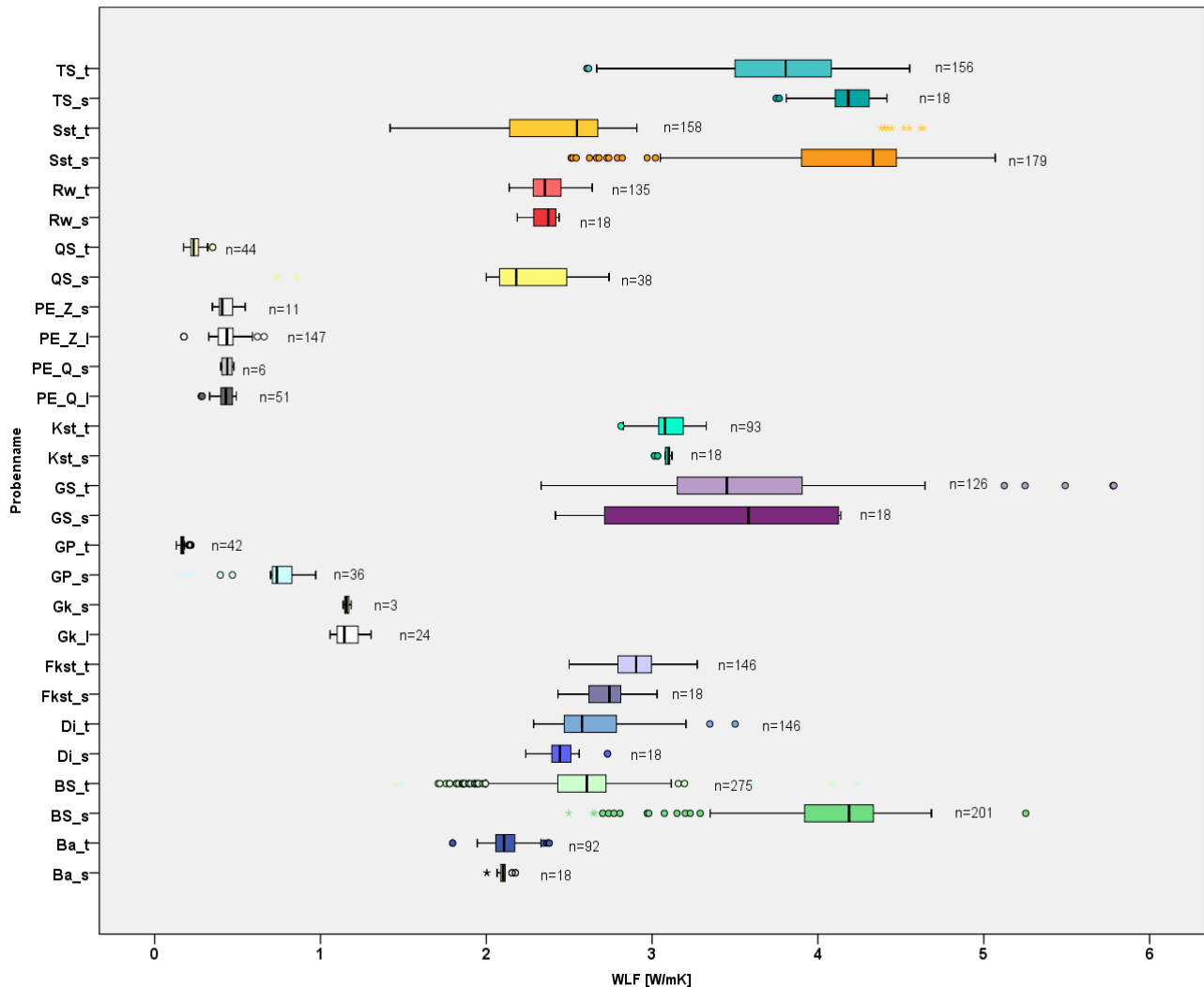
Charakteristisch für die Sandstein-Probenkörper ist eine hohe Porosität, die die starke Wasseraufnahme und damit die hohen Wärmeleitfähigkeiten bedingt. Andere Probenkörper mit sehr dichtem Gefüge und geringer Porosität, wie der Redwitzit (Rw\_t, Rw-s), der Kalkstein (Kst\_t, Kst\_s) oder der Basalt (Ba\_t, Ba\_s), zeigen keine deutlichen Unterschiede der Wärmeleitfähigkeitswerte zwischen trockenem und gesättigtem Zustand. Bei den Probenkörpern Glimmerschiefer und Tonschiefer sind die Differenzen zwischen trockenem und gesättigtem Zustand durch die Anisotropie des Materials und die Anzahl der Messwerte begründet.

Aus der differenzierten Betrachtung der Messergebnisse und der Sättigungsmethodik ergeben sich folgende Resultate:

- Bei Beachtung des Erreichens der Gewichtskonstanz im Verlauf des Sättigungsverfahrens sind sowohl Sättigungsverfahren unter atmosphärischen

Bedingungen wie in der DIN EN 13755 (2008) beschrieben als auch die Sättigung im Exsikkator unter Anlegen eines Vakuums geeignet.

- Für die Festgesteine (TCS-Messung) sind keine systematischen Abweichungen auf Grund der verschiedenen Sättigungsverfahren zu erkennen.
- Für die Lockergesteine und Bodenmaterialien (Vollraumsonden-Messungen) sind signifikante Abweichungen der Messergebnisse zu beobachten, die wahrscheinlich durch differenzierte Sättigungsverfahren begründet sind.



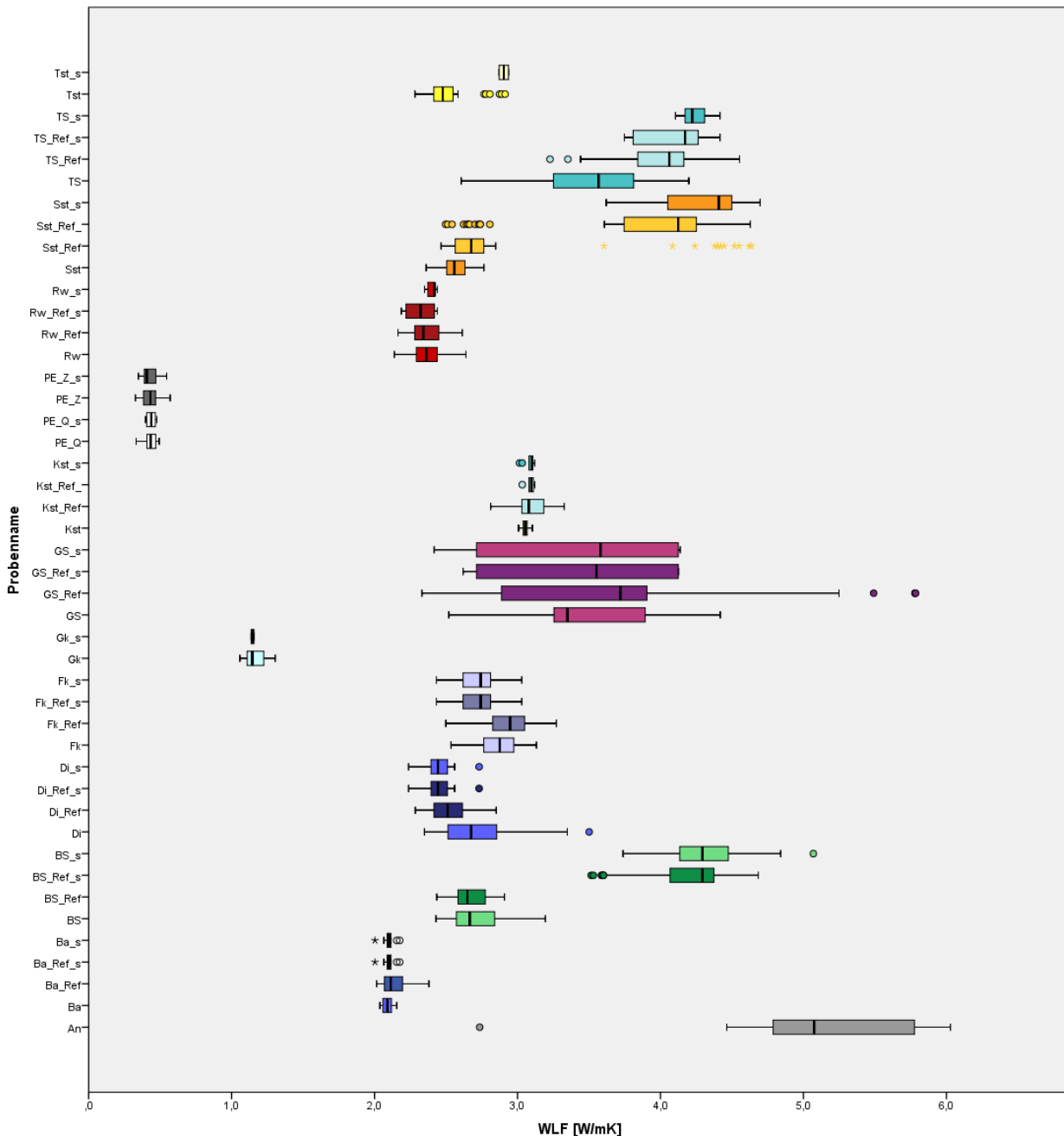
**Abbildung 22: Box-Plots der TCS- Messwerte für die getrockneten und gesättigten Probenkörper (keine Sortierung Ref- / Lab-Körper)**

### 6.3. Einfluss der Raumtemperatur und Luftfeuchte auf Messergebnisse

Die Raumtemperatur und Luftfeuchte im Messraum sollte überwiegend konstant gehalten werden. Im Methodenvergleich zeigte sich, dass stärkere Schwankungen der klimatischen Bedingungen im Messraum zu einer größeren Streuung der Messergebnisse beitragen. Die Erhöhung der Raumtemperatur und Luftfeuchte um etwa 15 % führt zu einer deutlichen Zunahme der Wärmeleitfähigkeit, die die Herstellerangaben von 3 % Abweichung um ein Vielfaches übersteigen.

## 6.4. Vergleich der Messergebnisse der Referenzprobenkörper und der laborspezifischen Probenkörper – laborspezifische Effekte

Um die Vergleichsbedingungen erfassen zu können, sind im Methodenvergleich Referenzprobenkörper und laborspezifische Probenkörper enthalten, die unter gleichen definierten Bedingungen und Verfahren von jedem Teilnehmer gemessen wurden. In Abbildung 23 sind die Messergebnisse der Referenzprobenkörper und laborspezifischen Probenkörper im trockenen und gesättigten Zustand gegenüber gestellt.



**Abbildung 23: Übersicht und Vergleich der TCS-Messungen von lagerfeuchten, trockenen und gesättigten Referenz-Probenkörpern mit den laborspezifischen Probenkörpern**

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass unter Beachtung der Messwertanzahl die Streuungseffekte bei den laborspezifischen Probenkörpern deutlich ausgeprägter sind als jene bei den



Referenzprobenkörpern. Besonders auffällig sind die Differenzen der Medianwerte bei den verhältnismäßig homogenen Materialien Diabas und Rhät-Sandstein. Hingegen konnte für die überwiegend homogenen Referenzprobenkörper und laborspezifischen Probenkörper Redwitz, Basalt, Buntsandstein und Kalkstein, unabhängig von dem Probenaufbereitungsverfahren, der Standardauswahl und den Raumbedingungen bei der Messung im TC-Modus des TCS-Messgerätes eine überdurchschnittliche Reproduzierbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte ( $R^2 = 0,976$ ) erzielt werden

Weitaus signifikantere Unterschiede in den Medianwerten und den Streuungsmaßen treten bei inhomogenen Materialien auf (vgl. Tonschiefer, Glimmerschiefer, Flaserkalk). Der kumulierte Fehler aus Anisotropie des Probenmaterials, differenziertes Probenaufbereitungsverfahren, TCS-Messungs-Modi und Standardauswahl sowie aus den spezifischen Raumbedingungen bei den Messungen führt zu einer Wärmeleitfähigkeitsstreuung von mehr als 14 %. Um solche Ungenauigkeiten der Wärmeleitfähigkeitseinschätzung und -streuung bei stark inhomogenen Materialien zu minimieren, ist eine standardisierte Probenaufbereitung und Messdurchführung dringend zu empfehlen.

Eine Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeiten mittels TCS-Messungen unterschiedlicher Laboratorien ist daher nur bei einheitlicher Messdurchführung gegeben (Konfidenzniveau  $p = 0,05$ ). Bei Einhaltung eines systematischen und konsistenten Probenaufbereitungsverfahrens, Messdurchführung (Auswahl der Messmodi, Standards, Kalibrierung) und Ergebniskontrolle (Kontrollmessung eines laboreigenen Referenzkörpers) sind intraspezifische Abweichungen der Wärmeleitfähigkeit eines Probenmaterials nur durch die natürliche Inhomogenität der Materialien und des geräteeigenen Fehlers (3-5%) begründet.

### **6.5. Messergebnisse der Messgeräte mit Voll- und Halbraumsonden**

Am Methodenvergleich waren vier Messgerätetypen mit Vollraumsonden und ein Messgerät mit Halbraumsonde beteiligt (siehe Tabelle 8 und 9). Die Messgeräte mit Vollraumsonden wurden überwiegend für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von lockeren oder schwach kompaktierten künstlichen oder natürlich vorkommenden Materialien eingesetzt. Von Festgesteinen liegen einige wenige Messwerte vor, die mit den TCS-Messgeräten gemessen wurden.

Im Vergleich zu den TCS-Messgeräten sind die Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit den Messgeräten mit Voll- und Halbraumsonden durch eine weitaus stärkere Streuung gekennzeichnet (Abbildung 24). Eine statistisch belegbare Reproduzierbarkeit der Ergebnisse konnte nur für wenige Probenmaterialien erzielt werden.

Aus der undifferenzierten Darstellung der Messergebnisse (Abbildung 24), klassifiziert nach den Probenkörpern, ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Generell lässt sich feststellen, dass die Varianz der Wärmeleitfähigkeitswerte für lockere bzw. schwach kompaktierte Materialien größer ist als jene der Festkörper. Daher sind Messungen an Lockermaterialien mit einer höheren Unsicherheit behaftet.

- In Analogie zu den Erkenntnissen aus der Messung mit den TCS-Messgeräten weisen die Messwerte der Wärmeleitfähigkeiten der Referenzprobenkörper Rhät-Sandstein (Sst\_Ref), Buntsandstein (BS\_Ref) und Anhydrit (An) eine weite Streuung der Messwerte auf.
- Die Streuung der Messwerte aus den Messungen an den PE-Körpern (PE\_Z, PE\_Q), Kalkstein (Kst\_Ref), Diabas (DI\_Ref), Basalt (Ba\_Ref) und Tonstein (Tst) ist gering.
- Gestörte Lagerungsverhältnisse bei ansonsten homogenen Materialien wie zum Beispiel dem Quarzsand und den Glasperlen erhöhen die Schwankungsbreite der Wärmeleitfähigkeit deutlich. Die interlaborspezifischen Differenzen der Wärmeleitfähigkeitswerte sind wesentlich höher als die intralaborspezifische Abweichung der Messwerte.
- Unterschiede in den Feuchtegehalten der Probenmaterialien können die Differenzen in den Wärmeleitfähigkeitswerten potenzieren (vgl. Quarzsand, Löss, Sandsteine). Die Angabe von Wertebereichen der Wärmeleitfähigkeit poröser Materialien in Abhängigkeit vom Wassergehalt ist deshalb sinnvoll.

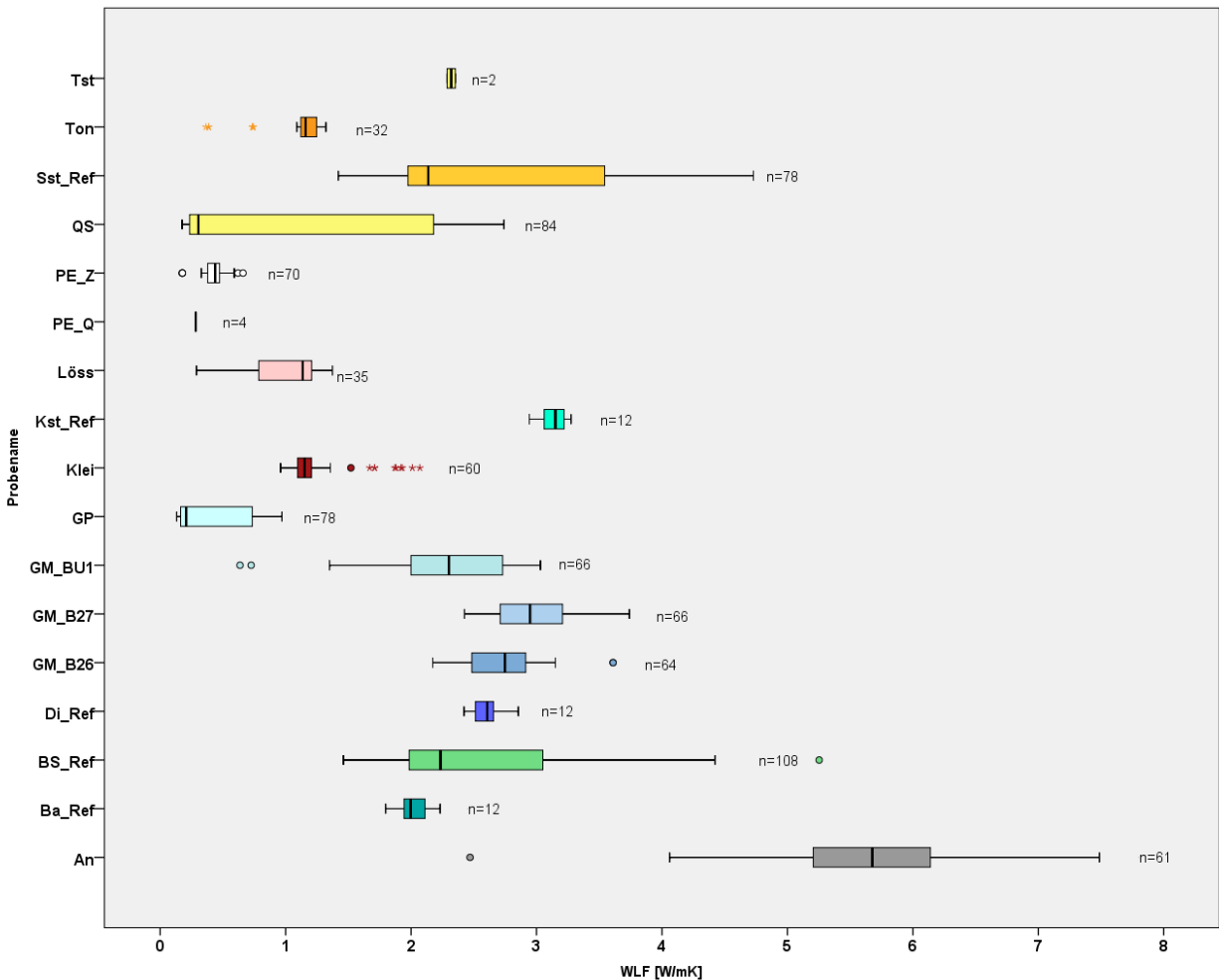
**Tabelle 9 Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Teilnehmer und Zustand des Probenmaterials.**

Teilnehmer	Messgerät	Zustand				Summe
		gesättigt	lagerfeucht	pF 2,5	trocken	
BSU	KD2-Pro	18	72	0	30	120
GDfB	KD2-Pro	42	79	0	39	160
LIAG	TK 04	4	71	0	33	108
LfU	KD2-Pro; LfU TM	10	98	0	33	141
LGB, RP	KD2-Pro	52	102	11	45	210
TLUG	SolidTherm	20	70	0	24	114
<b>Summe</b>		<b>146</b>	<b>492</b>	<b>11</b>	<b>204</b>	<b>853</b>

**Tabelle 10: Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Messgerät, Sondentyp und Zustand des Probenmaterials**

Messgerät	Zustand				Summe
	gesättigt	lagerfeucht	pF 2,5	trocken	
KD2-Pro	122	327	11	147	607
SolidTherm	20	70	0	24	114
TK04 – HLS	0	41	0	29	70
TK04 - VLS	4	30	0	4	38
TM	0	24	0	0	24
<b>Summe</b>	<b>146</b>	<b>492</b>	<b>11</b>	<b>204</b>	<b>853</b>

Die Ergebnisse bestätigen, dass Störungen der Lagerverhältnisse und unterschiedliche Feuchtegehalte einen signifikanten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Lockermaterialien haben. Demnach ist eine Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte unterschiedlicher Labore und Geräte nur anhand ungestörter Proben oder unter definierten Feuchte- und Lagerungsverhältnissen des Probenmaterials gegeben. Die Angabe finiter Wärmeleitfähigkeitswerte ist nur für vergleichbare Materialzustände und konsistenter Probenaufbereitungsverfahren und Messdurchführung möglich.



**Abbildung 24: Messwerte für die Probenkörper nach der Linien-Quellen-Theorie Methode**

### 6.5.1. Messergebnisse mit den Messgeräten mit Vollraumraumsonde

Die im Rahmen des Methodenvergleiches ermittelten Messergebnisse der Messgeräte mit Vollraumsonde zeigen ein sehr heterogenes Bild. Charakteristisch sind dafür die Boxplots 3.1, 3.9 bis 3.17 im Anhang. Allgemein lässt sich feststellen, dass signifikante Differenzen sowohl zwischen den vier Messgeräten als auch zwischen den acht Vollraumsondentypen auftreten. Die Streuung der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Messgeräten ist jedoch größer als die Vollraumsonden spezifische Varianz eines Gerätetyps.

Generell sind folgende Tendenzen ableitbar:

- Die Messergebnisse mit dem SolidTherm Messgerät weisen eine starke Streuung auf (siehe Anhang 3.5, 3.6, 3.9, 3.12). Die Wärmeleitfähigkeit gesättigter Festgesteine (z.B.

Rhät-Sandstein) wird um bis zu 25 % im Vergleich zu den anderen Vollraumsondentypen unterschätzt. Hingegen ist festzustellen, dass die Wärmeleitfähigkeit künstlicher Materialien sowie homogener Feinmaterialproben (z.B. Klei) um etwa 10 % überschätzt wird.

- Eine deutliche Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte vom Durchmesser der Sonden ist zu erkennen:
  - Große Durchmesser bedingen häufig eine größere Streuung der Wärmeleitfähigkeitswerte.
  - Geringe Durchmesser und die Doppelsonde weisen eine geringere Streuung der Wärmeleitfähigkeitswerte auf.
- Die Messung von stark inhomogenen Materialien mit dünnen, kurzen Sonden ist als problematisch zu bewerten aufgrund des kleineren Erfassungsraumes (Messradius). Die Repräsentativität der Wärmeleitfähigkeitsmessung für inhomogene Materialien ist daher eingeschränkt. Eine Erhöhung der Messanzahl kann zu einer deutlichen Verbesserung der Repräsentativität des Ergebnisses beitragen.
- Der Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der Festkörper (PE-Zylinder, Rhät-Sandstein, Buntsandstein), die sowohl mit den TCS-Messgeräten als auch mit den Messgeräten mit Vollraumsonden gemessen wurden, zeigt signifikante Differenzen. Die Wärmeleitfähigkeitswerte, die mit den Vollraumsonden des KD2-Pro Messgerätes gemessen wurden sind deutlich geringer als die, die mit den TCS-Messgeräten ermittelt wurden. Eine Ausnahme stellt der Anhydrit-Probekörper dar. Hier wurden vergleichbare Ergebnisse mit beiden Messgeräten erzielt (mittlere Abweichung  $\pm 2\%$ ).

Eine Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte bei Einsatz unterschiedlicher Vollraumsonden Messgeräte ist nicht gewährleistet. Ausgeprägte Gerätebesonderheiten und die Sensitivität der Wärmeleitfähigkeitsmessungen gegenüber Störfaktoren (z.B. Feuchtegehalt, Lagerverhältnisse) verursachen starke Abweichungen. Statistisch belastbare Ergebnisse können nur für einheitliche Messgeräte und Verfahren erzielt werden.

### **6.5.2. Messergebnisse mit den KD2-Pro Messgeräten**

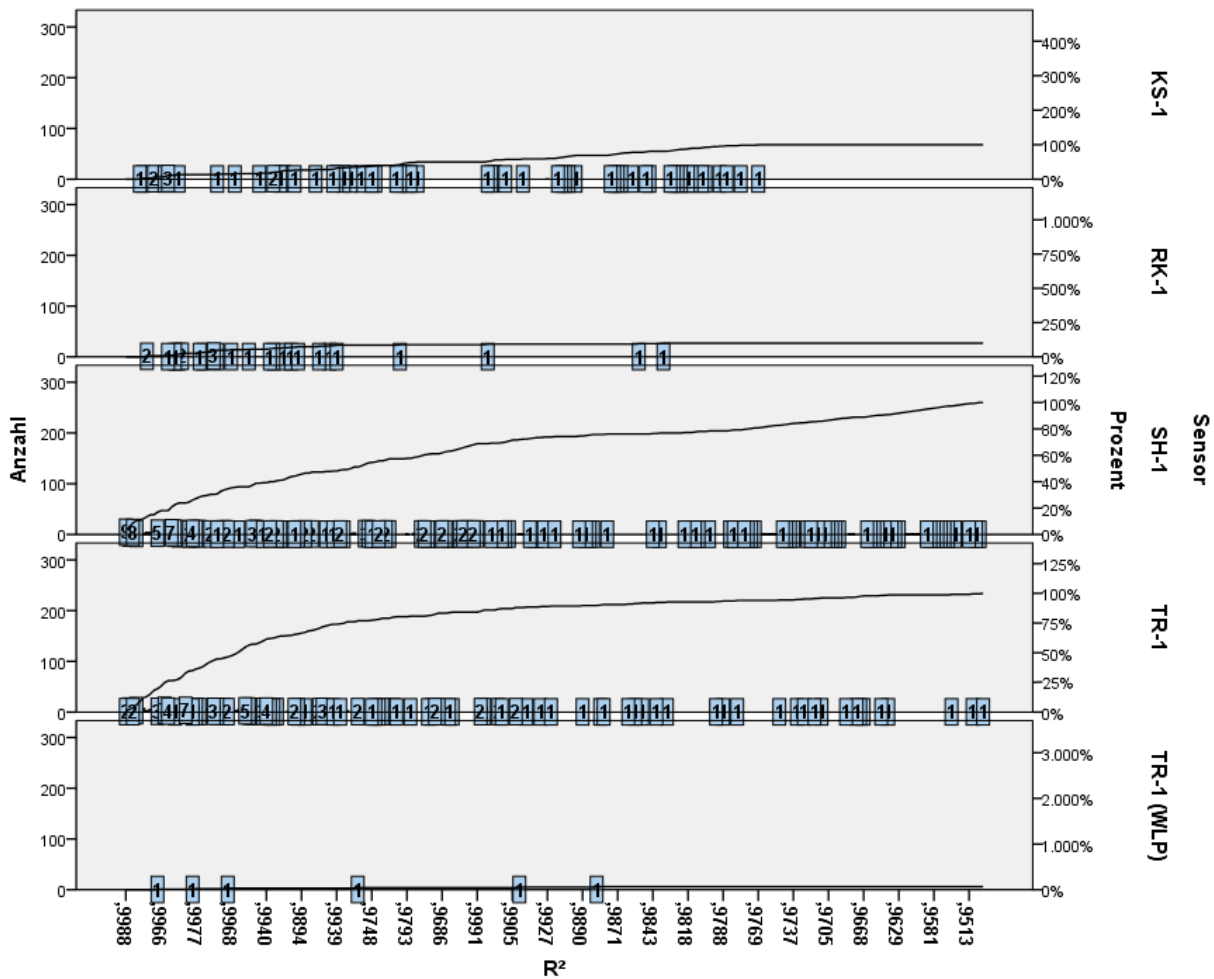
Am Methodenvergleich haben vier Messgeräte der Typenbezeichnung KD2-Pro mit unterschiedlichen Vollraumsonden teilgenommen. Eine Übersicht über die Vollraumsonden des KD2-Pro Messgerätes wird in Kapitel 3.2.2.2 gegeben. Einen Überblick über die Anzahl der Messungen mit den verschiedenen Vollraumsonden der KD2-Pro Messgeräte gibt die Tabelle 11.

Für die Bewertung der allgemeinen Güte jeder Einzelmessung wurde der Korrelationskoeffizient ( $R^2$ ) entsprechend den Herstellerangaben berücksichtigt: 1,0000; gut  $>0,9990$ , akzeptabel  $>0,9950$ ; inakzeptabel  $<0,9950$ . Diese Werte werden im Methodenvergleich jedoch in den meisten Fällen nicht erreicht. Laut Hersteller sollen die Messungen dann nochmals wiederholt werden. Für die Auswertung der Messergebnisse wurden nach einer Plausibilitätsprüfung alle Werte mit  $R^2 >0,9510$  in die Auswertung der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung der Materialien einbezogen. Das Pareto-Diagramm (Abbildung 25) zeigt den Zusammenhang zwischen

Vollraumsondentyp, Messwertanzahl und Häufigkeitsverteilung der Fehlerangaben des KD2-Pro Messgerätes.

**Tabelle 11: Anzahl der Messergebnisse differenziert nach Vollraumsondentypen der KD2-Pro Messgeräte.**

Sensor	Zustand				Summe
	gesättigt	lagerfeucht	pF 2,5	trocken	
KS-1	16	37	2	13	68
RK-1	6	15	0	6	27
SH-1	64	118	7	82	271
TR-1	36	151	2	46	235
TR-1 (Wärmeleitpaste)	0	6	0	0	6
<b>Summe</b>	<b>122</b>	<b>327</b>	<b>11</b>	<b>147</b>	<b>607</b>



**Abbildung 25: Pareto-Diagramm – Häufigkeitsverteilung der geräteeigenen Fehlerangabe der KD2-Pro Messwerte [%-Häufigkeit = Teilmenge / Gesamtmenge \* 100]**

Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung mit unterschiedlichen Vollraumsondentypen der KD2-Pro Messgeräte sind von einer starken Streuung gekennzeichnet. Unabhängig von der Materialbeschaffenheit erzeugt die Vollraumsonde SH-1 deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich zur Vollraumsonde TR-1 (vergl. Anhang 3.1, 3.15). Die Sonden spezifische Streuung der Wärmeleitfähigkeiten variiert im Mittel zwischen 3 und 15 %. Besonders starke Abweichungen von den arithmetischen Mittelwerten der Wärmeleitfähigkeiten der jeweiligen Lockermaterialien treten bei den Vollraumsonden RK-1 und KS-1 auf. Die Vollraumsonde RK-1 ist für Lockermaterialien ungeeignet. Wärmeleitfähigkeiten werden um bis zu 17 % überschätzt. Entsprechend der Herstellerangaben sollte die RK-1 deshalb nur bei Festgesteinsproben eingesetzt werden, was eine aufwendige Vorbereitung der Probenkörper mit entsprechenden Bohrungen notwendig macht. Die Vollraumsonde KS-1 tendiert hingegen zu einer Unterschätzung der Wärmeleitfähigkeit. Ebenfalls ist festzustellen, dass die Messergebnisse bei ausreichender Messwertanzahl von einer starken Streuung gekennzeichnet sind. Äquivalent zu den Ergebnissen der TCS-Messungen sind Wärmeleitfähigkeitsmessungen an homogene Materialien weniger störungsanfällig und besitzen eine größere Wertekonsistenz.

Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung mit den unterschiedlichen Vollraumsondentypen der KD2-Pro Messgeräte lassen folgende Erkenntnisse zu:

- Die Vollraumsonde SH-1 erzeugt im Vergleich zur Vollraumsonde TR-1 Messwerte mit geringeren Wärmeleitfähigkeiten (vergl. Anhang 3.1, 3.15).
- Die Vollraumsonde RK-1 ist für Lockermaterialien ungeeignet. Entsprechend der Herstellerangaben sollte die RK-1 nur bei Festgesteinsproben eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.2.2.2). Dafür sind Bohrungen notwendig.
- Die Vollraumsonde KS-1 liefert im Vergleich zu SH-1 und TR-1 häufig geringere Wärmeleitfähigkeiten (vergl. Anhang 3.1; 3,11 ff). Die Messergebnisse weisen in Hinblick auf die Anzahl der Messungen zudem eine starke Streuung auf. Die Varianz zwischen den verschiedenen Geräten ist in der Regel größer als die intraspezifische Varianz der Messreihe eines Gerätes.
- Der Einsatz von Wärmeleitpaste führt tendenziell zu einer Minderung der Wärmeleitfähigkeit der Probenmaterialien (vergl. Anhang 3.2; 3.4).

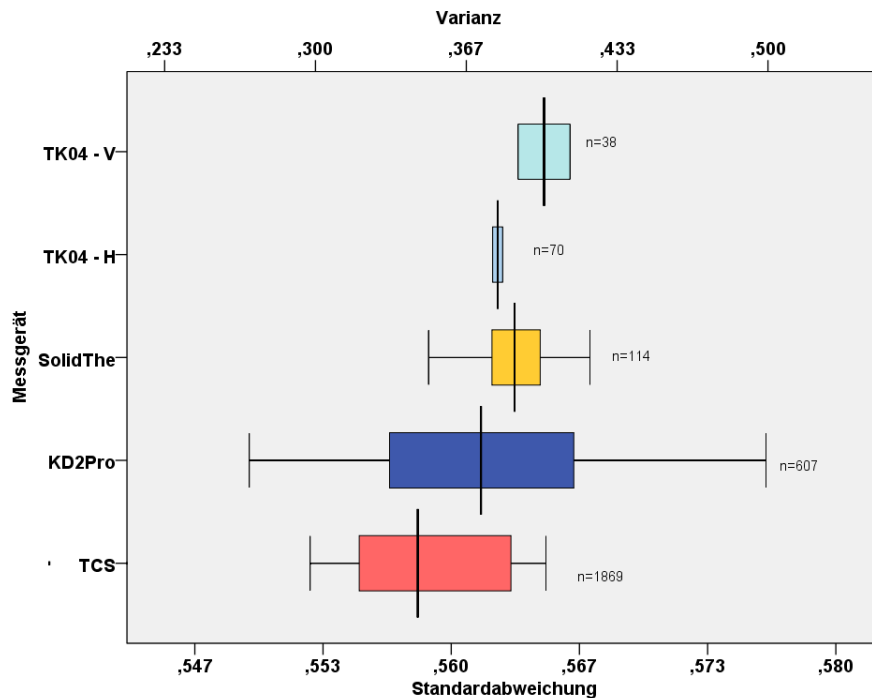
Allgemein lässt sich ableiten, dass das KD2-Pro Messgerät zur Wärmeleitfähigkeitsmessung von Lockermaterialien geeignet ist. Die Ermittlung zuverlässiger Wärmeleitfähigkeitswerte erfordert jedoch eine ausreichend große Messwertanzahl (> 5 Messungen pro Probe) und entsprechende Auswahl des Vollraumsondentyps unter Berücksichtigung der Herstellerhinweise. Die Angabe von finiten Wärmeleitfähigkeiten ist für natürliche Lockermaterialien nicht möglich. Eine genauere Beschreibung thermophysikalischer Eigenschaften und die Verwendung von arithmetischen Mittelwerten und Standardabweichungen sind daher für die Einschätzung von Wärmeleitfähigkeiten von Lockermaterialien vorteilhaft.

## 6.6. Vergleich der Messgeräte

In Abbildung 27 sind die Standardabweichung und die Varianz aller Messwerte in Bezug zu den jeweiligen Messgeräten dargestellt. Generell ist festzustellen, dass signifikante Unterschiede bezüglich der Messgenauigkeit zwischen den verschiedenen Geräten bestehen.

Für die TCS-Messgeräte liegen 1.869 Messwerte vor. In Anbetracht dieser sehr großen Datenmenge weist das Verfahren eine geringe Varianz und Standardabweichung auf. Eine überdurchschnittlich hohe Reproduzierbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte (Konfidenzlevel 95 %) ist im TC-Modus zu erzielen.

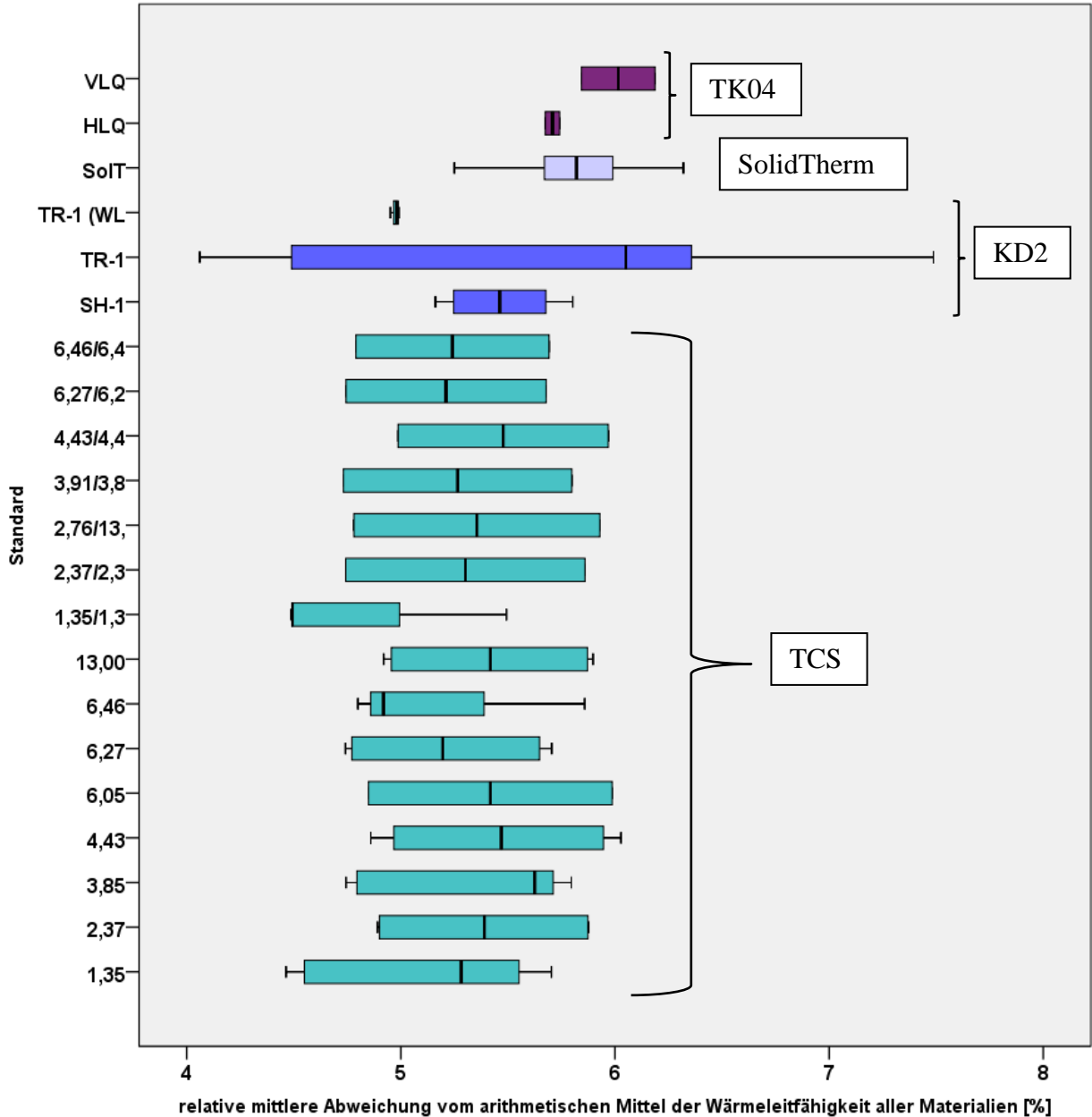
Die größten Unsicherheiten in den Wärmeleitfähigkeitswerten sind für das SolidTherm Messgerät festzustellen. Dabei zeigt sich tendenziell, dass die Wärmeleitfähigkeiten für natürlich vorkommende Materialien um bis zu 30 % durch das SolidTherm Messgerät unterschätzt werden (Abbildung 26; Abbildung 28). Für künstliche Materialien treten dagegen Überschätzungen der Wärmeleitfähigkeiten auf. Die Vollraumsonde des SolidTherm Messgerätes besitzt in Anbetracht der geringen Messwerteanzahl ( $n = 114$ ) und der eingeschränkten Probenauswahl eine überdurchschnittlich hohe Standardabweichung und Varianz. Der direkte Vergleich aller Messdatensätze wie in Abbildung 26 ist daher nur bedingt geeignet, die Fehlerabweichung verschiedener Geräte mit deutlich unterschiedlichem Stichprobenumfang zu bewerten.



**Abbildung 26: Vergleich der mittleren Standardabweichungen und Varianzen der unterschiedlichen Messgeräte**

Eine ähnliche Symptomatik lässt sich für die Messdaten der KD2-Pro Messgeräte erkennen. Hier stehen insgesamt 607 Messwerte von Locker- und Festmaterialien zur Verfügung. Durch den Einsatz der vier unterschiedlichen Vollraumsondentypen (SH-1; TK-1; KS-1; RK-1) mit

spezifischen Anwendungsbereichen ist die absolute Varianz der Messwerte verhältnismäßig hoch. Jedoch veranschaulicht die große Spannweite der Standardabweichung und Varianz auch, dass weitere Faktoren die Messgenauigkeit maßgeblich beeinflussen. Die Fehlerbetrachtung der KD2-Pro Messgeräte ist daher eng an eine Funktion aus dem Messbereich des gewählten Vollraumsondentyps (entsprechend Herstellerangaben) und der Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials geknüpft.



**Abbildung 27: Relative mittlere Abweichung vom Wärmeleitfähigkeitsmittelwerten aller Materialien [in %] bei Einsatz unterschiedlicher Messgeräte (TCS/ Sonden) und Standards bzw. Sondentypen**

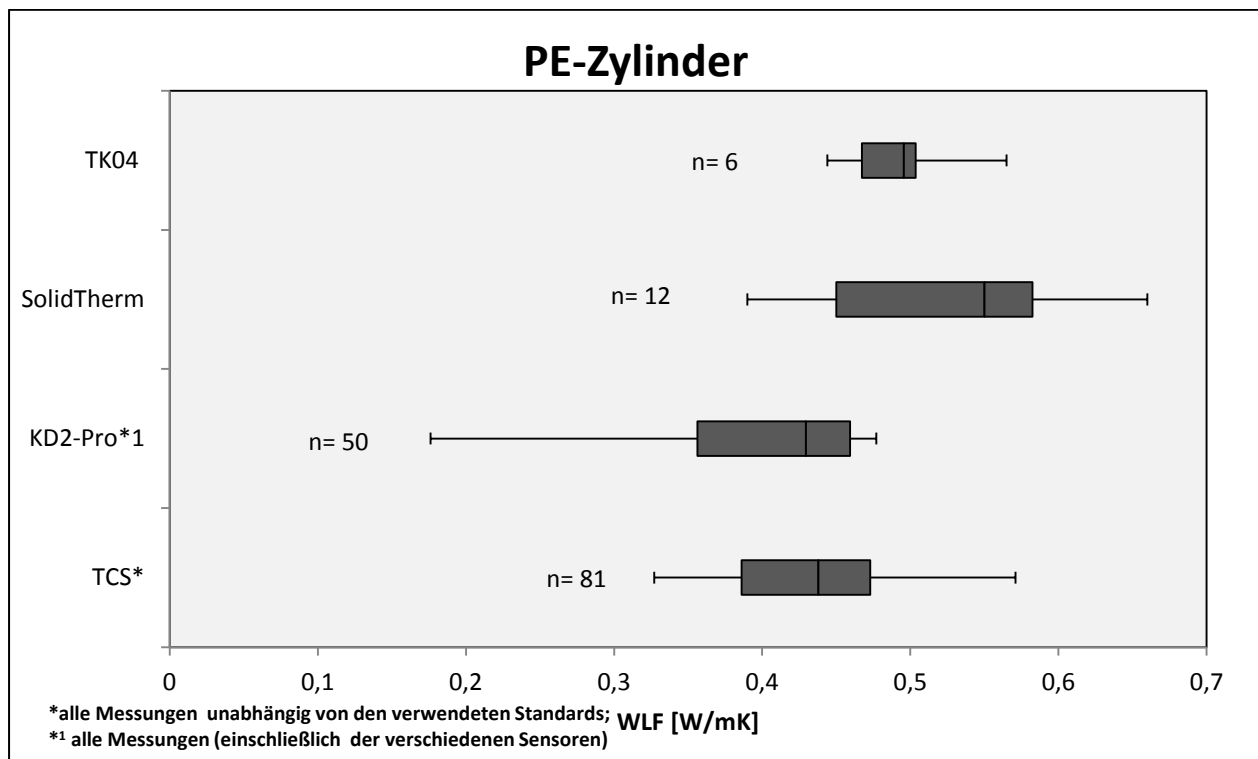
Das TK 04 Messgerät liefert für alle Probenmaterialien überwiegend reproduzierbare Ergebnisse. Aufgrund der eingeschränkten Anzahl von Messungen (n = 108) ist eine statistisch



verifizierte Aussage über die Konsistenz der TK 04 Messdaten allerdings nicht möglich. Die Wärmeleitfähigkeiten des TK 04 Messgerätes liegen häufig über den arithmetischen Mittel der KD2-Pro Messgeräte und des SolidTherm Messgerätes. Eine weitgehende Korrespondenz der Wärmeleitfähigkeitsmesswerte ist zwischen dem TK 04 (n = 72) Messgerät und den TCS-Messgeräten zu erkennen.

Neben den absoluten Differenzen zwischen den einzelnen Geräten können spezifische Abweichungen durch die Wahl des Vollraumsondentyps und des Standards verursacht werden. Ein Vergleich der relativen Abweichung unter Beachtung der verwendeten Standards und Vollraumsondentypen (mit  $n > 100$ ) verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen Reproduzierbarkeit, Messgenauigkeit und Messgerät (Abbildung 27).

Die relative mittlere Abweichung der TCS- Messungen beträgt 5,34 %. Dieser relative Fehler beinhaltet sowohl Geräte spezifische Differenzen als auch Einflüsse der Materialbeschaffenheit. Es ist zu erkennen, dass die Verwendung der Standards 1,35/1,35 im TC-Modus für die Messungen von natürlich vorkommenden Gesteinen zu einer größeren Unsicherheit der Messergebnisse führt (Median, 1. und 3. Quantil sind asymmetrisch und signifikant negativ oder positiv verschoben). Die Wahl eines angepassten Standards, der im Wertebereich der Wärmeleitfähigkeit des zu messenden Probenkörper liegt, ist demnach für die Validierung und Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte von hoher Priorität.

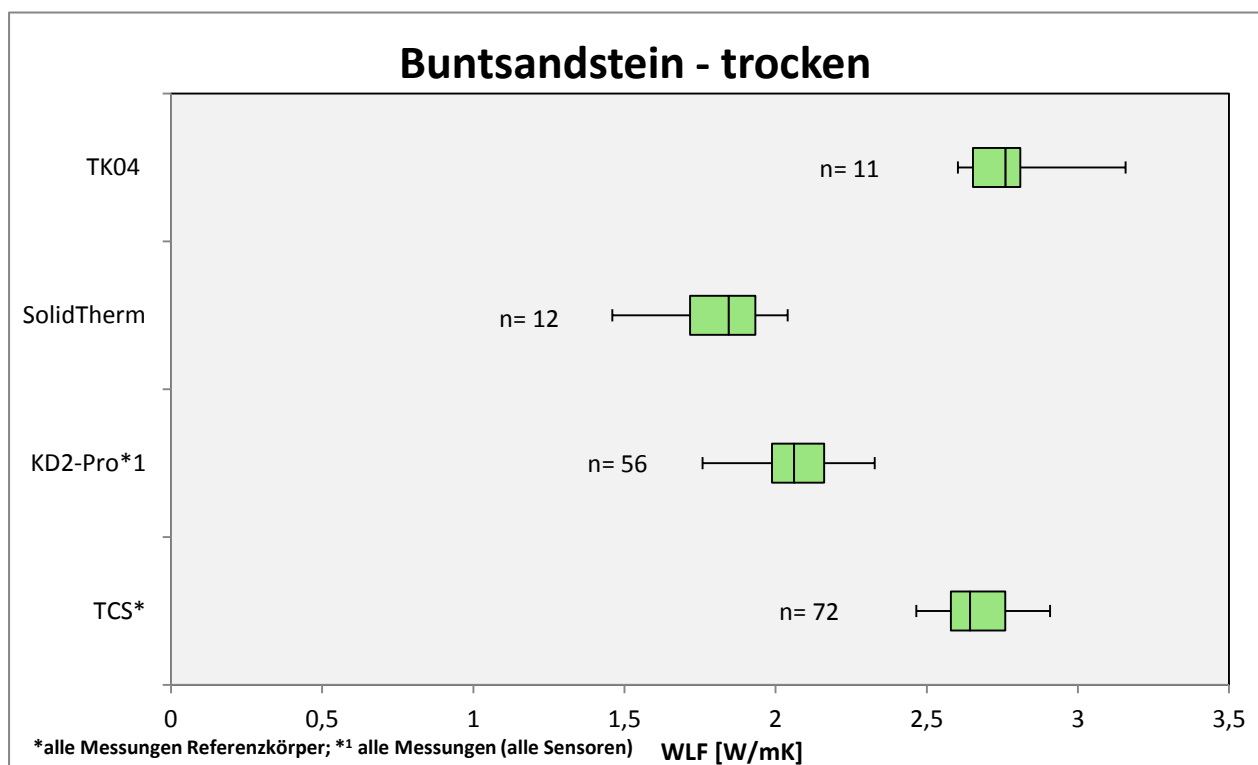


**Abbildung 28: Vergleich der Messergebnisse unterschiedlicher Messgeräte am Beispiel des PE-Zylinders.**

Die Messungen mit dem KD2-Pro Messgerät besitzen ebenfalls größere Abweichungen und sind teilweise mit starken Unsicherheiten behaftet. Die Genauigkeit der Wärmeleitfähigkeitswerte wird maßgeblich durch den Vollraumsondentyp und der Anzahl der

Messungen beeinflusst. Die Wahl des geeigneten Vollraumsondentyps ist stark von der Probenmaterialbeschaffenheit abhängig. Ein Vergleich der Festkörpermessungen (PE-Zylinder; Buntsandstein) zeigt, dass die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten um bis zu 20 % unter den TCS-Ergebnissen liegen. Eine signifikante Überschätzung der Wärmeleitfähigkeiten von Festkörpern tritt hingegen nur bei Fehlmessungen auf (negative Werte für  $R^2$ ).

Die hier im Rahmen des Methodenvergleiches getätigten Analysen zeigen, dass eine hohe Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch das TCS-Messgerät gewährleistet wird. Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem KD2-Pro Messgerät sind besonders sensitiv gegenüber externen und Material bedingten Störungen. Eine angemessene Anzahl von Wiederholungsmessungen und sorgfältige Auswahl des Vollraumsondentyps sowie ungestörtes Probenmaterial (Lager- und Feuchteverhältnisse) sind Voraussetzungen für die Repräsentativität der Wärmeleitfähigkeiten.



**Abbildung 29: Vergleich der Messergebnisse der unterschiedlichen Messgeräte am Beispiel des Buntsandsteins**

## 7. Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Rahmen des Methodenvergleichs wurden 49 Probenkörper aus 22 unterschiedlichen Materialien gemessen. Bei den Materialien handelt es sich überwiegend um natürlich vorkommende Gesteine bzw. Böden. Bei der Auswahl der Materialien wurde darauf geachtet, dass die Materialien ein weites Spektrum an Wärmeleitfähigkeiten abdecken. Die geringsten Wärmeleitfähigkeiten weisen die Probenkörper aus Polyethylen und die Glasperlen mit 0,4 bis 0,8 W/(m\*K) auf. Im Wertebereich um 1 W/(m\*K) liegen die Wärmeleitfähigkeiten der Probenkörper aus Ton, Löss, Klei und der Glaskörper. Typische Wärmeleitfähigkeiten im Bereich zwischen 2 und 3 W/(m\*K), wie diese bei natürlichen Gesteinen häufig auftreten, weisen der Tonstein, der Rhät-Sandstein im trockenen Zustand, der Redwitzit, der Kalkstein, die Geschiebemergel, der Flaserkalk, der Diabas, der Buntsandstein im trockenen Zustand und der Basalt auf. Im nächst folgenden Intervall mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen 3 und 4 W/(m\*K) liegen die Probenkörper der Tonschiefer (TS) und Glimmerschiefer (GS). Sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten von größer 4 W/(m\*K) konnten bei den gesättigten Sandsteinen und dem Anhydrit ermittelt werden.

Zur Feststellung der Reproduzierbarkeit von Messergebnissen mit einer Messmethode, einem Messgerät oder einem Probenaufbereitungsverfahren wurden im Methodenvergleich sehr homogene Materialien wie die Polyethylen Probenkörper, der Glaskörper, der Redwitzit, die Glasperlen oder der Quarzsand verwendet. Die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung mit der Optical-Scanning-Messmethode zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und Reproduzierbarkeit. Dies gilt insbesondere für die TCS-Messgeräte. Im Hinblick auf die Messmethode der Linien-Quellen-Theorie ist unter Berücksichtigung der Funktionsweise der Messmethode mit punktuellen Messungen der Wärmeleitfähigkeiten an einem Ort in der Probe die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse nur bedingt gegeben. Erschwerend kommt hinzu, dass die Messgeräte mit Vollraumsonden stark variierende Ausführungen und Geometrien der Messsonden aufweisen. Diese wurden als ursächlich für die teilweise starke Variation der Messergebnisse identifiziert.

Hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit unterschiedlichen Probenaufbereitungsverfahren, Messmethoden und Messgeräten konnte allgemeingültig festgestellt werden, dass das TCS-Messgerät unter Einhaltung standardisierten Probenaufbereitungsverfahren und Messdurchführung für alle Arten von Festgesteinen vergleichbare Messergebnisse erzeugt. Aus den Ergebnissen des Methodenvergleiches lassen sich folgende Empfehlungen ableiten, die entscheidend zur Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messwerte mit dem TCS-Messgerät beitragen:

- Die Messung der Wärmeleitfähigkeit ist vorzugsweise an ebenen Flächen durchzuführen. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit an gekrümmten Oberflächen (Bohrkernmantel) resultiert in einer Unterschätzung der Wärmeleitfähigkeit. Das Sägen und Herstellen einer ebenen Messoberfläche der Gesteinskörper bzw. Bohrkerne wird daher dringend empfohlen.
- Die Trocknung der Probenkörper sollte in Abhängigkeit der Materialbeschaffenheit bei 70° bis 105°C im Trockenschrank bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz erfolgen. Hydratwasserhaltige Proben, beispielsweise mit hohen Tonanteilen, die zur Abgabe des

kristallin gebundenen Wassers neigen, sind bei 70 °C zu trocknen. Anschließend müssen die Probenkörper auf Raumtemperatur abkühlen.

- Für kristalline Festgesteine ist die Zwischenlagerung und Abkühlung der Proben im geschlossenen Trockenschrank akzeptabel. Sedimentgesteine sind hygroskopischer. Deshalb ist für die Abkühlung und Lagerung der Probenkörper die Verwendung von Exsikkatoren zu bevorzugen.
- Die Wassersättigung der Probenkörper ist aufgrund der Effektivität unter Vakuum im Exsikkator zu empfehlen. Die Sättigungsdauer sollte dabei zwei Stunden nicht unterschreiten. Für Festgesteine mit hohen Tonanteilen ist eine Sättigung unter Vakuum problematisch. Aufgrund der Materialinstabilität und der Quellfähigkeit der Tonminerale wird eine Sättigung nach DIN EN 13755 (2008) empfohlen. Das Erreichen der Gewichtskonstanz der Probenkörper im Verlauf des Sättigungsverfahrens ist vor Messbeginn zu prüfen.
- Die klimatischen Bedingungen im Messraum sollten stets konstant gehalten werden. Starke Schwankungen der Lufttemperatur und Luftfeuchte sind zu vermeiden.
- Die Probenkörper sollten zur Temperierung am Vortag der Messung in den Messraum gebracht werden. Um eine Änderung des Feuchte- und Wassergehaltes zu vermeiden, wird die Lagerung der Probenkörper in Exsikkatoren empfohlen.
- Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Probenkörpers mit dem TCS-Messgerät sollte nur der TC-Modus genutzt werden. Der kombinierte TC/TD-Modus ist ergänzend für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit vorgesehen und sollte nicht als Substitut für die Wärmeleitfähigkeitsmessung gebraucht werden.
- Die Auswahl der Standards ist entsprechend der zu erwartenden Wärmeleitfähigkeit der Probenkörper vorzunehmen. Vor Messbeginn sollte die Temperierung der Standards entsprechend der Messraumbedingungen gewährleistet sein.
- Zu Beginn jeder Messung ist das TCS-Messgerät mittels des Software Tools „adjust sensor“ zu kalibrieren. Zur Kalibrierung sind Standards zu verwenden, die nicht für die Messung benutzt werden. Damit wird das zunehmende Aufheizen des Kalibrierstandards im Verlauf des Messgerätebetriebs sowie die sich daraus ergebenden negativen Auswirkungen auf die Messgenauigkeit ausgeschlossen. Bei umfassenden Messreihen sollte die Kalibrierung der Sensoren regelmäßig wiederholt werden.
- Bei stark anisotropen Gesteinen ist für jede Messung die Dokumentation der Messrichtung erforderlich, um die sich ergebende Streuungsmaße besser interpretieren zu können.
- Um Messungenauigkeiten möglichst gering zu halten sind kurze Messabschnitte vorteilhaft. Daher sollten die Standards und der Probenkörper sehr nah beieinander positioniert werden. Idealerweise sollte der Abstand zwischen Probenkörper und Standard weniger als 5 mm betragen. Bei jeder Messung sollte immer nur ein Probenkörper gemessen werden.
- Übermäßiges Aufheizen der verwendeten Standards bei längeren Messreihen ist zu vermeiden. Daher sollten Messpausen eingehalten und/oder Standardpaare getauscht werden. Messungenauigkeiten und Streuungseffekte der Wärmeleitfähigkeitswerte können somit minimiert werden.
- Jede Messreihe sollte die regelmäßige Messung eines Referenzkörpers (laborspezifischer Eichkörper) beinhalten. Es wird empfohlen, diese Referenzkörpermessung nach ca. 10

Einzelmessungen zu wiederholen. Abweichungen vom empirischen Normwert sind als Indikator für Messfehler zu sehen. Eine Korrektur bzw. Wiederholung der Messreihe ist dann nötig.

Im Gegensatz zum TCS-Messgerät sind für die Messgeräte mit Voll- und Halbraumsonden häufig große Spannweiten und Streuungsmaße der Messergebnisse zu verzeichnen. Eine belastbare Einschätzung der Wärmeleitfähigkeit ist anhand der Messwerte unterschiedlicher Geräte nicht möglich. Die spezifischen Charakteristika der verschiedenen Sondentypen erfordern deshalb eine standardisierte Vorgehensweise und die explizite Ausweisung der Materialeigenschaften und Messbedingungen. Für die Wärmeleitfähigkeitsmessung mit den Vollraumsonden des KD2-Pro Messgerätes werden folgende Vorgehensweisen empfohlen:

- Die Auswahl des Vollraumsondentyps ist entsprechend den Herstellerangaben materialspezifisch vorzunehmen.
- Der Wärmeleitfähigkeitsmesswert sollte stets die Angabe des verwendeten Vollraumsondentyps beinhalten.
- Die Vollraumsondentypen SH-1 und TR-1 des KD2-Pro Messgerätes sind für die Messung an Lockergesteinsproben zu bevorzugen. Dabei sollten Textur, Volumen, Störungen und Sättigungsgrad der Proben beachtet und dokumentiert werden.
- Die Vollraumsonde SH-1 ist besonders für feinkörnige, homogene Materialien (< 2 mm) mit geringem Skelettanteil geeignet. Bei Messungen von stärker inhomogenen Materialien (feine Grundmatrix mit höheren Grobkornanteilen von <10 %) sind umfangreichere Messreihen an unterschiedlichen Stellen (Messpunkte) nötig. Hier sollte der Median und die Standardabweichung aus mindestens 6 Messungen mit  $R^2 > 0,9510$  als repräsentativer Wärmeleitfähigkeitswert angegeben werden.
- Die Vollraumsonde TR-1 eignet sich vor allem für die Wärmeleitfähigkeitsbestimmung von Materialien mit breitem Korngrößenspektrum und hohem Grobkornanteilen (Sandfraktion und größer). Für Ton und Schluff dominierende homogenen Lockermaterialien ist die TR-1 weniger geeignet.
- Messungen an Festgesteinsproben sind nur bedingt durchführbar und unterschätzen die Wärmeleitfähigkeit maßgeblich. Für Festgesteinsproben mit Wärmeleitfähigkeiten  $> 2 \text{ W/(m}^*\text{K)}$  können nur die Vollraumsonden TR-1 und RK-1 verwendet werden.
- Der Einsatz von Wärmeleitpaste für die Messung der Wärmeleitfähigkeit an Festgesteinen ist ungeeignet.

Im Rahmen des Methodenvergleichs konnten eine Vielzahl grundlegender Probleme herausgestellt und Lösungsansätze ermittelt werden. Dennoch bestehen weitere Unsicherheiten, die in diesem Methodenvergleich nicht zu klären waren. Besonders herauszustellen sind dabei in Bezug auf das TCS-Messgerät der Einfluss der Kalibrierung und der Messlänge (= Gesamtlänge von Standard 1 + Probenkörper + Standard 2) auf die Messergebnisse, die erforderliche Probenanzahl pro Messung sowie die Differenzen zwischen TC- und TC/TD-Modi.

Generell sollte die Probenaufbereitung und Messdurchführung entsprechend der Beschreibung in Kapitel 4.4 ff erfolgen. Die Wärmeleitfähigkeitscharakteristik einer Gesteinsprobe sollte

ergänzend die petrographische, lithologische und stratigraphische Einordnung beinhalten. Für eine möglichst genaue Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit sind der Median einer Messreihe und die Standardabweichung geeignete statistische Mittel.

Im Vergleich zur Abfrage des Status der Wärmeleitfähigkeitsmessungen in den SGD und im LIAG (Bericht PK Geothermie, 2012) haben zwischenzeitlich einige SGD neue oder zusätzliche Messgeräte für Wärmeleitfähigkeitsmessungen angeschafft. Dabei fiel die Wahl durchweg auf das TCS-Messgerät oder das KD2-Pro Messgerät. Ein Vorteil des preisgünstigen KD2-Pro Messgerätes ist die Einsatzfähigkeit im Gelände. Hier sind in-situ-Messungen der Wärmeleitfähigkeit vorwiegend an Lockergesteinen und Bodensubstraten bei natürlicher Lagerungsfeuchte möglich. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Festgesteinskörpern ist an eine aufwendige Probenvorbereitung gebunden.

Technische Modifikationen des TCS-Messgerätes sollen in Zukunft die kontaktlose Messung der Wärmeleitfähigkeit an Lockergesteinsproben ermöglichen. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und Unsicherheiten zu minimieren ist die Durchführung der Messungen nach einem standardisierten Verfahren zu empfehlen.

Die bisher praktizierte Verwendung von Wärmeleitfähigkeitswerten aus der Literatur für die Erstellung von geothermischen Potentialkarten durch die SGD ist nicht repräsentativ für die lokalen geologischen und geothermischen Verhältnisse. Bei den Wärmeleitfähigkeitswerten aus der Literatur existiert in der Regel keine Angabe zur verwendeten Messmethode, zum Messgerät oder zum Probenaufbereitungsverfahren. Somit kann keine Bewertung der Unsicherheit bzw. Belastbarkeit des Literaturwärmeleitfähigkeitswertes vorgenommen werden. Zudem sind die Angaben häufig ohne Bezug zu einer lithologischen Einheit. Deshalb ist es nach den Erkenntnissen aus dem Methodenvergleich dringend zu empfehlen eigene Messungen unter Einhaltung definierter Verfahren für Gesteinsproben aus den länderspezifischen lithologischen Einheiten durchzuführen. Eine allgemeingültige Umrechnung der Wärmeleitfähigkeitswerte vom trockenen in den gesättigten Zustand ist rechnerisch nicht möglich.

Ein einheitliches, standardisiertes Vorgehen bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten der SGD stellt den ersten Schritt zur Schaffung einer harmonisierten Datengrundlage für die Bewertung der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes dar. Aufbauend auf methodisch klar beschriebenen und interpretierbaren Wärmeleitfähigkeitswerten kann in einem zweiten Schritt die abgestimmte Erarbeitung von geothermischen Potenzialkarten erfolgen.

## 8. Literatur

- Blackwell, J. (1954): "A transient flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk"; J. Appl. Phys., 25, 137-144.
- DIN 38402 Teil 41 (1984-5): "Ringversuche, Planung und Organisation "; Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 13755 (2008) „Prüfung für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck“; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 1936 (1999) „Prüfung von Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität“; Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 13755 (2008) „Prüfung für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck“, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 18121-1 (1998) „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt. Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung“, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 18121-2 (2012) „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt. Teil 2: Bestimmung durch Schnellverfahren“, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Erbas, K. (2001): "Eine universelle Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Aufheizkurven konstant geheizter Zylinderquellen". S. 90, Diss. TU Berlin
- Jaeger, J. (1956): "Conduction of heat in an infinite region bounded internally by a circular cylinder of a perfect conductor"; Australian J. Phys., 9, 167-179.
- Kristiansen, (1982): "The Transient Cylindrical Probe Methode for Determination of Thermal Parameters of Earth Materials"; Geoskrifter, Vol. 18, S. 154
- Lotz, B. (2004): "Neubewertung des rezenten Wärmestroms im Norddeutschen Becken", S. 227, Diss. Freie Uni. Berlin
- PK Oberflächennahe Geothermie (2008): "Sachstandsbericht für einen bundeseinheitlichen Produktkatalog zur wirtschaftlichen Anwendung oberflächennaher geothermischer Daten." S. 25 [http://www.infogeo.de/dokumente/download\\_pool/PKOG\\_Abschlussbericht\\_1.3\\_08-04-25.pdf](http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/PKOG_Abschlussbericht_1.3_08-04-25.pdf)
- Popov, Y. A., Tertychnyi, V., Romushkevich, R., Korobkov, D. & Pohl, J. (2003) Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: experimental data, Pure app. geophys., 160, 1137-1161
- Popov Y.A., Pevzner S.L., Pimenov V.P. & Romushkevich R.A. (1999): New geothermal data from the Kola superdeep well SG-3. Tectonophysics 306, 345-366.
- Popov Y.A., Pribnow D.F.C., Sass J.H., Williams C.F. & Burkhardt H. (1999): Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. Geothermics 28, 253-276.
- Popov Yu.A. (1997): Optical scanning technology for nondestructive contactless measurements of thermal conductivity and diffusivity of solid matters. In: Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Proceedings of the 4-th World Conference. Brussels, Belgium, 1, 109-117.

Popov, Y. A., Berezin, V. V., Semionov, V. G. & Korosteliyov, V. M. (1985) Complex detailed investigations of the thermal properties of rocks on the basis of a moving point source, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 1, 64-70

Popov, Y. A., Semionov, V. G., Korosteliyov, V. M. & Berezin, V. V. (1983) Non-contact evaluation of thermal conductivity of rocks with the aid of a mobile heat source, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 19, 563-567

Popov, Y. (1983) Theoretical models of the method of determination of the thermal properties of rocks on the basis of moveable sources, *Geologiya I Razvedka (Geology and Prospecting)*, p(I), 97-103

Pribnow, D. (1994): Ein Vergleich von Bestimmungsmethoden der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie“; *VDI Fortschrittsberichte Reihe 19, Nr. 75*, VDI-Verlag, S. 111

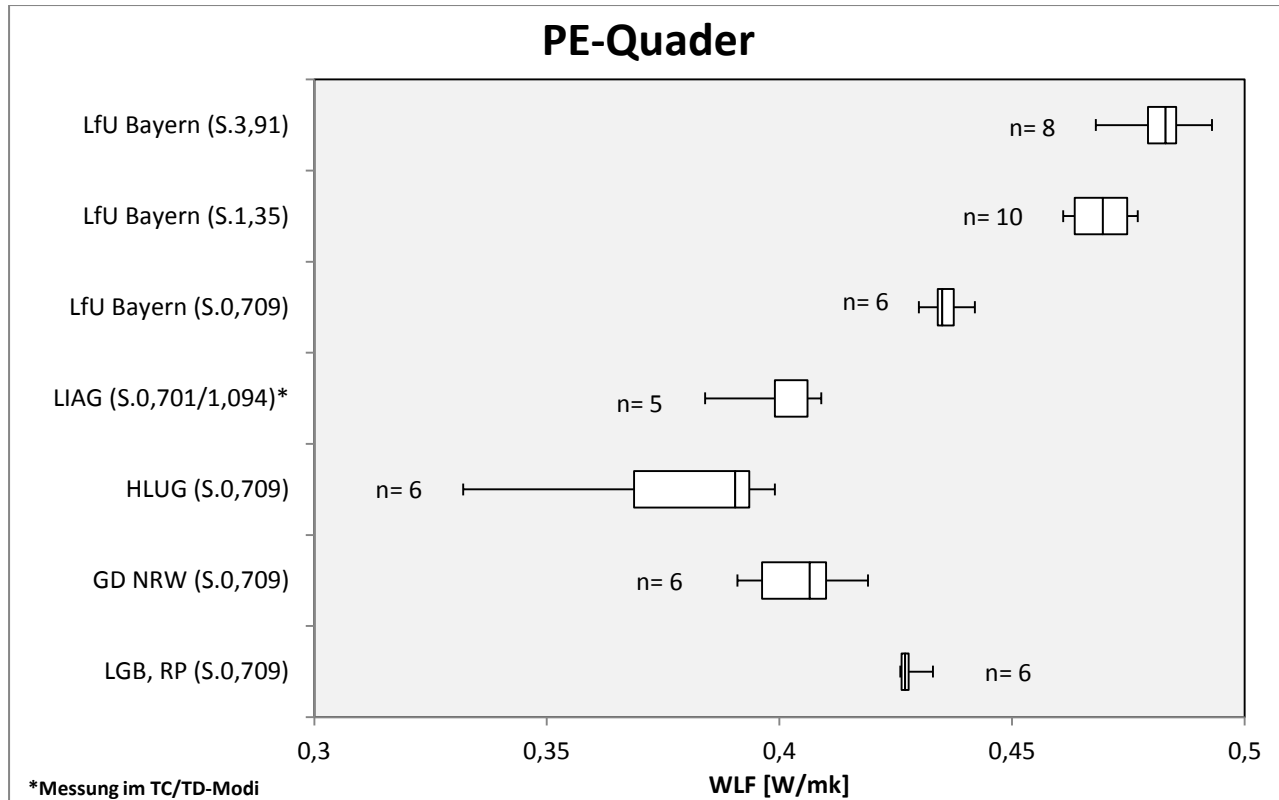
Tarnawski, V.R., Momose, T. & Leong, W.H. (2009): “Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil Thermal conductivity.” *Geotechnique* 59, No. 4, S. 331-338



# ANHANG

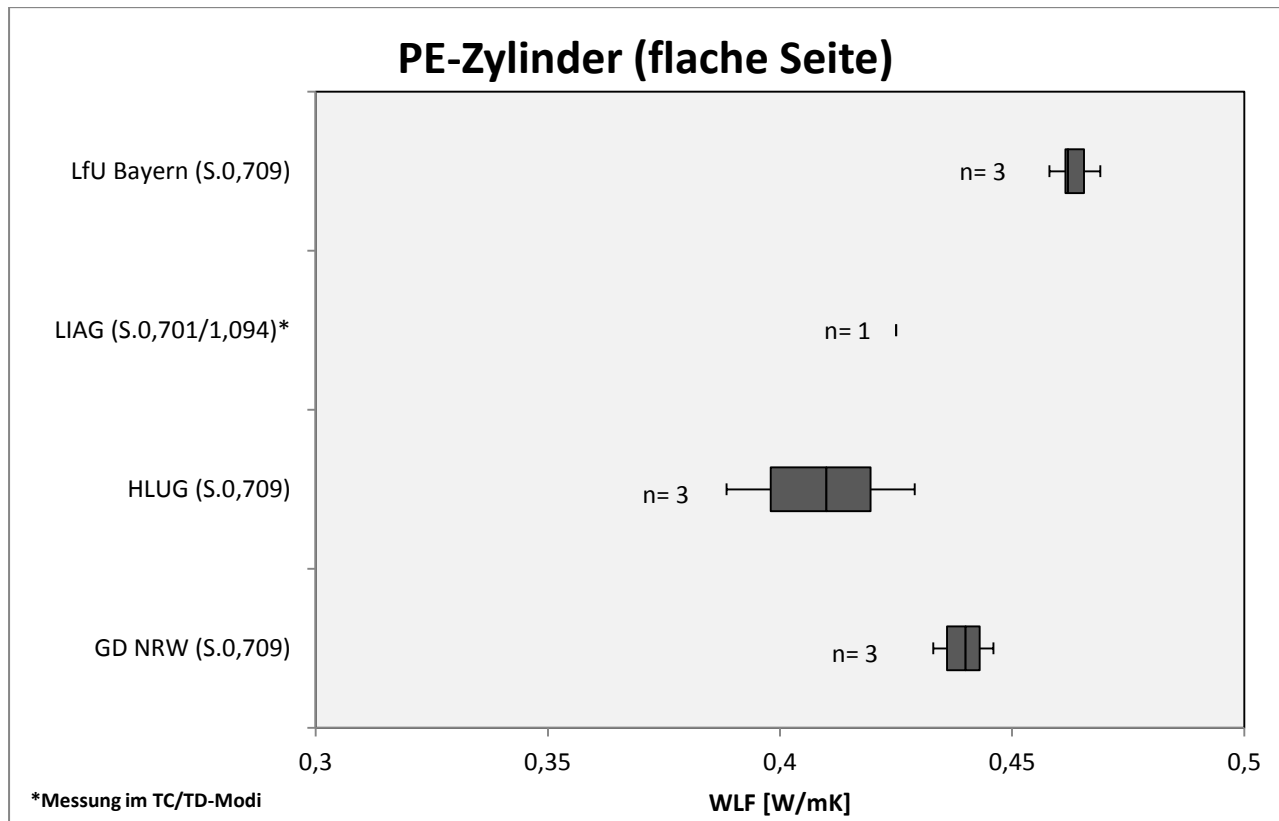
## 1. Referenzprobenkörper – TCS-Messgerät

### 1.1 PE-Körper (Quader) - Referenzkörper



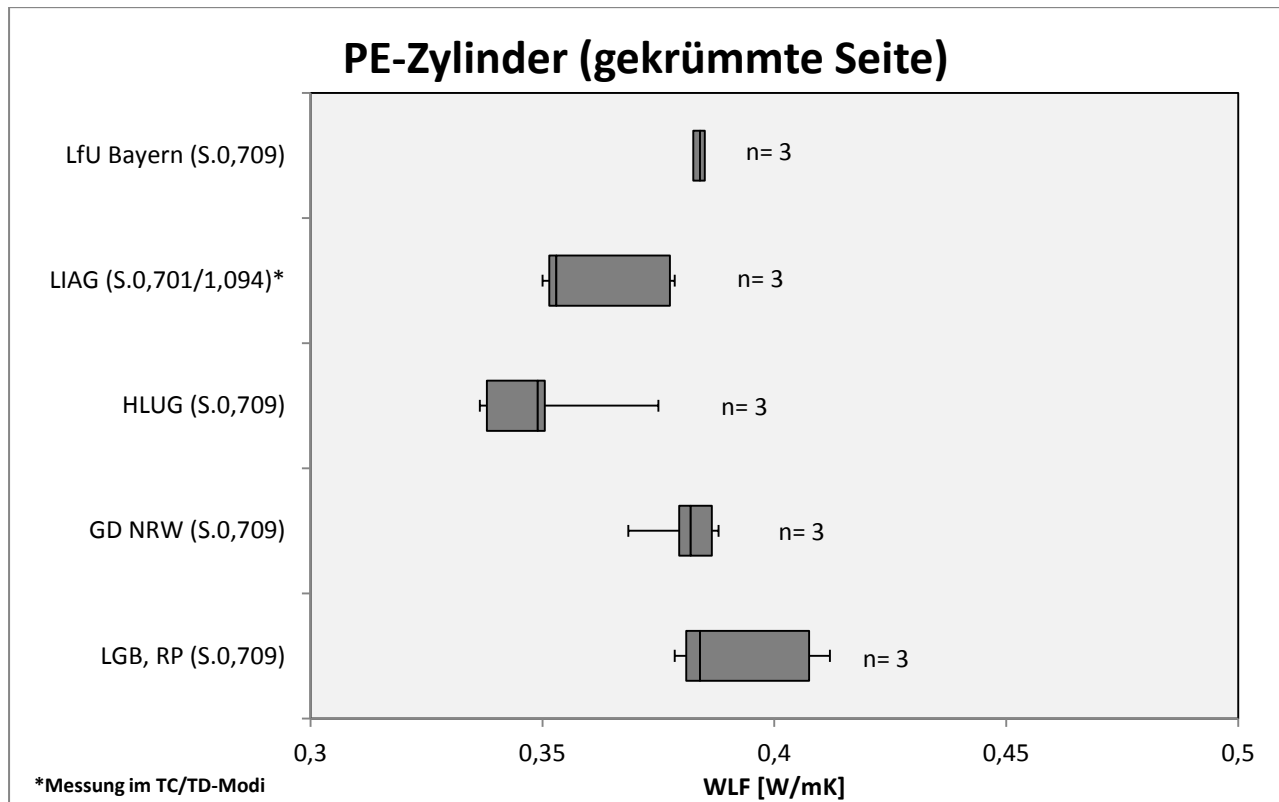
PE-Quader	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern	LfU Bayern
Standard	0,709	0,709	0,709	0,701/1,094	0,709	1,35	3,91
Umfang	6	6	6	5	6	10	8
Min	0,426	0,391	0,332	0,384	0,430	0,461	0,468
Max	0,433	0,419	0,399	0,409	0,442	0,477	0,493
Mittelwert	0,428	0,405	0,378	0,399	0,436	0,469	0,482
Stabw	0,002	0,010	0,024	0,009	0,004	0,006	0,007
Q1	0,426	0,396	0,369	0,399	0,434	0,464	0,479
Median	0,427	0,407	0,391	0,399	0,435	0,470	0,483
Q3	0,428	0,410	0,394	0,406	0,438	0,475	0,485

## 1.2 PE-Körper (Zylinder) – flache Seite - Referenzkörper



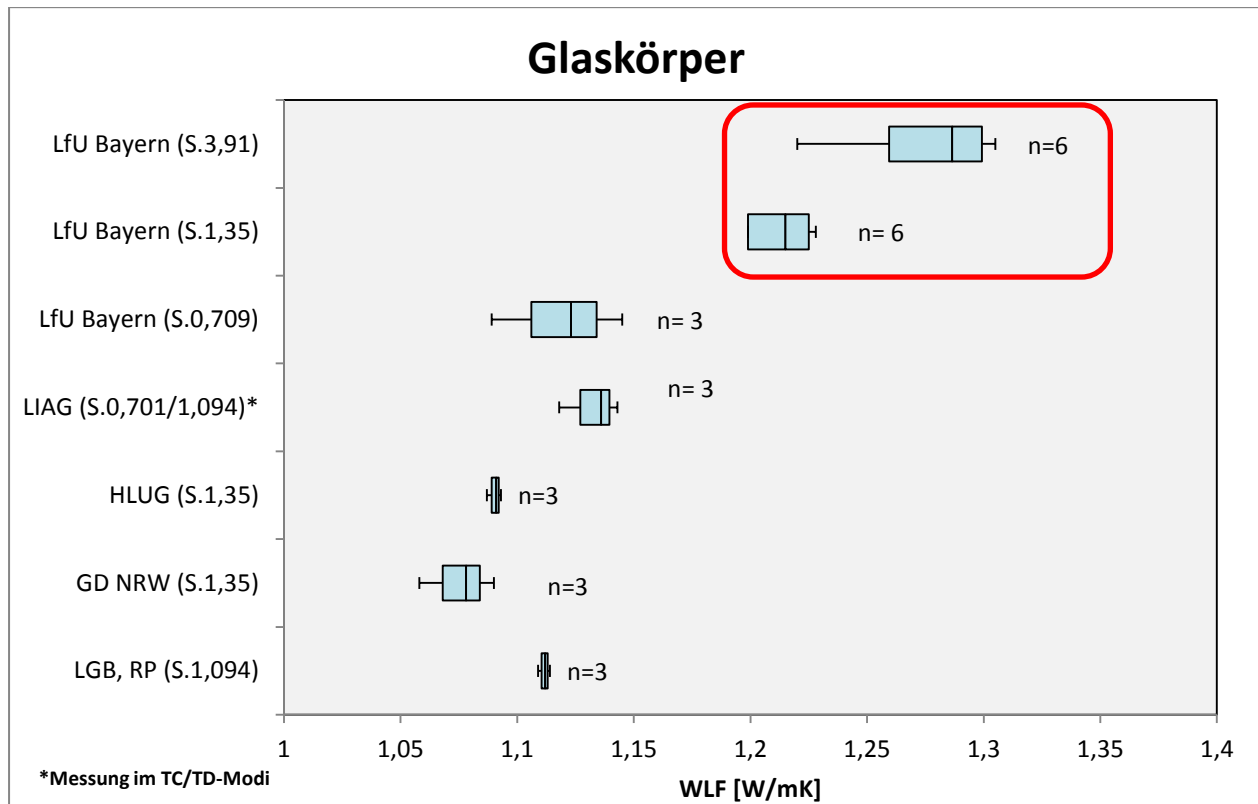
PE-Zylinder	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>0,709</b>	<b>0,709</b>	<b>0,709</b>	<b>0,701/1,094</b>	<b>0,709</b>
Umfang	3	3	3	1	3
Min	0,445	0,432	0,386	0,425	0,461
Max	0,460	0,446	0,429	0,425	0,469
Mittelwert	0,454	0,439	0,408	0,425	0,464
Stabw	0,006	0,006	0,018	0,000	0,004
Q1	0,451	0,436	0,398	0,425	0,462
median	0,456	0,440	0,410	0,425	0,462
Q3	0,458	0,443	0,420	0,425	0,466

### 1.3 PE-Körper (Zylinder) – gekrümmte Seite - Referenzkörper



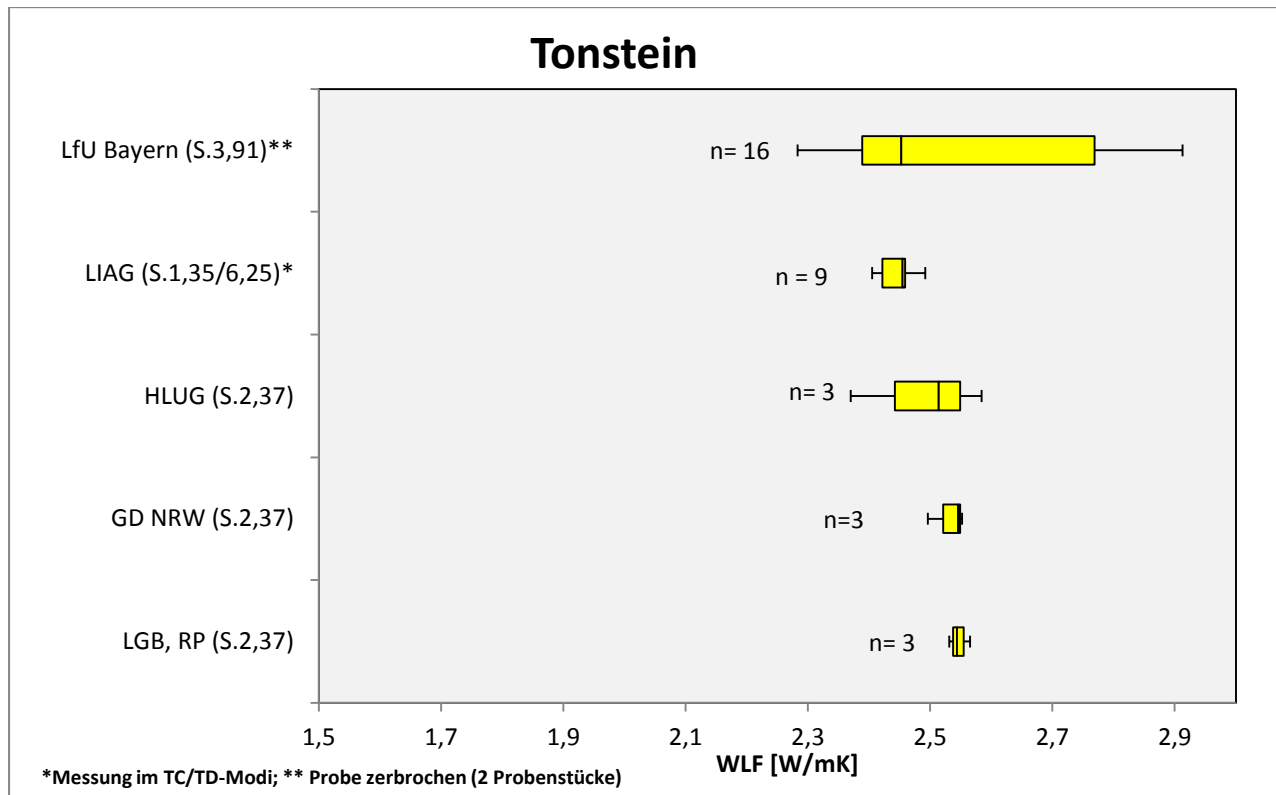
PE-Zylinder	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>0,709</b>	<b>0,709</b>	<b>0,709</b>	<b>0,701/1,094</b>	<b>0,709</b>
Umfang	3	3	3	3	3
Min	0,378	0,377	0,327	0,350	0,381
Max	0,431	0,391	0,352	0,402	0,386
Mittelwert	0,398	0,383	0,343	0,368	0,384
Stabw	0,024	0,006	0,011	0,024	0,002
Q1	0,381	0,380	0,338	0,352	0,383
Median	0,384	0,382	0,349	0,353	0,384
Q3	0,408	0,387	0,351	0,378	0,385

## 1.4 Glaskörper - Referenzkörper



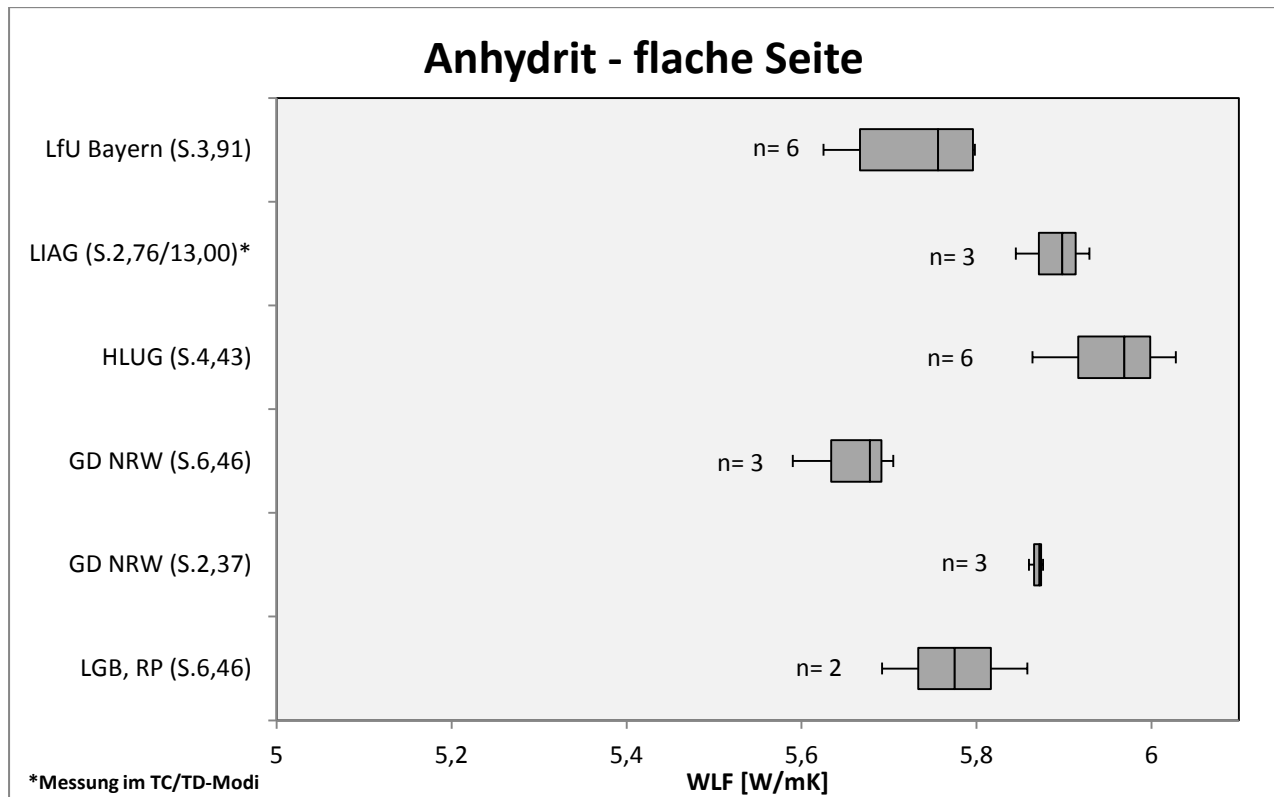
Glaskörper	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern	LfU Bayern
Standard	1,094	1,35	1,35	0,701/1,094	0,709	1,35	3,91
Umfang	3	3	3	3	3	6	6
Min	1,109	1,058	1,087	1,118	1,089	1,199	1,220
Max	1,114	1,090	1,093	1,143	1,145	1,228	1,305
Mittelwert	1,112	1,075	1,090	1,132	1,119	1,213	1,275
Stabw	0,002	0,013	0,002	0,011	0,023	0,012	0,030
Q1	1,111	1,068	1,089	1,127	1,106	1,199	1,260
Median	1,112	1,078	1,091	1,136	1,123	1,215	1,287
Q3	1,113	1,084	1,092	1,140	1,134	1,225	1,299

## 1.5 Tonstein - Referenzkörper



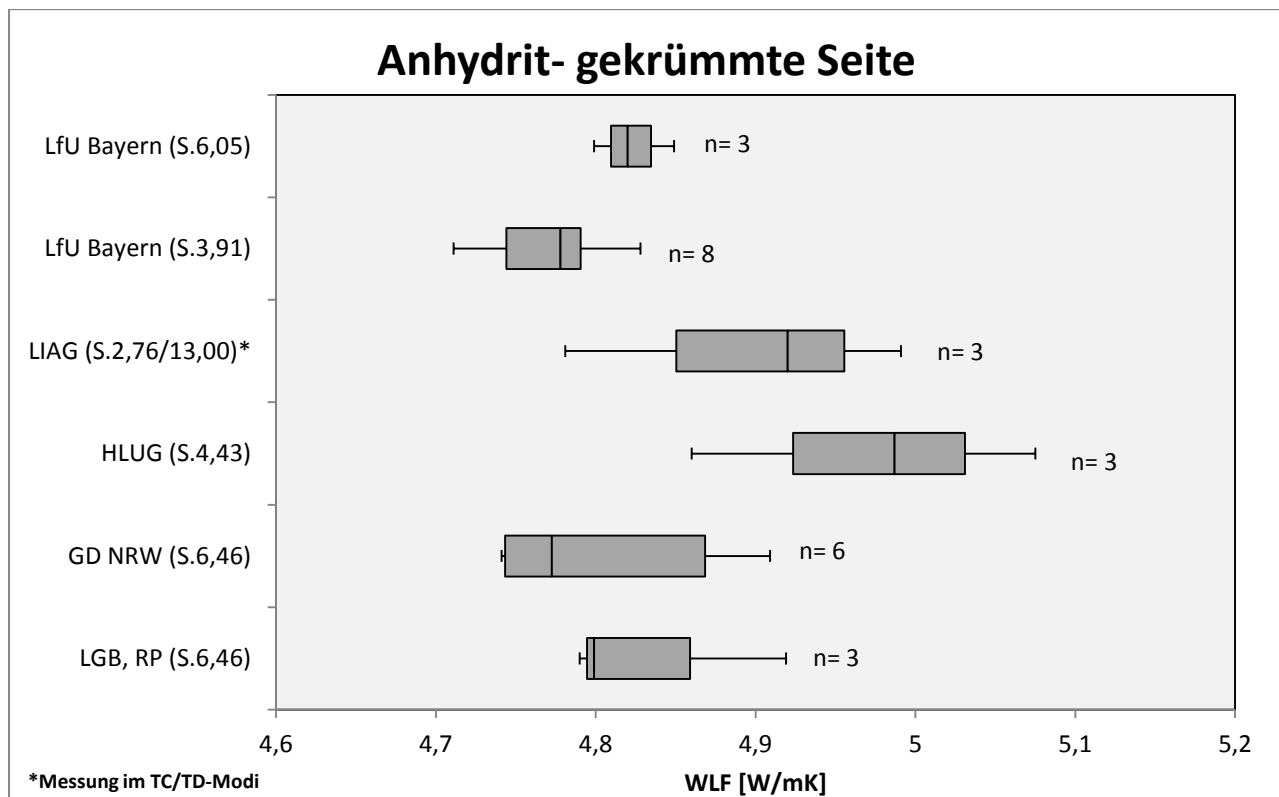
Tonstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	3	3	3	9	8	9
Min	2,531	2,496	2,370	2,405	2,283	2,405
Max	2,565	2,552	2,584	2,492	2,913	2,492
Mittelwert	2,547	2,531	2,489	2,447	2,534	2,447
Stabw	0,014	0,025	0,089	0,029	0,212	0,029
Q1	2,538	2,521	2,442	2,422	2,389	2,422
median	2,544	2,546	2,514	2,455	2,453	2,455
Q3	2,555	2,549	2,549	2,459	2,769	2,459

## 1.6 Anhydrit – flache Seite - Referenzkörper



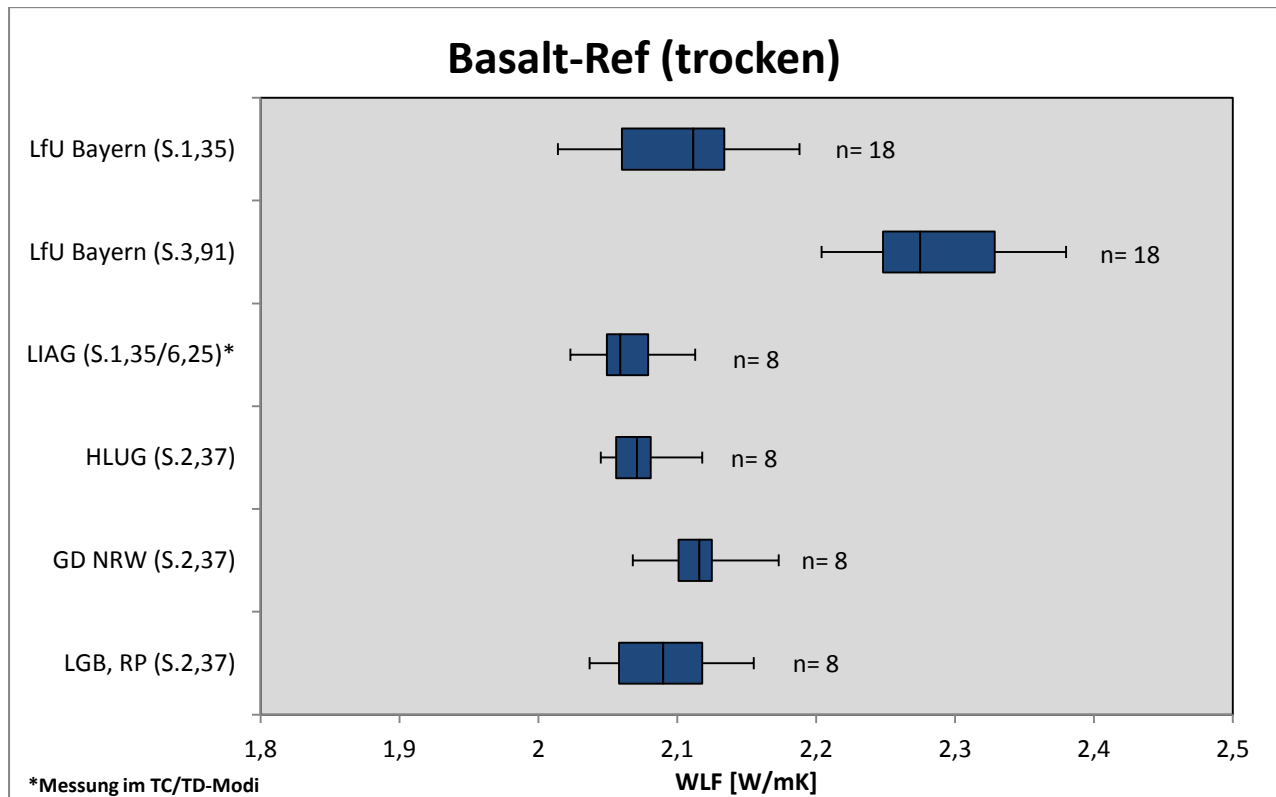
Anhydrit	LGB, RP	GD NRW	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>6,46</b>	<b>2,37</b>	<b>6,46</b>	<b>4,43</b>	<b>2,76/13,00</b>	<b>3,91</b>
Umfang	2	3	3	3	3	6
Min	5,692	5,860	5,590	5,864	5,845	5,625
Max	5,858	5,876	5,705	6,028	5,929	5,798
Mittelwert	5,775	5,869	5,658	5,954	5,891	5,728
Stabw	0,083	0,007	0,049	0,068	0,035	0,070
Q1	5,734	5,866	5,634	5,917	5,872	5,667
Median	5,775	5,872	5,678	5,969	5,898	5,756
Q3	5,817	5,874	5,692	5,999	5,914	5,796

## 1.7 Anhydrit – gekrümmte Seite - Referenzkörper



Anhydrit	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>6,46</b>	<b>6,46</b>	<b>4,43</b>	<b>2,76/13,00</b>	<b>3,91</b>	<b>6,05</b>
Umfang	3	6	3	3	8	3
Min	4,790	4,741	4,860	4,781	4,732	4,799
Max	4,919	4,909	5,075	4,991	4,849	4,849
Mittelwert	4,836	4,805	4,974	4,897	4,790	4,823
Stabw	0,059	0,071	0,088	0,087	0,038	0,020
Q1	4,795	4,743	4,924	4,851	4,765	4,810
Median	4,799	4,773	4,987	4,920	4,799	4,820
Q3	4,859	4,869	5,031	4,956	4,812	4,835

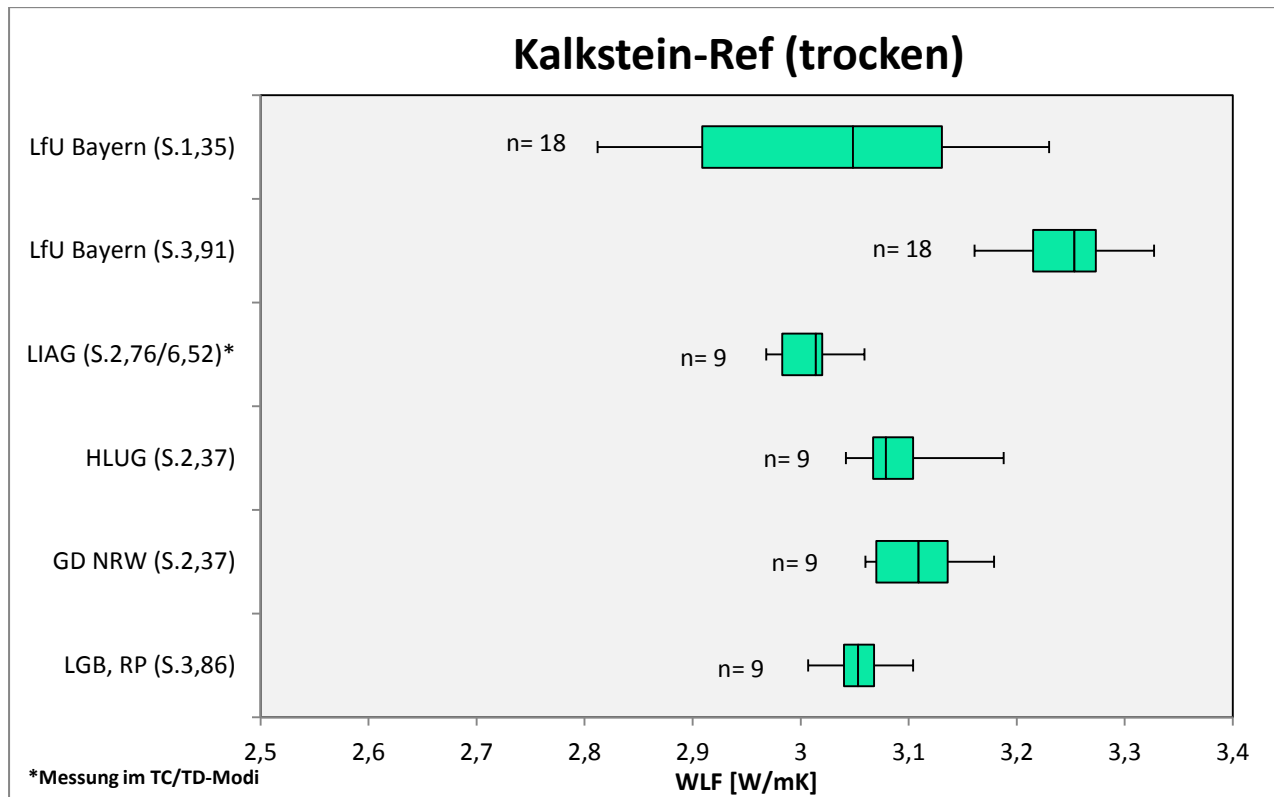
## 1.8 Basalt - Referenzkörper



Basalt	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	8	18	18
Min	2,037	2,068	2,045	2,023	2,204	2,014
Max	2,155	2,173	2,118	2,113	2,380	2,188
Mittelwert	2,091	2,120	2,073	2,064	2,289	2,103
Stabw	0,038	0,030	0,022	0,027	0,054	0,051
Q1	2,058	2,101	2,056	2,049	2,248	2,060
median	2,090	2,116	2,071	2,059	2,275	2,112
Q3	2,118	2,125	2,081	2,079	2,329	2,134

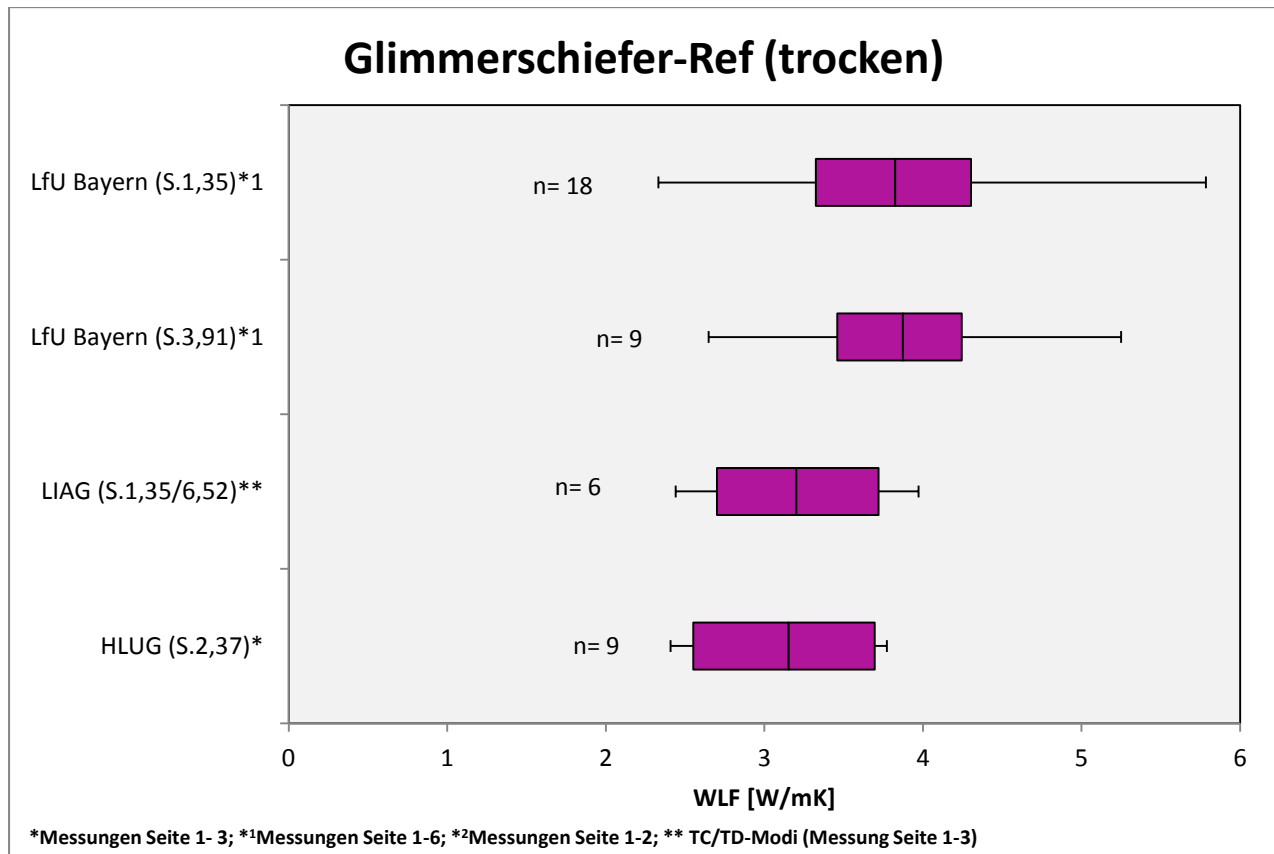


## 1.9 Kalkstein – Referenzkörper



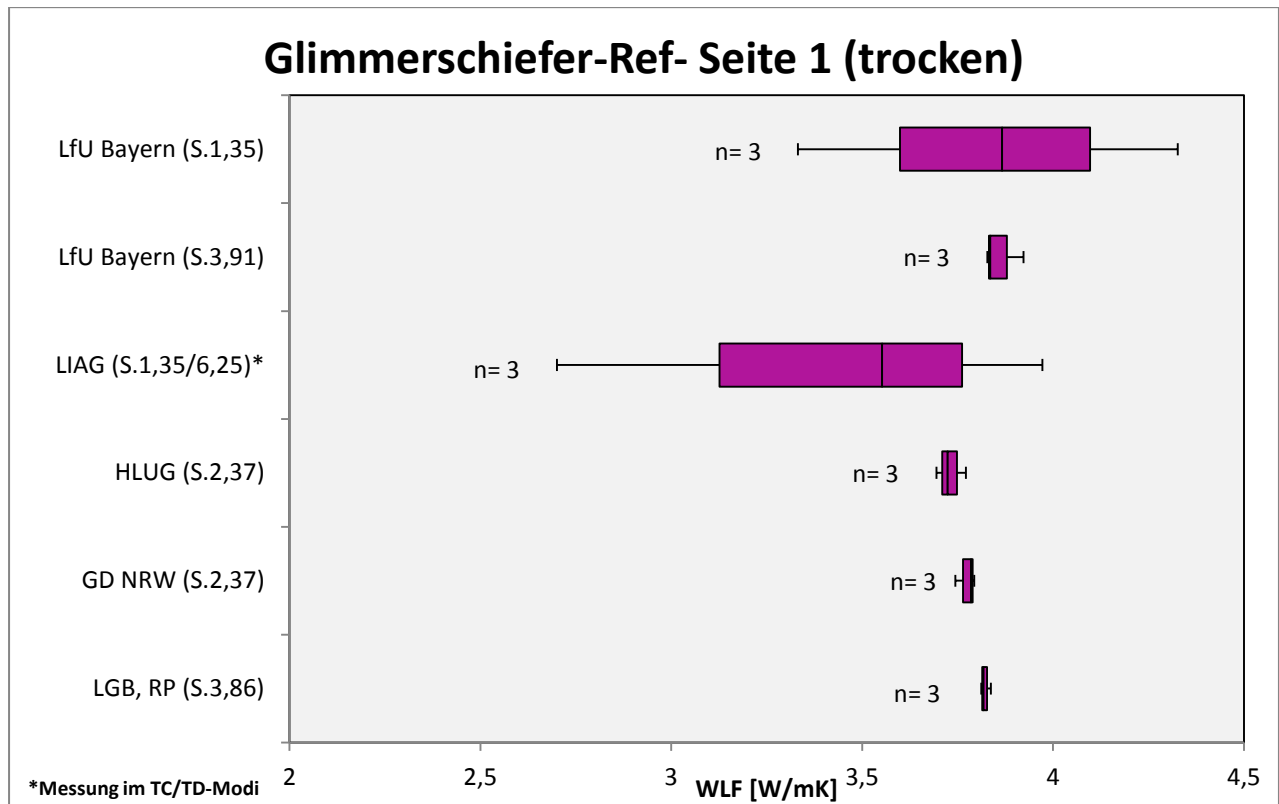
Kalkstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,76/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	18	18
Min	3,007	3,060	3,042	2,968	3,161	2,812
Max	3,104	3,179	3,188	3,059	3,327	3,230
Mittelwert	3,054	3,108	3,093	3,008	3,248	3,031
Stabw	0,028	0,041	0,043	0,026	0,045	0,128
Q1	3,040	3,070	3,067	2,983	3,215	2,909
Median	3,053	3,109	3,079	3,014	3,254	3,049
Q3	3,068	3,136	3,104	3,020	3,273	3,131

## 1.10 Glimmerschiefer – alle Messergebnisse - Referenzkörper



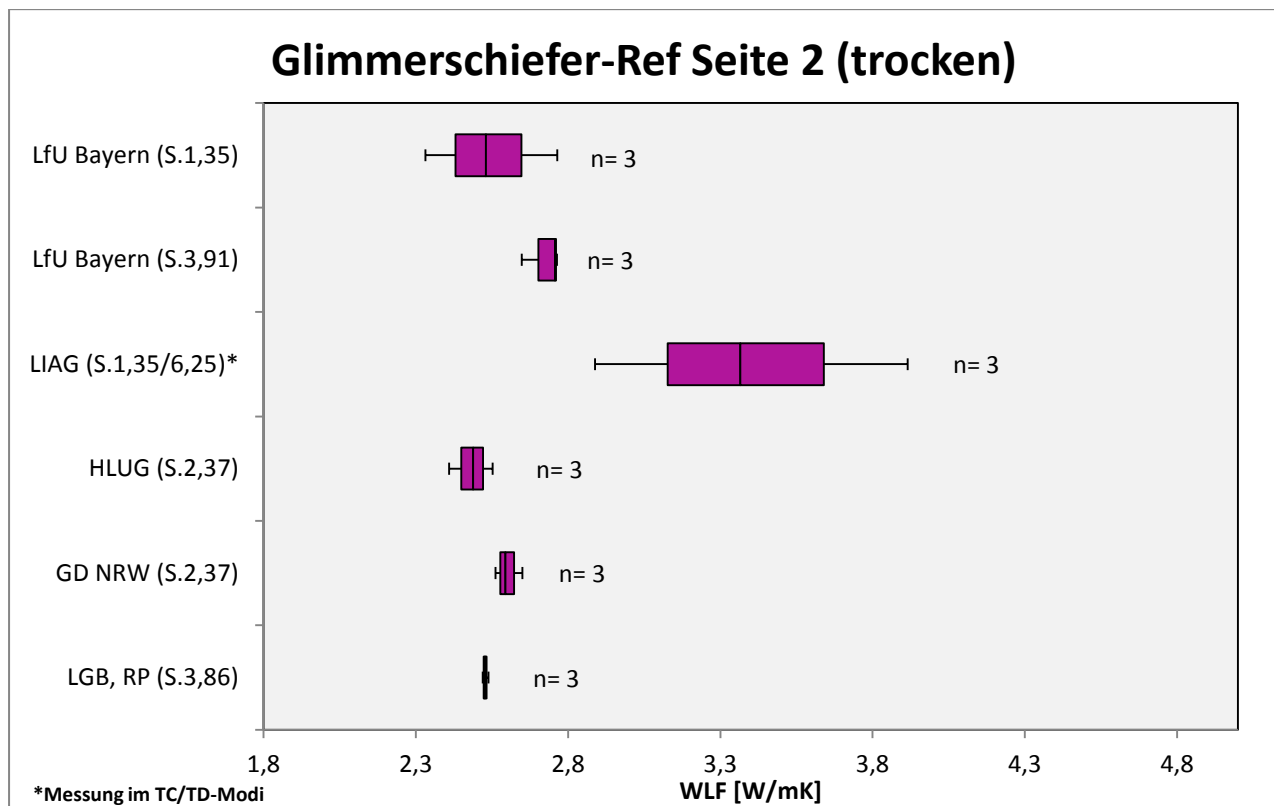
Glimmerschiefer	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	6	9	9	18	18
Min	2,519	2,561	2,409	2,440	2,648	2,331
Max	3,923	3,794	3,772	3,972	5,249	5,784
Mittelwert	3,234	3,188	3,124	3,243	3,809	3,803
Stabw	0,536	0,587	0,511	0,509	0,639	0,857
Q1	2,538	2,608	2,552	2,701	3,459	3,324
Median	3,336	3,197	3,153	3,202	3,874	3,826
Q3	3,812	3,775	3,695	3,719	4,245	4,304

## 1.11 Glimmerschiefer – Seite 1 - Referenzkörper



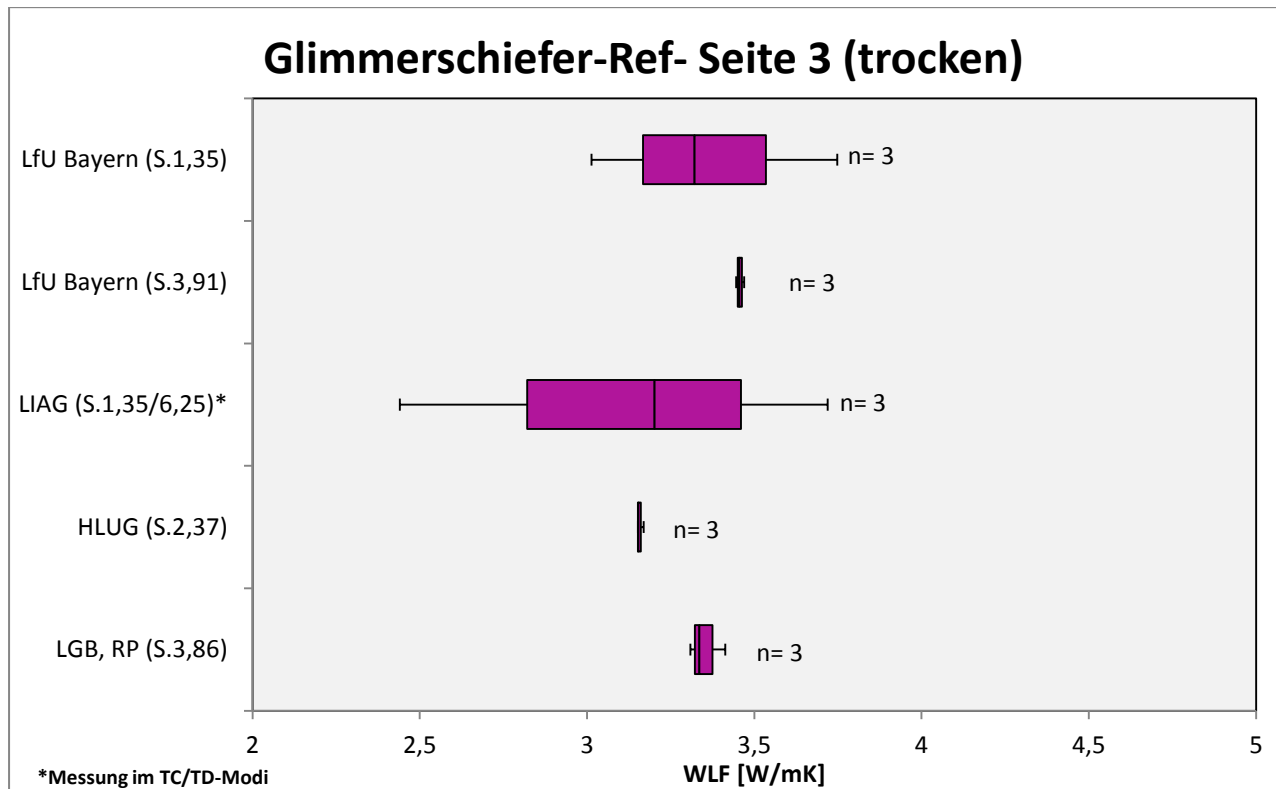
Glimmerschiefer	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	3	3	3	3	3	3
Min	3,812	3,744	3,695	2,701	3,828	3,332
Max	3,837	3,794	3,772	3,972	3,923	4,327
Mittelwert	3,822	3,774	3,730	3,408	3,862	3,842
Stabw	0,011	0,022	0,032	0,529	0,043	0,407
Q1	3,815	3,765	3,710	3,127	3,832	3,600
Median	3,818	3,785	3,724	3,552	3,836	3,867
Q3	3,828	3,790	3,748	3,762	3,880	4,097

## 1.12 Glimmerschiefer – Seite 2 - Referenzkörper



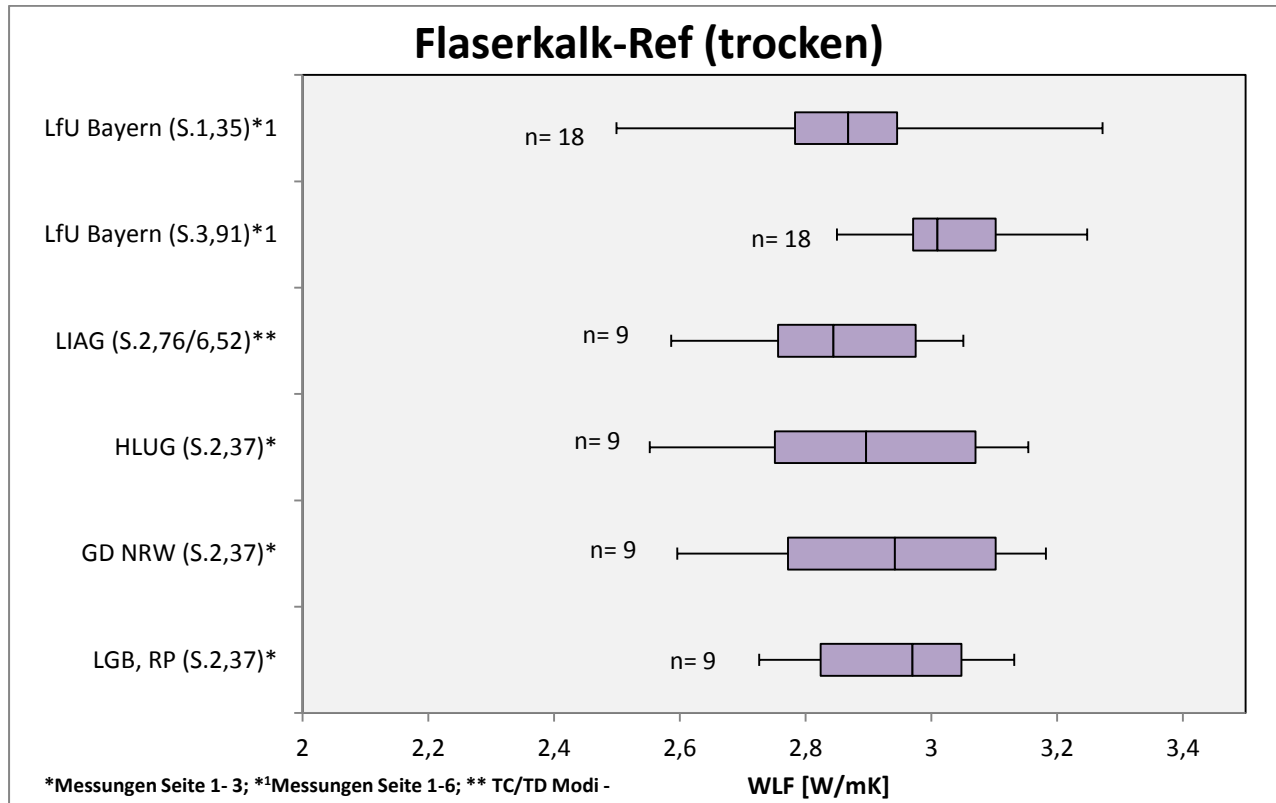
Glimmerschiefer	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	3	3	3	3	3	3
Min	2,519	2,561	2,409	2,699	2,648	2,331
Max	2,538	2,650	2,552	3,726	2,763	2,764
Mittelwert	2,528	2,602	2,483	3,200	2,723	2,542
Stabw	0,008	0,037	0,058	0,420	0,053	0,177
Q1	2,523	2,578	2,449	2,938	2,703	2,431
Median	2,527	2,594	2,488	3,176	2,757	2,530
Q3	2,533	2,622	2,520	3,451	2,760	2,647

### 1.13 Glimmerschiefer – Seite 3 - Referenzkörper



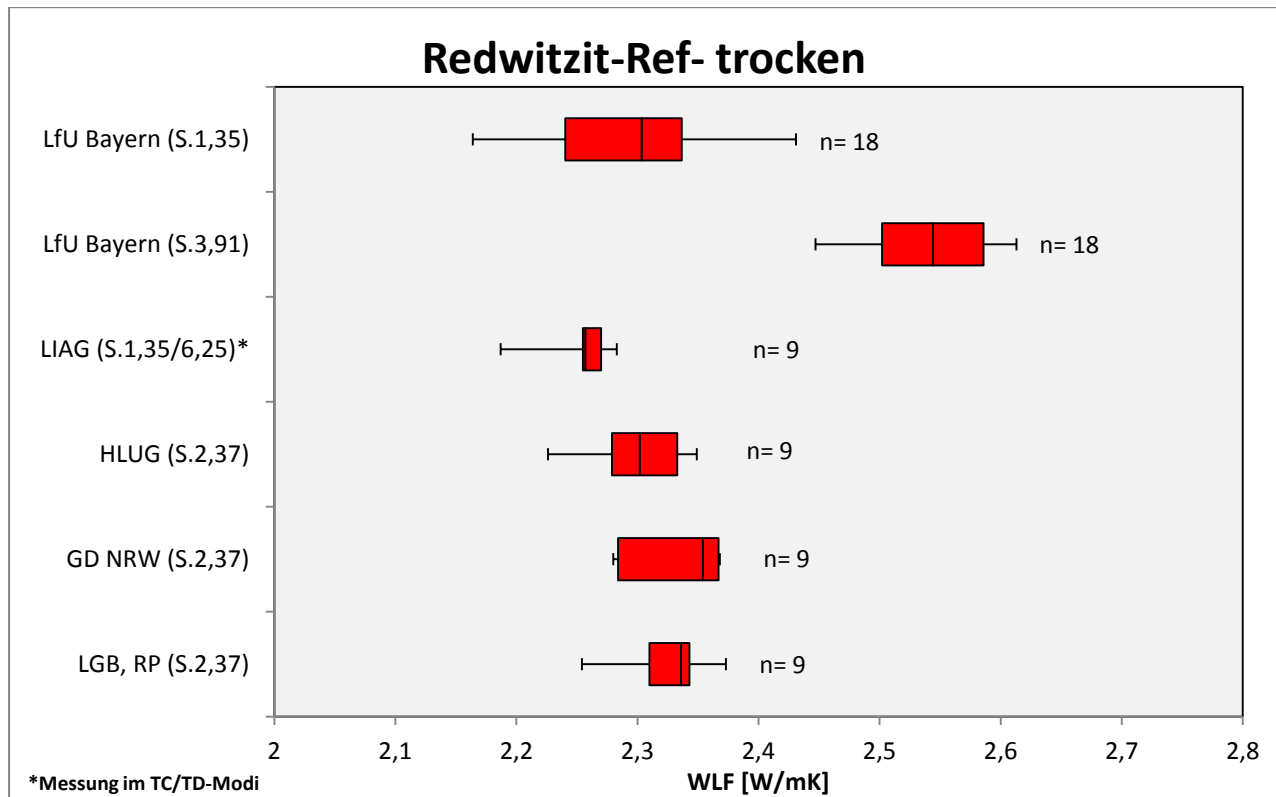
Glimmerschiefer	LGB, RP	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	3	3	3	3	3
Min	3,309	3,152	2,440	3,446	3,013
Max	3,413	3,169	3,719	3,470	3,748
Mittelwert	3,353	3,158	3,120	3,457	3,361
Stabw	0,044	0,008	0,525	0,010	0,301
Q1	3,323	3,153	2,821	3,451	3,167
Median	3,336	3,153	3,202	3,455	3,321
Q3	3,375	3,161	3,461	3,463	3,535

## 1.14 Flaserkalk - Referenzkörper



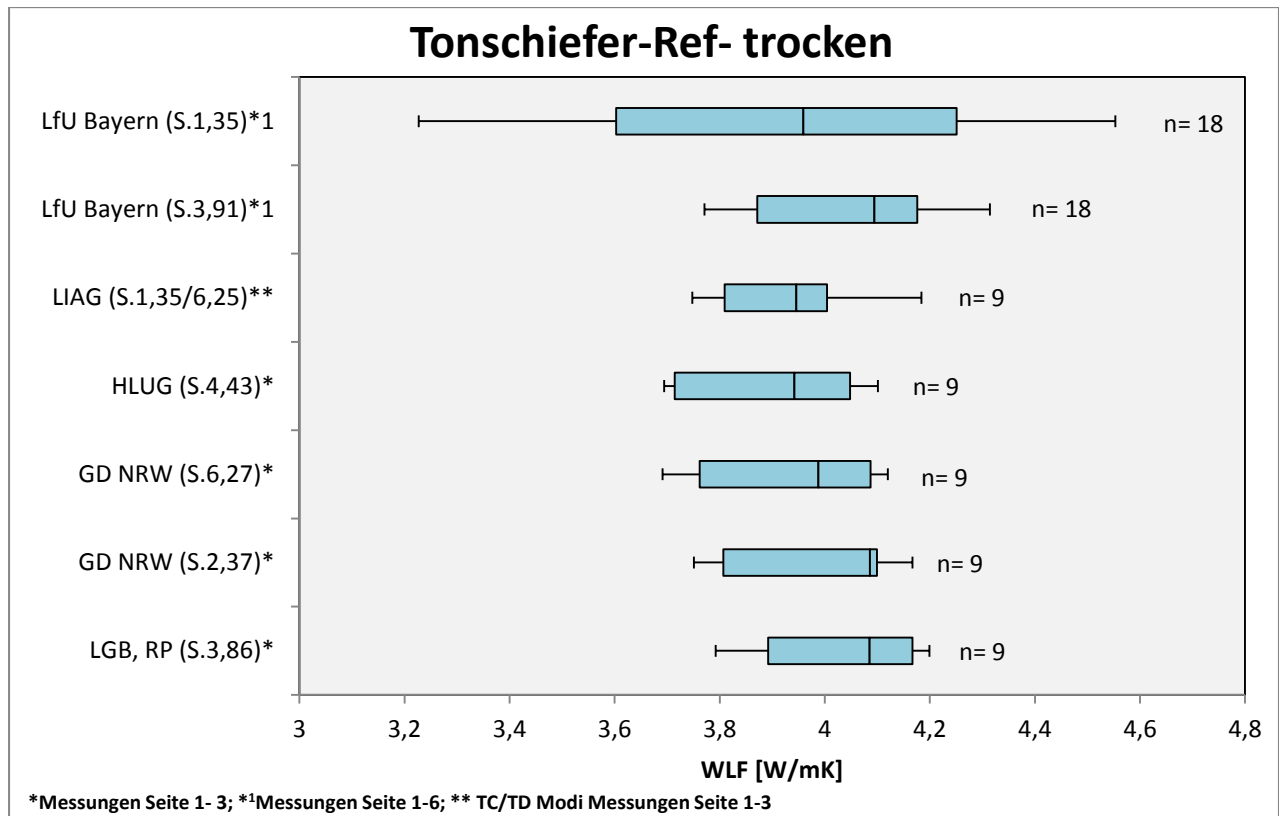
Flaserkalk	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	18	18
Min	2,726	2,596	2,552	2,586	2,850	2,499
Max	3,132	3,182	3,154	3,051	3,248	3,272
Mittelwert	2,938	2,920	2,867	2,844	3,040	2,879
Stabw	0,134	0,187	0,208	0,142	0,112	0,195
Q1	2,824	2,772	2,751	2,756	2,971	2,783
Median	2,970	2,942	2,896	2,844	3,010	2,868
Q3	3,048	3,102	3,070	2,975	3,103	2,946

## 1.15 Redwitzit - Referenzkörper



Redwitzit	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	18	18
Min	2,254	2,280	2,226	2,187	2,447	2,164
Max	2,373	2,368	2,349	2,283	2,613	2,431
Mittelwert	2,323	2,329	2,301	2,251	2,538	2,296
Stabw	0,036	0,039	0,039	0,028	0,052	0,072
Q1	2,310	2,284	2,279	2,255	2,502	2,240
Median	2,336	2,354	2,302	2,257	2,544	2,304
Q3	2,343	2,367	2,333	2,270	2,586	2,337

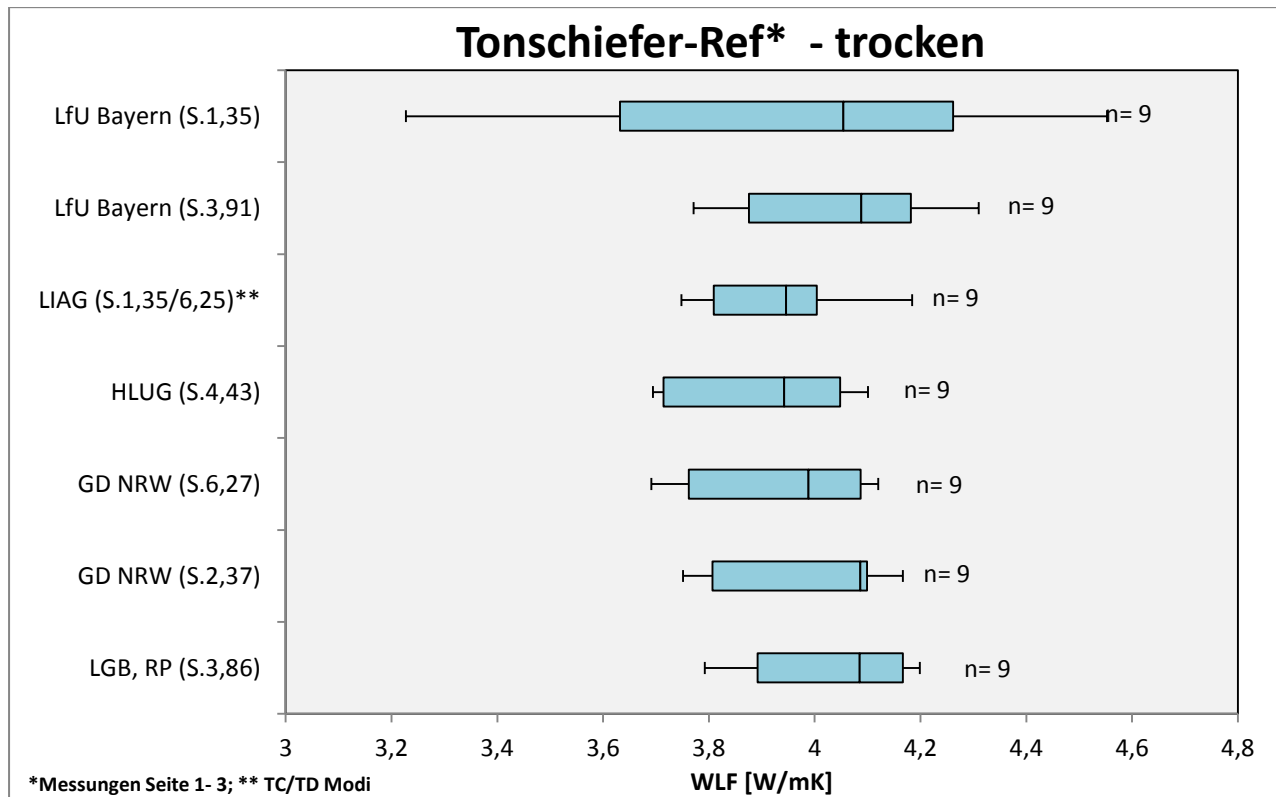
## 1.16 Tonschiefer - Referenzkörper



Tonschiefer	LGB, RP	GD NRW	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>6,27</b>	<b>4,43</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	9	18	18
Min	3,792	3,751	3,691	3,694	3,748	3,771	3,227
Max	4,199	4,167	4,120	4,101	4,184	4,314	4,553
Mittelwert	4,036	3,994	3,926	3,911	3,940	4,048	3,944
Stabw	0,146	0,158	0,156	0,158	0,136	0,177	0,358
Q1	3,892	3,807	3,762	3,714	3,809	3,872	3,603
Median	4,085	4,086	3,988	3,942	3,946	4,095	3,959
Q3	4,167	4,099	4,087	4,048	4,004	4,176	4,251

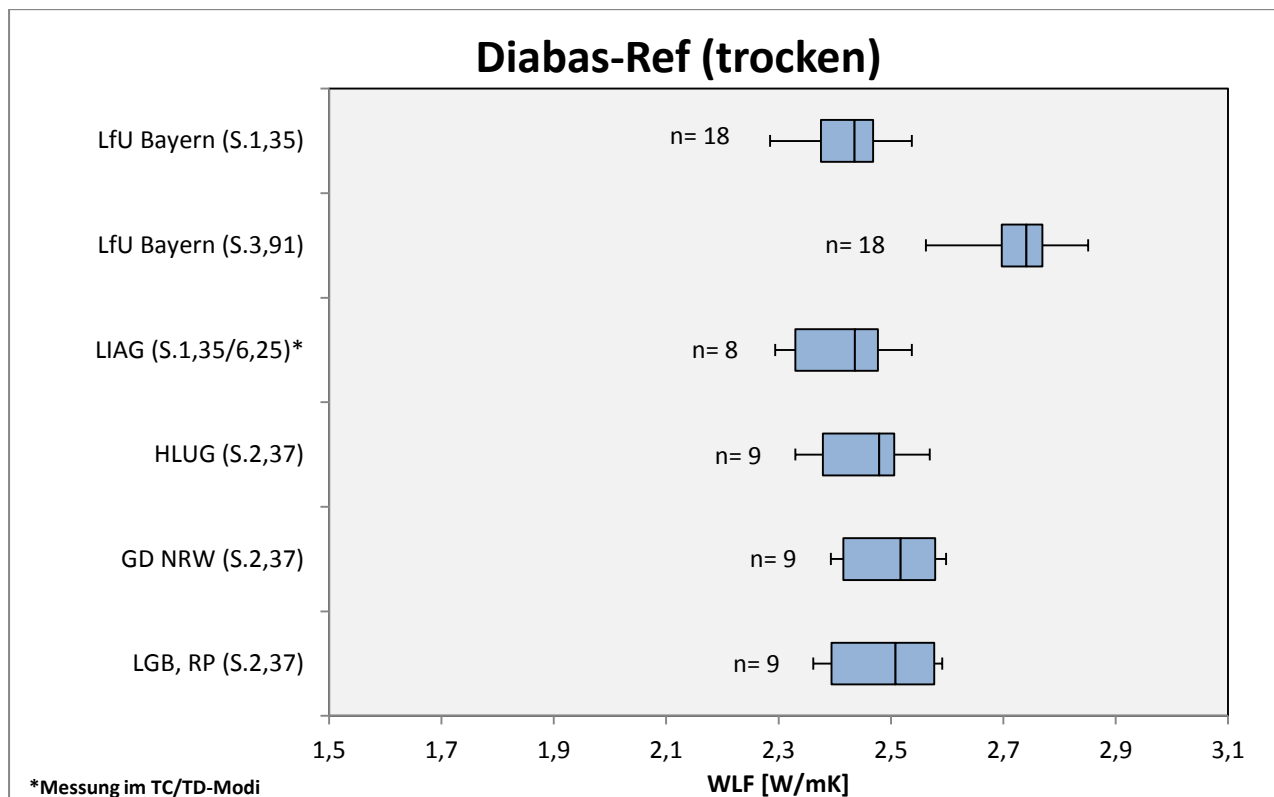


## 1.17 Tonschiefer – Referenzkörper Messungen auf Seite 1- 3



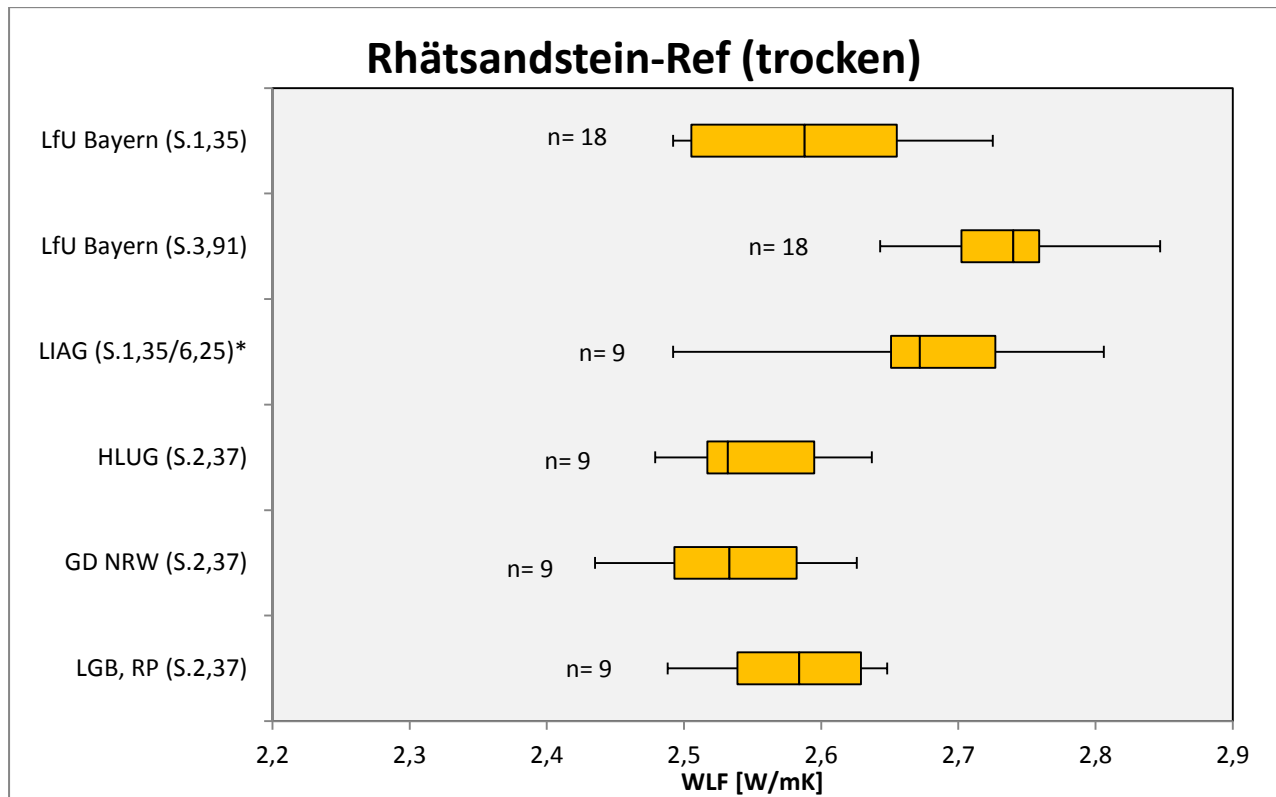
Tonschiefer	LGB, RP	GD NRW	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>6,27</b>	<b>4,43</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	9	9	9
Mittelwert	4,036	3,994	3,926	3,911	3,940	4,044	3,965
Stabw	0,146	0,158	0,156	0,158	0,136	0,172	0,419
Min	3,792	3,751	3,691	3,694	3,748	3,771	3,227
Max	4,199	4,167	4,120	4,101	4,184	4,310	4,553
Q1	3,892	3,807	3,762	3,714	3,809	3,876	3,632
Median	4,085	4,086	3,988	3,942	3,946	4,088	4,054
Q3	4,167	4,099	4,087	4,048	4,004	4,182	4,262

## 1.18 Diabas – Referenzkörper



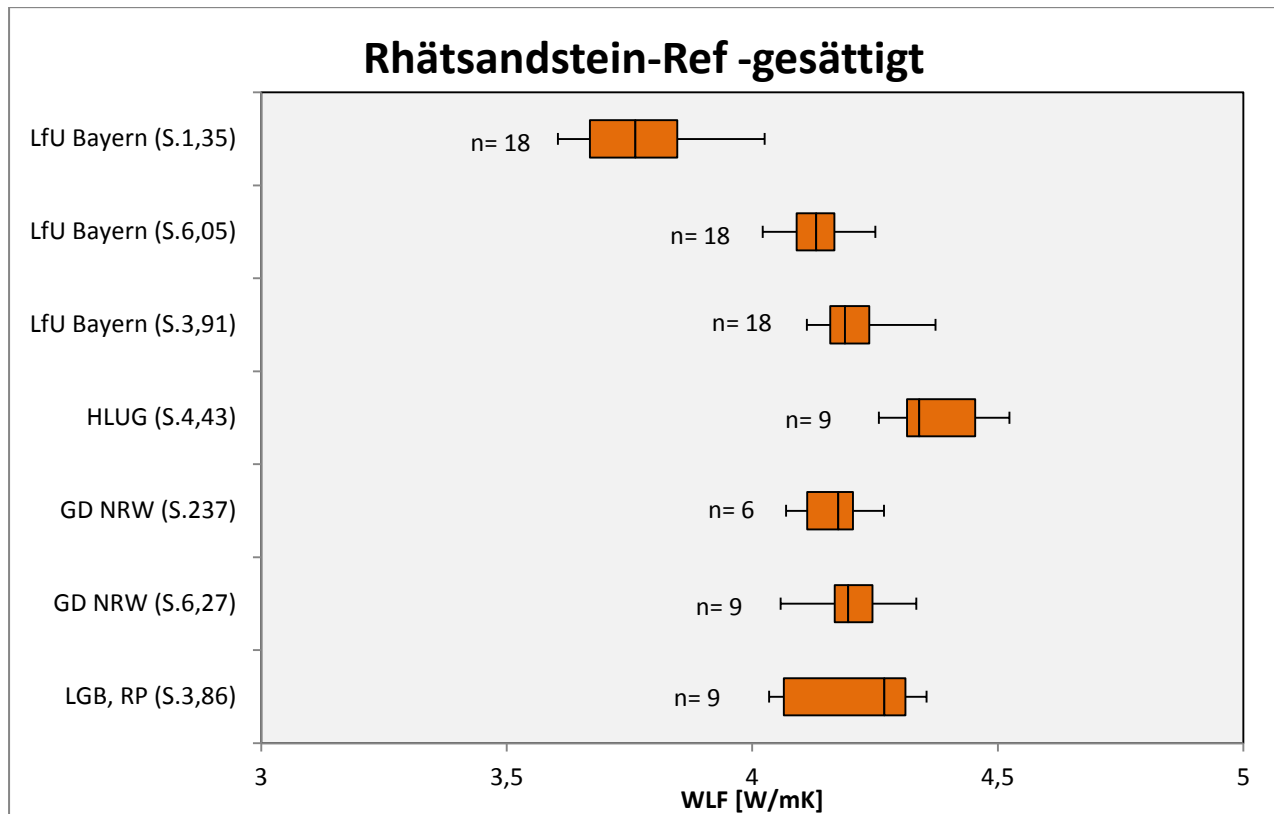
Diabas	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	8	18	18
Min	2,362	2,393	2,330	2,294	2,562	2,285
Max	2,591	2,598	2,569	2,537	2,851	2,537
Mittelwert	2,491	2,505	2,452	2,414	2,727	2,422
Stabw	0,085	0,078	0,085	0,081	0,076	0,068
Q1	2,394	2,415	2,379	2,330	2,697	2,375
Median	2,508	2,517	2,479	2,436	2,741	2,435
Q3	2,577	2,579	2,506	2,477	2,769	2,468

## 1.19 Rhät-Sandstein – trocken - Referenzkörper



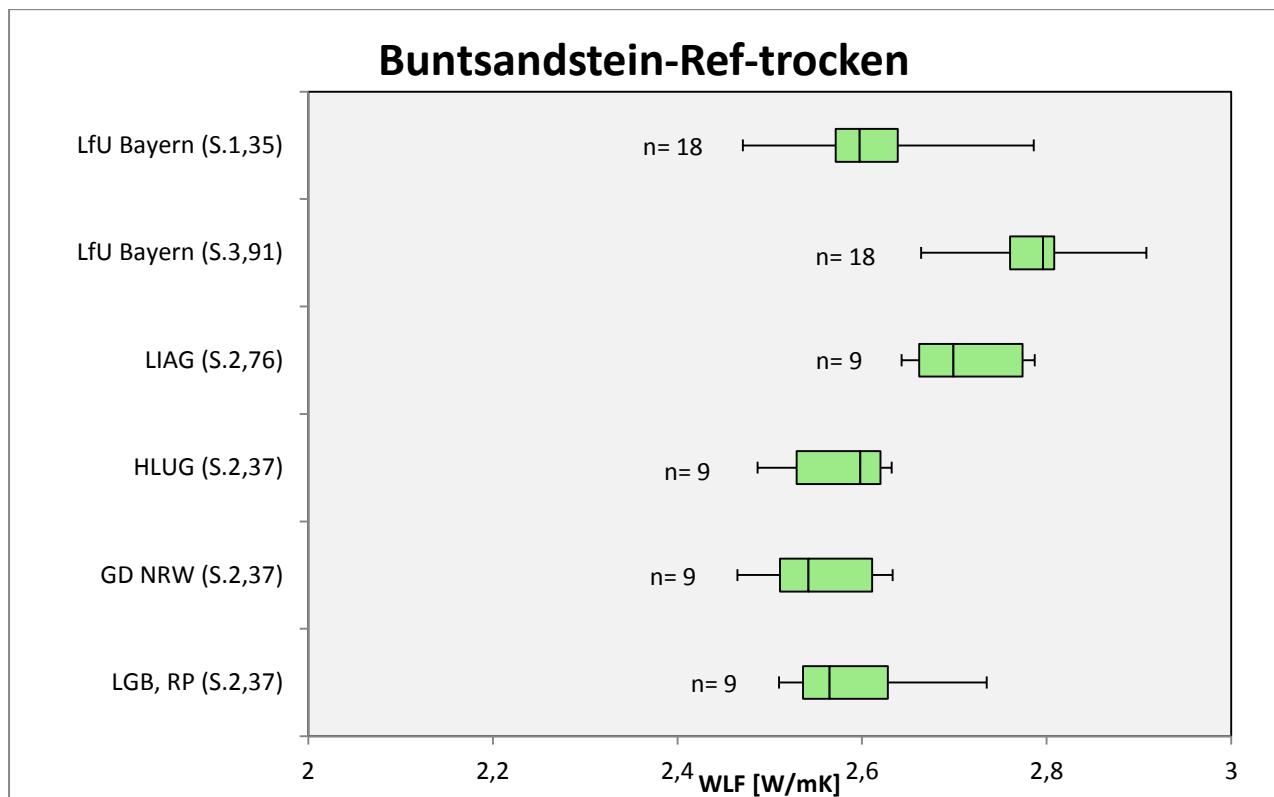
Rhät sandstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	18	18
Min	2,488	2,435	2,479	2,492	2,643	2,492
Max	2,648	2,626	2,637	2,806	2,847	2,725
Mittelwert	2,577	2,534	2,554	2,669	2,737	2,588
Stabw	0,056	0,057	0,050	0,085	0,054	0,076
Q1	2,539	2,493	2,517	2,651	2,702	2,505
Median	2,584	2,533	2,532	2,672	2,740	2,588
Q3	2,629	2,582	2,595	2,727	2,759	2,655

## 1.20 Rhät-Sandstein – gesättigt - Referenzkörper



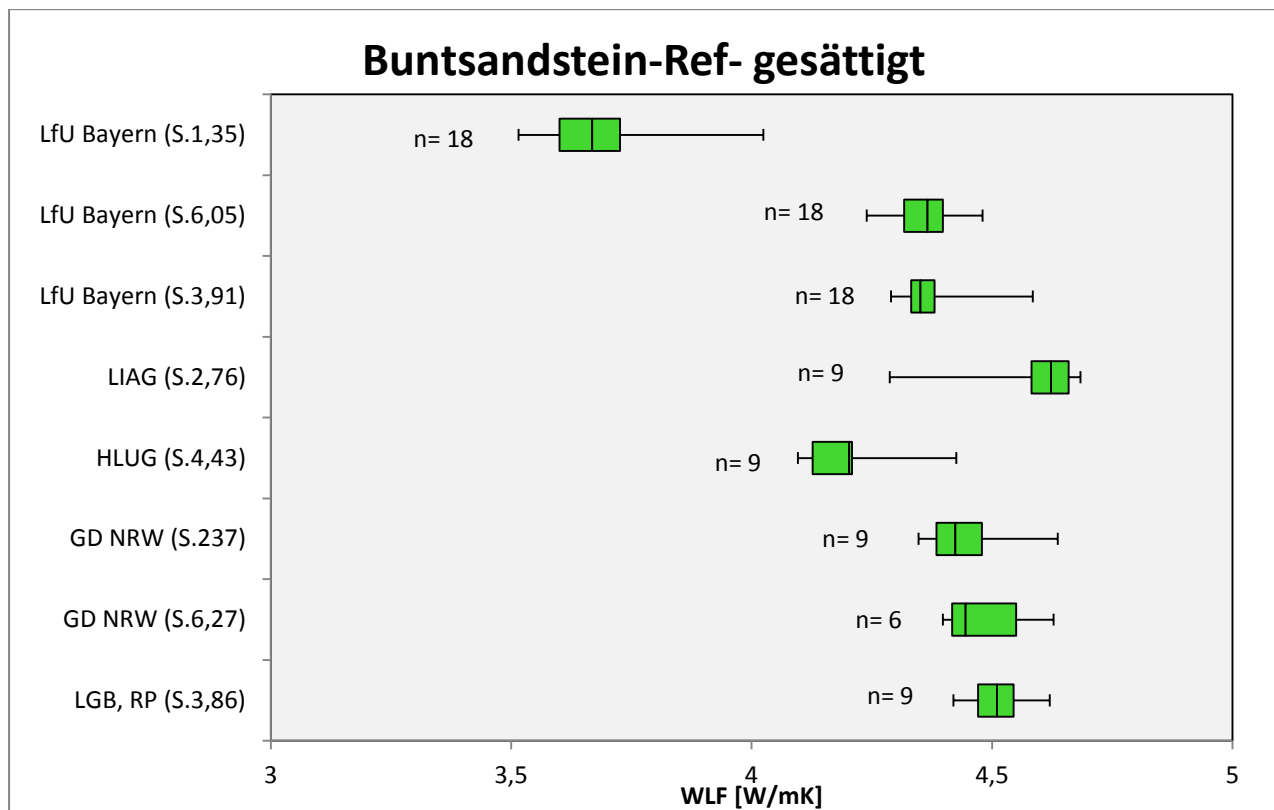
Rhätsandstein	LGB, RP	GD NRW	GD NRW	HLUG	LfU Bayern	LfU Bayern	LfU Bayern
Standard	3,86	6,27	2,37	4,43	3,91	6,05	1,35
Umfang	9	9	6	9	18	18	18
Min	4,034	4,058	4,069	4,258	4,111	4,021	3,604
Max	4,355	4,334	4,268	4,524	4,373	4,251	4,025
Mittelwert	4,201	4,197	4,166	4,368	4,202	4,130	3,762
Stabw	0,129	0,076	0,068	0,083	0,069	0,054	0,110
Q1	4,064	4,168	4,112	4,315	4,159	4,090	3,669
Median	4,269	4,195	4,175	4,340	4,189	4,130	3,762
Q3	4,312	4,245	4,205	4,454	4,239	4,168	3,848

## 1.21 Buntsandstein – trocken - Referenzkörper



Buntsandstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	18	18
Min	2,510	2,465	2,487	2,643	2,664	2,471
Max	2,735	2,633	2,632	2,787	2,908	2,786
Mittelwert	2,592	2,553	2,581	2,712	2,788	2,610
Stabw	0,073	0,055	0,050	0,055	0,060	0,082
Q1	2,536	2,511	2,529	2,662	2,761	2,572
Median	2,565	2,542	2,598	2,699	2,796	2,598
Q3	2,628	2,611	2,620	2,774	2,808	2,639

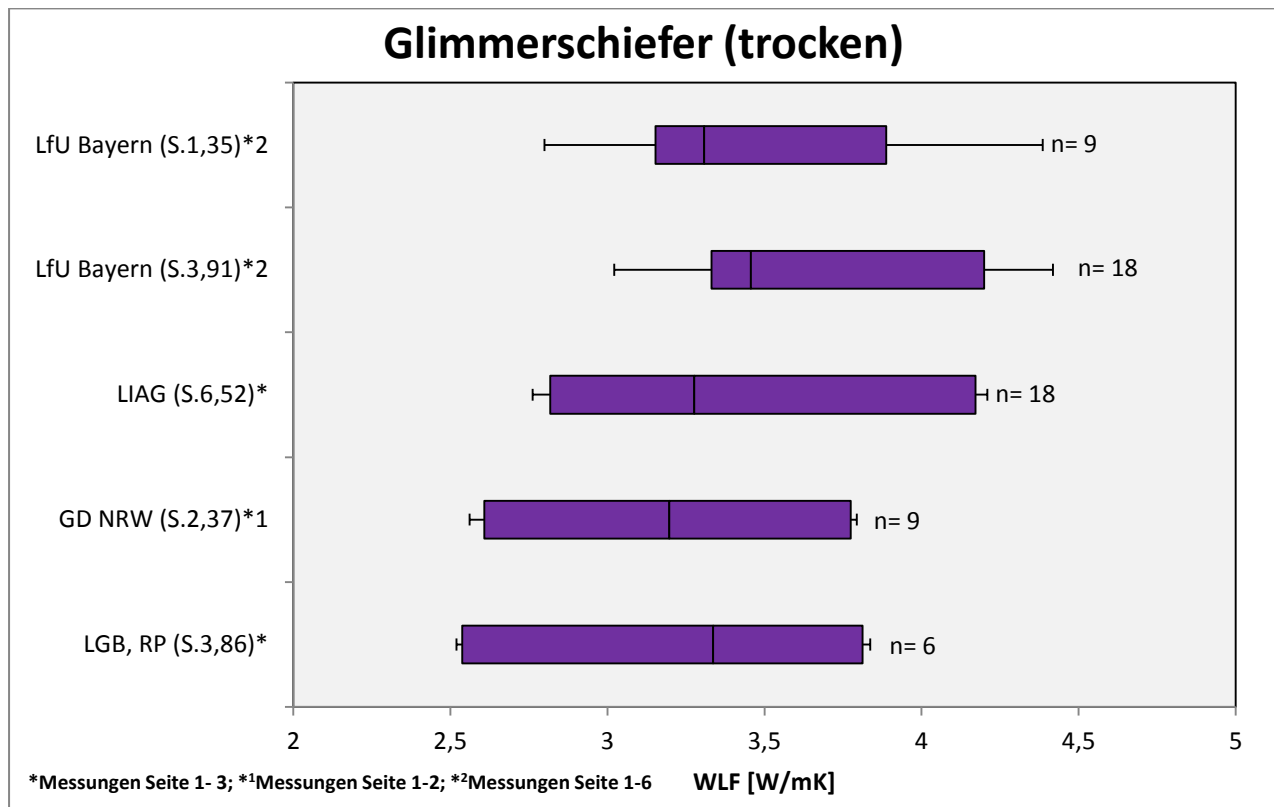
## 1.22 Buntsandstein – gesättigt - Referenzkörper



Buntsandstein	LGB, RP	GD NRW	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>6,27</b>	<b>2,37</b>	<b>4,43</b>	<b>2,76</b>	<b>3,91</b>	<b>6,05</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	6	9	9	19	18	18
Min	4,420	4,398	4,347	4,096	4,287	4,290	4,239	3,515
Max	4,620	4,628	4,637	4,426	4,684	4,585	4,480	4,024
Mittelwert	4,514	4,481	4,450	4,198	4,572	4,376	4,360	3,680
Stabw	0,068	0,082	0,095	0,092	0,133	0,079	0,070	0,118
Q1	4,471	4,417	4,385	4,127	4,582	4,332	4,318	3,600
median	4,510	4,445	4,424	4,203	4,623	4,351	4,366	3,669
Q3	4,545	4,550	4,479	4,209	4,659	4,381	4,398	3,726

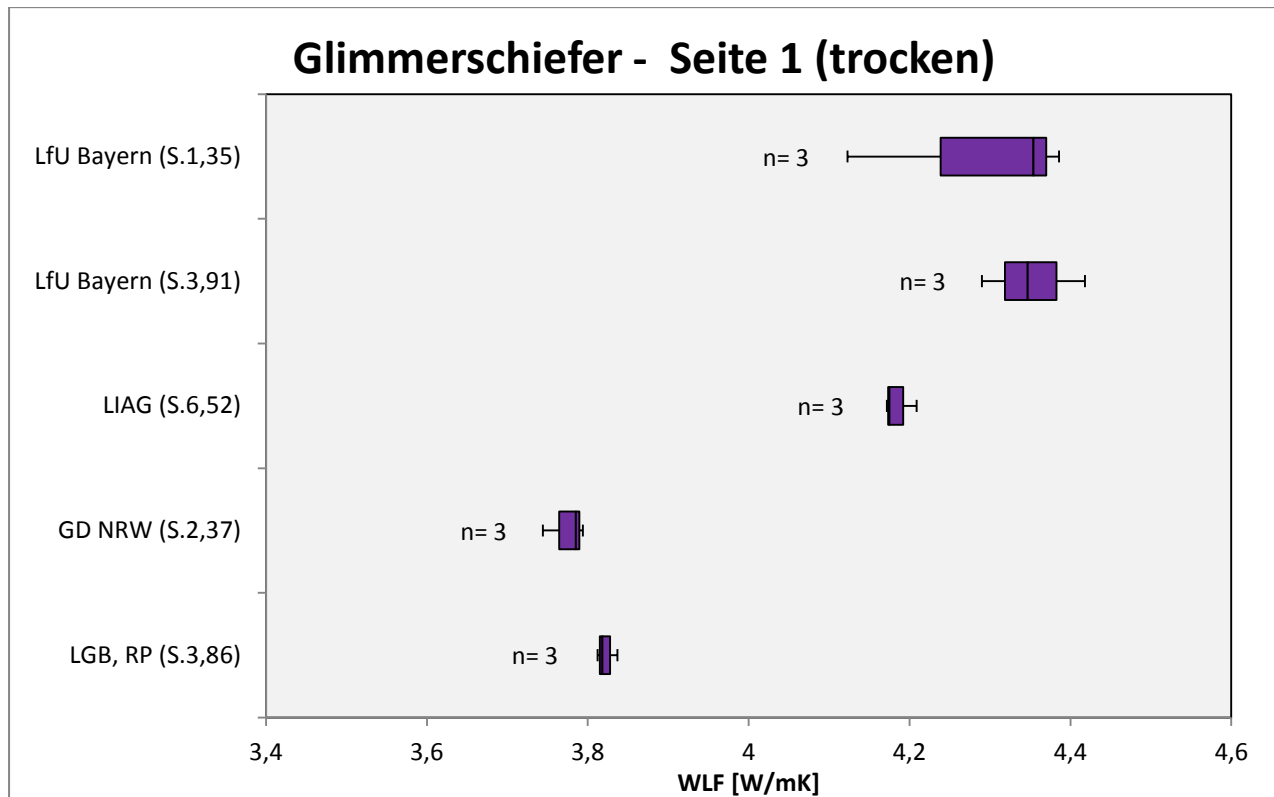
## 2. Laborspezifische Probenkörper – TCS-Messgerät

### 2.1 Glimmerschiefer – alle Messwerte - Laborspezifische Probenkörper



Glimmerschiefer	LGB, RP	GD NRW	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	6	9	18	18
Min	2,519	2,561	2,762	3,022	2,799
Max	3,837	3,794	4,209	4,418	4,386
Mittelwert	3,234	3,188	3,415	3,677	3,498
Stabw	0,536	0,587	0,577	0,455	0,503
Q1	2,538	2,608	2,818	3,331	3,153
Median	3,336	3,197	3,276	3,457	3,308
Q3	3,812	3,775	4,172	4,200	3,888

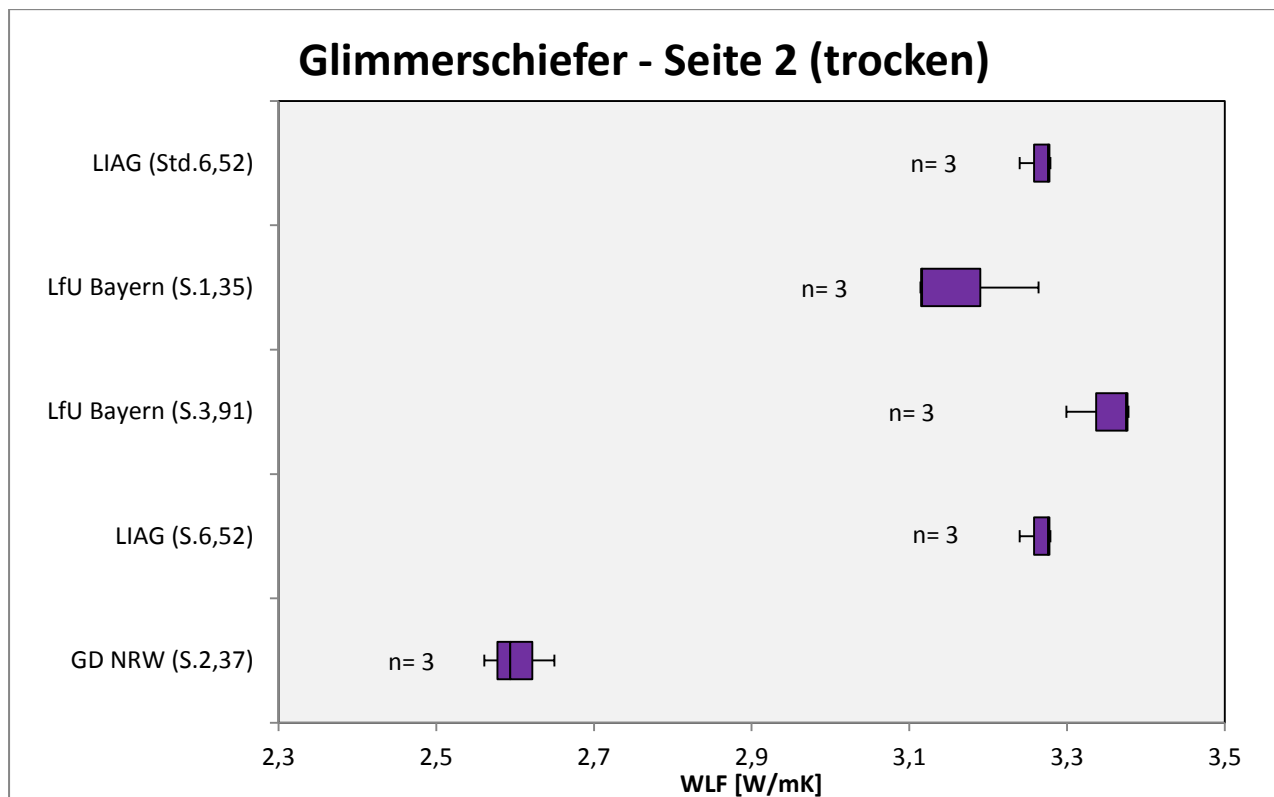
## 2.2 Glimmerschiefer – Seite 1 - Laborspezifische Probenkörper



Glimmerschiefer	LGB, RP	GD NRW	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	3	3	3	3	3
Min	3,812	3,744	4,172	4,290	4,123
Max	3,837	3,794	4,209	4,418	4,386
Mittelwert	3,822	3,774	4,185	4,352	4,288
Stabw	0,011	0,022	0,017	0,052	0,117
Q1	3,815	3,765	4,174	4,319	4,239
median	3,818	3,785	4,175	4,347	4,354
Q3	3,828	3,790	4,192	4,383	4,370

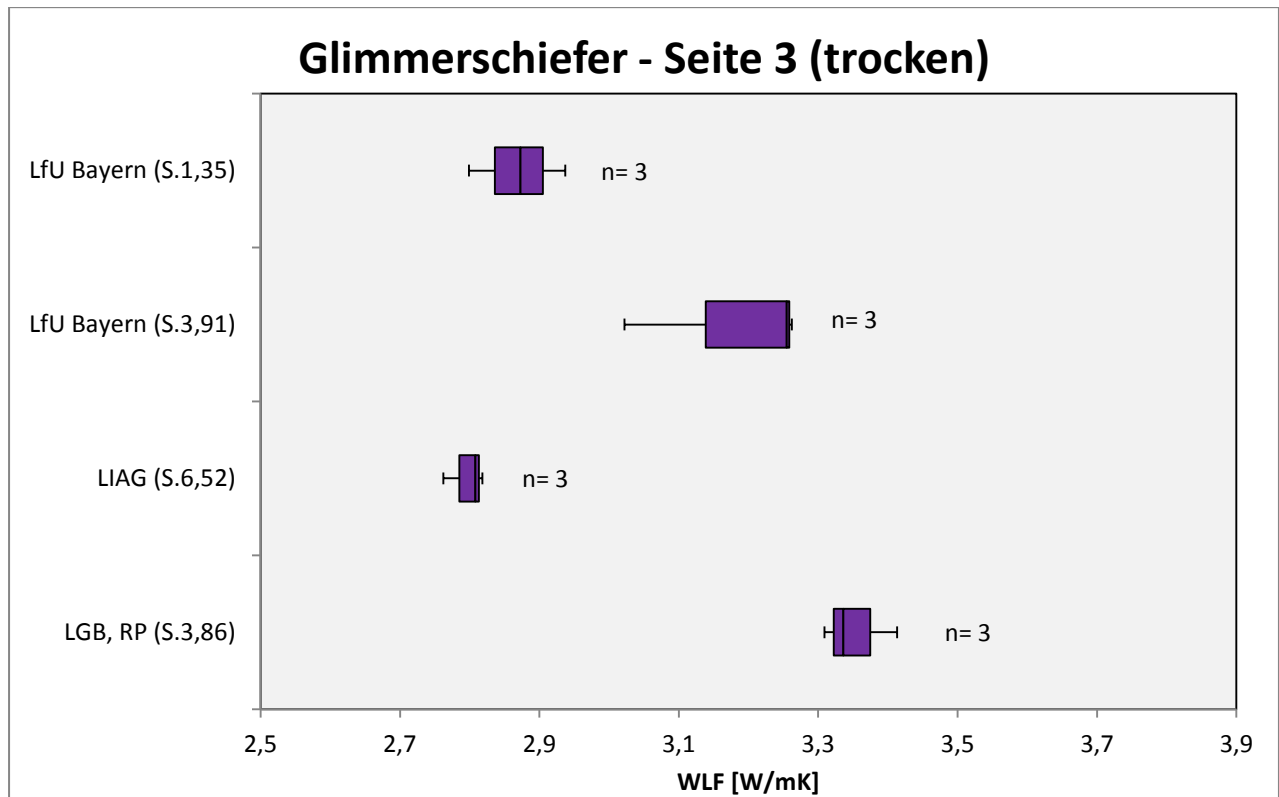


## 2.3 Glimmerschiefer – Seite 2 - Laborspezifische Probenkörper



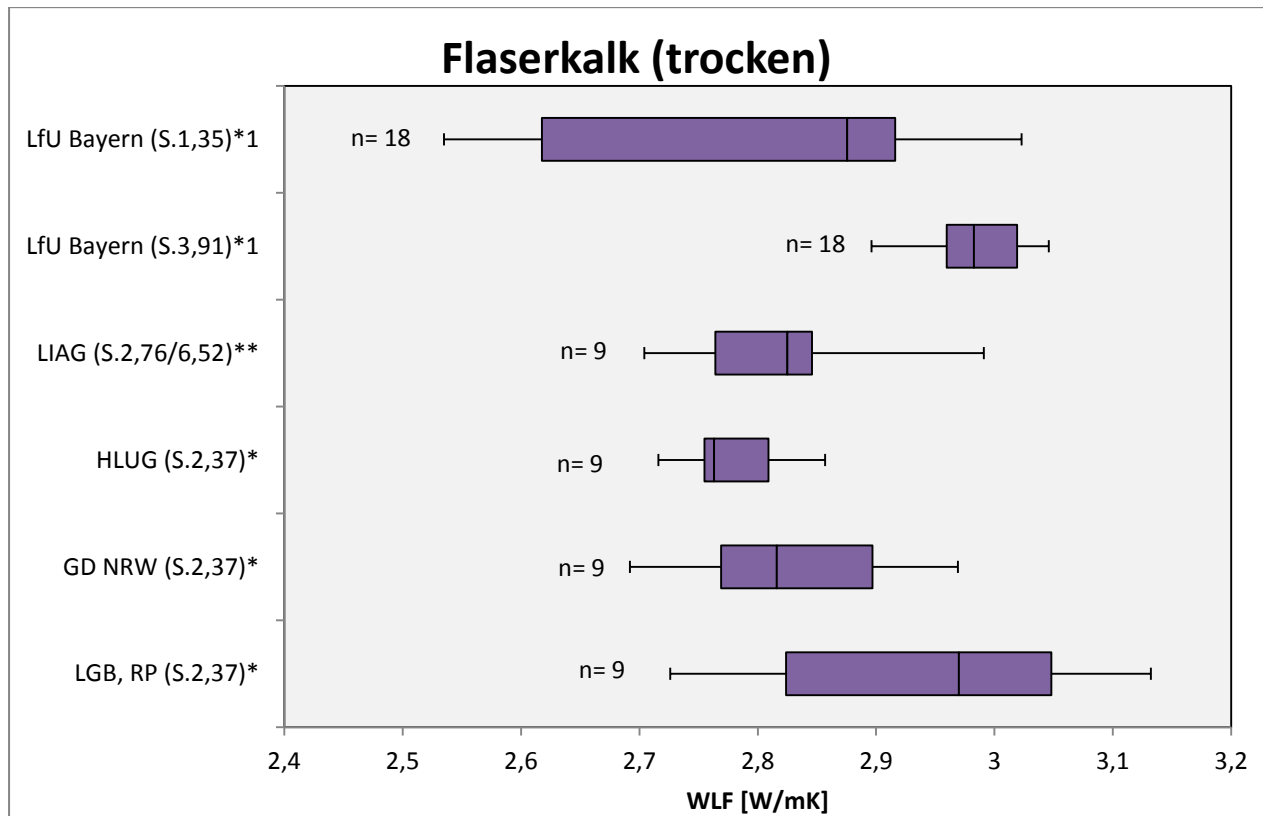
Glimmerschiefer	LGB, RP	GD NRW	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	3	3	3	3	3
Min	2,519	2,561	3,240	3,299	3,114
Max	2,538	2,650	3,279	3,378	3,264
Mittelwert	2,528	2,602	3,265	3,351	3,165
Stabw	0,008	0,037	0,018	0,037	0,070
Q1	2,523	2,578	3,258	3,337	3,115
Median	2,527	2,594	3,276	3,375	3,116
Q3	2,533	2,622	3,278	3,377	3,190

## 2.4 Glimmerschiefer – Seite 3 - Laborspezifische Probenkörper



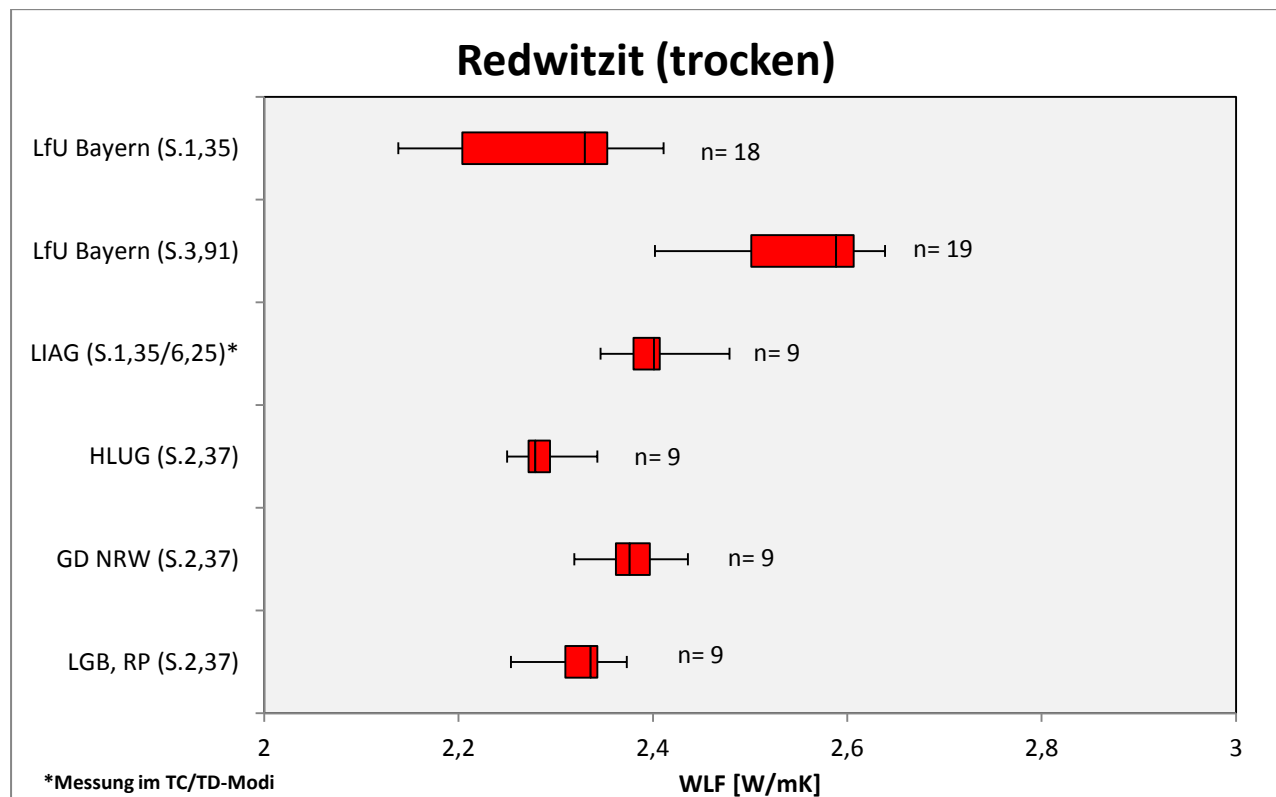
Glimmerschiefer	LGB, RP	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	3	3	3	3
Min	3,309	2,762	3,022	2,799
Max	3,413	2,818	3,262	2,937
Mittelwert	3,353	3,040	3,180	2,870
Stabw	0,044	0,024	0,112	0,056
Q1	3,323	2,785	3,139	2,836
Median	3,336	2,808	3,255	2,873
Q3	3,375	2,813	3,259	2,905

## 2.5 Flaserkalk – Laborspezifische Probenkörper



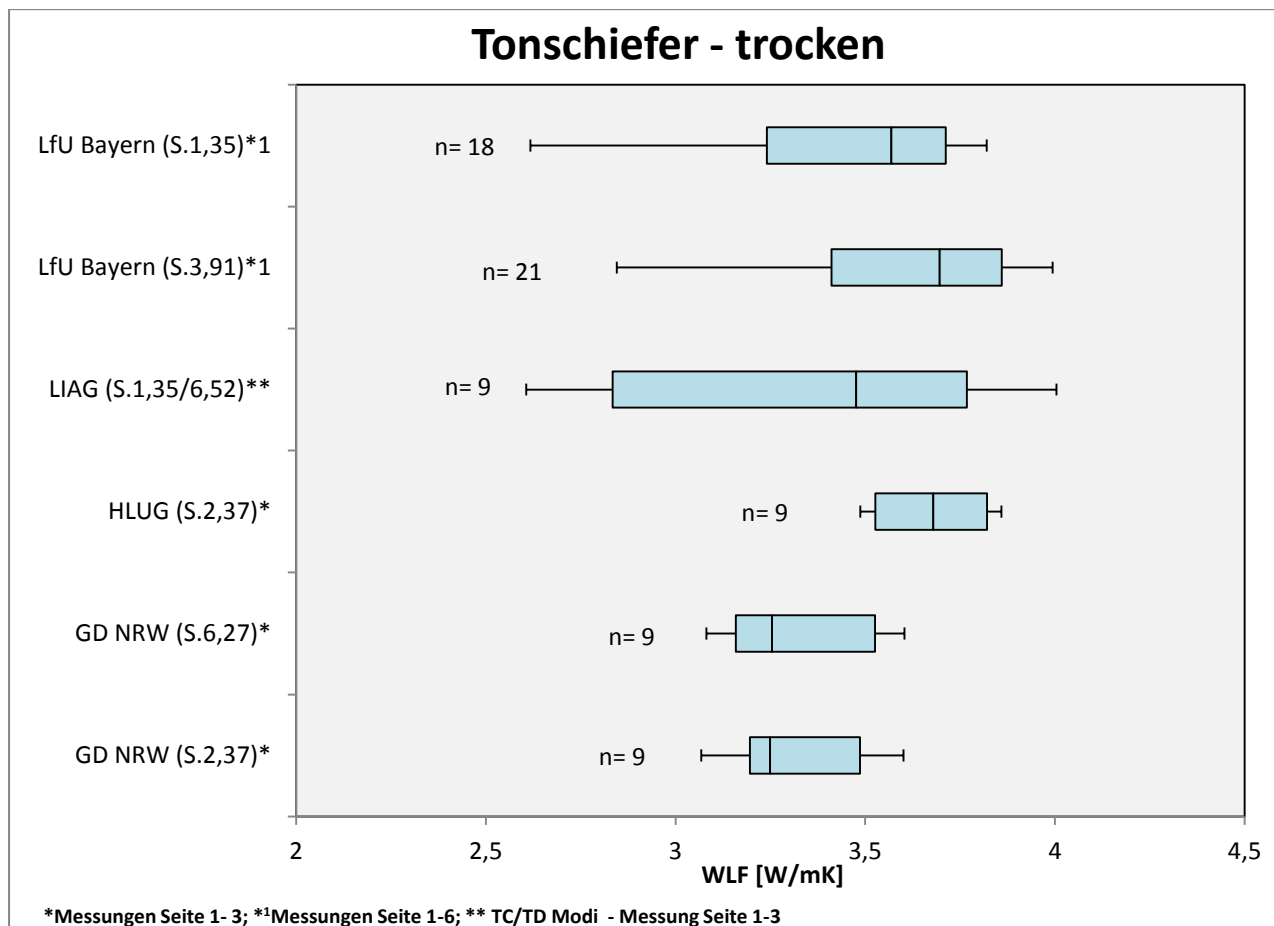
Flaserkalk	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	18	18
Min	2,726	2,692	2,716	2,704	2,896	2,535
Max	3,132	2,969	2,857	2,991	3,046	3,023
Mittelwert	2,938	2,827	2,783	2,822	2,981	2,801
Stabw	0,134	0,086	0,044	0,073	0,046	0,170
Q1	2,824	2,769	2,755	2,764	2,960	2,618
Median	2,970	2,816	2,763	2,825	2,983	2,876
Q3	3,048	2,897	2,809	2,846	3,019	2,916

## 2.6 Redwitzit – Laborspezifische Probenkörper



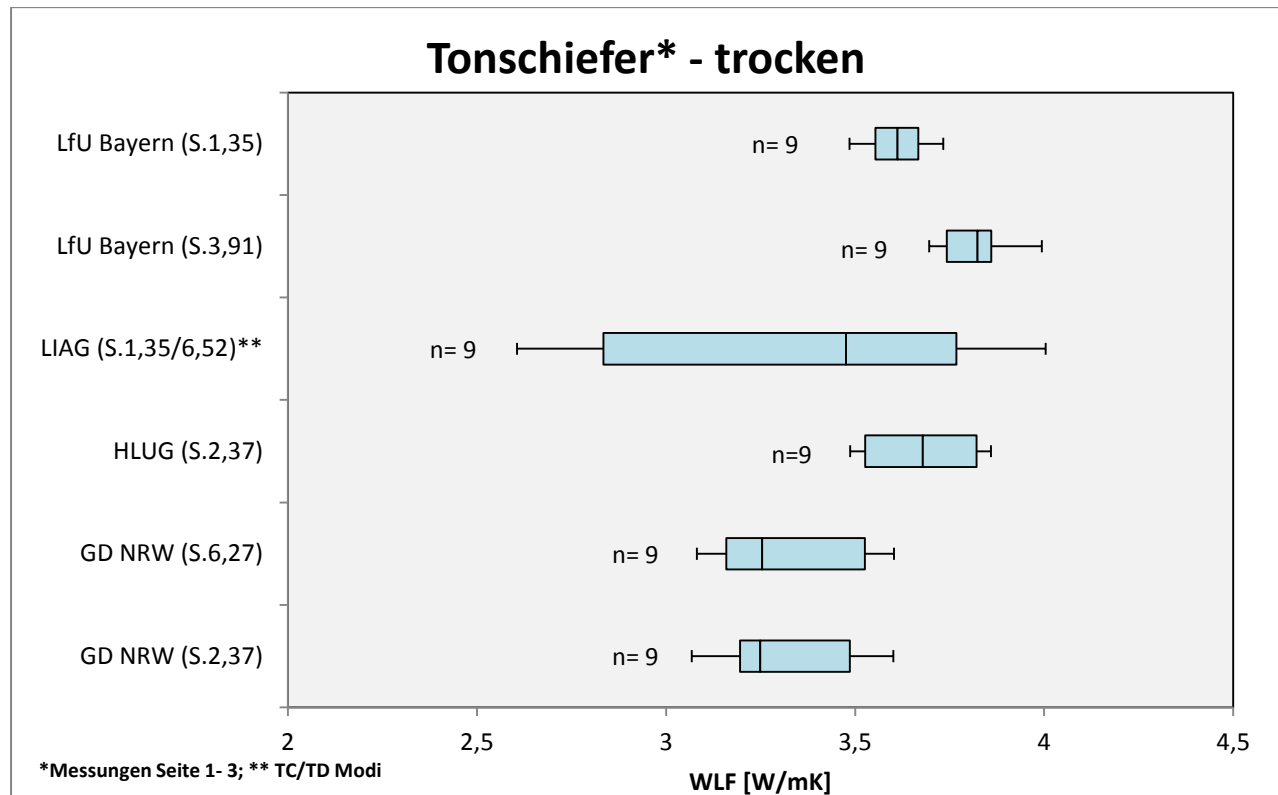
Redwitzit	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	19	18
Min	2,254	2,319	2,250	2,346	2,402	2,138
Max	2,373	2,436	2,343	2,479	2,639	2,411
Mittelwert	2,323	2,375	2,287	2,403	2,554	2,291
Stabw	0,036	0,034	0,029	0,039	0,070	0,083
Q1	2,310	2,362	2,272	2,380	2,501	2,204
Median	2,336	2,376	2,279	2,401	2,589	2,330
Q3	2,343	2,397	2,294	2,407	2,607	2,353

## 2.7 Tonschiefer – Laborspezifische Probenkörper



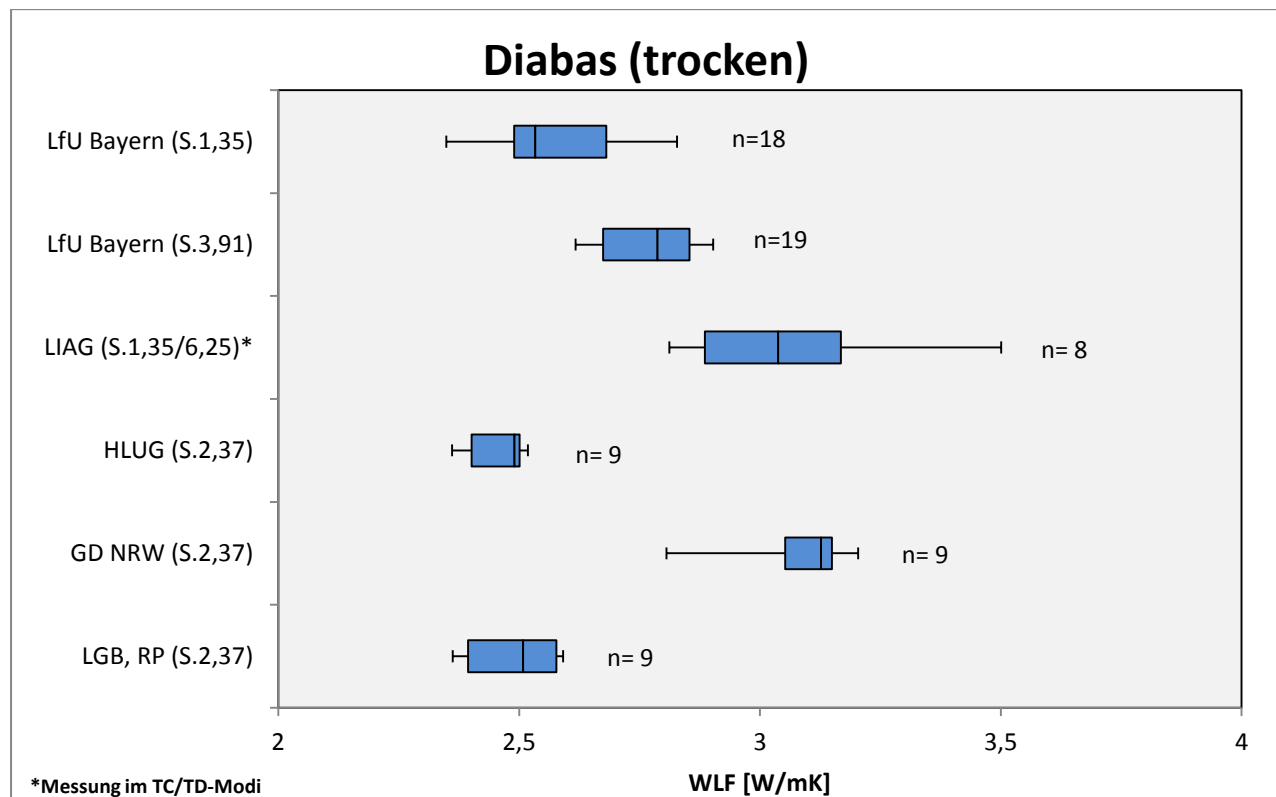
Tonschiefer	LGB, RP	GD NRW	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>6,27</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	9	21	18
Min	3,792	3,068	3,081	3,487	2,606	2,845	2,617
Max	4,199	3,601	3,603	3,859	4,004	3,994	3,820
Mittelwert	4,036	3,308	3,316	3,679	3,340	3,574	3,411
Stabw	0,146	0,169	0,189	0,136	0,479	0,355	0,383
Q1	3,892	3,196	3,159	3,527	2,834	3,411	3,241
Median	4,085	3,249	3,254	3,679	3,476	3,696	3,569
Q3	4,167	3,486	3,526	3,821	3,768	3,860	3,712

## 2.8 Tonschiefer – Messungen auf Seite 1-3 Laborspezifische Probenkörper



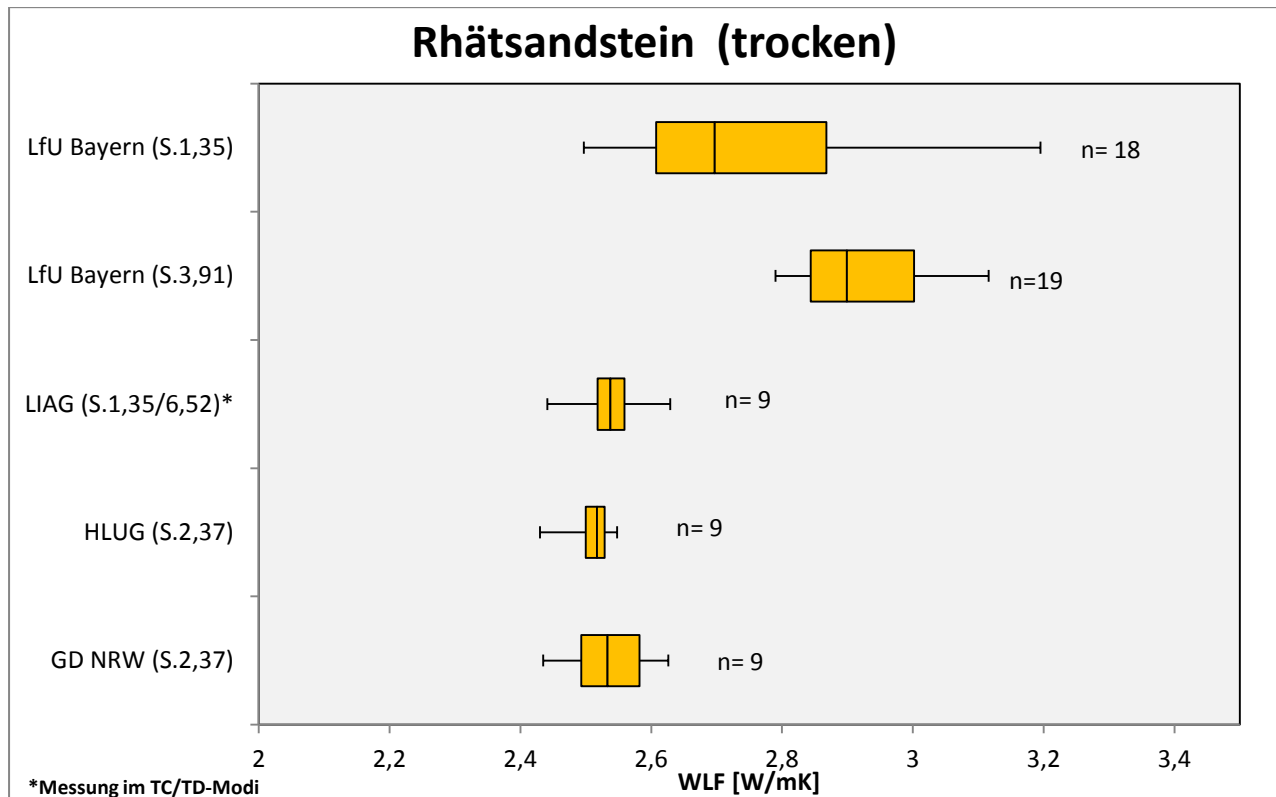
Tonschiefer	LGB, RP	GD NRW	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>6,27</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	9	9	9
Min	3,792	3,068	3,081	3,487	2,606	3,696	3,485
Max	4,199	3,601	3,603	3,859	4,004	3,994	3,733
Mittelwert	4,036	3,308	3,316	3,679	3,340	3,811	3,611
Stabw	0,146	0,169	0,189	0,136	0,479	0,090	0,085
Q1	3,892	3,196	3,159	3,527	2,834	3,742	3,554
Median	4,085	3,249	3,254	3,679	3,476	3,824	3,612
Q3	4,167	3,486	3,526	3,821	3,768	3,860	3,667

## 2.9 Diabas – Laborspezifische Probenkörper



Diabas	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	8	19	18
Min	2,362	2,806	2,361	2,812	2,617	2,349
Max	2,591	3,204	2,518	3,501	2,903	2,828
Mittelwert	2,491	3,063	2,461	3,074	2,772	2,569
Stabw	0,085	0,141	0,056	0,227	0,093	0,150
Q1	2,394	3,052	2,401	2,886	2,674	2,490
Median	2,508	3,127	2,490	3,038	2,787	2,534
Q3	2,577	3,149	2,501	3,168	2,854	2,681

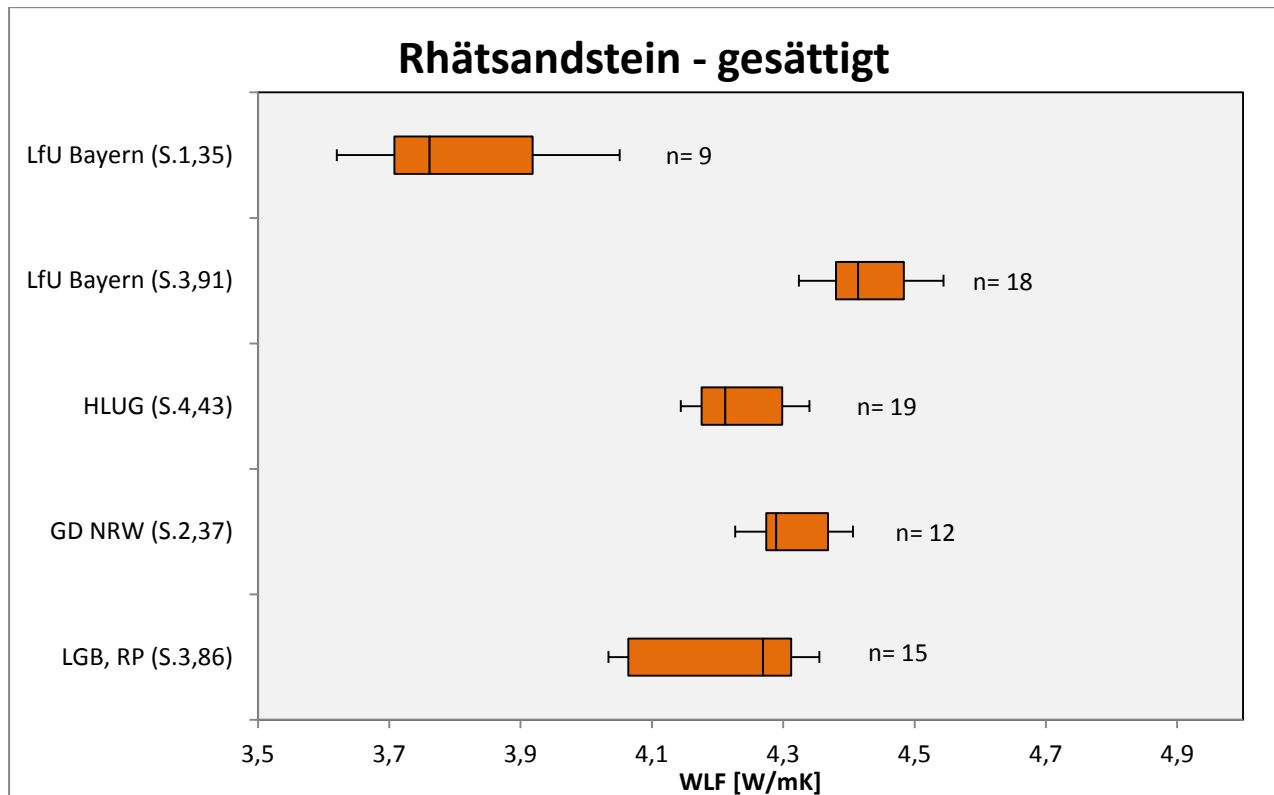
## 2.10 Rhät-Sandstein – trocken – Laborspezifische Probenkörper



Rhät sandstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	18	19	18
Min	2,488	2,435	2,430	2,441	2,790	2,497
Max	2,648	2,626	2,548	2,629	3,116	3,195
Mittelwert	2,577	2,534	2,508	2,536	2,924	2,739
Stabw	0,056	0,057	0,034	0,037	0,095	0,176
Q1	2,539	2,493	2,500	2,518	2,844	2,608
Median	2,584	2,533	2,517	2,538	2,899	2,697
Q3	2,629	2,582	2,529	2,559	3,002	2,868

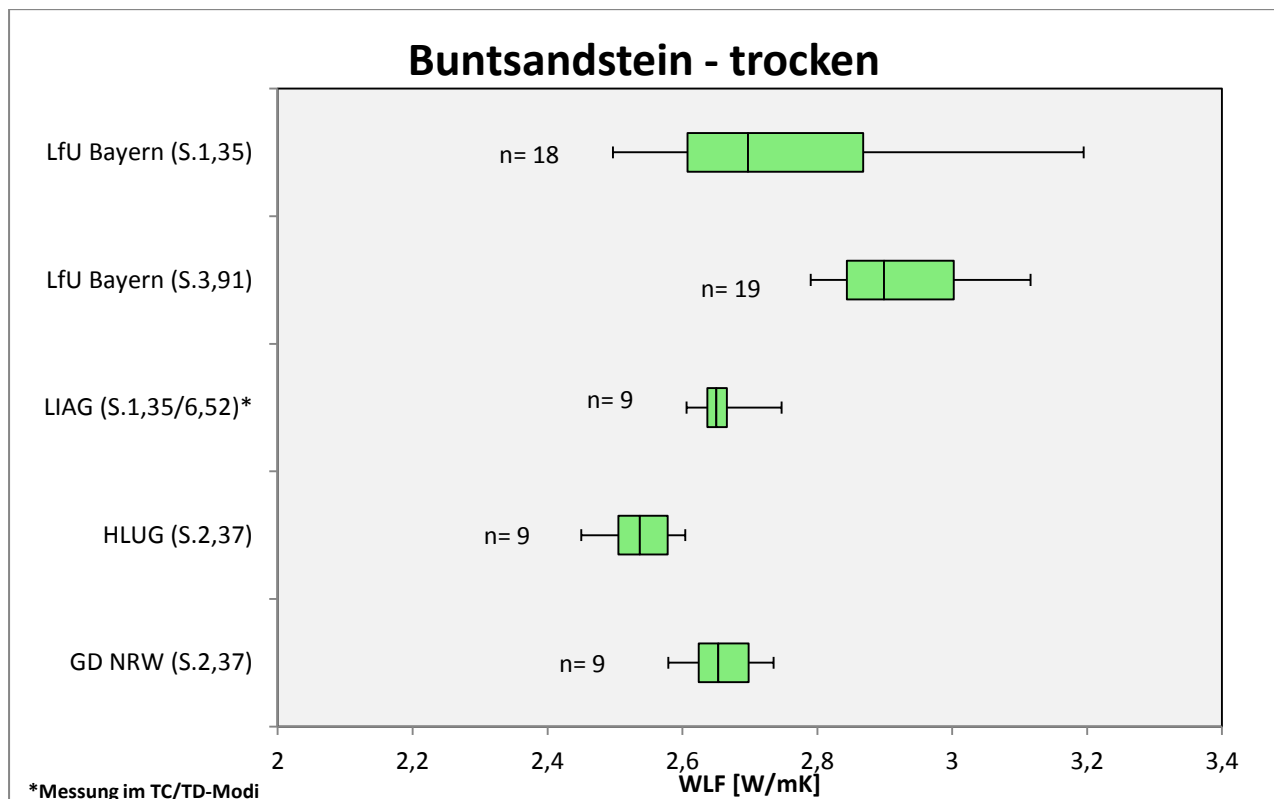


## 2.11 Rhät-Sandstein – gesättigt – Laborspezifische Probenkörper



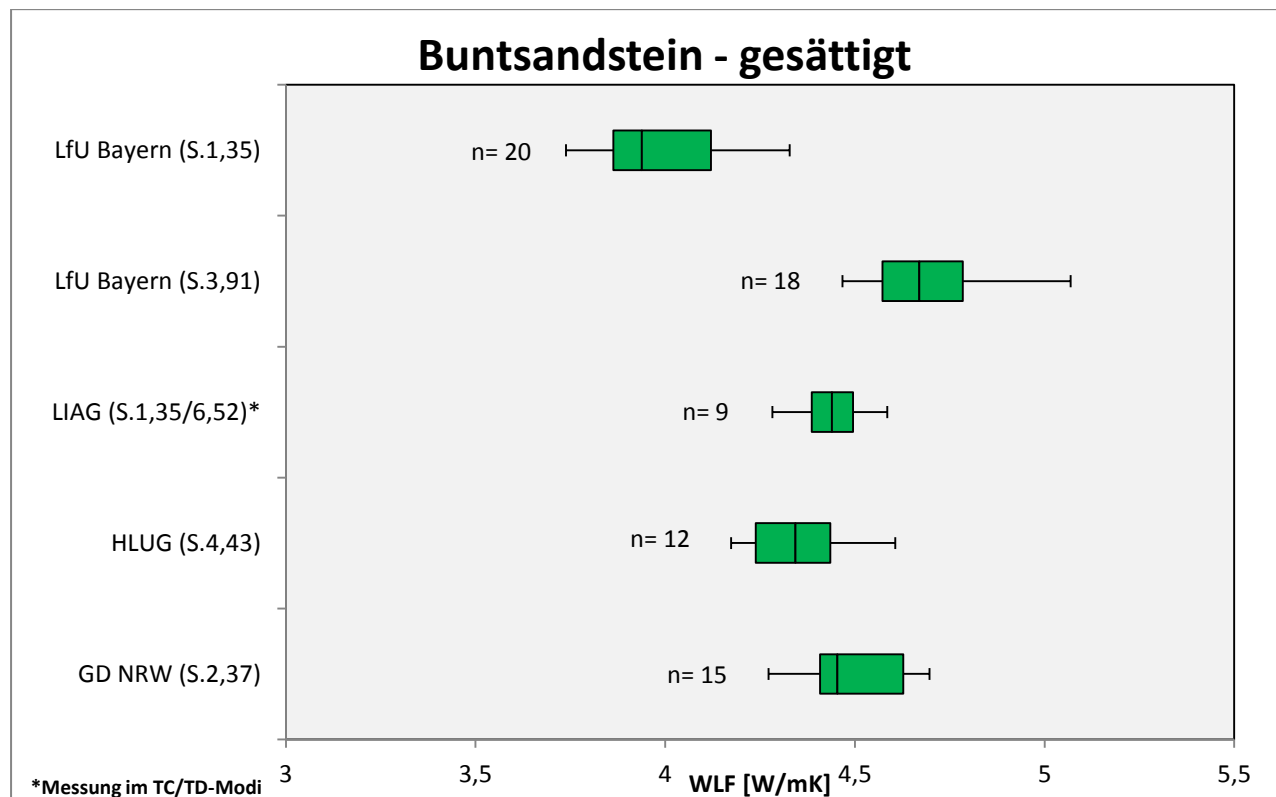
Rhätsandstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>4,43</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	15	12	19	18
Min	4,034	4,227	4,144	4,324	3,620
Max	4,355	4,406	4,340	4,544	4,051
Mittelwert	4,201	4,315	4,232	4,431	3,809
Stabw	0,129	0,057	0,065	0,064	0,127
Q1	4,064	4,274	4,176	4,381	3,708
Median	4,269	4,289	4,212	4,414	3,762
Q3	4,312	4,368	4,299	4,484	3,918

## 2.12 Buntsandstein – trocken – Laborspezifische Probenkörper



Buntsandstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>2,37</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	9	9	9	19	18
Min	2,510	2,579	2,450	2,606	2,790	2,497
Max	2,735	2,735	2,604	2,747	3,116	3,195
Mittelwert	2,592	2,659	2,539	2,660	2,924	2,739
Stabw	0,073	0,051	0,046	0,041	0,095	0,176
Q1	2,536	2,624	2,505	2,637	2,844	2,608
Median	2,565	2,653	2,537	2,650	2,899	2,697
Q3	2,628	2,698	2,578	2,666	3,002	2,868

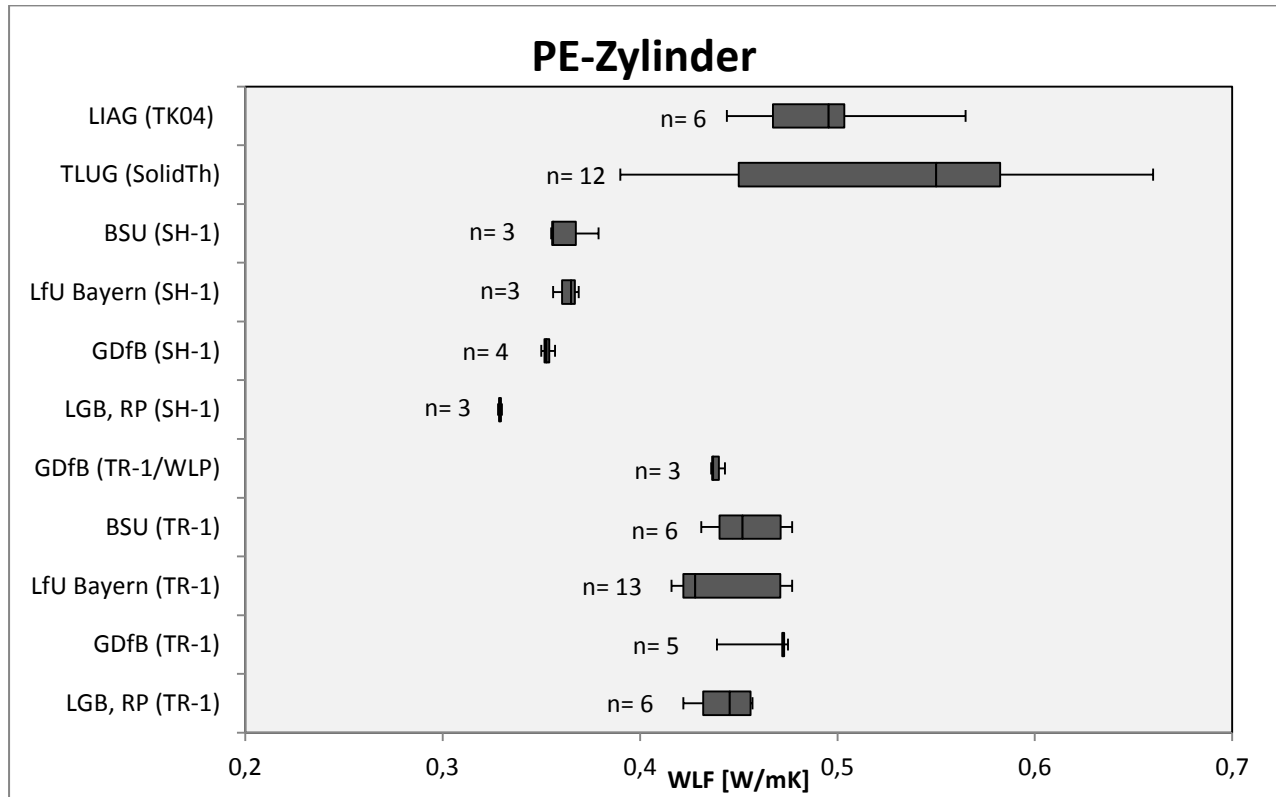
## 2.13 Buntsandstein – gesättigt – Laborspezifische Probenkörper



Buntsandstein	LGB, RP	GD NRW	HLUG	LIAG	LfU Bayern	LfU Bayern
<b>Standard</b>	<b>3,86</b>	<b>2,37</b>	<b>4,43</b>	<b>1,35/6,52</b>	<b>3,91</b>	<b>1,35</b>
Umfang	9	15	12	9	18	20
Min	4,420	4,272	4,174	4,282	4,467	3,738
Max	4,620	4,697	4,606	4,585	5,069	4,328
Mittelwert	4,514	4,487	4,348	4,432	4,687	3,977
Stabw	0,068	0,129	0,127	0,088	0,145	0,147
Q1	4,471	4,408	4,238	4,386	4,573	3,863
Median	4,510	4,454	4,344	4,439	4,670	3,939
Q3	4,545	4,628	4,436	4,495	4,784	4,121

### 3. Referenz- und laborspezifische Probenkörper – Messgeräte mit Vollraumsonden

#### 3.1 PE-Zylinder

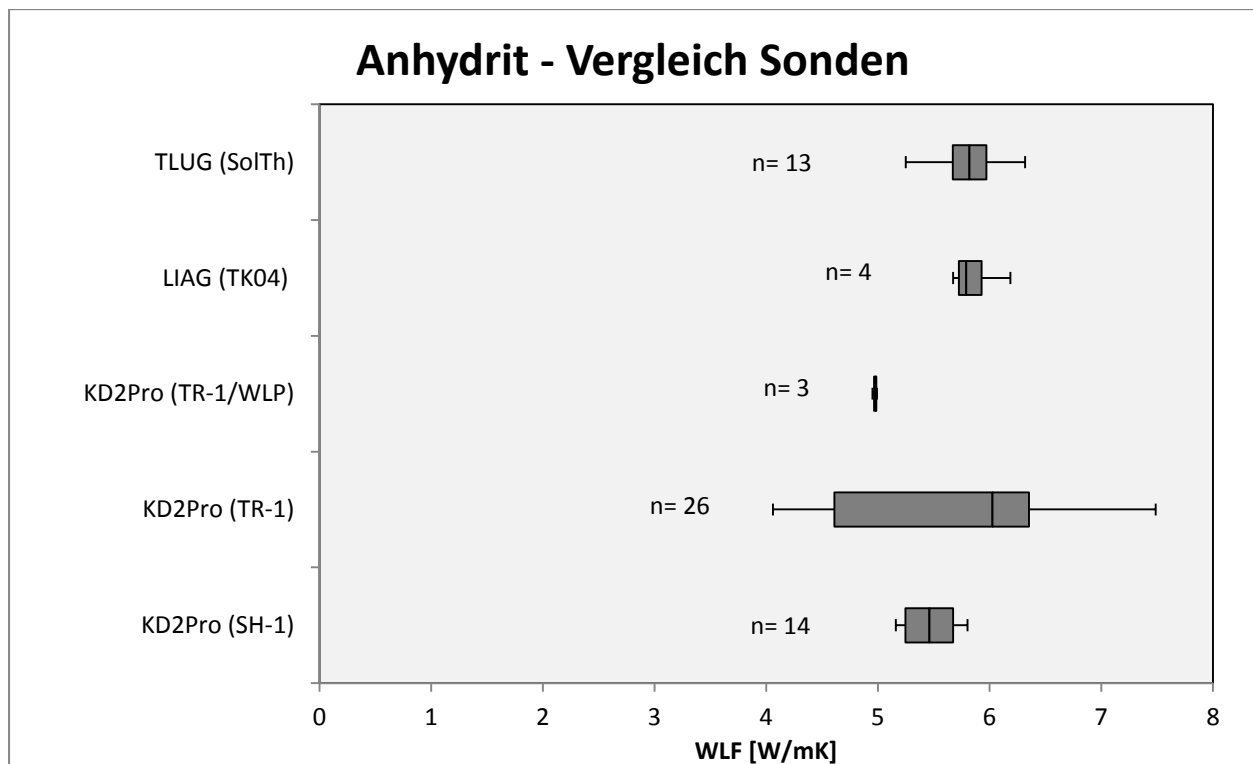


PE-Zylinder	LGB, RP	GDfB	LfU Bayern	BSU	GDfB
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1/WLP
Umfang	6	5	13	6	3
Min	0,422	0,439	0,416	0,431	0,436
Max	0,457	0,475	0,477	0,477	0,443
Mittelwert	0,443	0,466	0,445	0,454	0,439
Stabw	0,014	0,014	0,025	0,018	0,003
Q1	0,432	0,472	0,422	0,440	0,437
Median	0,446	0,472	0,428	0,452	0,437
Q3	0,456	0,473	0,471	0,471	0,440

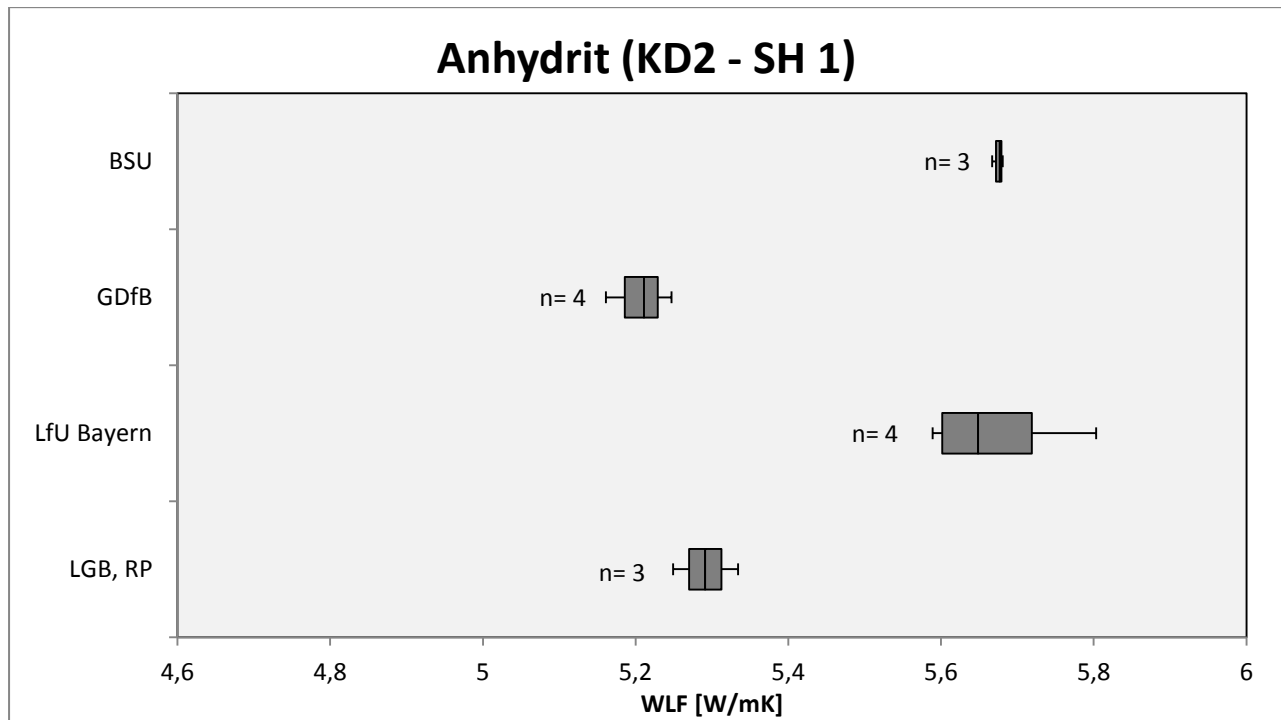
PE-Zylinder	LGB, RP	GDfB	LfU Bayern	BSU	TLUG	LIAG
Sonde/Sensor	SH-1	SH-1	SH-1	SH-1	SolTh	TK04
Umfang	3	4	3	3	12	6
Min	0,328	0,350	0,356	0,355	0,390	0,444
Max	0,330	0,357	0,369	0,379	0,660	0,565
Mittelwert	0,329	0,353	0,363	0,363	0,524	0,494
Stabw	0,001	0,003	0,005	0,011	0,086	0,039
Q1	0,329	0,352	0,361	0,356	0,450	0,467
Median	0,329	0,353	0,365	0,356	0,550	0,496
Q3	0,330	0,354	0,367	0,368	0,583	0,504

### 3.2 Anhydrit



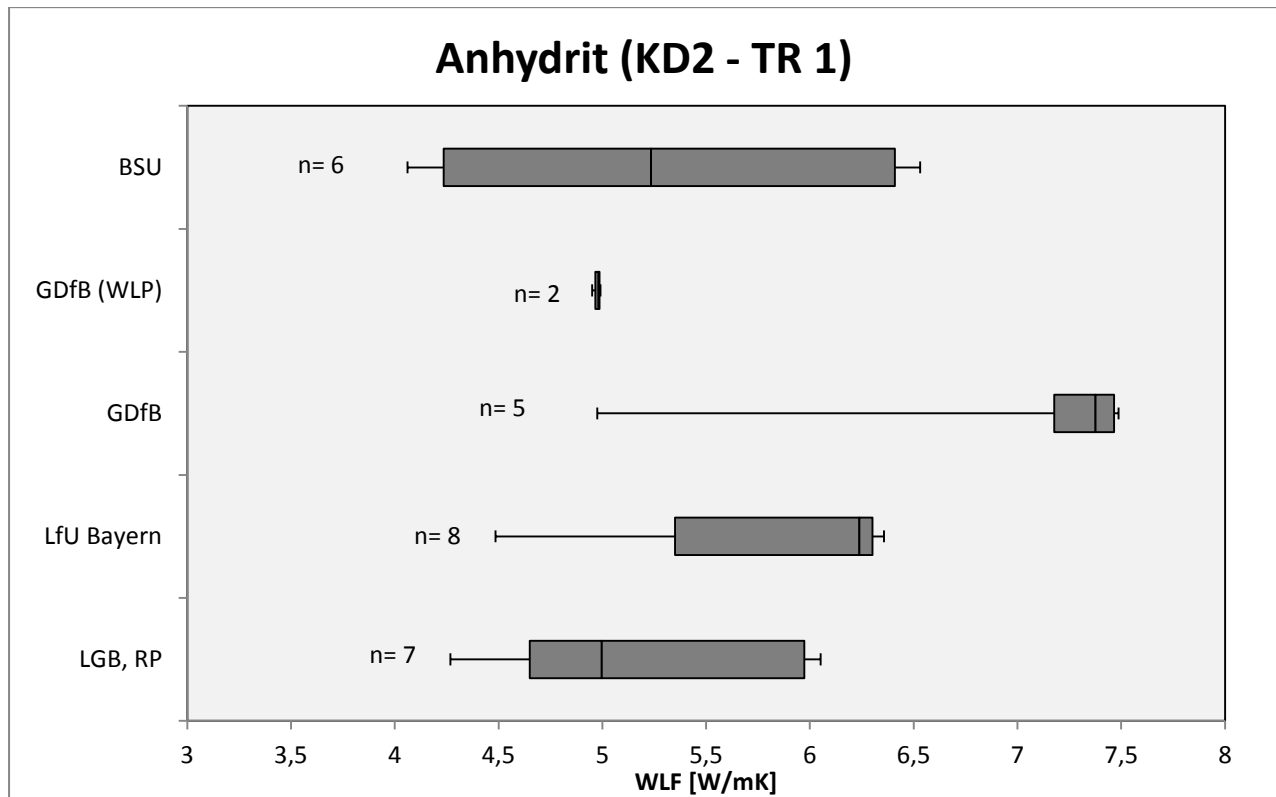
Anhydrit	KD2Pro	KD2Pro	KD2Pro	TK04	SolTh
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	HLQ/VLQ	
Umfang	14	26	3	4	13
Min	5,161	4,061	4,951	5,675	5,250
Max	5,803	7,487	4,991	6,187	6,320
Mittelwert	5,458	5,736	4,975	5,862	5,824
Stabw	0,223	1,078	0,017	0,197	0,286
Q1	5,248	4,611	4,967	5,725	5,670
Median	5,462	6,028	4,982	5,793	5,820
Q3	5,675	6,353	4,987	5,930	5,973

### 3.3 Anhydrit – Messgerät KD2-Pro - Vollraumsonde SH-1



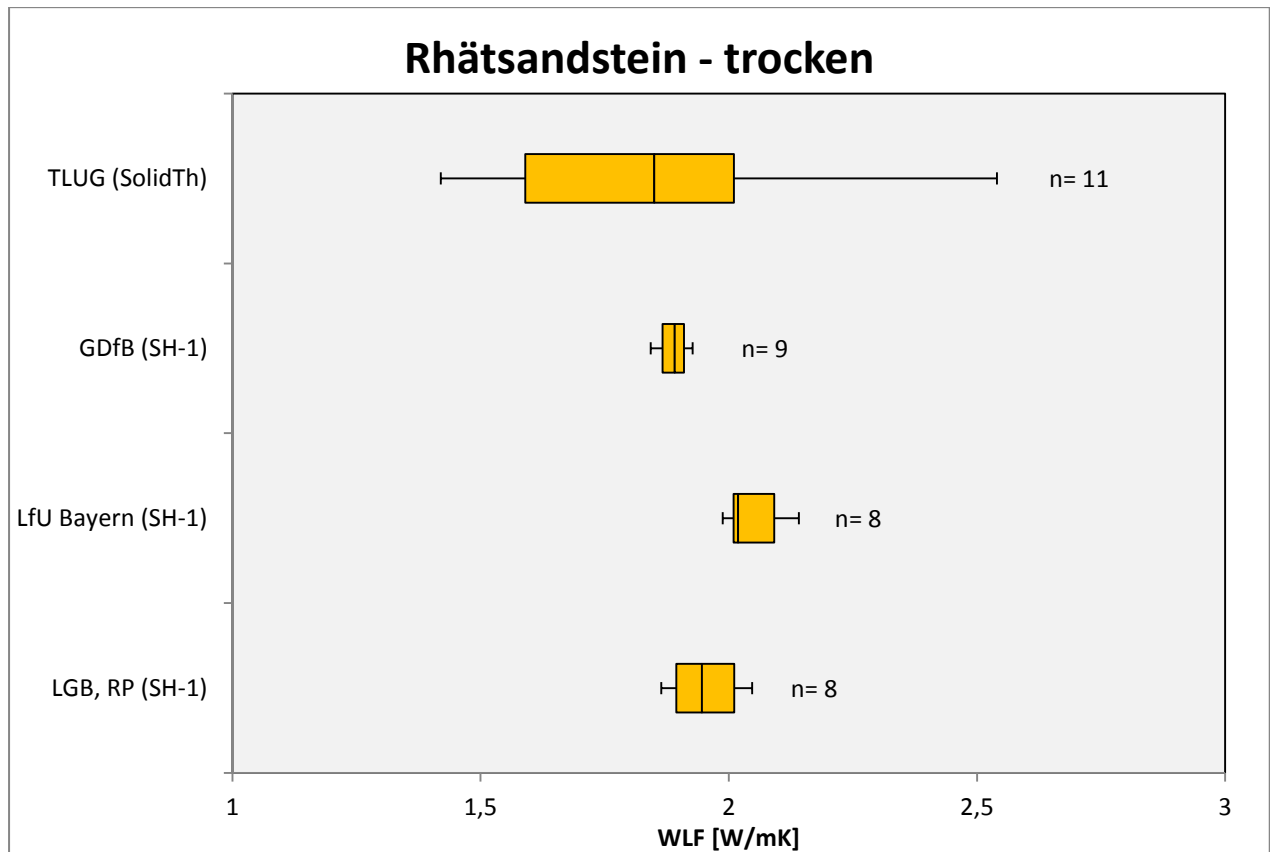
Anhydrit	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	BSU
Sonde/Sensor	SH-1	SH-1	SH-1	SH-1
Umfang	3	4	4	3
Min	5,249	5,589	5,161	5,667
Max	5,334	5,803	5,247	5,681
Mittelwert	5,291	5,672	5,206	5,675
Stabw	0,035	0,085	0,035	0,006
Q1	5,270	5,602	5,186	5,672
Median	5,291	5,649	5,211	5,677
Q3	5,313	5,719	5,229	5,679

### 3.4 Anhydrit – Messgerät KD2-Pro - Vollraumsonde TR-1



Anhydrit	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	GDfB	BSU
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1 (WLP)	TR-1
Umfang	7	8	5	3	6
Min	4,268	4,485	4,975	4,951	4,061
Max	6,051	6,357	7,487	4,991	6,531
Mittelwert	5,223	5,769	6,896	4,975	5,294
Stabw	0,724	0,812	0,967	0,017	1,118
Q1	4,651	5,351	7,177	4,967	4,236
Median	4,997	6,238	7,376	4,982	5,235
Q3	5,973	6,302	7,465	4,987	6,409

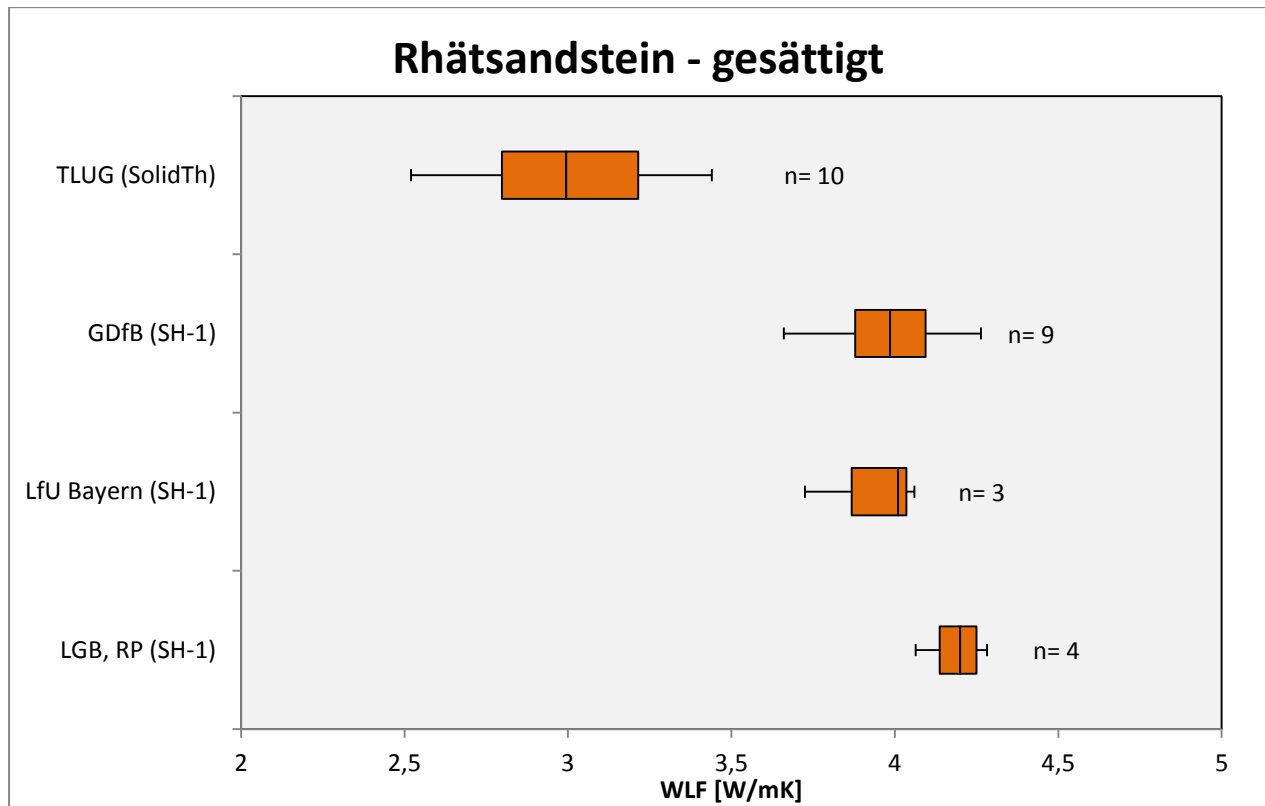
### 3.5 Rhät-Sandstein - trocken



Rhät sandstein	LGB, RP	LfU Bayern	GdfB	TLUG
Sonde/Sensor	SH-1	SH-1	SH-1	SolTh
Umfang	8	8	9	11
Min	1,864	1,988	1,843	1,420
Max	2,047	2,141	1,927	2,540
Mittelwert	1,952	2,050	1,888	1,868
Stabw	0,070	0,054	0,039	0,344
Q1	1,894	2,010	1,867	1,590
Median	1,946	2,019	1,891	1,850
Q3	2,011	2,092	1,910	2,010

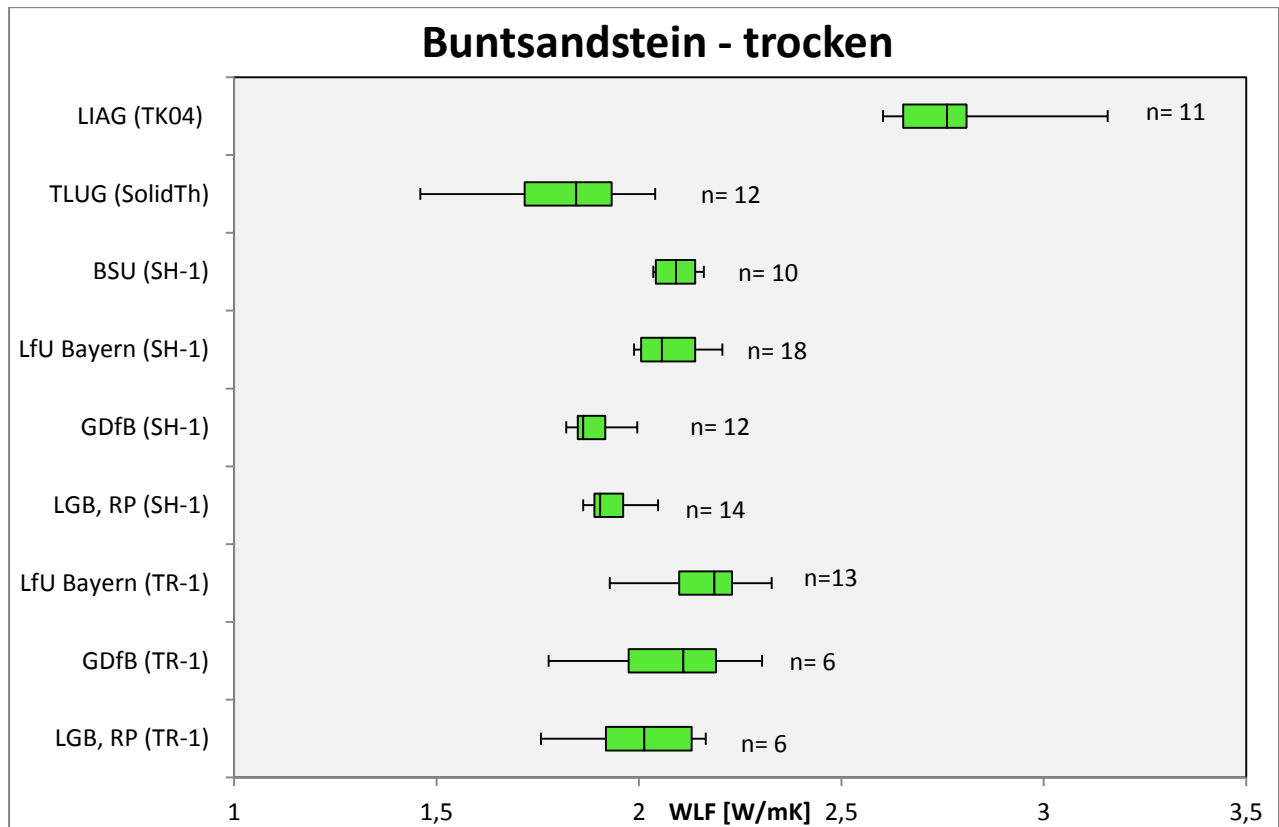


### 3.6 Rhät-Sandstein – gesättigt



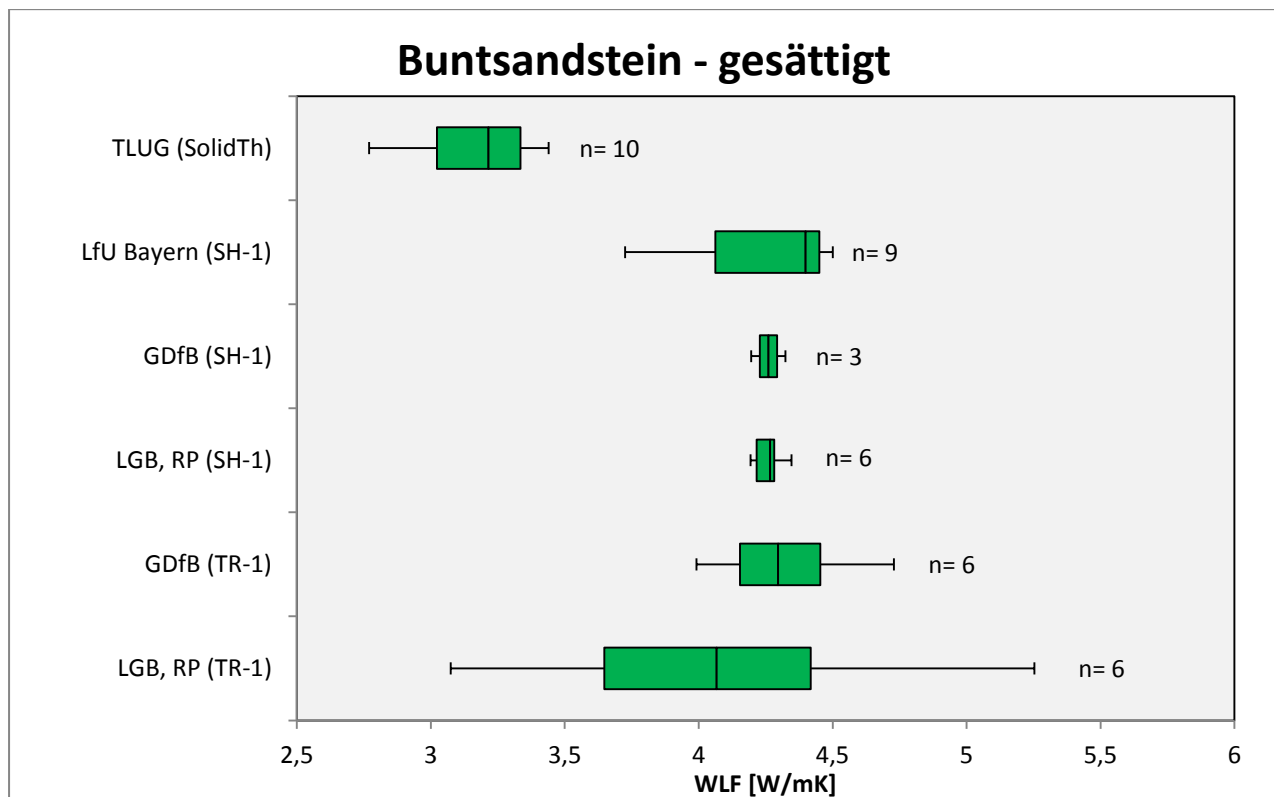
Rhätsandstein	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	TLUG
Sonde/Sensor	SH-1	SH-1	SH-1	SolTh
Umfang	4	3	9	10
Mittelwert	4,187	3,932	3,951	2,987
Stabw	0,083	0,148	0,187	0,278
Min	4,064	3,725	3,660	2,520
Q1	4,137	3,868	3,879	2,798
Median	4,200	4,010	3,985	2,995
Q3	4,250	4,035	4,094	3,215
Max	4,282	4,060	4,263	3,440

### 3.7 Buntsandstein - trocken



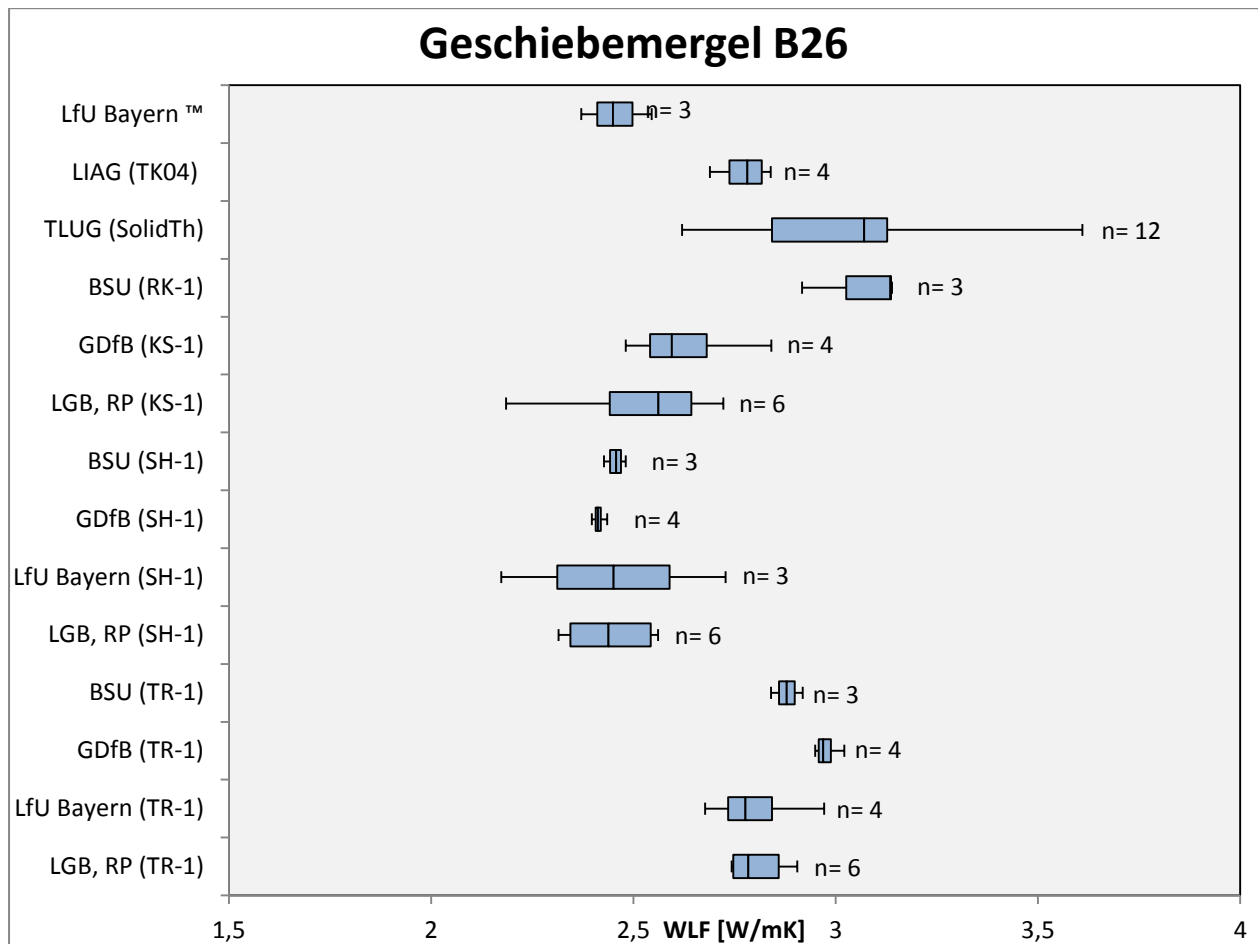
Buntsandstein	LGB, RP	GDfB	LfU Bayern	LGB, RP	GDfB	LfU Bayern	BSU
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	SH-1	SH-1	SH-1	SH-1
Umfang	6	6	13	14	12	18	10
Min	1,758	1,777	1,928	1,862	1,820	1,988	2,035
Max	2,165	2,304	2,328	2,047	1,996	2,206	2,160
Mittelwert	2,001	2,075	2,146	1,926	1,888	2,074	2,093
Stabw	0,144	0,174	0,121	0,056	0,063	0,072	0,052
Q1	1,919	1,975	2,099	1,890	1,849	2,005	2,042
Median	2,014	2,110	2,186	1,904	1,863	2,057	2,092
Q3	2,130	2,190	2,230	1,961	1,917	2,139	2,139
Buntsandstein	TLUG	LIAG					
Sonde/Sensor	SolTh	TK04					
Umfang	12	11					
Min	1,460	2,603					
Max	2,040	3,158					
Mittelwert	1,808	2,797					
Stabw	0,179	0,195					
Q1	1,718	2,653					
Median	1,845	2,761					
Q3	1,933	2,809					

### 3.8 Buntsandstein - gesättigt



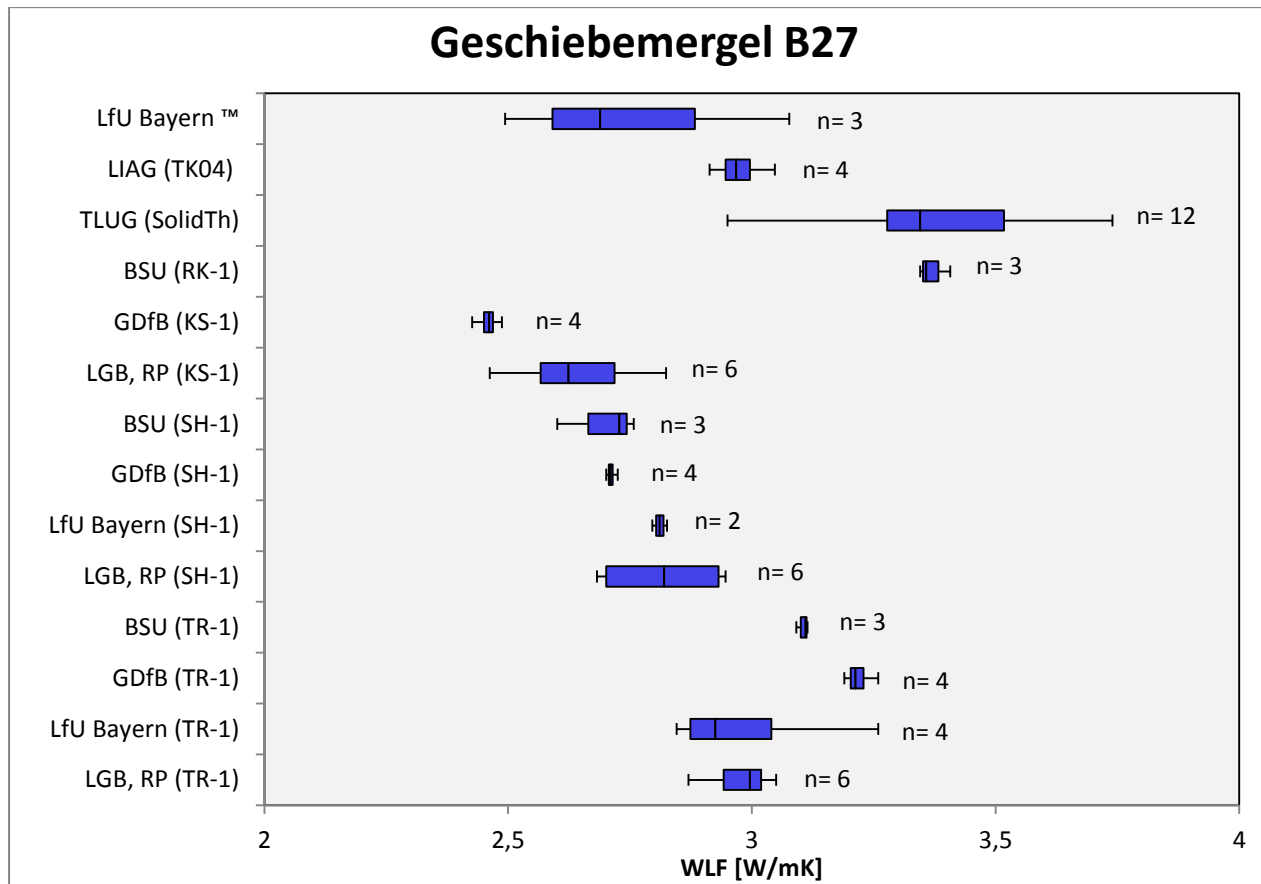
Buntsandstein	LGB, RP	GDfB	LGB, RP	GDfB	LfU Bayern	TLUG
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	SH-1	SH-1	SH-1	SolTh
Umfang	6	6	6	3	9	10
Min	3,074	3,992	4,193	4,196	3,725	2,770
Max	5,253	4,729	4,346	4,324	4,501	3,440
Mittelwert	4,084	4,321	4,260	4,260	4,208	3,179
Stabw	0,700	0,242	0,052	0,052	0,344	0,204
Q1	3,648	4,154	4,216	4,229	4,062	3,023
median	4,067	4,297	4,267	4,261	4,399	3,215
Q3	4,418	4,455	4,282	4,293	4,450	3,335

### 3.9 Geschiebemergel B26



Geschiebemergel B26	LGB, RP	LfU Bayern	GDFB	BSU	LGB, RP	LfU Bayern
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1	SH-1	SH-1
Umfang	6	4	4	3	6	3
Min	2,743	2,677	2,949	2,840	2,315	2,173
Max	2,905	2,971	3,021	2,918	2,561	2,728
Mittelwert	2,803	2,800	2,977	2,879	2,441	2,451
Stabw	0,067	0,108	0,027	0,032	0,107	0,278
Q1	2,747	2,734	2,958	2,860	2,344	2,312
Median	2,784	2,777	2,969	2,879	2,439	2,451
Q3	2,859	2,843	2,988	2,899	2,543	2,589
Geschiebemergel B26	LGB, RP	GDFB	BSU	TLUG	LIAG	LfU Bayern
Sonde/Sensor	KS-1	KS-1	RK-1	SolTh	TK04	TM
Umfang	6	4	3	12	4	3
Min	2,185	2,481	2,917	2,620	2,689	2,371
Max	2,722	2,841	3,139	3,610	2,839	2,545
Mittelwert	2,517	2,628	3,064	3,060	2,773	2,455
Stabw	0,179	0,134	0,104	0,292	0,057	0,071
Q1	2,442	2,541	3,026	2,843	2,737	2,410
Median	2,562	2,595	3,135	3,070	2,782	2,449
Q3	2,643	2,681	3,137	3,128	2,817	2,497

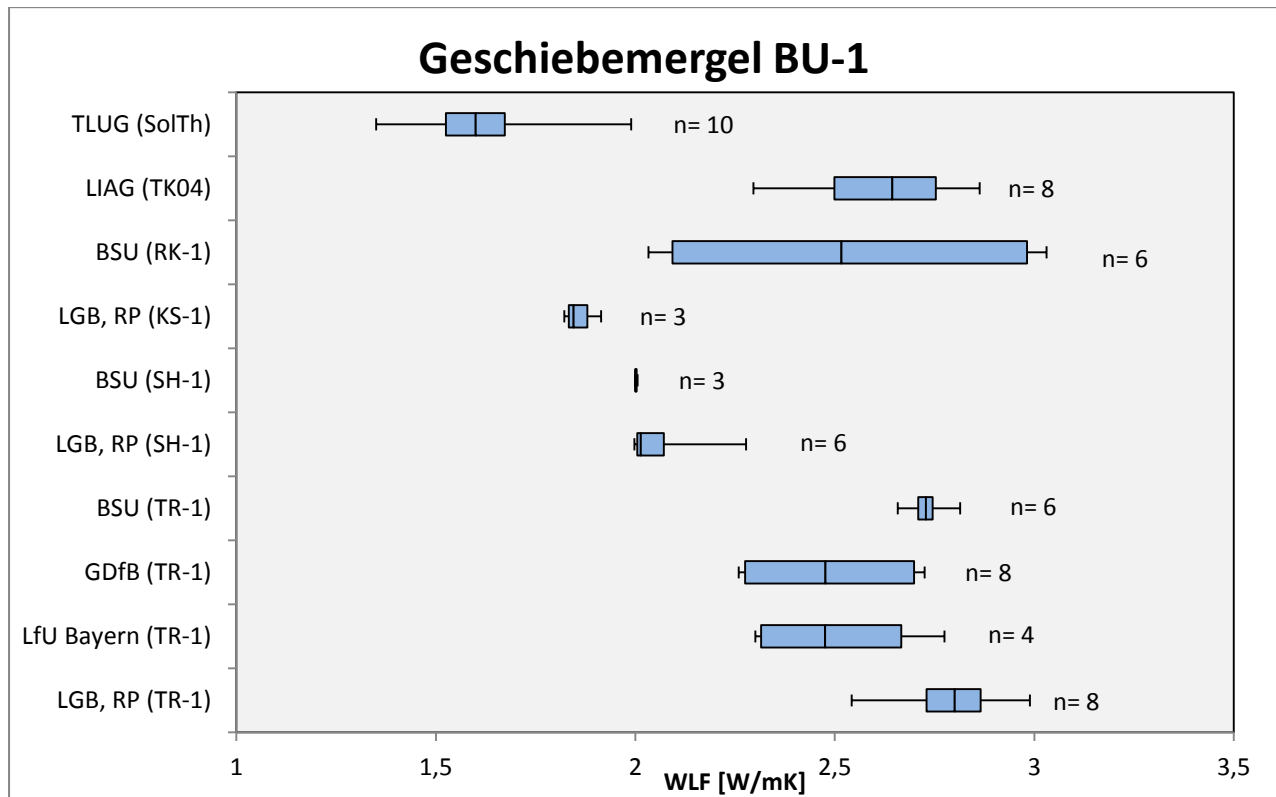
### 3.10 Geschiebemergel B27



Geschiebemergel B27	LfU Bayern		BSU		LfU Bayern		BSU	
	LGB, RP	TR-1	GdFB	TR-1	LGB, RP	SH-1	GdFB	SH-1
Umfang	6	4	4	3	6	2	4	3
Min	2,870	2,846	3,190	3,091	2,682	2,796	2,701	2,601
Max	3,050	3,259	3,259	3,114	2,946	2,826	2,725	2,758
Mittelwert	2,977	2,989	3,219	3,105	2,817	2,811	2,711	2,696
Stabw	0,061	0,162	0,025	0,010	0,119	0,015	0,009	0,068
Q1	2,943	2,874	3,203	3,101	2,701	2,804	2,706	2,665
Median	2,996	2,925	3,213	3,110	2,820	2,811	2,710	2,728
Q3	3,019	3,040	3,229	3,112	2,932	2,819	2,715	2,743

Geschiebemergel B27	LfU Bayern		BSU		LfU Bayern	
	LGB, RP	KS-1	GdFB	RK-1	TLUG	LIAG
Umfang	6	4	3	12	4	3
Min	2,462	2,426	3,345	2,950	2,913	2,494
Max	2,824	2,487	3,407	3,740	3,047	3,077
Mittelwert	2,640	2,459	3,370	3,381	2,974	2,753
Stabw	0,123	0,022	0,027	0,206	0,048	0,242
Q1	2,567	2,451	3,352	3,278	2,946	2,591
Median	2,624	2,461	3,358	3,345	2,968	2,689
Q3	2,719	2,469	3,383	3,518	2,996	2,883

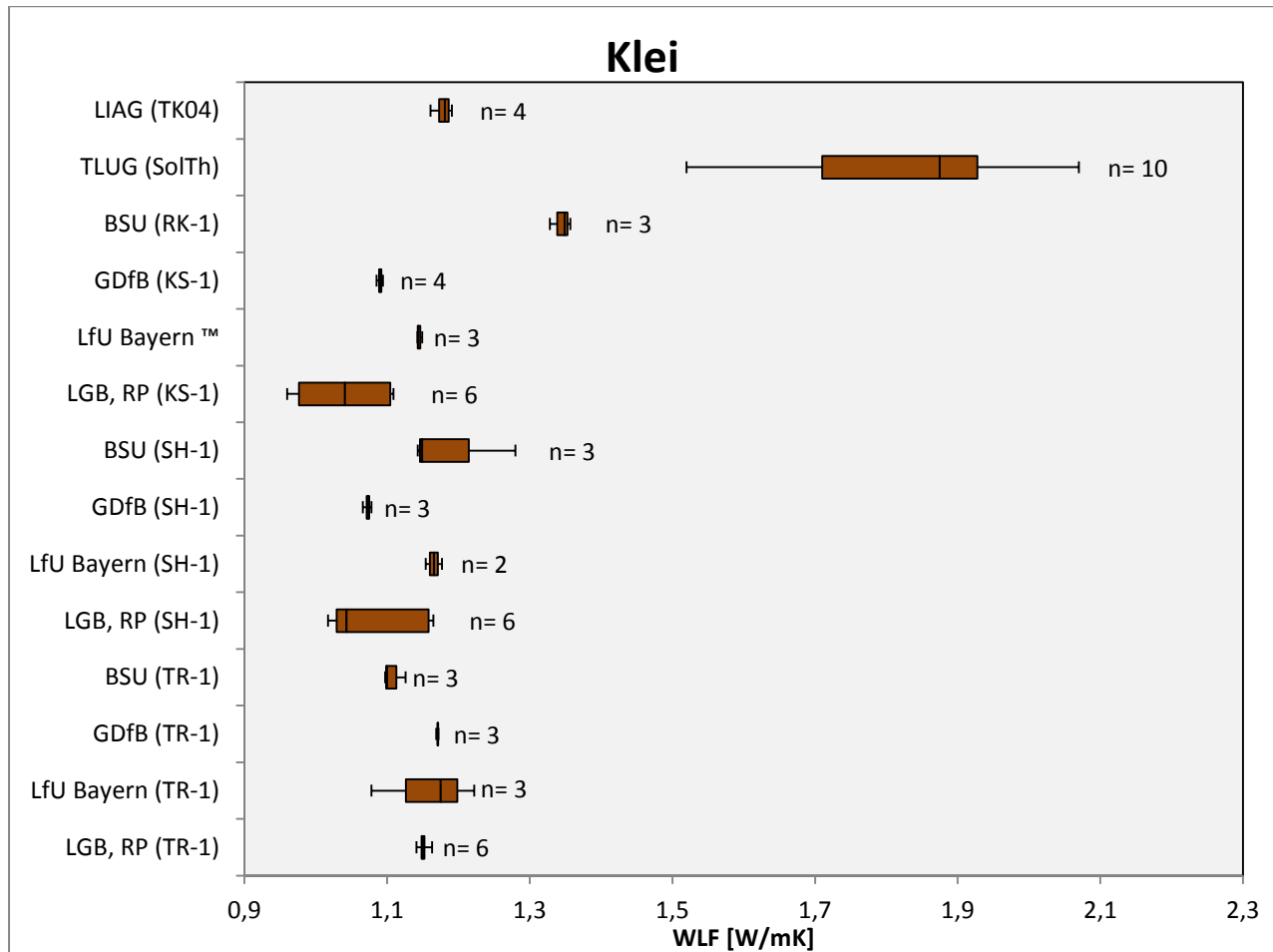
### 3.11 Geschiebemergel BU 1



Geschiebemergel BU 1	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	BSU	LGB, RP
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1	SH-1
Umfang	8	4	8	6	6
Min	2,542	2,301	2,259	2,658	1,998
Max	2,989	2,775	2,725	2,814	2,278
Mittelwert	2,787	2,507	2,486	2,731	2,063
Stabw	0,134	0,203	0,210	0,047	0,093
Q1	2,730	2,315	2,275	2,710	2,005
Median	2,801	2,476	2,477	2,729	2,014
Q3	2,866	2,667	2,699	2,745	2,072

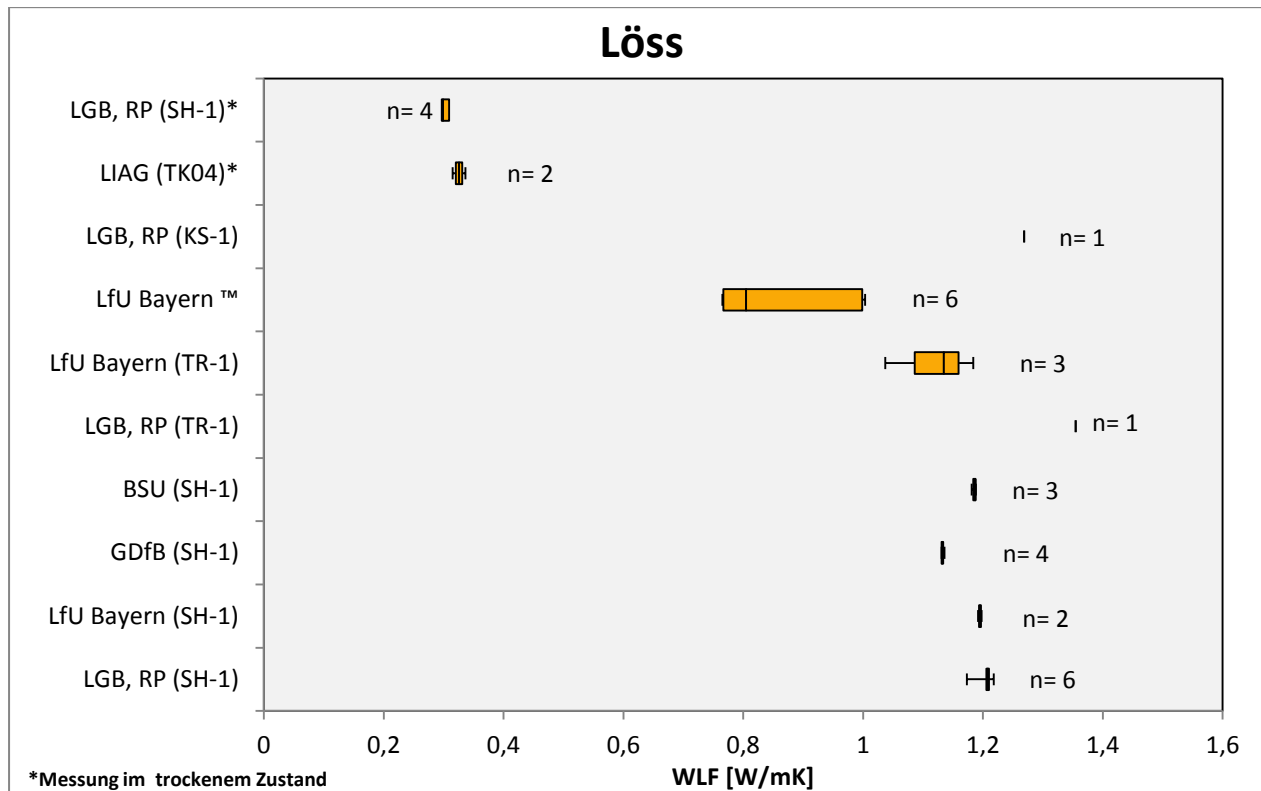
Geschiebemergel BU 1	BSU	LGB, RP	BSU	LIAG	TLUG
Sonde/Sensor	SH-1	KS-1	RK-1	TK04	SolTh
Umfang	3	3	6	8	10
Min	1,999	1,822	2,033	2,296	1,350
Max	2,006	1,914	3,031	2,863	1,990
Mittelwert	2,002	1,860	2,531	2,614	1,610
Stabw	0,003	0,039	0,45830521	0,180	0,166
Q1	2,000	1,834	2,09325	2,499	1,525
Median	2,001	1,845	2,5165	2,644	1,600
Q3	2,004	1,880	2,98175	2,753	1,673

### 3.12 Klei



Klei	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	BSU	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1	SH-1	SH-1	SH-1
Umfang	6	3	3	3	6	2	3
Min	1,141	1,078	1,169	1,097	1,017	1,154	1,066
Max	1,163	1,222	1,172	1,126	1,165	1,177	1,078
Mittelwert	1,151	1,158	1,171	1,108	1,082	1,166	1,073
Stabw	0,007	0,060	0,001	0,013	0,065	0,012	0,004
Q1	1,148	1,127	1,171	1,099	1,029	1,160	1,071
Median	1,150	1,175	1,171	1,100	1,043	1,166	1,074
Q3	1,153	1,199	1,171	1,113	1,158	1,171	1,075
Klei	BSU	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	BSU	TLUG	LIAG
Sonde/Sensor	SH-1	KS-1	TM	KS-1	RK-1	SolTh	TK04
Umfang	3	6	3	4	3	10	4
Min	1,143	0,960	1,143	1,085	1,328	1,520	1,161
Max	1,280	1,109	1,149	1,094	1,357	2,070	1,191
Mittelwert	1,191	1,039	1,145	1,090	1,345	1,829	1,179
Stabw	0,063	0,067	0,003	0,003	0,012	0,162	0,011
Q1	1,146	0,976	1,143	1,089	1,339	1,710	1,173
Median	1,149	1,041	1,143	1,091	1,349	1,875	1,181
Q3	1,215	1,104	1,146	1,092	1,353	1,928	1,187

### 3.13 Löss

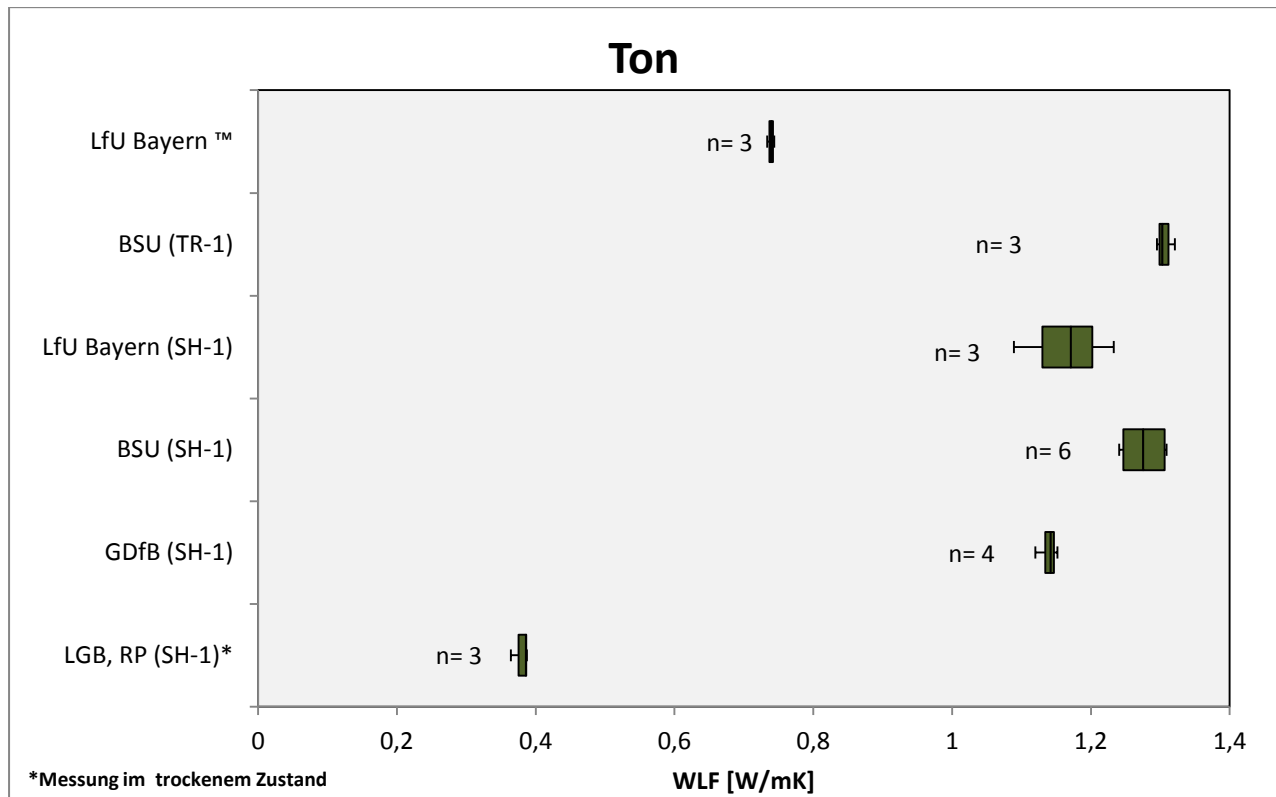


Löss	LGB, RP	LfU Bayern	GdFB	BSU	LGB, RP
Sonde/Sensor	SH-1	SH-1	SH-1	SH-1	TR-1
Umfang	6	2	4	3	1
Min	1,173	1,192	1,131	1,181	1,355
Max	1,218	1,198	1,136	1,188	1,355
Mittelwert	1,203	1,195	1,133	1,185	1,355
Stabw	0,016	0,003	0,002	0,003	0,000
Q1	1,206	1,194	1,131	1,184	1,355
Median	1,208	1,195	1,132	1,187	1,355
Q3	1,210	1,197	1,134	1,188	1,355

Löss	LfU Bayern	LfU Bayern	LGB, RP	LIAG	LGB, RP
Sonde/Sensor	TR-1	TM	KS-1	TK04	SH-1
Umfang	3	6	1	2	3
Min	1,037	0,765	1,269	0,315	0,289
Max	1,184	1,004	1,269	0,336	0,340
Mittelwert	1,119	0,868	1,269	0,326	0,307
Stabw	0,061	0,110	0	0,011	0,020
Q1	1,086	0,767	1,269	0,320	0,297
Median	1,135	0,804	1,269	0,326	0,299
Q3	1,160	0,998	1,269	0,331	0,309

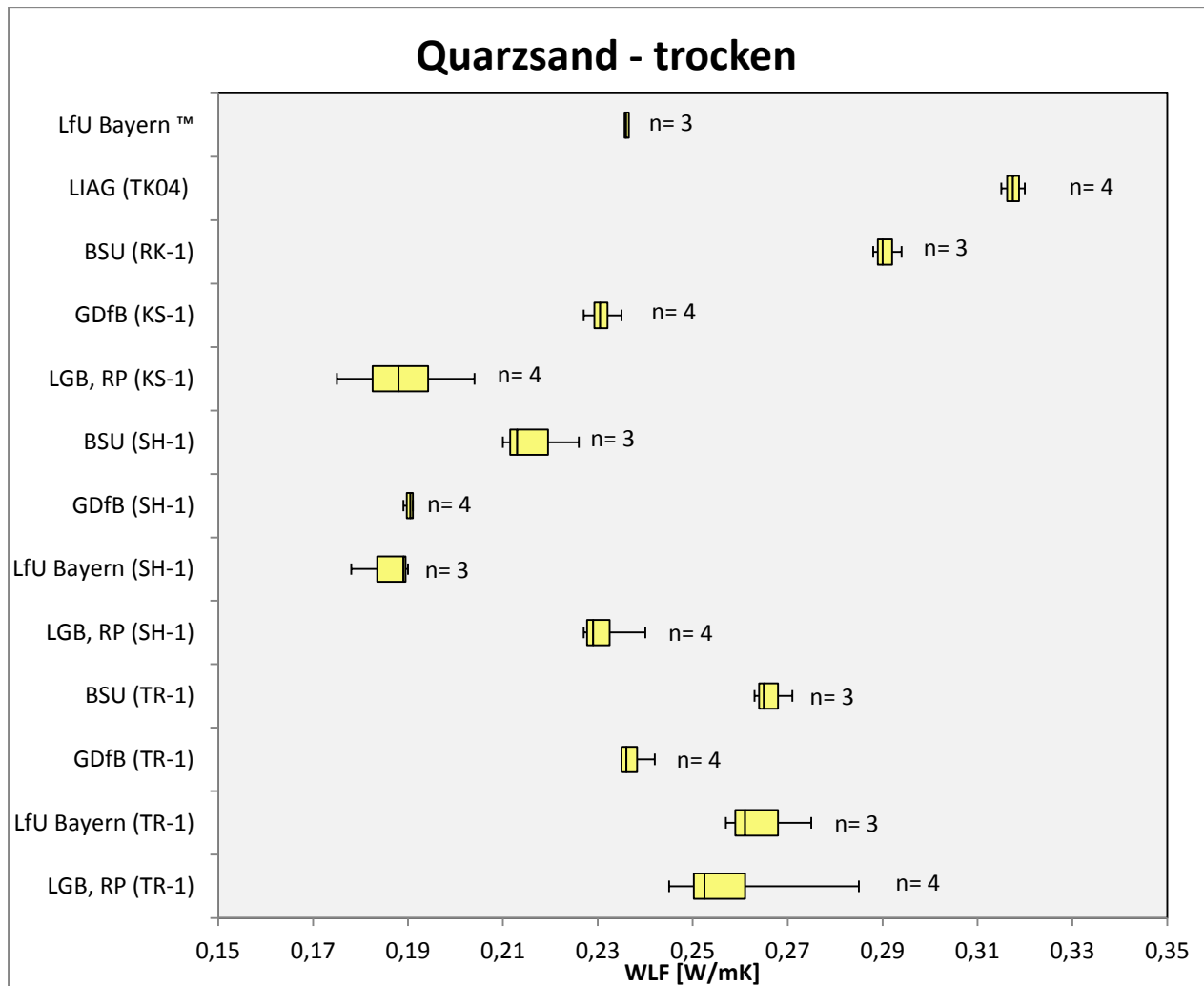


### 3.14 Ton



Ton	LGB, RP	GDfB	BSU	LfU Bayern	BSU	LfU Bayern
Sonde/Sensor	SH-1	SH-1	SH-1	SH-1	TR-1	TM
Umfang	3	4	6	3	3	3
Min	0,364	1,120	1,241	1,089	1,295	0,734
Max	0,387	1,152	1,309	1,233	1,321	0,744
Mittelwert	0,379	1,139	1,276	1,164	1,306	0,739
Stabw	0,011	0,012	0,031	0,059	0,011	0,004
Q1	0,375	1,134	1,247	1,130	1,299	0,737
Median	0,386	1,142	1,276	1,171	1,303	0,740
Q3	0,387	1,147	1,306	1,202	1,312	0,742

### 3.15 Quarzsand - trocken

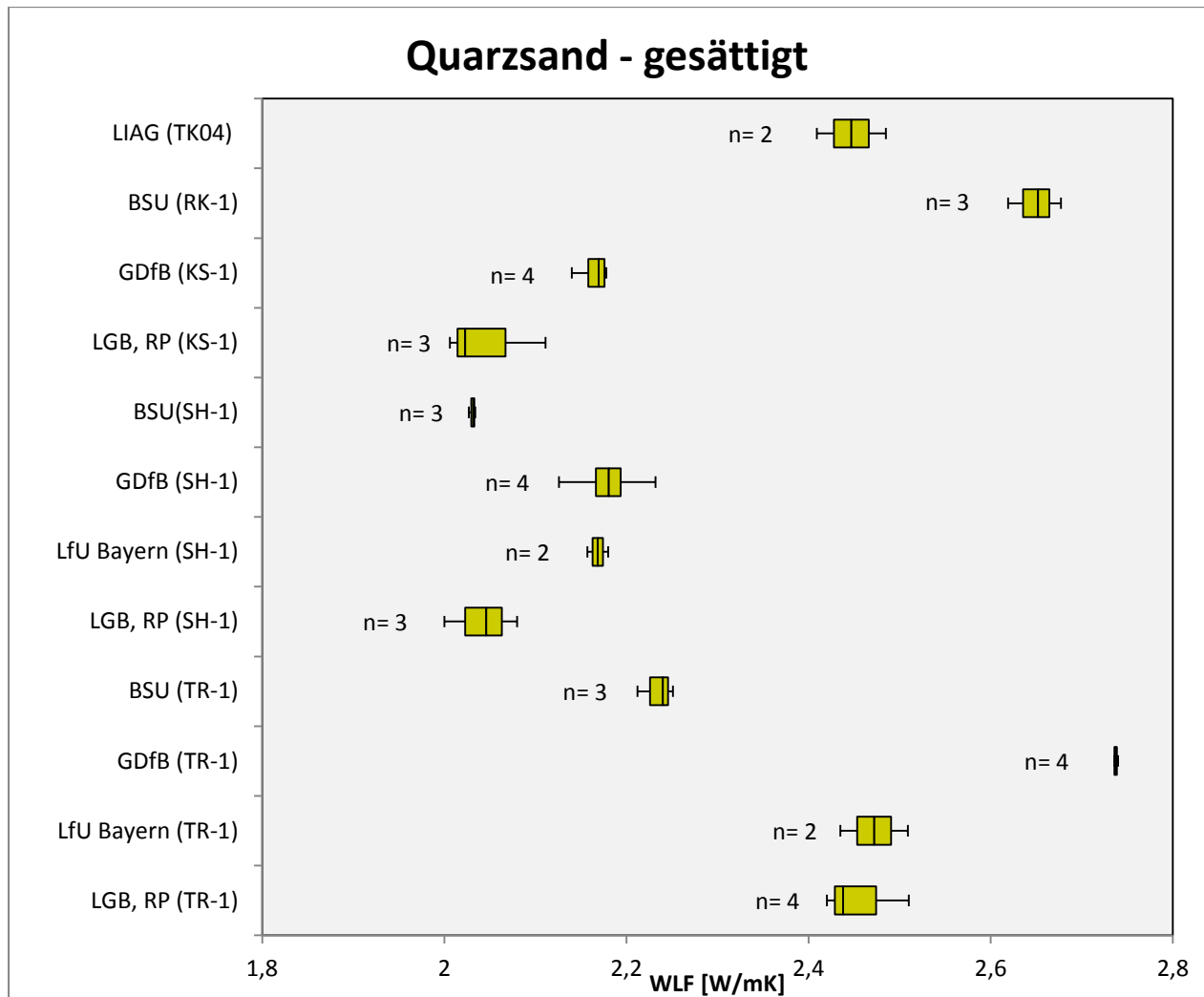


Quarzsand	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	BSU	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1	SH-1	SH-1	SH-1
Umfang	4	3	4	3	4	3	4
Min	0,245	0,257	0,235	0,263	0,227	0,178	0,189
Max	0,285	0,275	0,242	0,271	0,240	0,190	0,191
Mittelwert	0,259	0,264	0,237	0,266	0,231	0,186	0,190
Stabw	0,015	0,008	0,003	0,003	0,005	0,005	0,001
Q1	0,250	0,259	0,235	0,264	0,228	0,184	0,190
Median	0,253	0,261	0,236	0,265	0,229	0,189	0,191
Q3	0,261	0,268	0,238	0,268	0,233	0,190	0,191

Quarzsand	BSU	LGB, RP	GDfB	BSU	LIAG	LfU Bayern
Sonde/Sensor	SH-1	KS-1	KS-1	RK-1	TK04	TM
Umfang	3	4	4	3	4	3
Min	0,210	0,175	0,227	0,288	0,315	0,235
Max	0,226	0,204	0,235	0,294	0,320	0,237

Mittelwert	0,216	0,189	0,231	0,291	0,318	0,236
Stabw	0,007	0,010	0,003	0,002	0,003	0,001
Q1	0,212	0,183	0,229	0,289	0,316	0,236
Median	0,213	0,188	0,231	0,290	0,318	0,236
Q3	0,220	0,194	0,232	0,292	0,319	0,237

### 3.16 Quarzsand - gesättigt

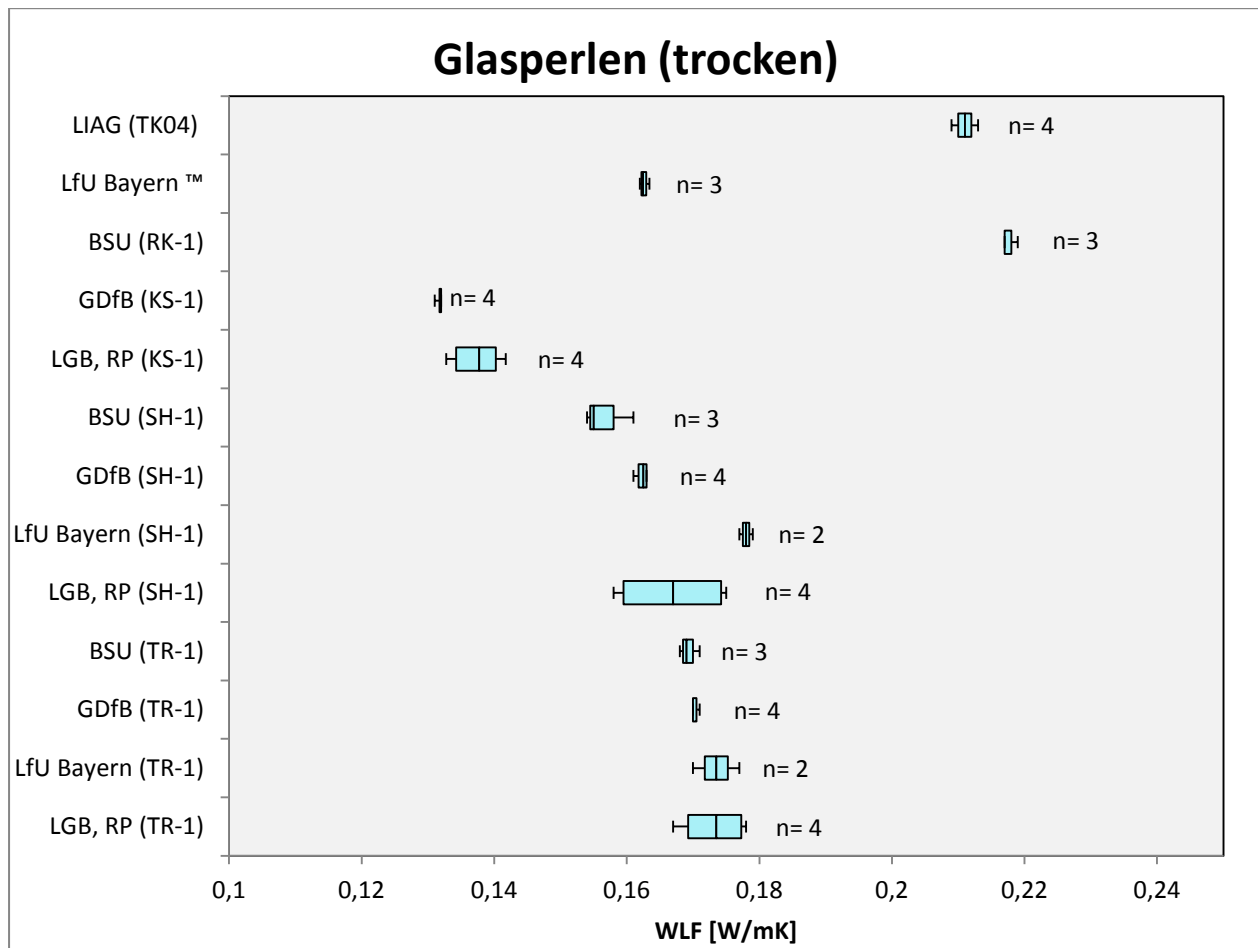


Quarzsand (s)	LGB, RP	LfU Bayern	GdfB	BSU	LGB, RP	LfU Bayern
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1	SH-1	SH-1
Umfang	4	2	4	3	3	2
Min	2,420	2,435	2,736	2,212	2,000	2,157
Max	2,510	2,509	2,740	2,251	2,080	2,180
Mittelwert	2,456	2,472	2,738	2,234	2,042	2,169
Stabw	0,039	0,037	0,002	0,016	0,033	0,012
Q1	2,429	2,454	2,736	2,226	2,023	2,163
Median	2,438	2,472	2,737	2,240	2,046	2,169
Q3	2,474	2,491	2,739	2,246	2,063	2,174

Quarzsand (s)	GdfB	BSU	LGB, RP	GdfB	BSU	LIAG
Sonde/Sensor	SH-1	SH-1	KS-1	KS-1	RK-1	TK04
Umfang	4	3	3	4	3	2
Min	2,126	2,027	2,006	2,140	2,619	2,409
Max	2,232	2,034	2,111	2,178	2,677	2,485

Mittelwert	2,180	2,031	2,047	2,164	2,649	2,447
Stabw	0,037	0,003	0,046	0,015	0,024	0,038
Q1	2,167	2,030	2,015	2,158	2,636	2,428
Median	2,181	2,032	2,023	2,170	2,652	2,447
Q3	2,194	2,033	2,067	2,176	2,665	2,466

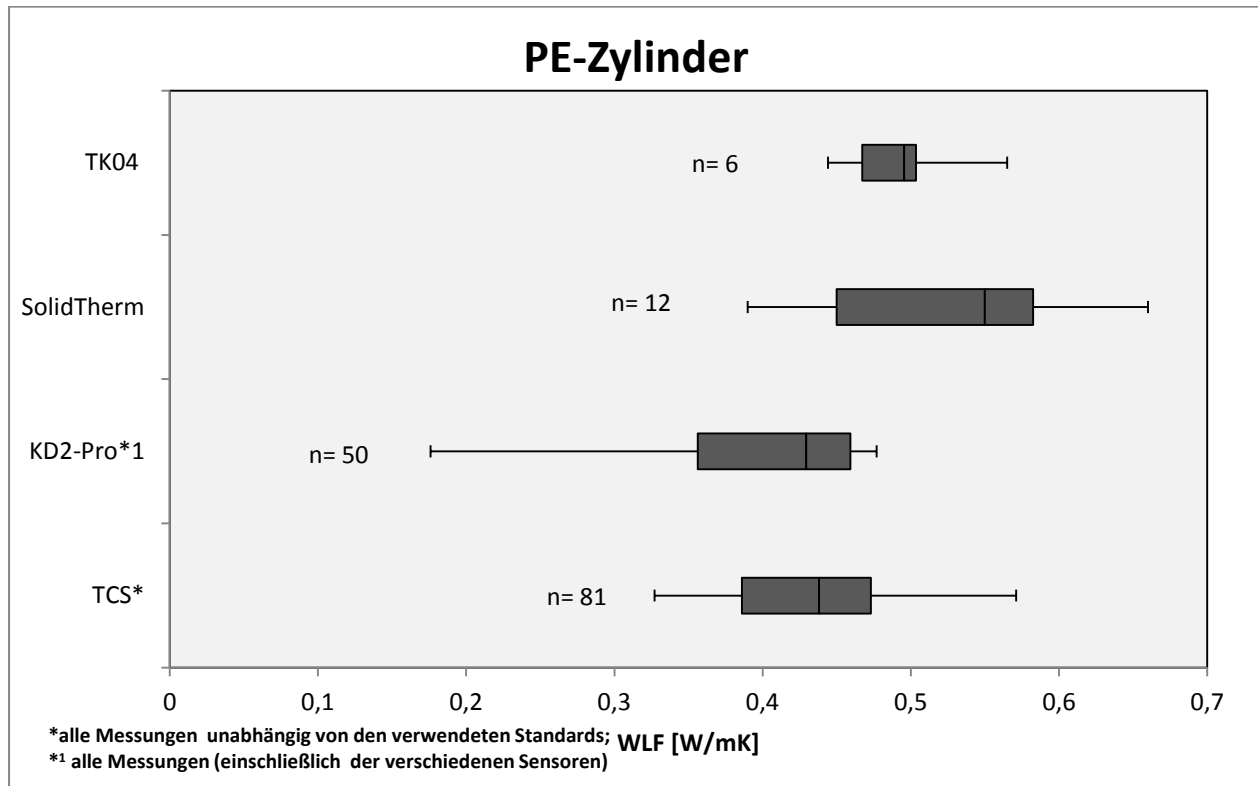
### 3.17 Glasperlen



Glasperlen	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB	BSU	LGB, RP	LfU Bayern	GDfB
Sonde/Sensor	TR-1	TR-1	TR-1	TR-1	SH-1	SH-1	SH-1
Umfang	4	2	4	3	4	2	4
Min	0,167	0,170	0,170	0,168	0,158	0,177	0,161
Max	0,178	0,177	0,171	0,171	0,175	0,179	0,163
Mittelwert	0,173	0,174	0,170	0,169	0,167	0,178	0,162
Stabw	0,005	0,003	0,000	0,001	0,008	0,001	0,001
Q1	0,169	0,172	0,170	0,169	0,160	0,178	0,162
Median	0,174	0,174	0,170	0,169	0,167	0,178	0,163
Q3	0,177	0,175	0,171	0,170	0,174	0,179	0,163
Glasperlen	BSU	LGB, RP	GDfB	BSU	LfU Bayern	LIAG	
Sonde/Sensor	SH-1	KS-1	KS-1	RK-1	TM	TK04	
Umfang	3	4	4	3	3	4	
Min	0,154	0,132	0,131	0,217	0,162	0,209	
Max	0,161	0,141	0,132	0,219	0,163	0,213	
Mittelwert	0,157	0,137	0,132	0,218	0,163	0,211	
Stabw	0,003	0,003	0,000	0,001	0,001	0,002	
Q1	0,155	0,134	0,132	0,217	0,162	0,210	
Median	0,155	0,137	0,132	0,217	0,162	0,211	
Q3	0,158	0,140	0,132	0,218	0,163	0,212	

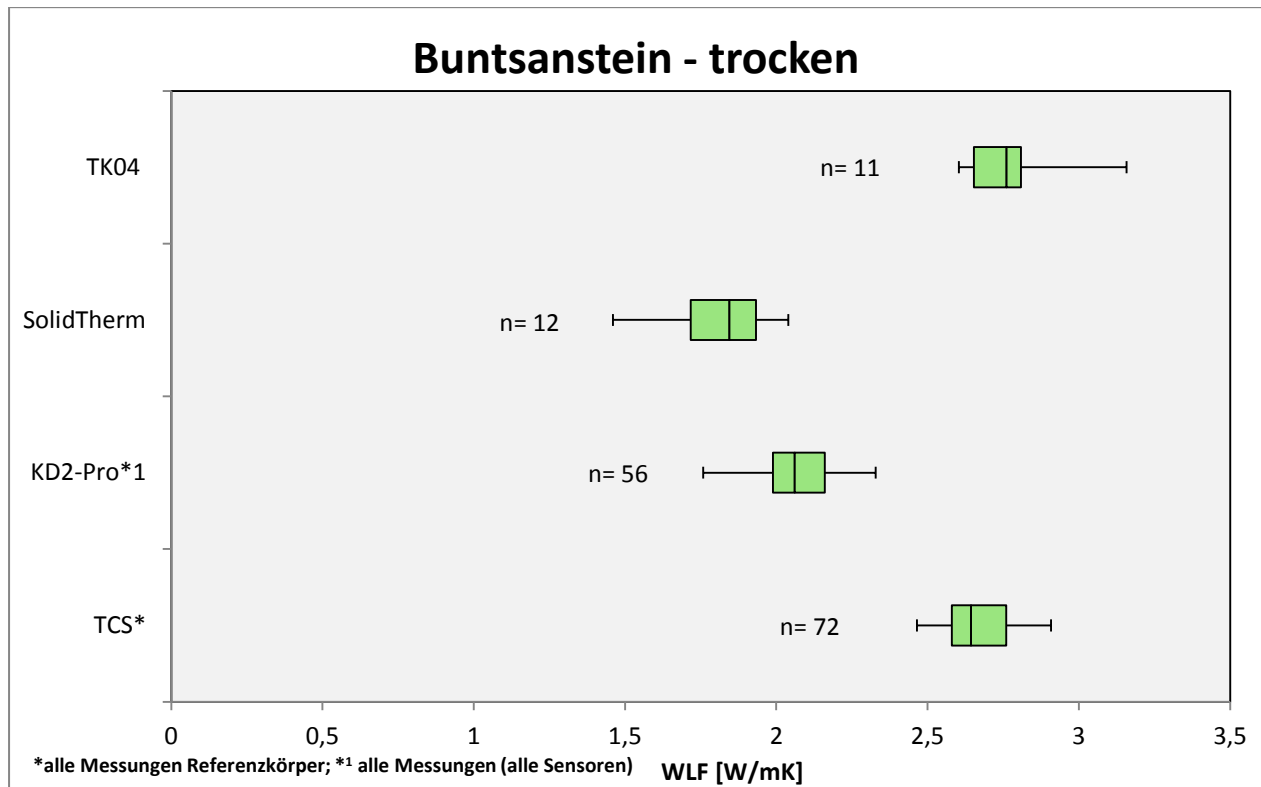
## 4. Vergleich Messgeräte

### 4.1 PE-Zylinder



PE-Zylinder	TCS*	KD2-Pro	SolidTherm	TK04
Umfang	81	50	12	6
Min	0,327	0,176	0,390	0,444
Max	0,571	0,477	0,660	0,565
Mittelwert	0,440	0,402	0,524	0,494
Stabw	0,058	0,081	0,086	0,039
Q1	0,386	0,356	0,450	0,467
Median	0,438	0,430	0,550	0,496
Q3	0,473	0,459	0,583	0,504

## 4.2 Buntsandstein - trocken

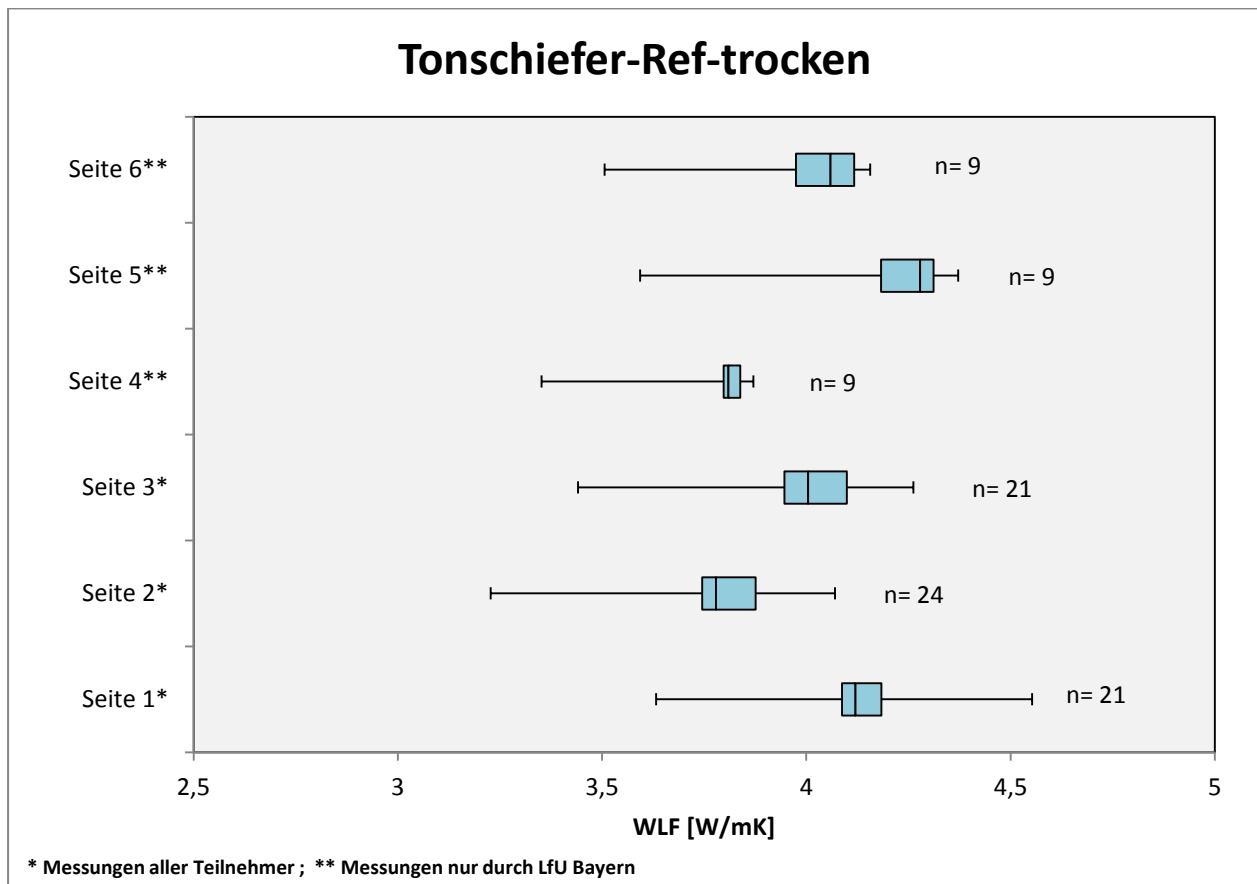


Buntsandstein	TCS*	KD2-Pro	SolidTherm	TK04
Umfang	72	56	12	11
Min	2,465	1,758	1,460	2,603
Max	2,908	2,328	2,040	3,158
Mittelwert	2,662	2,066	1,808	2,797
Stabw	0,107	0,131	0,179	0,195
Q1	2,580	1,989	1,718	2,653
Median	2,644	2,061	1,845	2,761
Q3	2,760	2,161	1,933	2,809



## 5. Vergleich Anisotrop

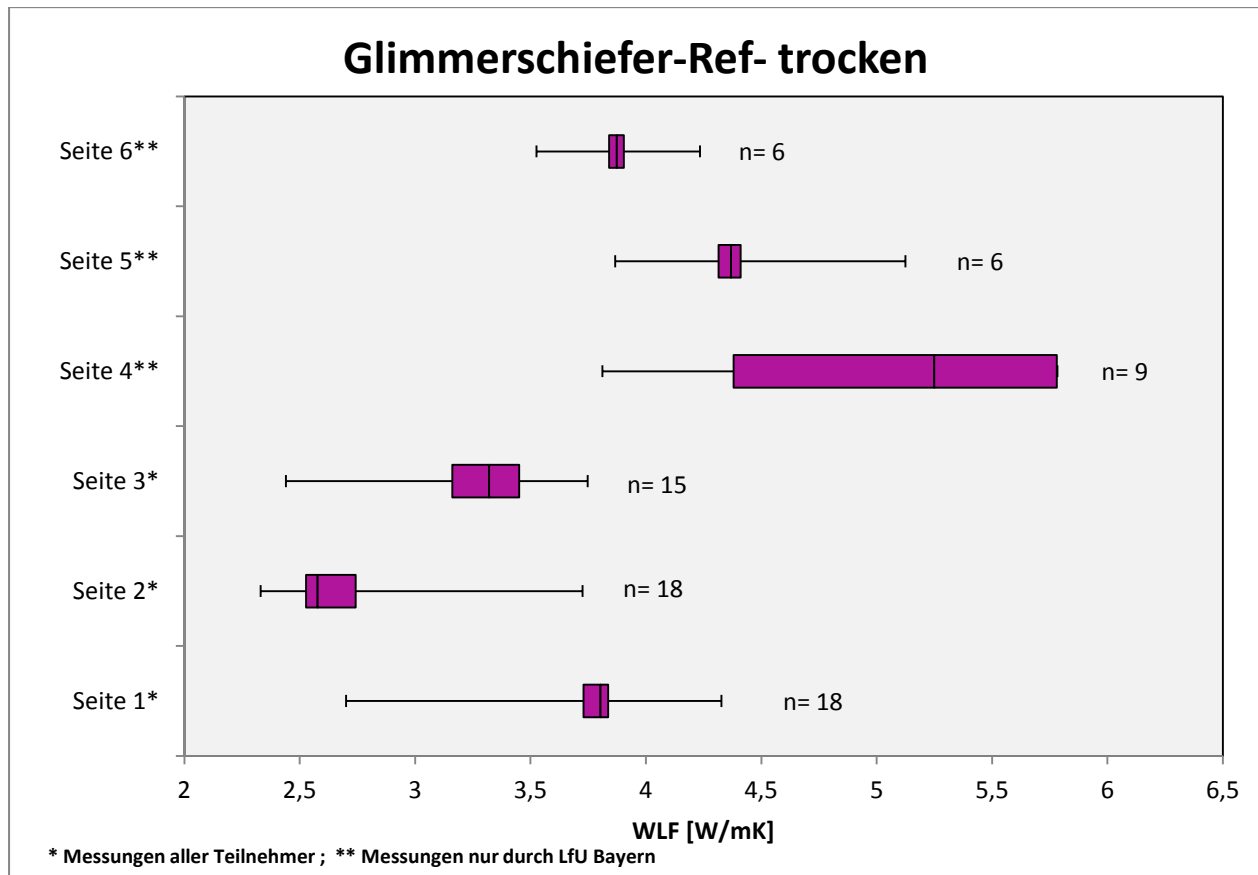
### 5.1. Tonschiefer



Tonschiefer	Seite 1*	Seite 2*	Seite 3*	Seite 4**	Seite 5**	Seite 6**
Umfang	21	24	21	9	9	9
Min	3,632	3,227	3,441	3,352	3,593	3,506
Max	4,553	4,07	4,262	3,870	4,372	4,156
Mittelwert	4,123	3,794	4,005	3,747	4,166	3,977
Stabw	0,182	0,166	0,167	0,179	0,264	0,221
Q1	4,087	3,745	3,946	3,798	4,183	3,974
Median	4,120	3,779	4,004	3,810	4,279	4,059
Q3	4,184	3,876	4,099	3,839	4,311	4,118

\* Messungen aller Teilnehmerlabore  
 \*\* Messungen nur durch LfU Bayern

## 5.2. Glimmerschiefer



Glimmerschiefer	Seite 1*	Seite 2*	Seite 3*	Seite 4**	Seite 5**	Seite 6**
Umfang	18	18	15	9	6	6
Min	2,701	2,331	2,440	3,811	3,867	3,526
Max	4,327	3,726	3,748	5,784	5,124	4,235
Mittelwert	3,740	2,680	3,290	5,000	4,408	3,876
Stabw	0,314	0,310	0,301	0,739	0,370	0,206
Q1	3,729	2,528	3,161	4,380	4,315	3,841
Median	3,803	2,578	3,321	5,249	4,369	3,874
Q3	3,837	2,743	3,451	5,780	4,410	3,905

\* Messungen aller Teilnehmerlabore  
 \*\* Messungen nur durch LfU Bayern

## 6. Beschreibung Probenkörper

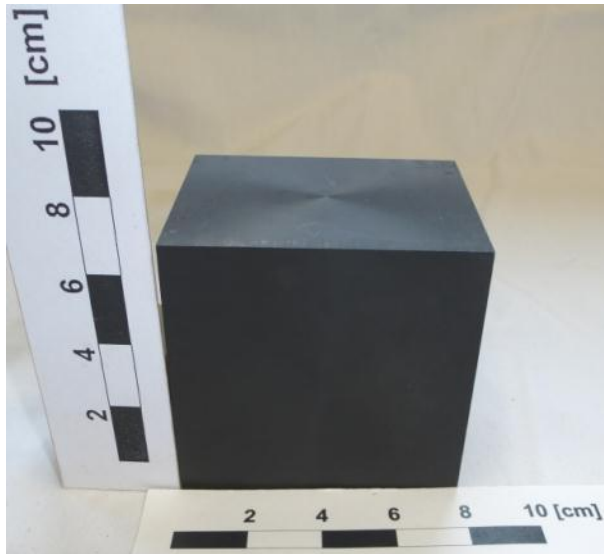
Nachfolgend erfolgt eine Beschreibung der im Ringversuch befindlichen Probenkörper.



**Abbildung 30: Übersicht über einige Proben im Ringversuch "Wärmeleitfähigkeiten" der SGD (Foto: LfU BY)**

### 6.1 PE Körper – quadratisch

Der schwarze quadratische PE-Körper hat die Abmessungen 8 x 8 x 8 cm. Der PE-Körper besteht aus Polyethylen-Material, welches für die Herstellung von Erdwärmesondenrohren verwendet wird. Das Material weist ähnliche Wärmeleitfähigkeitswerte auf wie die Erdwärmesondenrohre. Der PE-Körper ist für die Wärmeleitfähigkeitsmessung mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) und die Messgeräte mit Vollraum- und Halbraumsonde geeignet. Aufgrund der homogenen Beschaffenheit des Materials ist eine Messung der Wärmeleitfähigkeiten auf zwei Seiten des Körpers ausreichend. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit der Vollsonde ist das Erstellen einer Bohrung mit dem entsprechenden Durchmesser erforderlich.



**Abbildung 31: Foto PE-Körper – quadratisch (Probenkörper Nr. 1) (Foto: LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **1**

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

## 6.2 PE Körper - zylindrisch

Der schwarze zylindrische PE-Körper hat eine Höhe von 14 cm und einen Durchmesser von 13 cm. Der PE-Körper besteht aus Polyethylen-Material, welches für die Herstellung von Erdwärmesondenrohren verwendet wird. Das Material weist ähnliche Wärmeleitfähigkeiten auf wie die Erdwärmesondenrohre. Der PE-Körper ist für die Wärmeleitfähigkeitsmessung mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) und die Messgeräte mit Vollraum- und Halbraumsonde geeignet. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit der Vollsonde ist das Erstellen einer Bohrung mit dem entsprechenden Durchmesser erforderlich. Die Messung mit dem Thermal Conductivity Scanner soll auf der ebenen, glatten Fläche senkrecht zur Zylinderachse und auf der gekrümmten Manteloberfläche durchgeführt werden. Aufgrund der homogenen Beschaffenheit des Materials ist eine Messung der Wärmeleitfähigkeiten auf zwei Seiten des Körpers ausreichend. Für die Messung der gekrümmten Mantelfläche verwenden einige Labors Unterlegkeile zur Optimierung des erforderlichen Abstandes zu den Temperaturmessfühlern und

zur Wärmequelle des TCS. Diese sollten auch im Rahmen des Ringversuches verwendet werden und dies im Messprotokoll vermerkt werden.



**Abbildung 32: Foto PE-Körper – zylindrisch (Probenkörper Nr. 2) (Foto: LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

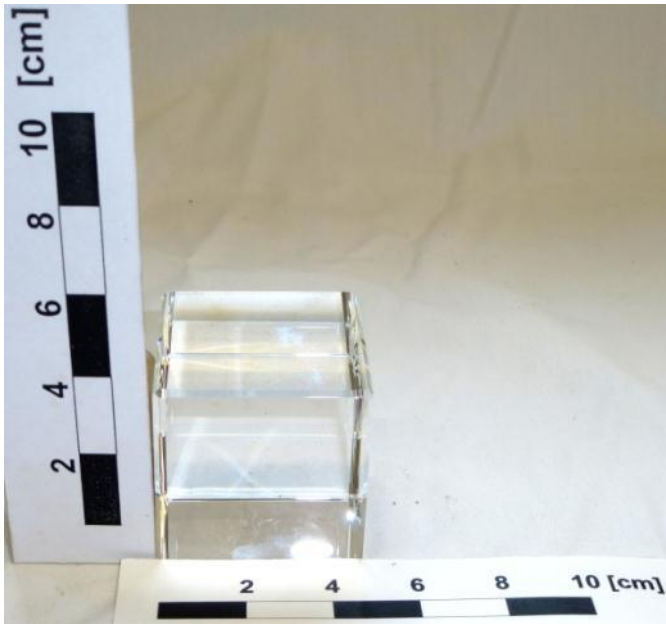
Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **1**

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

### 6.3 Glaskörper

Der im Ringversuch enthaltene Glaskörper ist ein Quader mit den Abmessungen 5 x 5 x 5 cm. Es ist davon auszugehen, dass die Struktur des Glases keine Inhomogenität aufweist und die Wärmeleitfähigkeit einheitlich ist. Deshalb erscheint es ausreichend eine Seite zu messen. Neben dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) kann die Messung mit den Messgeräten mit der Halbraumsonde durchgeführt werden.



**Abbildung 33: Foto Glaskörper (Probenkörper Nr. 3)** (Foto: LGB-RP)

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **1**

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

## 6.4 Tonstein

Der im Ringversuch enthaltene Tonstein wurde aus der Bohrung 6122BG000011 Schleifbach im Buntsandstein der Detfurth-Geröllsandstein-Lage in Unterfranken entnommen. Es handelt sich um einen tonigen, schwach feinsandigen Schluffstein, der in Wechsellagerung untergeordnet im Buntsandstein vorkommt. Der ursprünglich 10 cm im Durchmesser aufweisende Bohrkern wurde halbiert. Das vorliegende Kernstück stammt aus 49,33 bis 49,47 m Tiefe und ist 9 cm lang. Das Gestein weist eine sehr geringe Porosität auf. Die Messung kann mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) und den Messgeräten mit der Halbraumsonde erfolgen. Die Messung wird im lagerfeuchten Zustand durchgeführt.



**Abbildung 34: Foto Tonstein (Probenkörper Nr. 4) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

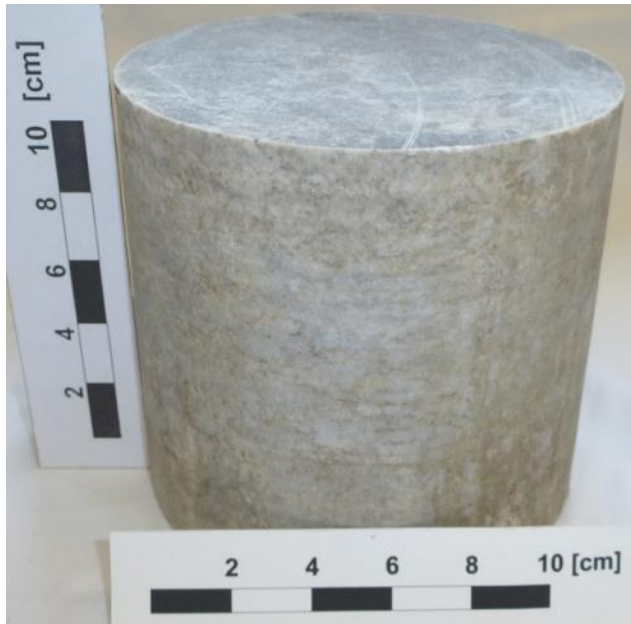
Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: 1

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

## 6.5 Anhydrit

Der im Ringversuch enthaltene Anhydrit ist ein Bohrkernstück mit 12,5 cm Länge und 13 cm Durchmesser. Der Bohrkern stammt aus Wipfra (5 km nordöstlich von Ilmenau) und ist stratigraphisch der Werra-Folge (z1AN) zuzuordnen. Auf den Seiten senkrecht zur Bohrkernachse wurde der Körper abgesägt, so dass glatte Oberflächen entstanden. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit kann mit allen drei Methoden (TCS, VLS und HLS) vorgenommen werden. Die Messungen mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) sollen auf einer glatten, ebenen Seite senkrecht zur Bohrkernachse und auf der gekrümmten Mantelfläche erfolgen. Für die Messung der gekrümmten Mantelfläche verwenden einige Labors Unterlegkeile zur Optimierung des erforderlichen Abstandes zu den Temperaturmessfühlern und zur Wärmequelle. Diese sollten auch im Rahmen des Ringversuches verwendet werden und dies im Messprotokoll vermerkt werden. **Dieser Probenkörper darf nicht gesättigt werden.**



**Abbildung 35: Foto Anhydrit (Probenkörper Nr. 5) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

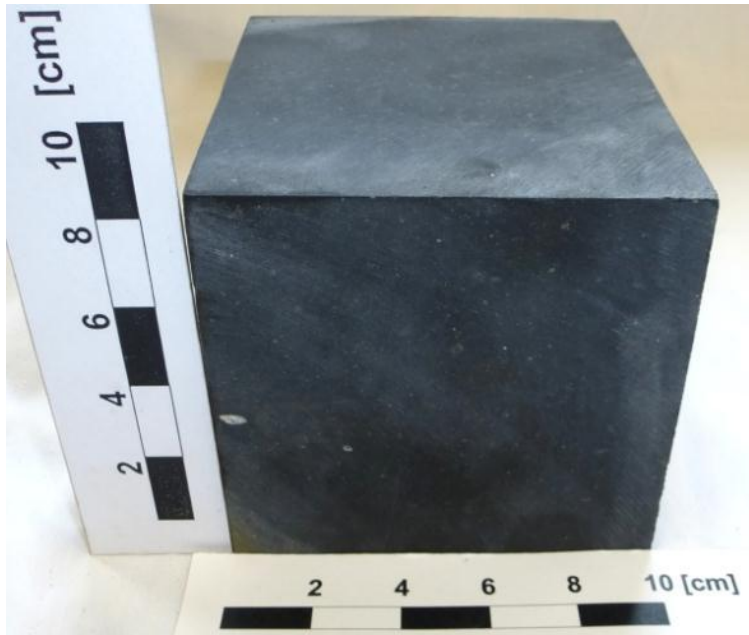
Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **1**

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

## 6.6. Basalt

Der im Ringversuch enthaltene Basalt ist ein Quader mit den Abmessungen 10 x 10 x 10 cm. Der Basalt stammt aus dem aufgelassenen Steinbruch „Girkenrother Kopf“. Es handelt sich um einen Basalt des Tertiär, der teilkörnig, dicht, gute bis sehr gute Kornbindung, anthrazitgrau (S800W), Mineraleinschlüsse ( $\varnothing$  ca. 0,5-1,0 mm), frisch, kalkfrei, nicht veränderlich, voraussichtlich sehr hohe Druckfestigkeit, massig ist. Die Probenahme erfolgte durch A. Wehinger vom LGB-RP am 15.05.2012. Die Koordinaten der Probenahmestelle sind TK 5413, RW 3427370, HW 5598330. Der Basalt ist für die Messung mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) und den Messgeräten mit der Halbraumsonde geeignet. Im Ringversuch befindet sich ein Probenkörper, der mindestens auf drei Seiten gemessen werden sollte.





**Abbildung 36: Foto Basalt (Probenkörper Nr. 6) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

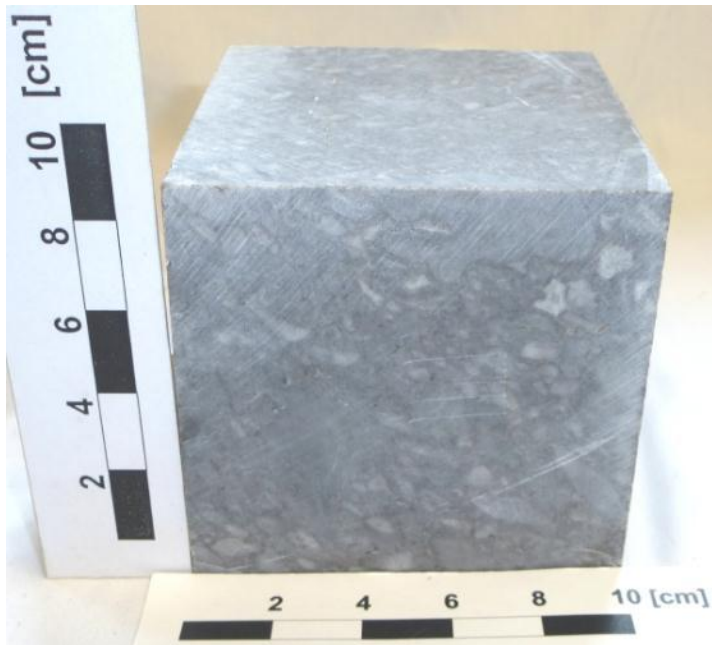
Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: 1

Bemerkung: Aufgrund der geringen Porosität der Probenkörper wird eine Sättigung mit Wasser keinen nennenswerten Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten erbringen.

## 6.7 Kalkstein

Der im Ringversuch enthaltene Kalkstein ist ein Quader mit den Abmessungen 10 x 10 x 10 cm. Der Kalkstein stammt aus dem Steinbruch der Fa. Schaefer in Hahnstätten. Es handelt sich um einen Riffkalk des Mittel-Devon. Der Kalkstein ist nichtkörnig, dicht und weist eine gute bis sehr gute Kornbindung auf. Die Farbe ist steingrau (S500W), es existieren Fossileinschlüsse (Stromatoporen, Korallen/Bryozoen); hellgrau – S200W), frisch, stark kalkhaltig, nicht veränderlich, voraussichtlich hohe bis sehr hohe Druckfestigkeit, massig. Die Probenahme erfolgte durch M. Alberti am 30.05.2012. Die Koordinaten des Probennahmepunktes lauten TK 5614, RW 3433140, HW 5575490. Der Kalkstein ist für die Messung mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) und den Messgeräten mit der Halbraumsonde geeignet. Im

Ringversuch befindet sich ein Probenkörper, der mindestens auf drei Seiten gemessen werden sollte.



**Abbildung 37: Foto Kalkstein (Probenkörper Nr. 7) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

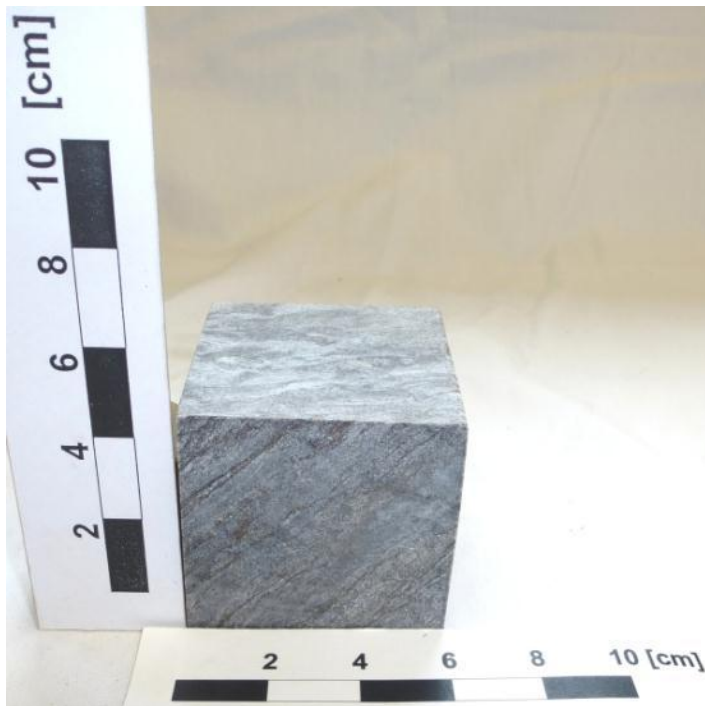
Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: 1

Bemerkung: Aufgrund der geringen Porosität der Probenkörper wird eine Sättigung mit Wasser keinen nennenswerten Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten erbringen.

## 6.8 Glimmerschiefer

Der im Ringversuch enthaltene Glimmerschiefer ist ein Quader mit den Abmessungen 5,8 x 5,8 x 5,8 cm. Der Glimmerschiefer ist für die Messung mit dem Thermal Conductivity Scanner (TCS) und den Messgeräten mit der Halbraumsonde geeignet. Im Ringversuch befindet sich ein Probekörper, der mindestens auf drei Seiten gemessen werden sollte.



**Abbildung 38: Foto Glimmerschiefer (Probenkörper Nr. 8) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

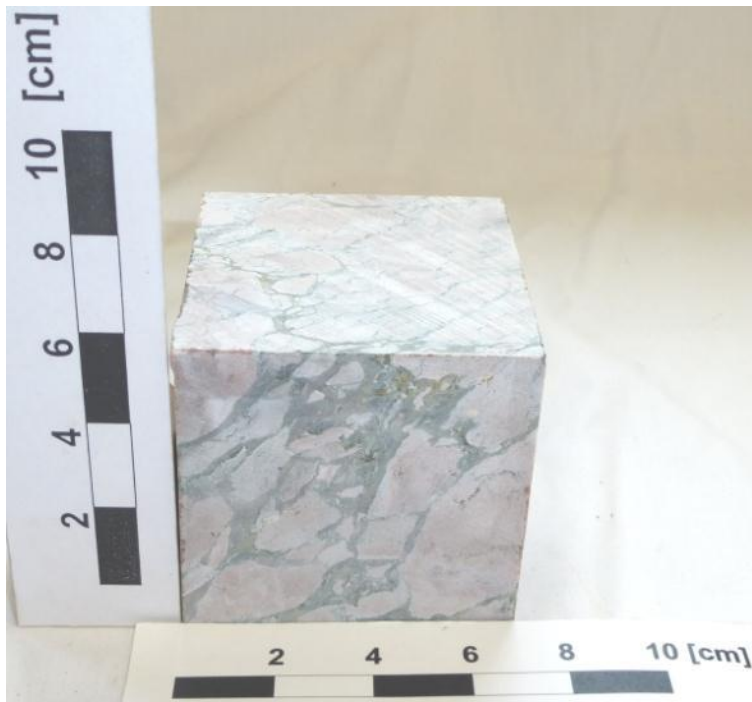
Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **1**

Bemerkung: Aufgrund der geringen Porosität der Probenkörper wird eine Sättigung mit Wasser keinen nennenswerten Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten erbringen.

## 6.9 Flaserkalk

Der im Ringversuch enthaltene Flaserkalk ist ein Quader mit den Abmessungen 7 x 7 x 7 cm. Die Gesteinsprobe entstammt aus dem Thüringisch-Bayerischen Schiefergebirge. Es handelt sich um den oberdevonischen Flaserkalk aus dem ehemaligen Steinbruch Horwagen im Frankenwald. Das Gestein wurde unter dem Handelsnamen „Deutsch-Rot-Marmor“ im Handel geführt. Die hell- bis dunkelroten Kalke, die von dünnen an- und abschwellenden roten und

grünen Ton- und Tuffitlagen durchzogen werden stammen aus einem Riffkörper, der tektonisch in Tonschiefer und Diabas eingebettet ist. Der Flaserkalk ist für die Messung mit dem Thermal Conductivity Scanner und der Halbraumsonde geeignet. Im Ringversuch befinden sich sieben Probenkörper. Sechs Probenkörper sind für die Wärmeleitfähigkeitsmessungen im sternförmigen Verfahren mit dem TCS vorgesehen. Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand ist an mindestens drei senkrecht zu einander angeordneten Probenkörperflächen erforderlich. Eine Messung an sechs Seiten wäre wünschenswert. Eine weitere Probe kann für Messungen mit der Nadelsonde verwendet werden, sofern Bohrungen eingebracht werden können. Außerdem sind die Messungen mit den Messgeräten mit Halbraumsonde durchzuführen.



**Abbildung 39: Foto Flaserkalk (Probenkörper Nr. 9) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig

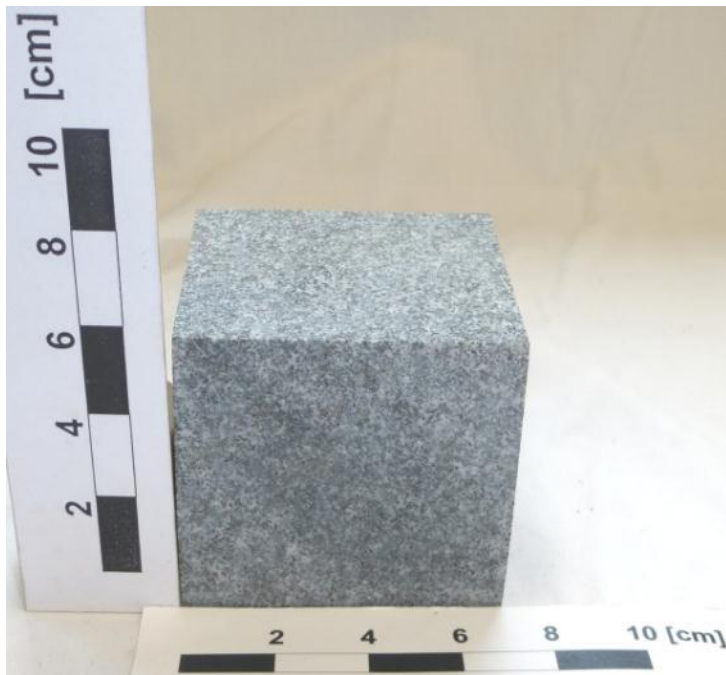
Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **5**

Bemerkung: Aufgrund der geringen Porosität der Probenkörper wird eine Sättigung mit Wasser keinen nennenswerten Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten erbringen.

## 6.10 Tonalit (Redwitzit)

Die im Ringversuch enthaltenen Gesteinskörper „Redwitzit“ sind Quader mit den Abmessungen 7 x 7 x 7 cm. Die Gesteinsprobe stammt aus Kernbohrungen zur Baugrunduntersuchung entlang der Bundesstraße 303 zwischen Marktredwitz und Arzberg. Es handelt sich um Tonalite, die im Oberkarbon gebildet wurden und eine ähnliche mineralische Zusammensetzung aufweisen wie der Granit. Der Tonalit ist für die Messung mit dem Thermal Conductivity Scanner und der Halbraumsonde geeignet. Im Ringversuch befinden sich sieben Probenkörper. Sechs Probenkörper sind für die Wärmeleitfähigkeitsmessungen im sternförmigen Verfahren mit dem TCS vorgesehen. Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand ist an mindestens drei senkrecht zu einander angeordneten Probenkörperflächen erforderlich. Eine Messung an sechs Seiten wäre wünschenswert. Eine weitere Probe kann für Messungen mit der Nadelsonde verwendet werden, sofern Bohrungen eingebracht werden können. Außerdem sind die Messungen mit den Messgeräten mit Halbraumsonde durchzuführen.



**Abbildung 40: Foto Tonalit (Redwitzit) (Probenkörper Nr. 10) (Foto-LGB-RP)**

### Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

### Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig                      Sternförmig

Bemerkung: Aufgrund der geringen Porosität der Probenkörper wird eine Sättigung mit Wasser keinen nennenswerten Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten erbringen.

### 6.11 Tonschiefer

Die im Ringversuch enthaltenen Gesteinsproben des Tonschiefers sind in Quadern mit den Abmessungen 7 x 7 x 7 cm gesägt. Der Tonschiefer stammt aus dem nördlichen Frankenwald aus einem aufgelassenen Steinbruch südöstlich von Nordhalben an der St2198. Die Proben wurden aus der massigen Fazies der Dachschiefer des Unterkarbons entnommen. Die Gesteinskörper weisen wenige Schieferungs- bzw. Schichtungsflächen auf. Insgesamt ist das Gestein sehr dicht und feinkörnig. Im Ringversuch befinden sich sieben Probenkörper. Sechs Probenkörper sind für die Wärmeleitfähigkeitsmessungen im sternförmigen Verfahren mit dem TCS vorgesehen. Eine weitere Probe kann für Messungen mit der Nadelsonde verwendet werden, sofern Bohrung eingebracht werden können. Aufgrund der vorliegenden Anisotropie durch Schieferung und Schichtung erscheint eine Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand an mindestens drei senkrecht zu einander angeordneten Probenkörperflächen erforderlich. Eine Messung an sechs Seiten wäre wünschenswert. Außerdem sind die Messungen mit den Messgeräten mit Halbraumsonde durchzuführen.

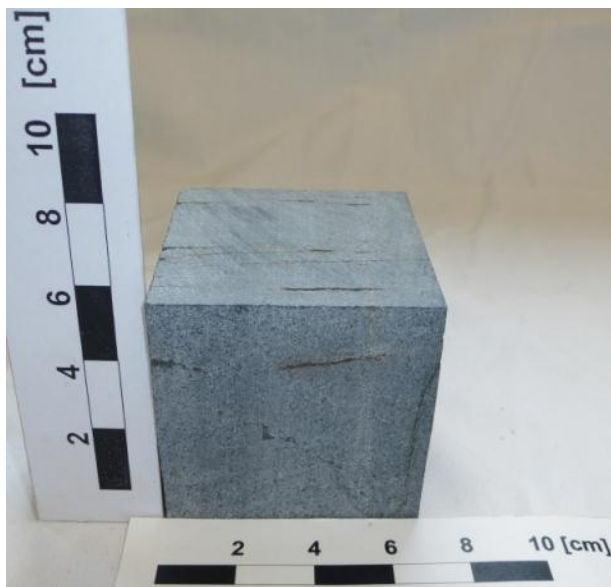


Abbildung 41: Foto Tonschiefer (Probenkörper Nr. 11) (Foto-LGB-RP)

#### Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

#### Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

HLS

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig

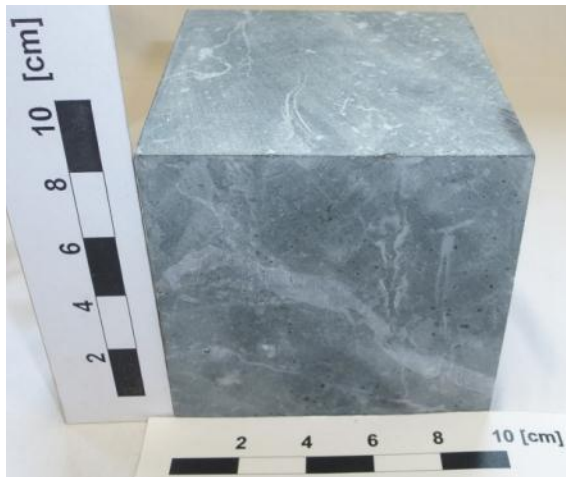
Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **5**

Bemerkung: Aufgrund der geringen Porosität der Probenkörper wird eine Sättigung mit Wasser keinen nennenswerten Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten erbringen.

## 6.12 Diabas

Die im Ringversuch enthaltenen Probenkörper aus Diabas sind vier Quader mit den Abmessungen 7 x 7 x 7 cm und drei Quader mit den Abmessungen 10 x 10 x 10 cm. Der Diabas wurde einem im Abbau befindlichen Steinbruch westlich der Ortschaft Köditz bei Hof entnommen. Das Gestein ist sehr dicht und erscheint isotrop. Somit ist eine Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem TCS auf drei Probenkörperflächen ausreichend. Im Idealfall kann wiederum eine Messung auf allen sechs Seiten erfolgen. Im Ringversuch befinden sich sieben Probenkörper. Sechs Probenkörper sind für die Wärmeleitfähigkeitsmessungen im sternförmigen Verfahren mit dem TCS vorgesehen. Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand ist an mindestens drei senkrecht zu einander angeordneten Probenkörperflächen erforderlich. Eine Messung an sechs Seiten wäre wünschenswert. Eine weitere Probe kann für Messungen mit der Nadelsonde verwendet werden, sofern Bohrungen eingebracht werden können. Außerdem sind die Messungen mit den Messgeräten mit Halbraumsonde durchzuführen.



**Abbildung 42: Foto Diabas (Probenkörper Nr. 12) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

TCS      ja      nein  
     

Probenaufbereitung:

Trocknung      Ja      nein



VLS    
 HLS

Sättigung

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig  Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **5**

Bemerkung: Aufgrund der geringen Porosität der Probenkörper wird eine Sättigung mit Wasser keinen nennenswerten Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten erbringen.

**6.13 Rhätsandstein (Sandstein RoL)**

Die im Ringversuch enthaltenen Probenkörper des Rhätsandsteins sind ein Quader mit den Abmessungen 7 x 7 x 7 cm. Der Sandstein wurde aus einem aktiven Steinbruch in Burgebrach gewonnen. Typisch für die Rhätsandsteine sind die Bänderungen durch Eisenhydroxid. Im Ringversuch sind sieben Probenkörper enthalten. Sechs stehen für die Messung der Wärmeleitfähigkeiten im sternförmigen Verfahren mit dem TCS unter trocknen und gesättigten Bedingungen bereit. Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand ist an mindestens drei senkrecht zu einander angeordneten Probenkörperflächen erforderlich. Eine Messung an sechs Seiten wäre wünschenswert. Ein weiterer Probekörper kann für Messungen mit der Nadelsonde verwendet werden, sofern eine Bohrung eingebracht werden kann. Außerdem sind die Messungen mit den Messgeräten mit Halbraumsonde durchzuführen.



**Abbildung 43: Foto Rhätsandstein (Probenkörper 13) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

TCS ja  nein

Probenaufbereitung:

Trocknung Ja  nein



VLS    
HLS

Sättigung

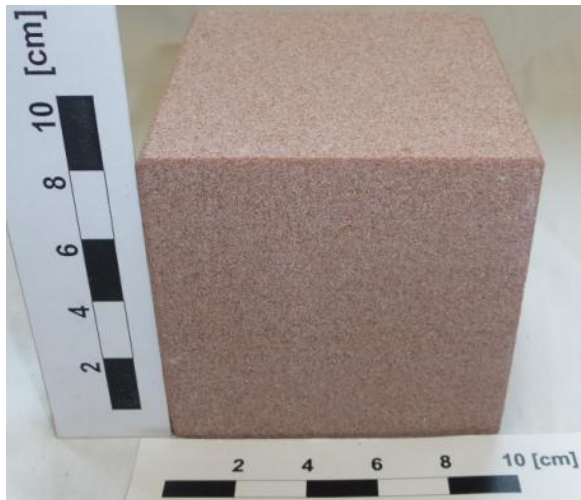
Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig  Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **5**

**6.14 Buntsandstein (Sandstein BS)**

Die im Ringversuch enthaltenen Probenkörper des Buntsandsteins sind ein Quader mit den Abmessungen 10 x 10 x 10 cm. Der Buntsandstein wurde aus dem Steinbruch der Firma Picardan der Lokalität Schweinsthal bei Landhut (RP) entnommen. Die Handelsbezeichnung lautet Schweinsthaler Sandstein, Schopper Sandstein und Queidersbacher Sandstein. Es ist ein hellroter, mittelkörnig, mittelsandig, gut sortiert, glimmerarm, Sandstein aus dem Mittlerer Buntsandstein. An den Probenkörper treten weiße Entfärbungsflecken und kaum erkennbare Schrägschichtung auf. Die Koordinaten des Probenahmepunktes lauten TK 6612, RW 3404000, HW 5472500. Im Ringversuch sind sieben Probenkörper enthalten. Sechs stehen für die Messung der Wärmeleitfähigkeiten im sternförmigen Verfahren mit dem TCS unter trocknen und gesättigten Bedingungen bereit. Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand ist an mindestens drei senkrecht zu einander angeordneten Probenkörperflächen erforderlich. Eine Messung an sechs Seiten wäre wünschenswert. Ein weiterer Probenkörper kann für Messungen mit der Nadelsonde verwendet werden, sofern eine Bohrung eingebracht werden kann. Außerdem sind die Messungen mit den Messgeräten mit Halbraumsonde durchzuführen.



**Abbildung 44: Foto Buntsandstein (Probenkörper Nr. 14) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

TCS ja  nein

Probenaufbereitung:

Trocknung Ja  nein

VLS    
 HLS

Sättigung

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig  Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **5**

**6.15 Geschiebemergel B26**

Der im Ringversuch enthaltene Bohrkern des Geschiebemergel B26 stammt aus einer Bohrkampagne von 2009 entlang der A7 (nördlicher Geestbereich) bei Hamburg. Der Kern wurde aus 14,5 m bis 14,7 m Tiefe entnommen. Der Drenthe-Geschiebemergel (Niendorfer Moräne) befindet sich in einem Metallzylinder mit 20 cm Länge und 10 cm Durchmesser. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von der Oberseite (Kappe ohne Klebeband) in das Sediment einzustecken. Die Messung erfolgt unter lagerfeuchten Bedingungen. Eine Trocknung oder Sättigung ist nicht vorgesehen. Analysenergebnisse zur Korngröße, Dichte, dem  $C_{org}$ - und  $C_{anrog}$ -Gehalt und Wassergehalt liegen bereits vor.



**Abbildung 45: Foto Geschiebemergel B26 (Probenkörper Nr. 15) (Foto-LGB-RP, LfU-BY)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

HLS

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig

Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: 1

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

### 6.16 Geschiebemergel B27

Der im Ringversuch enthaltene Bohrkern des Geschiebemergel B26 stammt aus einer Bohrkampagne von 2009 entlang der A7 (nördlicher Geestbereich) bei Hamburg. Der Kern wurde aus 16,5 m bis 16,7 m Tiefe entnommen. Der Drenthe-Geschiebemergel (Niendorfer Moräne) befindet sich in einem Metallzylinder mit 20 cm Länge und 10 cm Durchmesser. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von der Oberseite (Eingeritztes Klebeband) in das Sediment einzustecken. Die Messung erfolgt unter lagerfeuchten Bedingungen. Eine Trocknung oder Sättigung ist nicht vorgesehen. Analyseergebnisse zur Korngröße, Dichte, dem  $C_{org}$ - und  $C_{anorg}$ -Gehalt und Wassergehalt liegen bereits vor.



**Abbildung 46: Geschiebemergel B27 (Probenkörper Nr. 16) (Foto-LGB-RP, LfU-BY)**

Messverfahren:

TCS ja nein

Probenaufbereitung:

Trocknung Ja nein

VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
HLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			

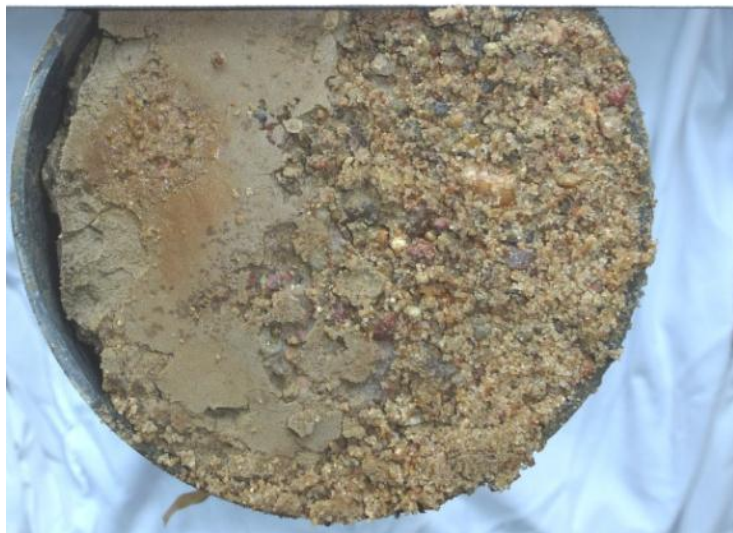
Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig	Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: 1
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

### 6.17 Geschiebemergel BU 1

Der im Ringversuch enthaltene Bohrkern des Geschiebemergels stammt aus einer Bohrkampagne von 2011 entlang der Schönerlinder Chaussee in Berlin. Der Kern wurde aus 3,0 bis 3,5 m Tiefe entnommen. Der Geschiebemergel befindet sich in einem Plastikliner mit cm Länge und 10 cm Durchmesser. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von der Längsseite (parallel zur Bohrkernachse) in jeweils zwei kleine, vorhandene Öffnungen, die mit Klebeband abgeklebt sind (entspricht Meter 3,15 und Meter 3,35 Teufe des Gesamtbohrkerns) in das Sediment einzustecken. Die Messung erfolgt unter lagerfeuchten Bedingungen. Eine Trocknung oder Sättigung ist nicht vorgesehen.



**Abbildung 47: Foto Geschiebemergel BU 1 (Probenkörper Nr. 17) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>



HLS

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig

Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: 1

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

### 6.18 Klei

Der im Ringversuch enthaltene Bohrkern des Klei stammt aus einer Bohrkampagne von 2010 entlang der Wilhelmsburger Reichstraße in Hamburg (Elbmarsch). Der Kern wurde aus 6,60 bis 6,90 m entnommen. Der perimarine Klei (Niendorfer Moräne) befindet sich in einem Metallzylinder mit 30 cm Länge und 10 cm Durchmesser. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von der Oberseite (Kappe ohne Klebeband) in das Sediment einzustecken. Die Messung erfolgt unter lagerfeuchten Bedingungen. Eine Trocknung oder Sättigung ist nicht vorgesehen.



**Abbildung 48: Foto Klei (Probenkörper Nr. 18) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

TCS ja nein

Probenaufbereitung:

Trocknung Ja nein

VLS    
 HLS

Sättigung

Durchlauf Ringversuch:

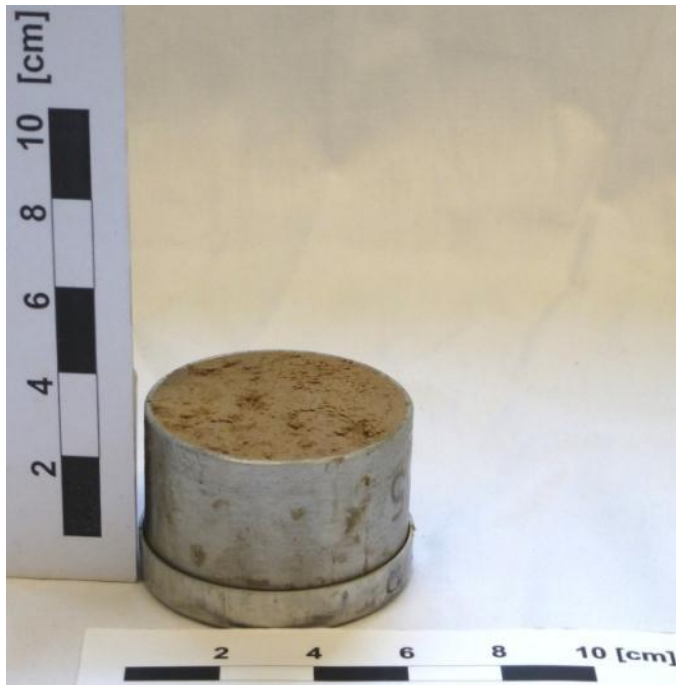
Ringförmig  Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: 1

Bemerkung: Messung im „unbehandelten“ Zustand.

**6.19 Löss**

Der im Ringversuch enthaltene Löss wurde in Rheinland-Pfalz in Mainz Hechthelm in Standard-Stechzylindern entnommen. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von der Oberseite in das Sediment einzustecken. Die Messung erfolgt bei dem eingestellten Wassergehalt von pF 2,5. Eine Trocknung oder Sättigung ist nicht vorgesehen. Wenn die Länge der Vollraumsonde die Höhe des Stechzylinders überschreitet sind zwei Stechzylinder übereinander zu stellen.



**Abbildung 49: Foto Löss (Probenkörper Nr. 19) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

HLS

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig

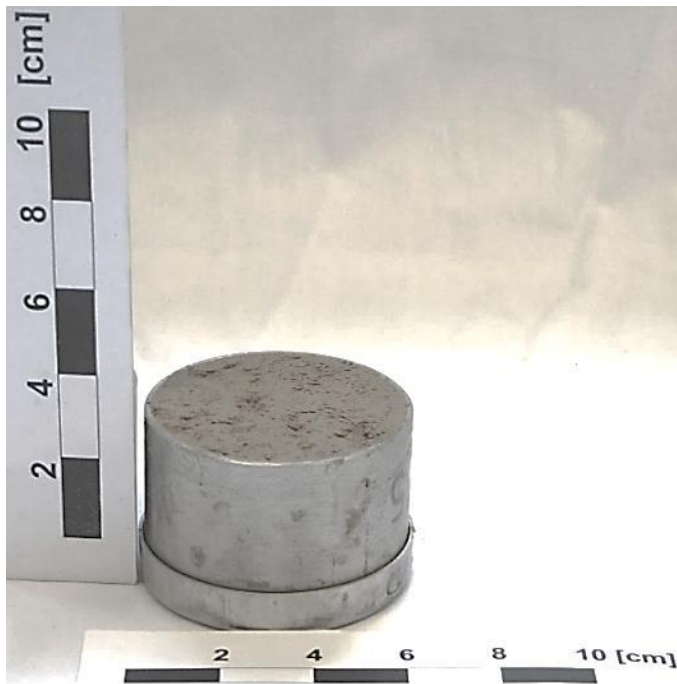
Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **6**

Bemerkung: Wassergehalt auf pf 2,5 Feldkapazität durch LGB-RP eingestellt.

## 6.20 Ton

Der im Ringversuch enthaltene Ton wurde in Rheinland-Pfalz in Standard-Stechzylindern entnommen. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von der Oberseite in das Sediment einzustecken. Die Messung erfolgt bei dem eingestellten Wassergehalt von pF 2,5. Eine Trocknung oder Sättigung ist nicht vorgesehen. Wenn die Länge der Vollraumsonde die Höhe des Stechzylinders überschreitet sind zwei Stechzylinder übereinander zu stellen.



**Abbildung 50: Foto Ton (Probenkörper Nr. 20) (Foto LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sättigung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

HLS           

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig

Sternförmig

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **6**

Bemerkung: Wassergehalt auf pf 2,5 Feldkapazität durch LGB-RP eingestellt.

### 6.21 Quarzsand

Bei dem im Ringversuch enthaltenen Plastik-Inliner mit Quarzsand handelt es sich um Quarzfugensand aus dem Baumarkt. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von einer Seite in das Sediment einzustecken. Die Messung erfolgt unter trockenen und gesättigten Bedingungen. Analysenergebnisse zur Korngröße, Dichte, dem  $C_{org}$ - und  $C_{anrog}$ -Gehalt und Wassergehalt liegen bereits vor. Im Ringversuch befinden sich sechs Probenkörper die nach den Labor spezifischen Aufbereitungsmethoden getrocknet und gesättigt werden. Ein Probenkörper durchläuft den Ringversuch als Referenzprobenkörper.





## Abbildung 51: Foto Quarzsand (Probenkörper Nr. 21) (Foto-LGB-RP)

### Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
HLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

### Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **6**

## 6.22 Glasperlen

Die im Ringversuch befindlichen Glasperlen werden gewöhnlich als Filterschüttung im Brunnen und Grundwassermessstellenbau eingesetzt. Die vorliegenden Glasperlen weisen einen Durchmesser von 0,75 bis 1,00 mm auf. Als mögliches Messverfahren kommt nur die Nadelsonde in Frage. Diese ist von der Oberseite in die Glasperlen einzustechen. Die Messung erfolgt unter trockenen und gesättigten Bedingungen. Im Ringversuch befinden sich sechs Probenkörper die nach den Labor spezifischen Aufbereitungsmethoden getrocknet und gesättigt werden. Ein Probenkörper durchläuft den Ringversuch als Referenzprobenkörper.



**Abbildung 52: Foto Glasperlen (Probenkörper Nr. 22) (Foto-LGB-RP)**

Messverfahren:

	ja	nein
TCS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
VLS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
HLS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Probenaufbereitung:

	Ja	nein
Trocknung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sättigung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Durchlauf Ringversuch:

Ringförmig	Sternförmig
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Anzahl der Probenkörper im Ringversuch: **6**

## 7. Messprotokolle

### 7.1 TCS – Messprotokoll

MESSPROTOKOLL - PE-Körper (Quarder)	
<b>Proben-Nr. 1: PE-Körper (Quarder)</b>	
Probenbezeichnung:	PE-Körper (Quarder)
Teilnehmer / Labor:	GD NRW
Form (Probekörper):	Quader 10 x10 x 10 cm
Messgerät:	TCS
Wurden die Proben zwischen den Messdurchgängen im Exsikkator gelagert? Ja / Nein	
Falls nein, kurze Beschreibung:	
Nein, lagerfeuchte Messung.	
<b>Messprotokoll TCS-Gerät</b>	
Messreihe 1 - Standards a+b [W/(m*K)]:	
Standard a [W/(m*K)]	0,709
Standard b [W/(m*K)]	0,709
Messreihe 2 <sup>**1</sup> - Standards a+b [W/(m*K)]:	
Standard a [W/(m*K)]:	
Standard b [W/(m*K)]:	
<sup>**1</sup> Eine 2. Messreihe ist nur optional erforderlich z.B. folgende Standards sind zum TCS Gerät vorhanden: 1,35 [W/(m*K)] und 3,85 [W/(m*K)], die WLF eines Probekörpers beträgt 1,9 [W/(m*K)], dann die Messung der 1. Messreihe mit dem Standard 1,35 [W/(m*K)] und die 2. Messreihe mit dem Standard 3,85 [W/(m*K)] durchführen.	
Sollwert Referenzkörper [W/(m*K)]:	

Abbildung 53: Vorlage des TCS Messprotokolls – Beschreibung der Probenart; Probenaufbereitung, verwendete Standards und Wärmeleitfähigkeit des laboreigenen Referenz-/Eichkörpers.

MESSPROTOKOLL - PE-Körper (Quarder)

TCS

Messreihe 1 - PE-Körper												
Datum /Uhrzeit: #####				Datum /Uhrzeit: #####				Datum /Uhrzeit: #####				
Temperatur: 23°C				Temperatur: 23°C				Temperatur: 23°C				
Luftfeuchte: 48%				Luftfeuchte: 39%				Luftfeuchte: 36%				
Name, Vorname: Olders, Angelika				Name, Vorname: Olders, Angelika				Name, Vorname: Olders, Angelika				
Gewicht Probekörper [g]: 369,53				Gewicht Probekörper [g]: 369,52				Gewicht Probekörper [g]: 369,52				
Messdurchgang 1 - TCS				Messdurchgang 2 - TCS (1. Wdh.-Messung)				Messdurchgang 2 - TCS (2. Wdh.-Messung)				
Probe: Nr.1 PE-Körper				Probe: Nr.1 PE-Körper				Probe: Nr.1 PE-Körper				
	Kal. <sup>±2</sup>	Proben-Name	Mittelw. WLF	G (%)	Kal. <sup>±2</sup>	Proben-Name	Mittelw. WLF	G (%)	Kal. <sup>±2</sup>	Proben-Name	Mittelw. WLF	G (%)
Ref.-körper												
Seite 1	x	PER2_1_1	0,391	1,576		PER2_1_2	0,419	2,859		PER2_1_3	0,407	1,300
Seite 2	x	PER2_2_1	0,393	0,969		PER2_2_2	0,411	1,944		PER2_2_3	0,406	1,932

\*<sup>±2</sup> Kalibrierung durchgeführt "x", Kalibrierung nicht durchgeführt "-"

Bemerkungen:

Messreihe 2 - PE-Körper												
Datum /Uhrzeit: _____				Datum /Uhrzeit: _____				Datum /Uhrzeit: _____				
Temperatur: _____				Temperatur: _____				Temperatur: _____				
Luftfeuchte: _____				Luftfeuchte: _____				Luftfeuchte: _____				
Name, Vorname: _____				Name, Vorname: _____				Name, Vorname: _____				
Gewicht Probekörper [g]: _____				Gewicht Probekörper [g]: _____				Gewicht Probekörper [g]: _____				
Messdurchgang 1 - TCS				Messdurchgang 2 - TCS (1. Wdh.-Messung)				Messdurchgang 3 - TCS (2. Wdh.-Messung)				
Probe: Nr.1 PE-Körper				Probe: Nr.1 PE-Körper				Probe: Nr.1 PE-Körper				
	Kal. <sup>±2</sup>	Proben-Name	Mittelw. WLF	G (%)	Kal. <sup>±2</sup>	Proben-Name	Mittelw. WLF	G (%)	Kal. <sup>±2</sup>	Proben-Name	Mittelw. WLF	G (%)
Ref.-körper												
Seite 1												
Seite 2												

\*<sup>±2</sup> Kalibrierung durchgeführt "x", Kalibrierung nicht durchgeführt "-"

Bemerkungen:

.../Messprotokoll\_ringörmig\_TCS\_ergeb\_NRW/Nr.1 PE-Körper\_Quarder

2/2

Abbildung 41: Vorlage des TCS Messprotokolls – Erfassung der Messbedingungen und Messwerte.

## 7.2 Sonden - Messprotokoll

Ringversuch										
Vollraumsonde KD2Pro		K	rho	C	D	Err	Temp(0)	Sample ID	Read Time	Power Mode
Measurement Time	Sensor	W/(m·K)	°C·cm/W	MJ/(m <sup>3</sup> ·K)	mm <sup>2</sup> /s		°C		minutes	
04.08.2014 14:38	SH-1	61,629	1,6	0,007	0,000	4,9666	24,19	An_Ref	2	HPM
04.08.2014 14:53	SH-1	5,691	17,6	2,473	2,301	0,0422	24,20	An_Ref	2	HPM
04.08.2014 15:08	SH-1	5,803	17,2	2,370	2,449	0,0728	24,19	An_Ref	2	HPM
04.08.2014 15:14	SH-1	2,132	46,9	1,602	1,331	0,0373	25,13	BS_Ref	2	HPM
04.08.2014 15:27	SH-1	0,365	274,3	1,750	0,208	0,0013	24,27	PE_Z_Ref	2	HPM
05.08.2014 8:25	SH-1	2,077	48,1	2,226	0,933	0,0246	24,02	Sst_Ref_5	2	HPM
05.08.2014 8:39	SH-1	1,988	50,3	2,263	0,879	0,0263	23,96	Sst_Ref_2	2	HPM
05.08.2014 10:52	SH-1	2,165	46,2	1,639	1,321	0,0380	24,33	BS_Ref_2	2	HPM
05.08.2014 11:02	SH-1	2,163	46,2	1,641	1,318	0,0380	24,39	BS_Ref_2	2	HPM

Abbildung 42: Messprotokoll der KD2-Pro.