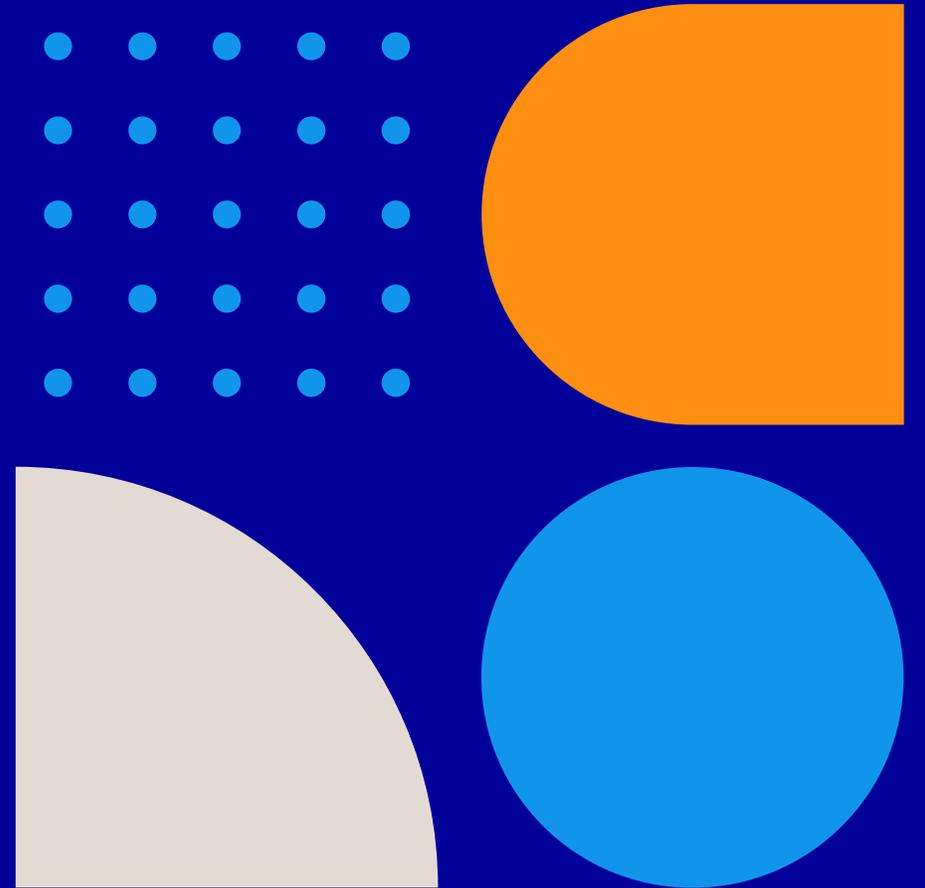
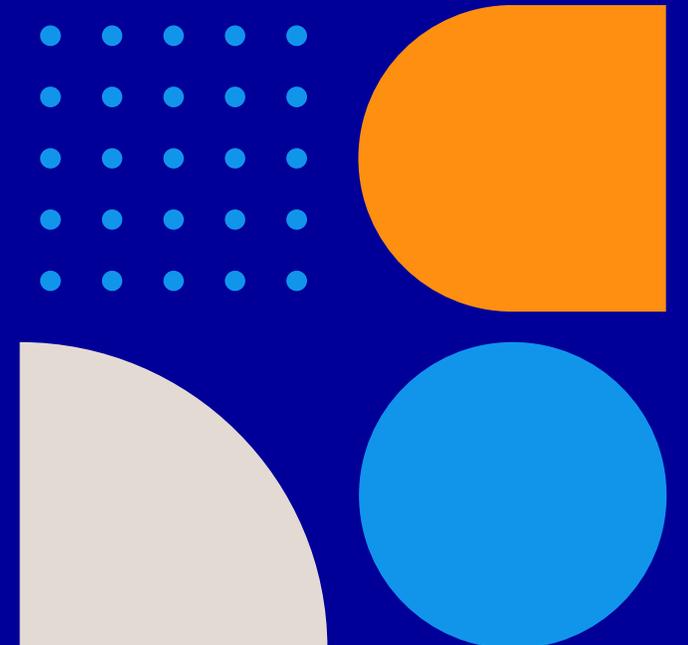


Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Hochspannungssymposium 2024 | Schultheiß/Dang
11.06.2024, Filderhalle Leinfelden



Zukünftige Netzsituation & Lösungen für HS-Kabelstrecken



Vier Schwerpunkte für eine sichere Versorgung in Baden-Württemberg

Verteilnetzbetrieb

Netze BW plant, baut und betreibt Strom- und Gasnetze.



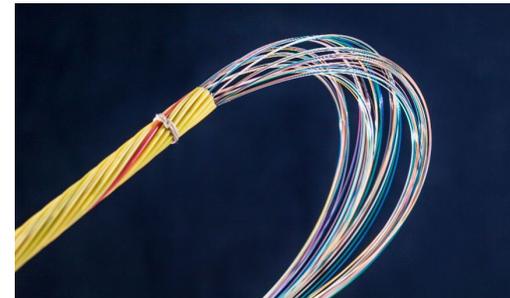
Messstellenbetrieb

Netze BW ist für den Einbau und Betrieb von Messeinrichtungen sowie für die eichrechtskonforme Messung verantwortlich.



Dienstleistungsbereich

Die Sparte Dienstleistungen der Netze BW GmbH plant, errichtet und betreibt kritische Infrastruktur z.B. in den Bereichen Strom, Wärme, Kommunikation, E-Mobilität und Breitband.

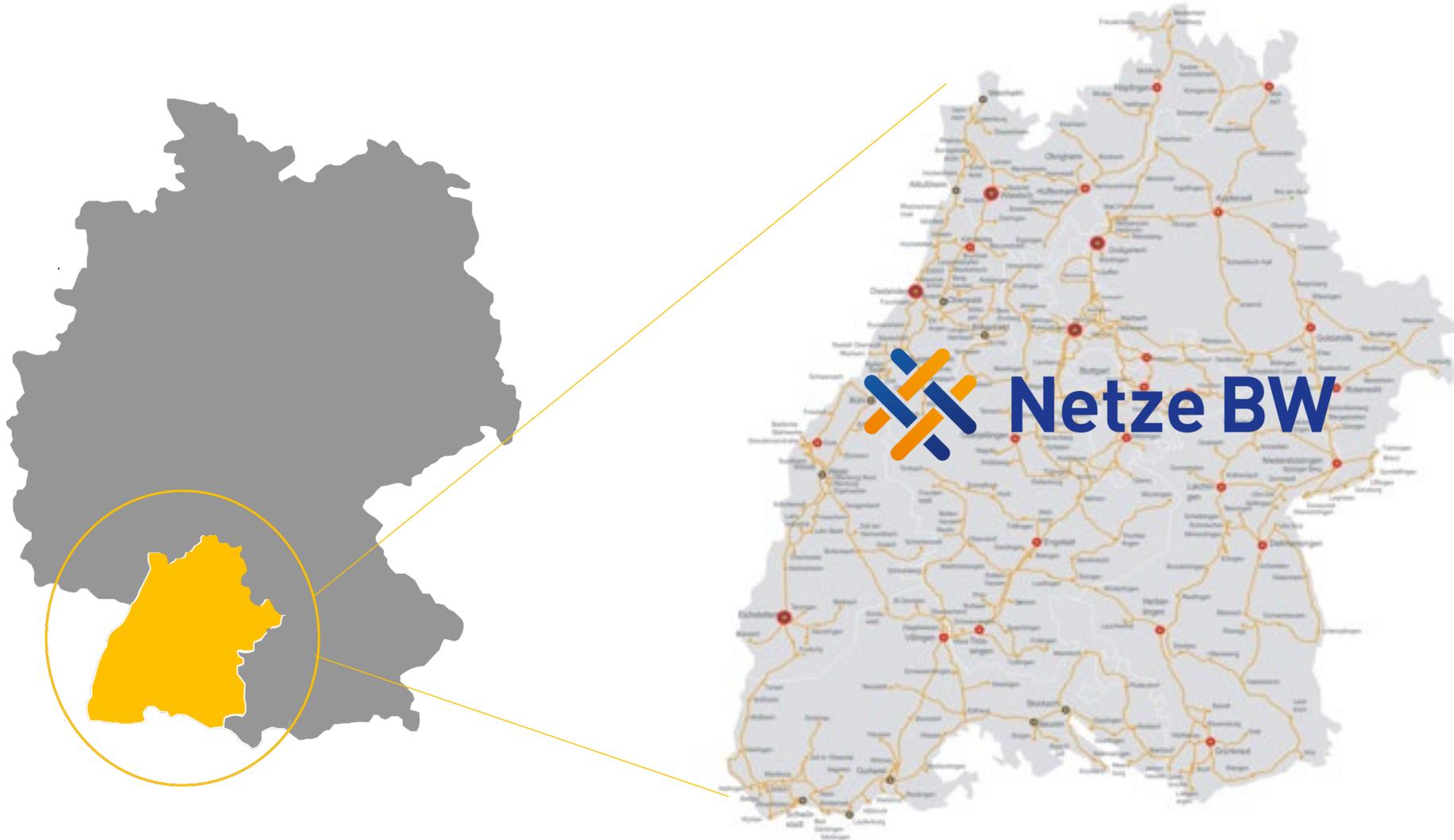


Wasserversorgung

Unsere Tochtergesellschaft Netze BW Wasser GmbH versorgt Stuttgarter*innen mit Trinkwasser.

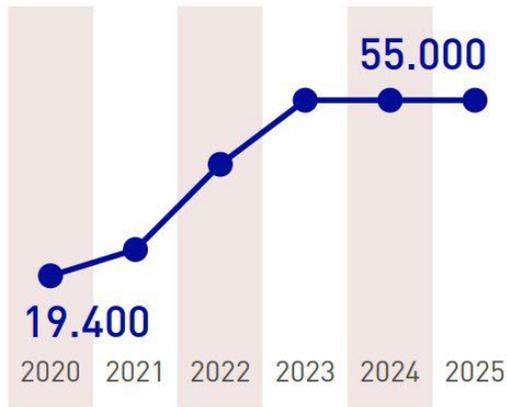


Netzgebiet HS

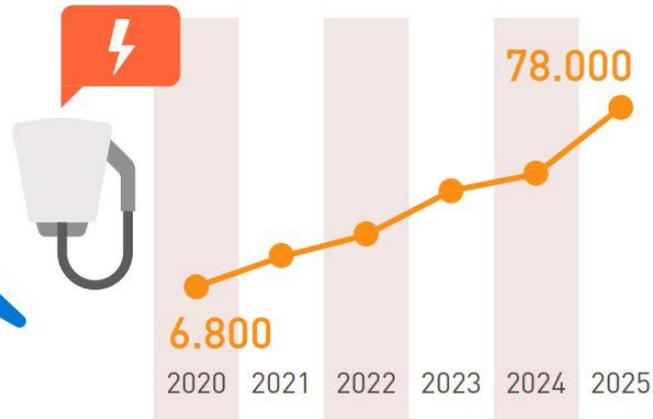


Was wir spüren: Anfragewelle

Anträge auf **Einspeiseanfragen** für Erneuerbare Energien bei Netze BW



Anträge auf **Ladeeinrichtungen** (Wallboxen) bei Netze BW



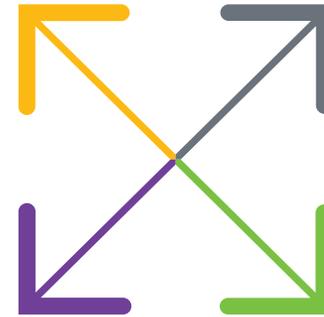
- › Einspeiseanfragen 2022: **+80%** zum VJ
- › Ladeeinrichtungen 2022: **+40%** zum VJ

- › Anfragewelle von 2022- wird sich fortsetzen

Netzentwicklungsplan-Strom (NEP)

NEP

- wird alle 2 Jahre von Übertragungsnetzbetreiber erstellt.
- stellt zentrales Instrument für Netzplanung dar.
- regelte bisher den HöS-Netzausbau in Deutschland für die nächsten zehn bis fünfzehn Jahre.
- ÜNB müssen Ziele der Energiewende ebenso im Blick behalten wie Interessen von Mensch und Umwelt.
- Szenariorahmen, der dem NEP zugrunde liegt, betrachtet neben Zieljahr 2037 auch Zeithorizont **2045**.
- Jahr 2045 markiert Zieljahr fürs Erreichen der vollständigen Dekarbonisierung in Deutschland.
- Der vorliegende NEP bildet erstmals ein Stromübertragungsnetz für **ein vollständig dekarbonisiertes Energiesystem in Deutschland** ab.



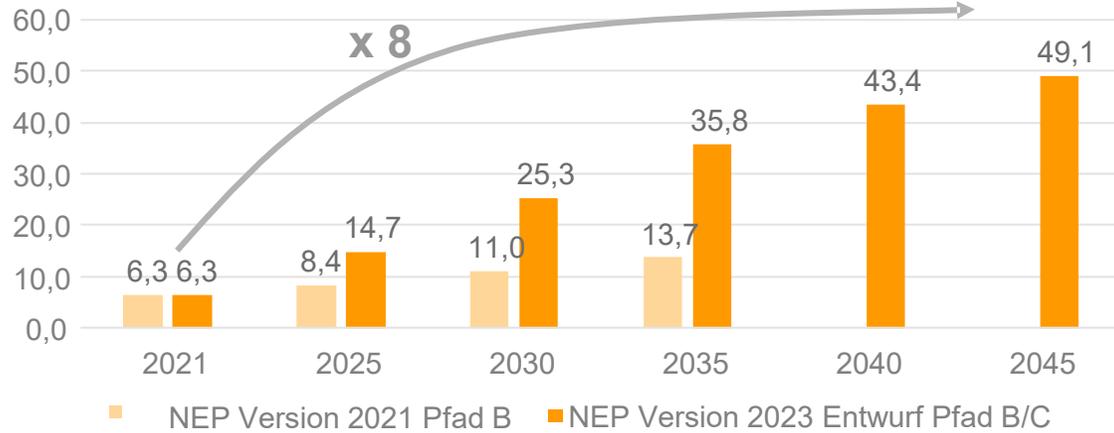
NETZ
ENTWICKLUNGS
PLAN **STROM**

*)<https://www.netzentwicklungsplan.de/verstehen>

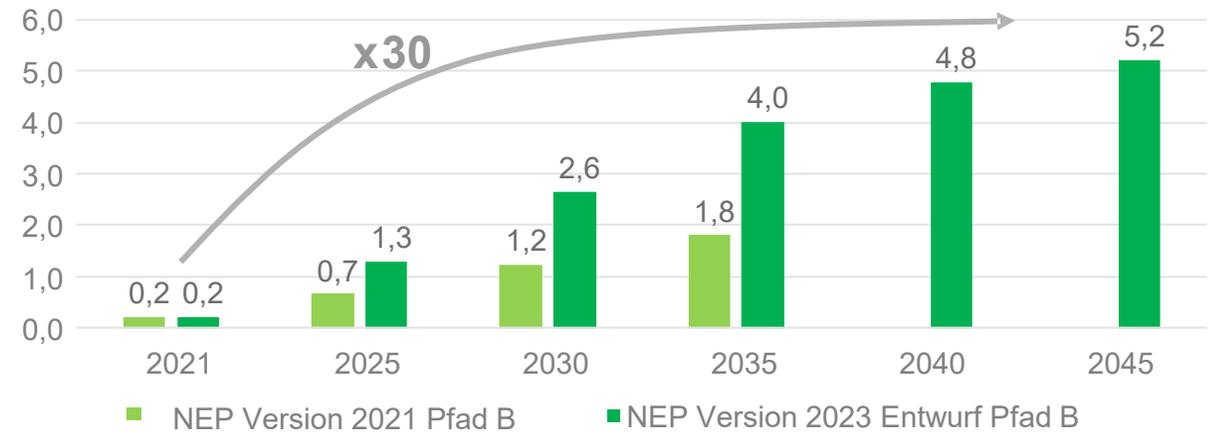
Wovon wir ausgehen: Elektrifizierung des Energiesektors

Vergleich NEP2021 und 2023 für Baden Württemberg

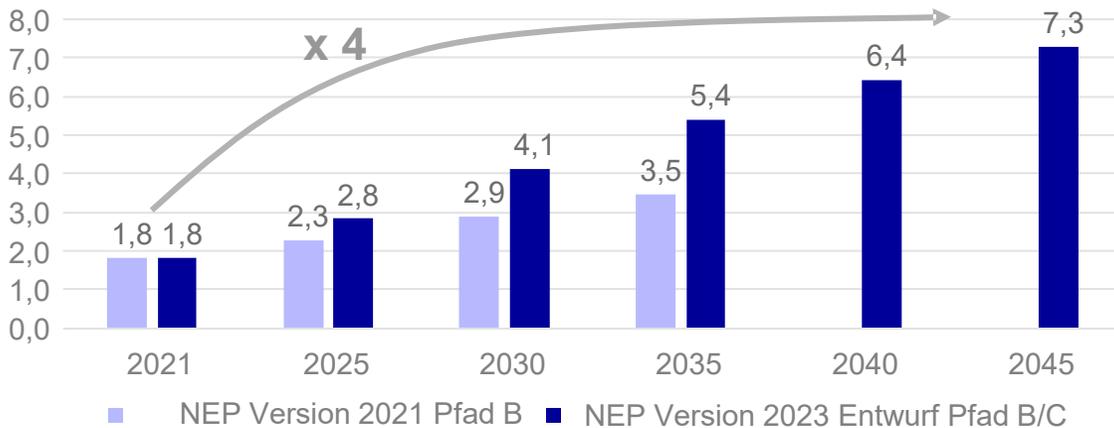
Photovoltaik [GW]



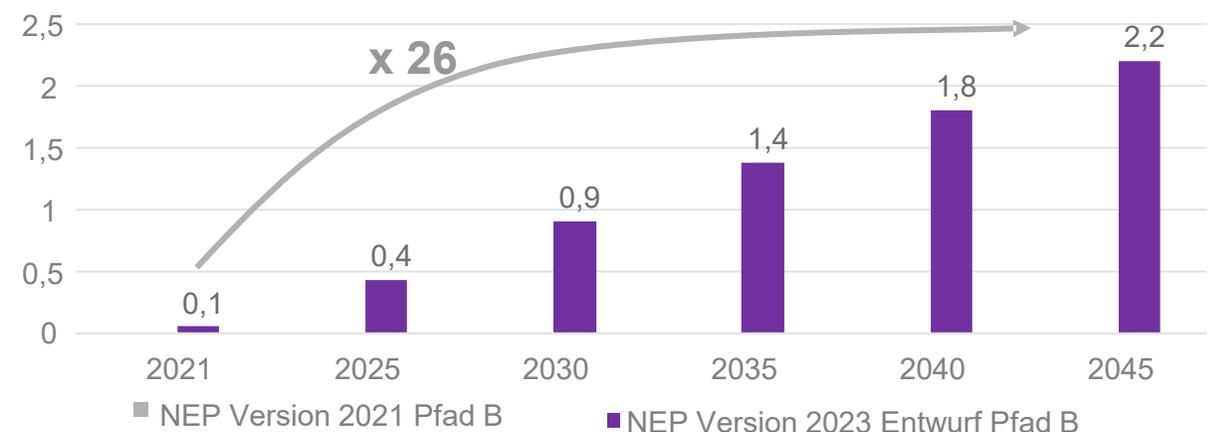
Elektrofahrzeuge [Mio.] Stk



Windenergie [GW]



Wärmepumpen [Mio.] Stk



Netzausbau im Gesamtnetz HS



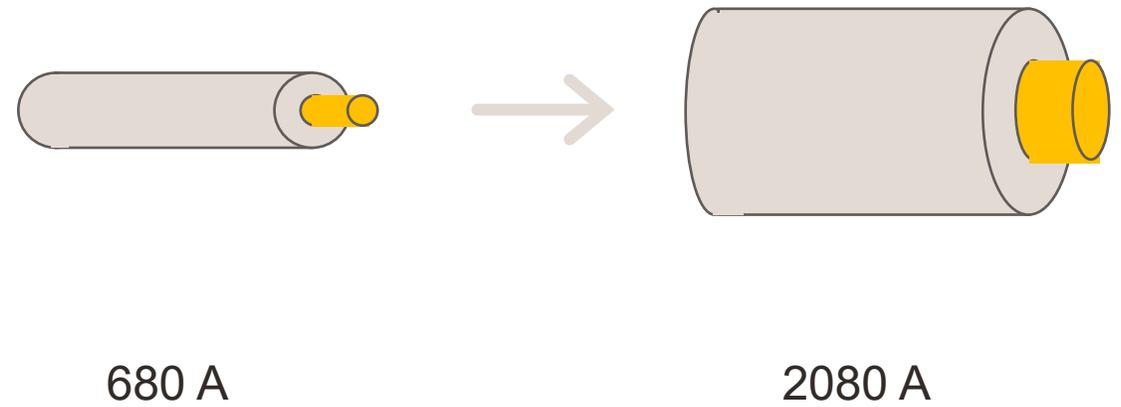
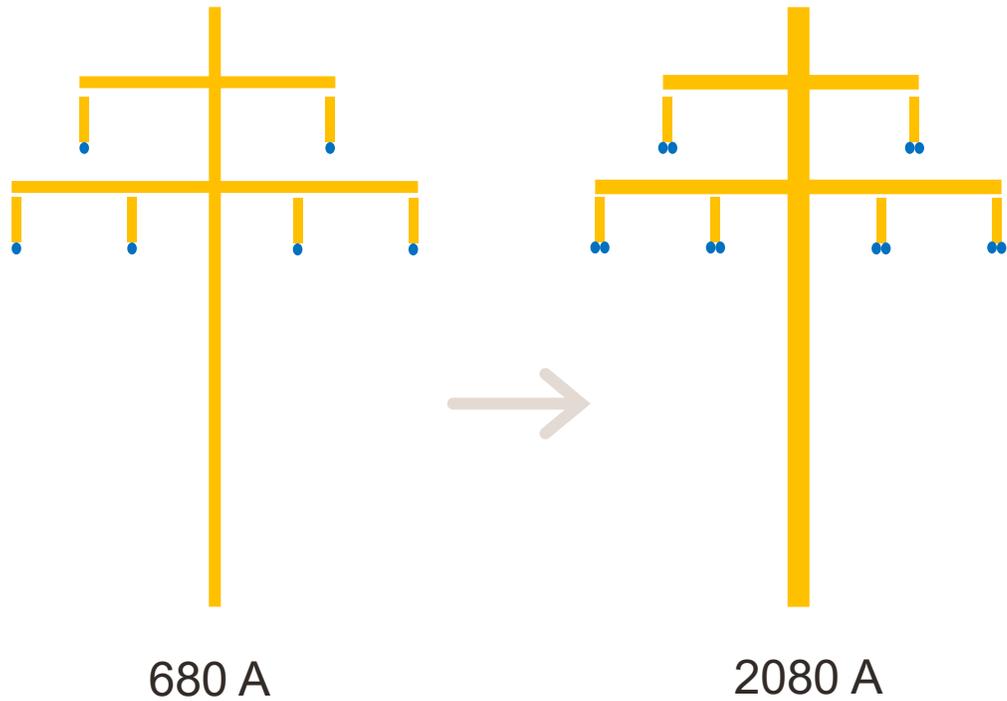
Ersatzneubau Trasse	2.600 km von 3.965 km (NAP21: 495 km)
Trassenneubau	245 km (NAP21: 12 km)
Zu erweiternde HS/MS-UWs	266 von 280 (95 %)
Neue HS/MS-UWs der Netze BW	50 ... 100
Zu erweiternde HöS/HS-UWs	32 von 38
Neue HöS/HS-Umspannwerke	24



Publikation des SWR vom 10.08.2023

Für die Energiewende muss der Netzbetreiber Netze BW sein Stromnetz in Baden-Württemberg deutlich umfangreicher ausbauen als bislang bekannt. Das geht aus einer Studie des Unternehmens hervor. "Das Ziel Deutschlands, bis 2045 klimaneutral zu sein, stellt uns vor eine riesige Herausforderung. Ohne Maßnahmen wären perspektivisch etwa **65 Prozent** unserer Hochspannungsleitungstrassen überlastet", sagte der Leiter Technisches Anlagenmanagement Hochspannung von Netze BW, Fred Oechsle, am Donnerstag im Umspannwerk Pulverdingen (Kreis Ludwigsburg). Das entspreche einer Länge von rund 3.000 Kilometern.

Neuer Standard für nachhaltigen Netzausbau



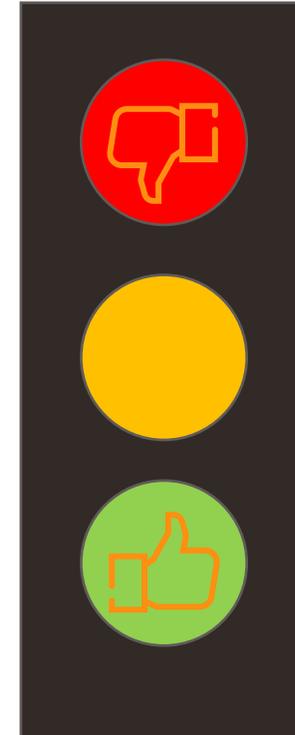


Probleme mit größeren Kabelquerschnitten:

- Kosten
- Größere Biegeradien
- Geringe Verfügbarkeit von HS-Kabeln mit Leiterquerschnitten $> 2500 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$
- Ggf. auch Doppelkabelsysteme (Breitere Trassen, Genehmigung)
- Probleme mit der Aufführung großer Kabel an Kabelendmasten
- ...

Lösungen zur Reduzierung des Querschnittes (Brainstorming)

- Zwei parallele Systeme
- Alternative Bettungsmaterialien (generell/ in Hotspots)
- Temperaturmonitoring
- Erdung (einseitig oder crossbonding)
- Kabeldesign anpassen (isolierte Drähte, gleichgeschlagene Drähte, verringerte Isolierwandstärke, ...)
- Tausch des Isolationsmaterials für Temperaturen $> 90^{\circ}\text{C}$
- Größerer Abstand zwischen Phasen und Kabelsystemen
- Anpassen des Lastfaktors
- Nutzung der Wärmekapazität „kurativer Netzbetrieb“
- Kühlung (aktiv)
- Austausch der Kabel gegen andere Übertragungsmedien (GIL, Supraleiter,...)
- Reduzierung der Legetiefe
- Bodenbeprobung und Berechnung mit den realen Bodenwerten
- ...



Einige Punkte werden genauer untersucht

- Erdung ✓
- Legeanordnung ✓
- ...

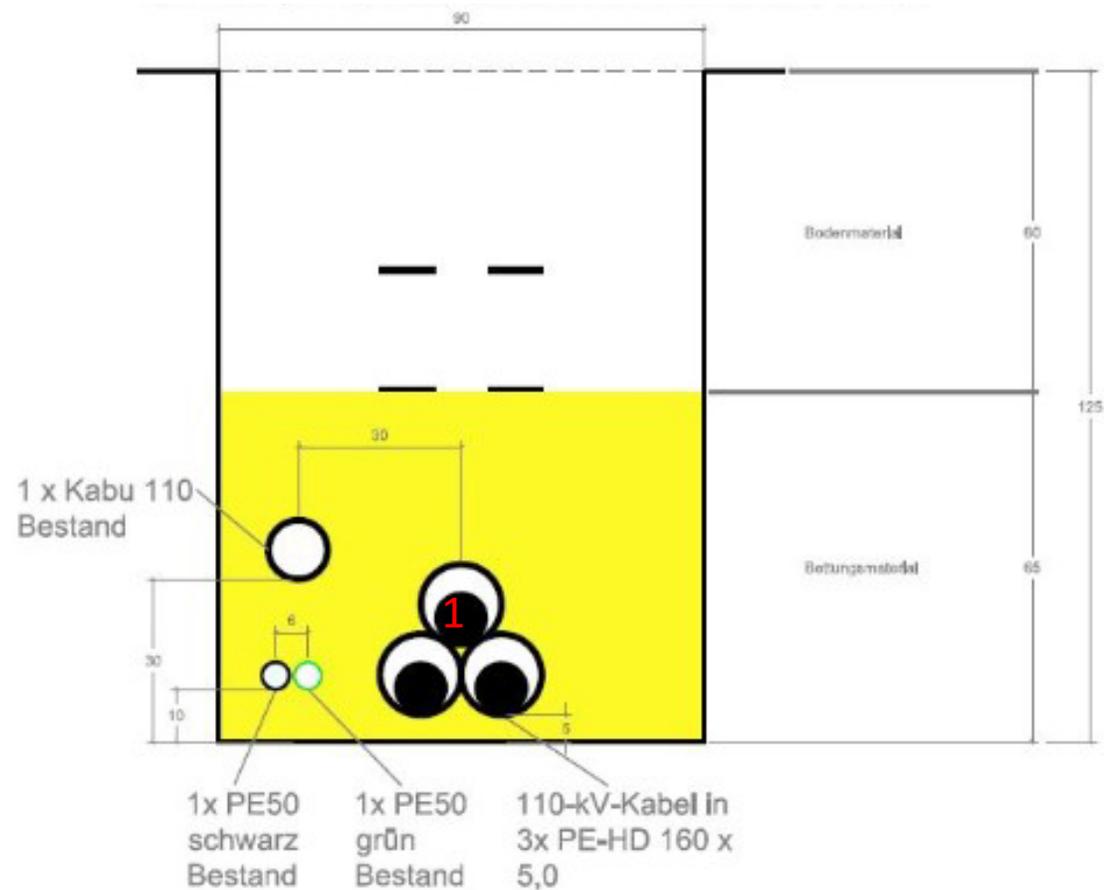


- Monitoring ?
- Bettungsmaterialien ?

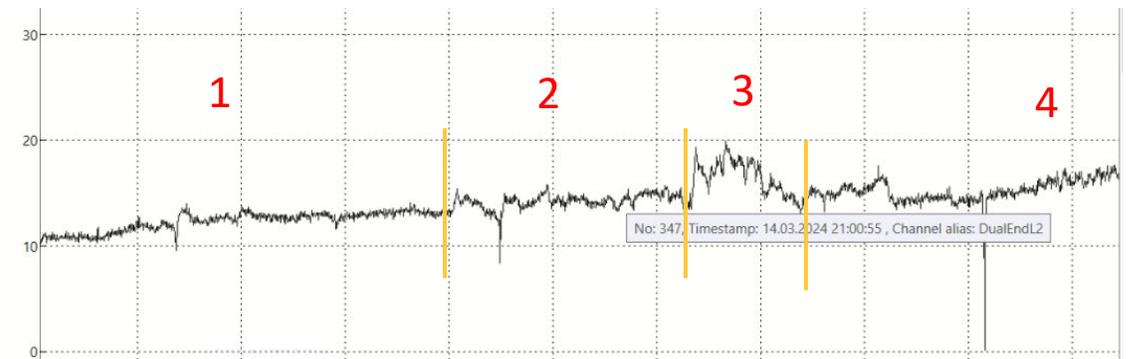


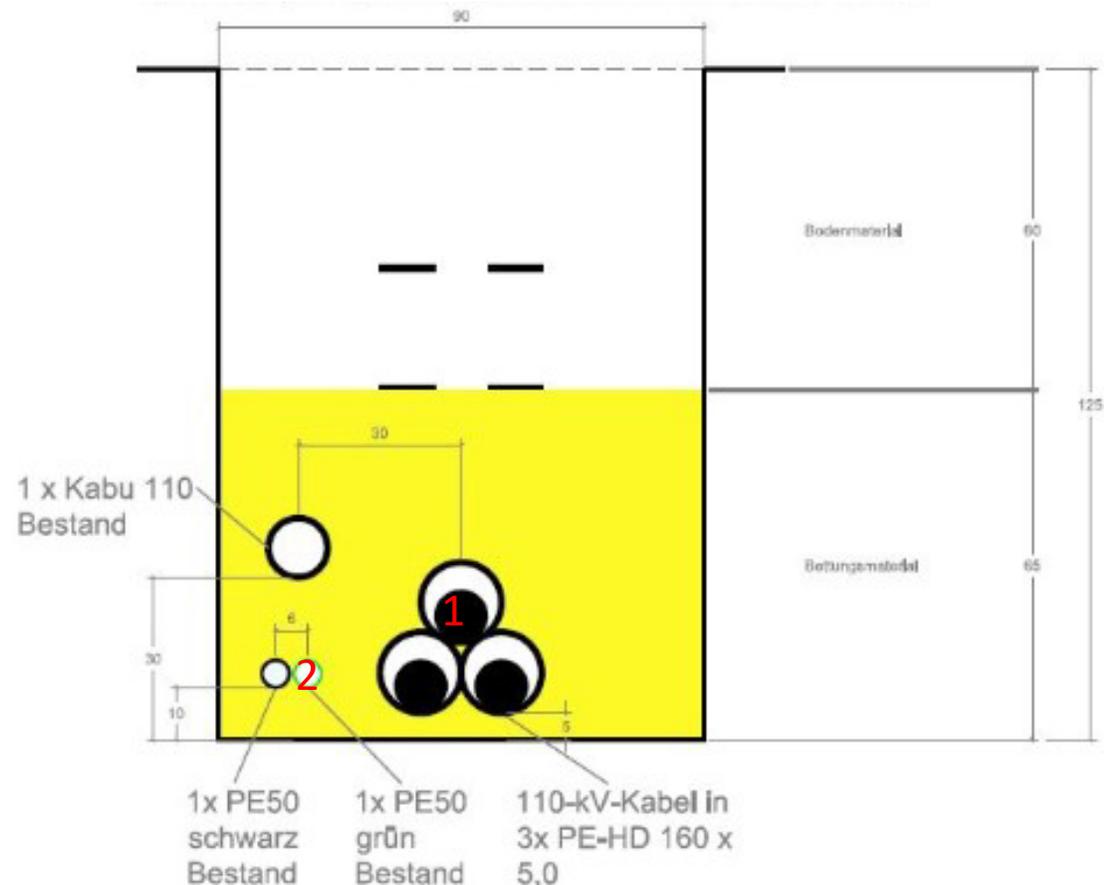
Monitoring Herrenberg





1. Monitoring im Kabelschirm





1. Monitoring im Kabelschirm

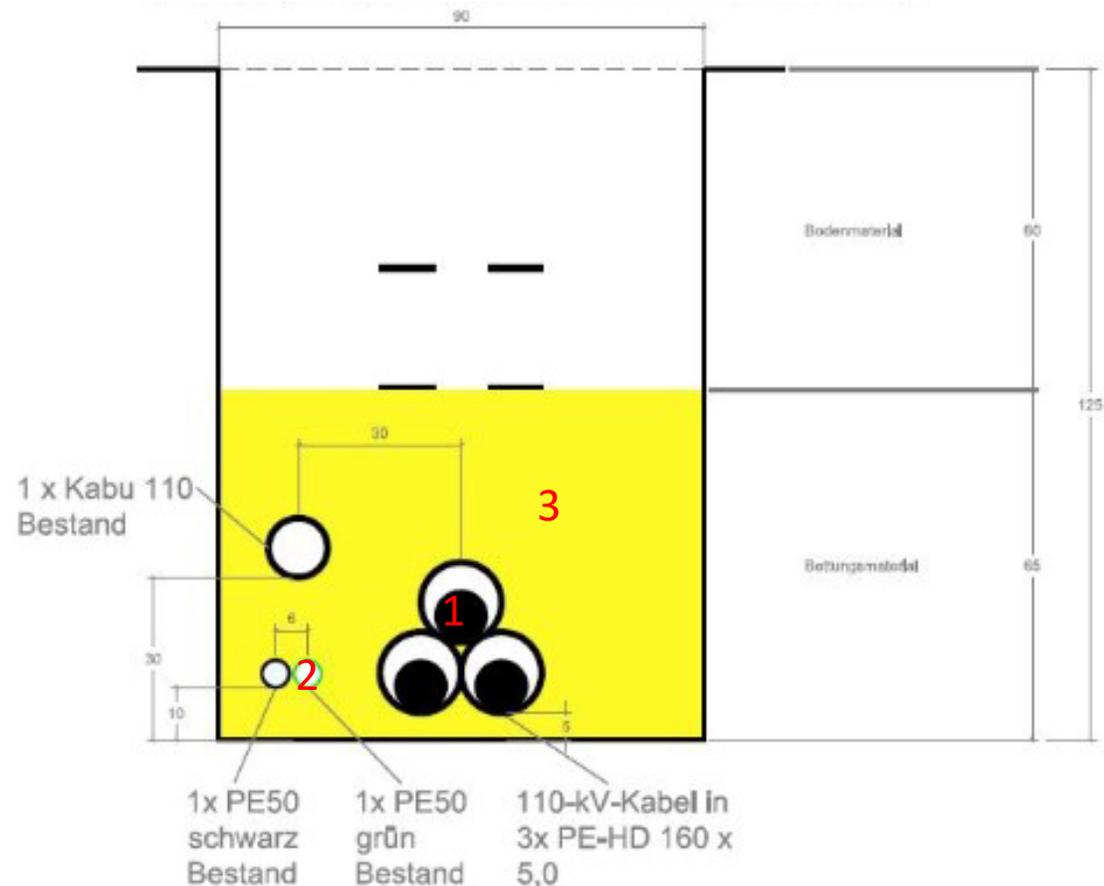
2. Monitoring über benachbartes Kommunikationskabel

Nachteil:

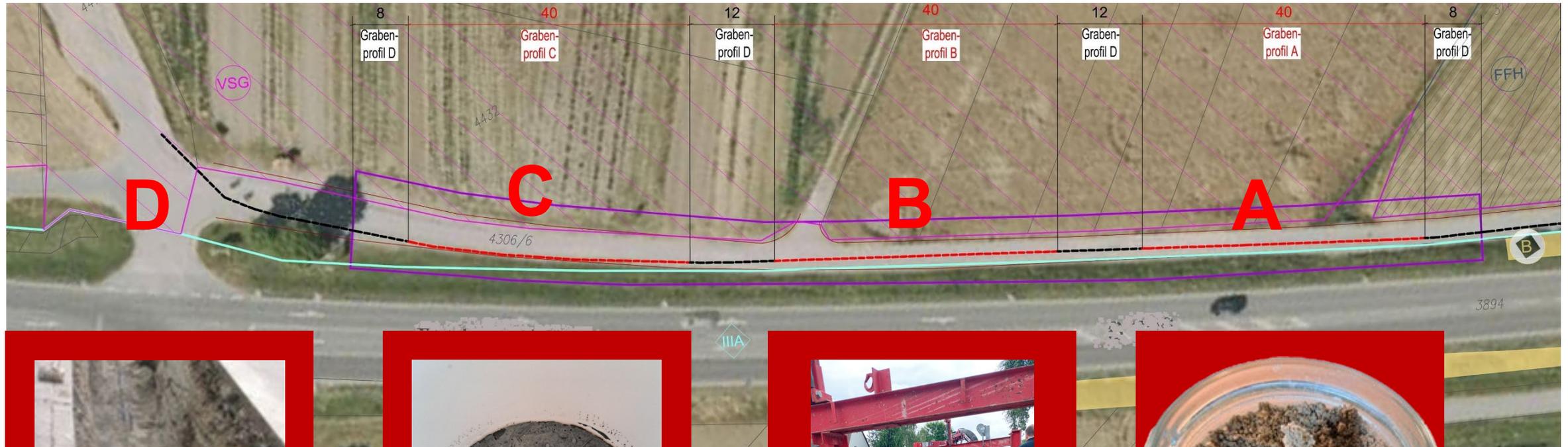
- Weiter weg vom HS-Kabel, Berechnungsergebnisse müssen exakter sein.

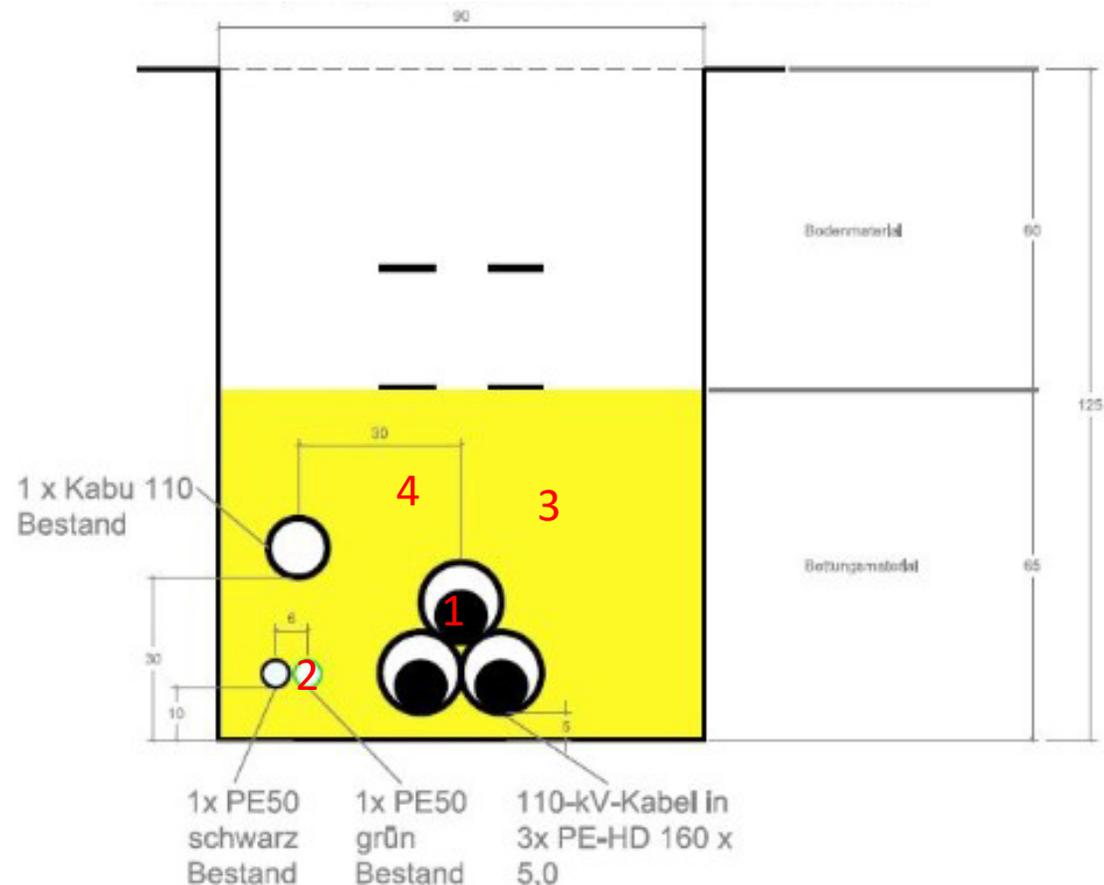
Vorteil:

- Glasfaser muss nicht an jeder HS-Muffe gespleist werden.
- Weniger Abhängigkeit zwischen Monitoringfasern und der HS bei Arbeiten oder Störungen.
- Nachträgliches Monitoring an Bestandsstrecken möglich, bei denen Kommunikationskabel verlegt wurden.



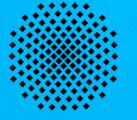
1. Monitoring im Kabelschirm
2. Monitoring über benachbartes Kommunikationskabel (ggf. alternative zum Monitoring im Schirm und Lösung für Bestandskabelstrecken)
3. Bettungsmaterialtausch
 - Bestand Flusssand 0-2 mm
 - Bettungsmaterialtausch 40m therm. stabiler Sand
 - Bettungsmaterialtausch 40m Flüssigboden
 - Bettungsmaterialtausch 40m therm. verbesserter Beton





1. Monitoring im Kabelschirm
2. Monitoring über benachbartes Kommunikationskabel (ggf. alternative zum Monitoring im Schirm und Lösung für Bestandskabelstrecken)
3. Bettungsmaterialtausch
 - Bestand Flusssand 0-2 mm
 - Bettungsmaterialtausch 40m therm. stabiler Sand
 - Bettungsmaterialtausch 40m Flüssigboden
 - Bettungsmaterialtausch 40m therm. verbesserter Beton
4. Begleitende Messung und Validierung der Ergebnisse über Sensoren durch die Universität Stuttgart

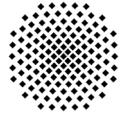
Grundlagen



Universität
Stuttgart

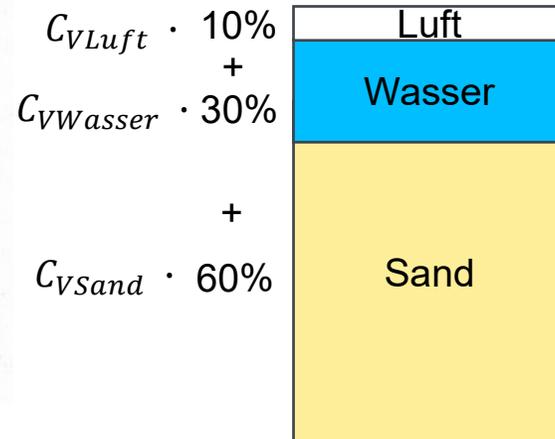
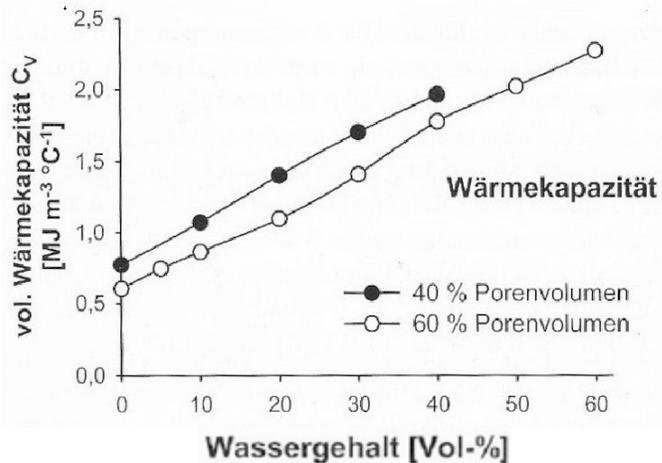
Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Thermische Eigenschaften des Bodens



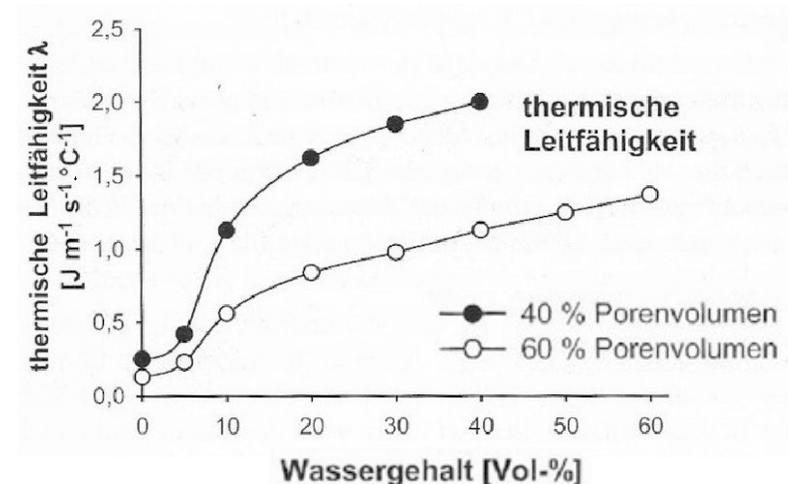
Die volumetrische Wärmekapazität $C_V \left[\frac{J}{m^3 K} \right]$

- Definition:
Wärmeenergie, die $1m^3$ Boden um $1K$ erwärmt.



Die thermische Leitfähigkeit $\lambda \left[\frac{J}{msK} = \frac{W}{mK} \right]$

- Definition:
Wärmeenergie, die im homogenen Medium mit einem Volumen von $1m^3$ fließt, bei einem Temperaturgradient von $1 \frac{K}{m}$ in 1 Sekunde

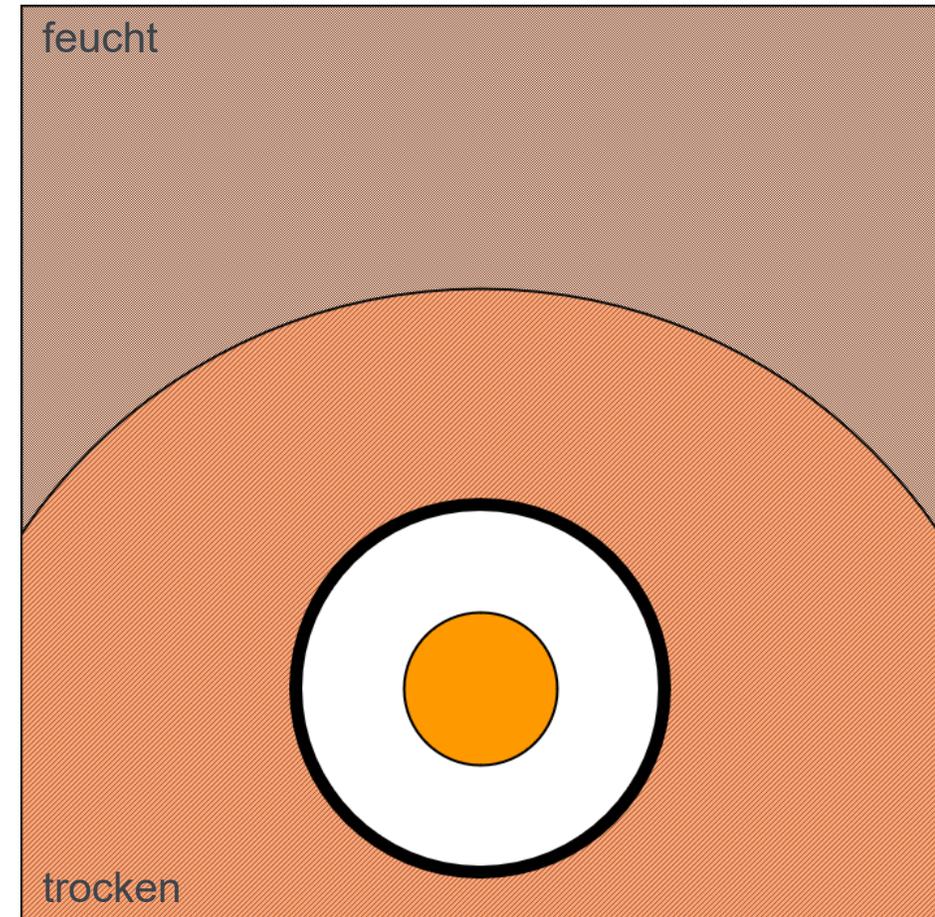


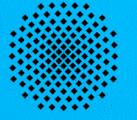
Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Bodenaustrocknung nach IEC 60287

- Bodenaustrocknung
bei Oberflächentemperatur des
Kabels von ca. 15°C über
Umgebungstemperatur
- Strombelastbarkeitsberechnung
nach IEC 60287

- Zweischichtenmodell





Universität
Stuttgart

Laboraufbau & Thermische Modellierung

Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Laboraufbau



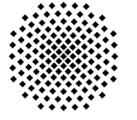
- Kabelstück in VDE – Sand
- Heizpatronen an Enden des Kabels
- Temperatursensoren platziert

- Versuchsdurchläufe im trockenen und nassen Bettungsmaterial
- Ziel: Validierung für ein einsetzbares thermisches Modell

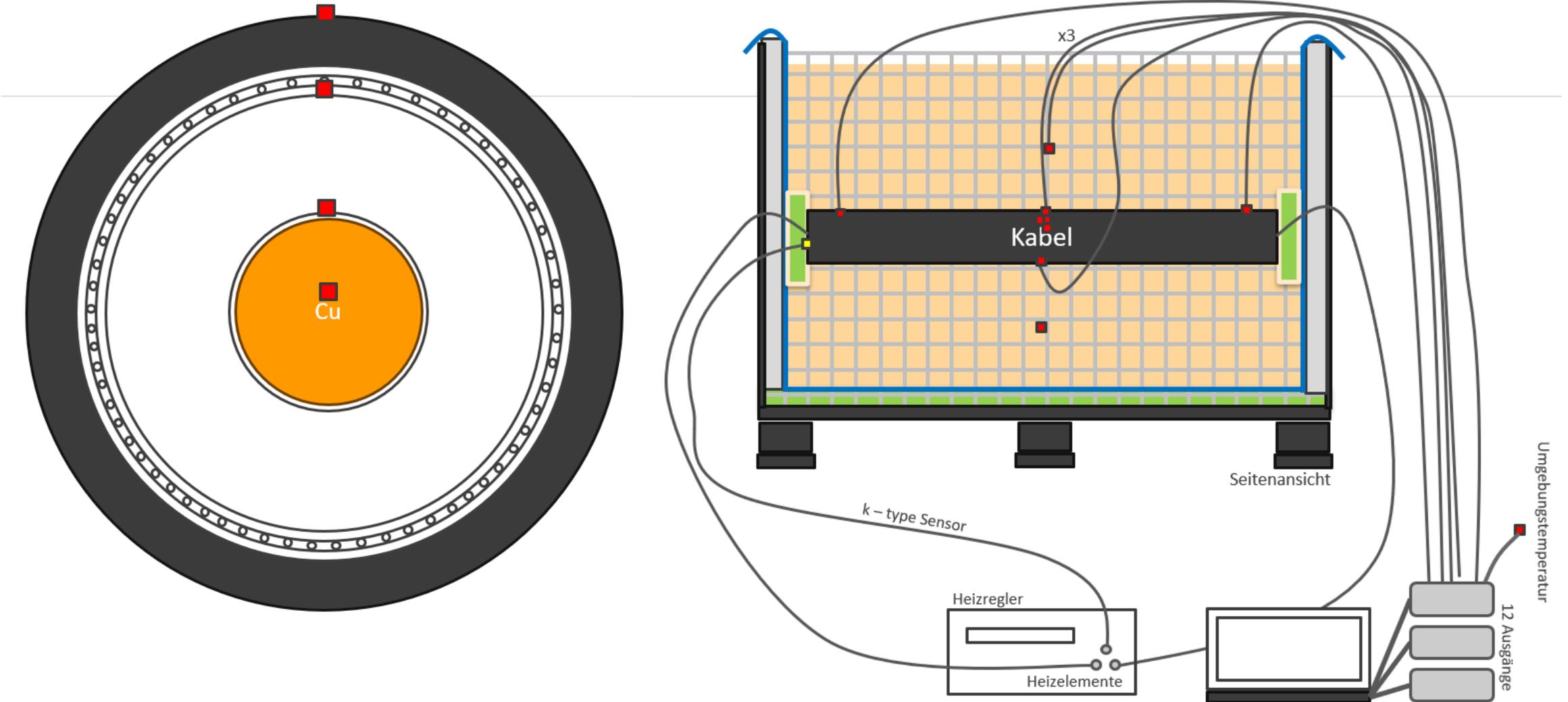


Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Laboraufbau

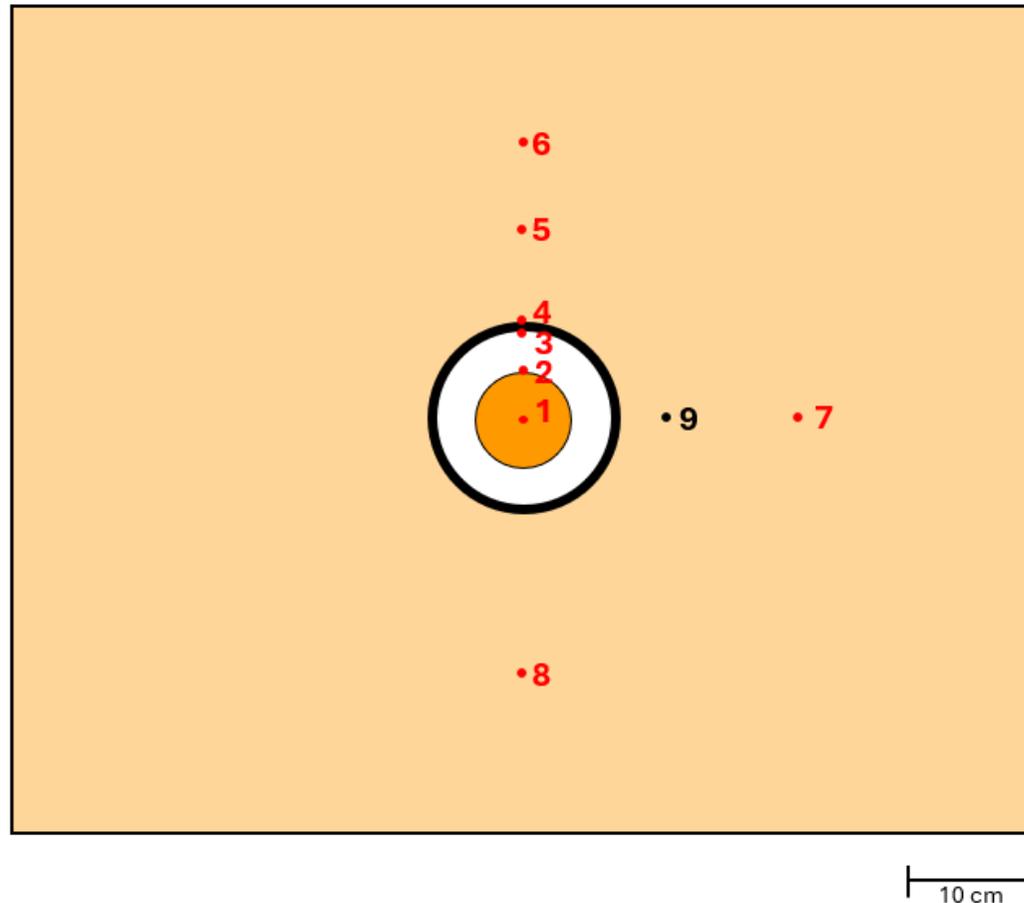


Universität
Stuttgart



Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Sensorpositionen

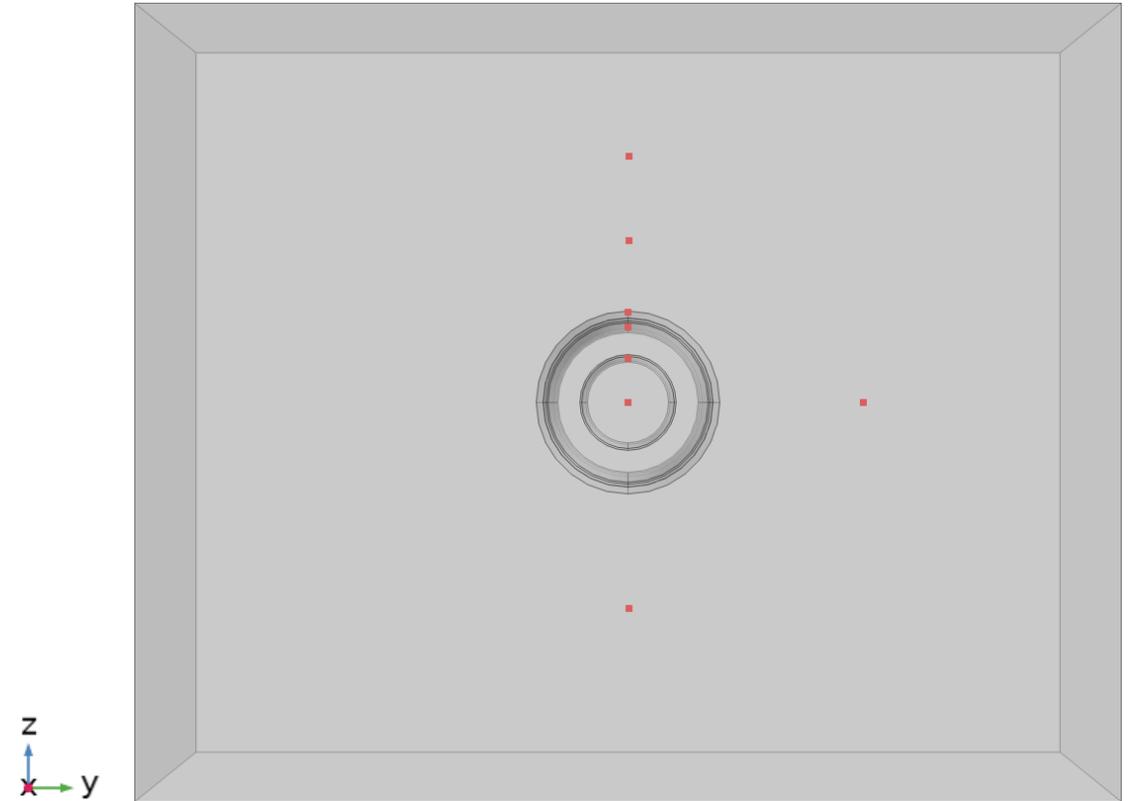
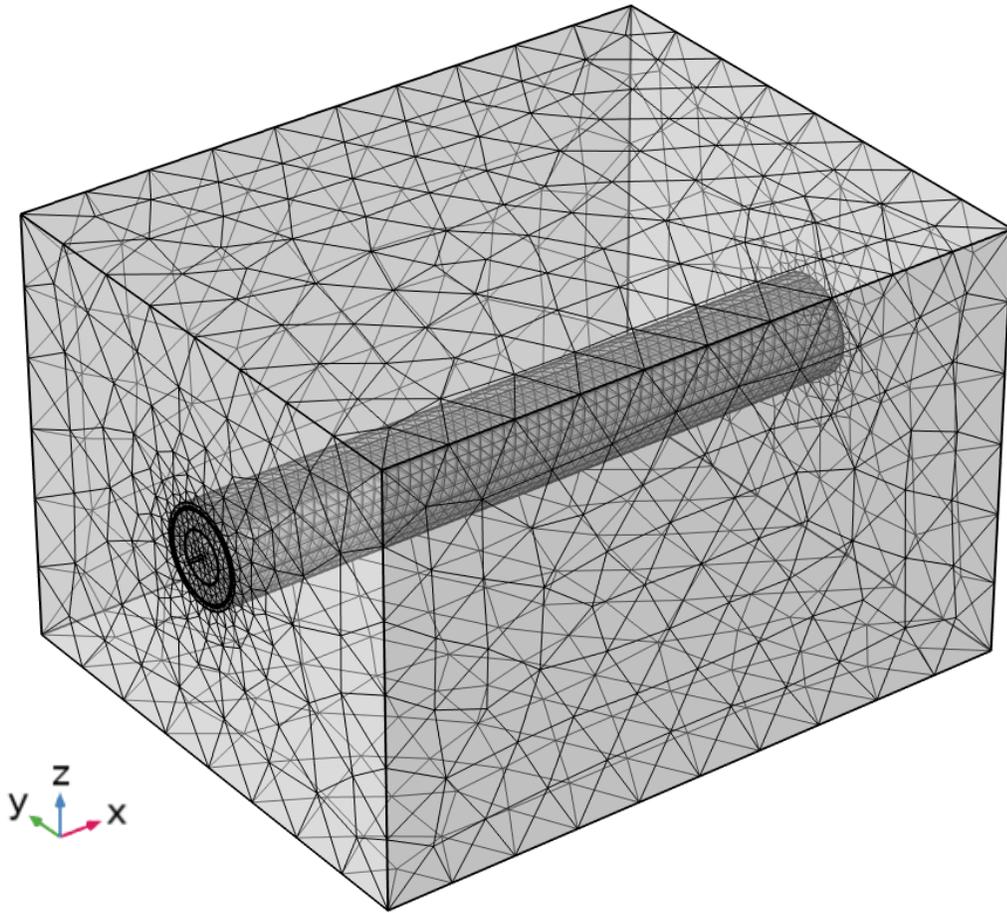


Positionen der
Sensoren:

1. Kupferleiter
2. Innere Leitschicht
3. Äußere Leitschicht
4. Manteloberfläche
5. 7cm über dem Kabel
6. 14cm über dem Kabel
7. 14cm horizontal neben dem Kabel
8. 12,5cm unter dem Kabel
9. 4cm horizontal neben dem Kabel

Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Thermische Modellierung



Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

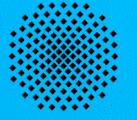
Thermische Modellierung

- Materialparameter für heat transfer interface:

Material	ρ in kg/m ³	λ in W/(mK)	c_p in J/(kgK)
Aluminium	2700	237	904
Kupfer	8920	400	385
PE	2000	0,286	1000
VPE	960	0,286	2100
VPE halb.	800	0,286	1200

Material	ρ in kg/m ³	λ in W/(mK)	c_p in J/(kgK)
Trockener Sand (IEC)	1420	0,4	830
Nasser Sand (IEC)	1420	1	1483

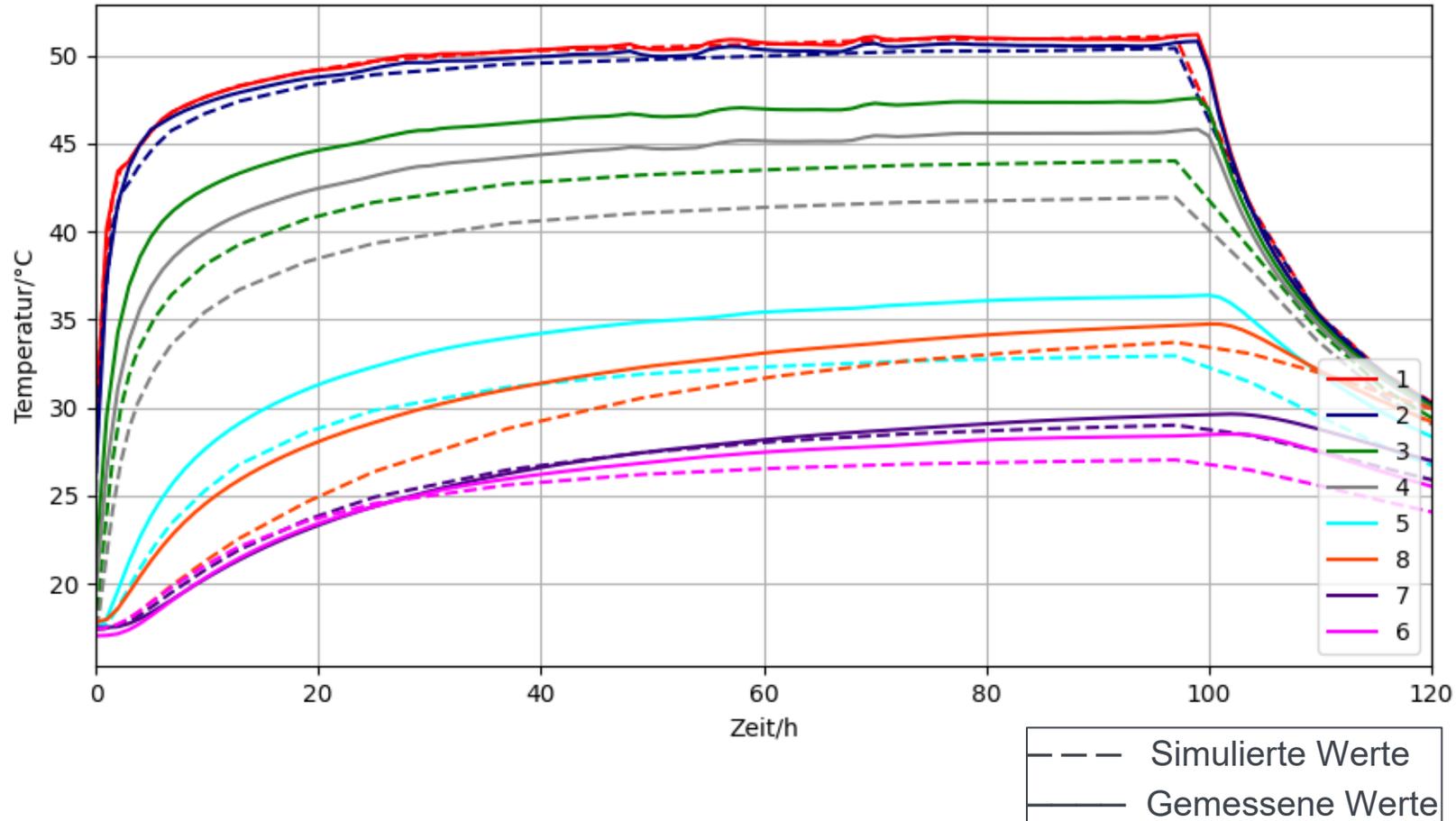
Ergebnisse



Universität
Stuttgart

Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

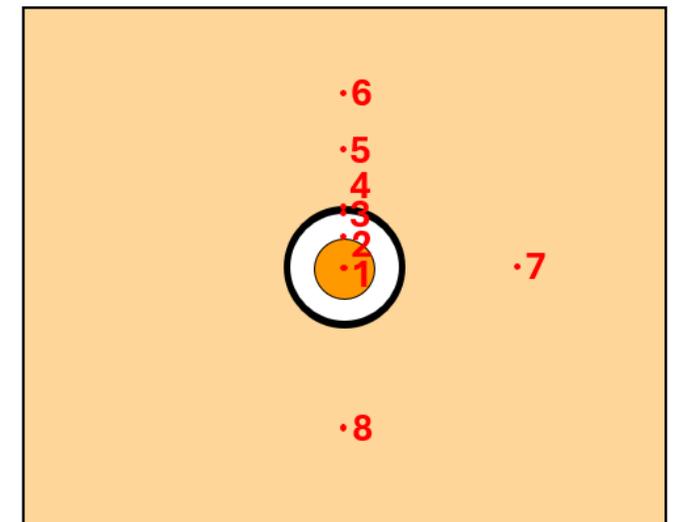
Thermische Zeitverläufe im trockenen Zustand



- max. Leitertemperatur:
51°C

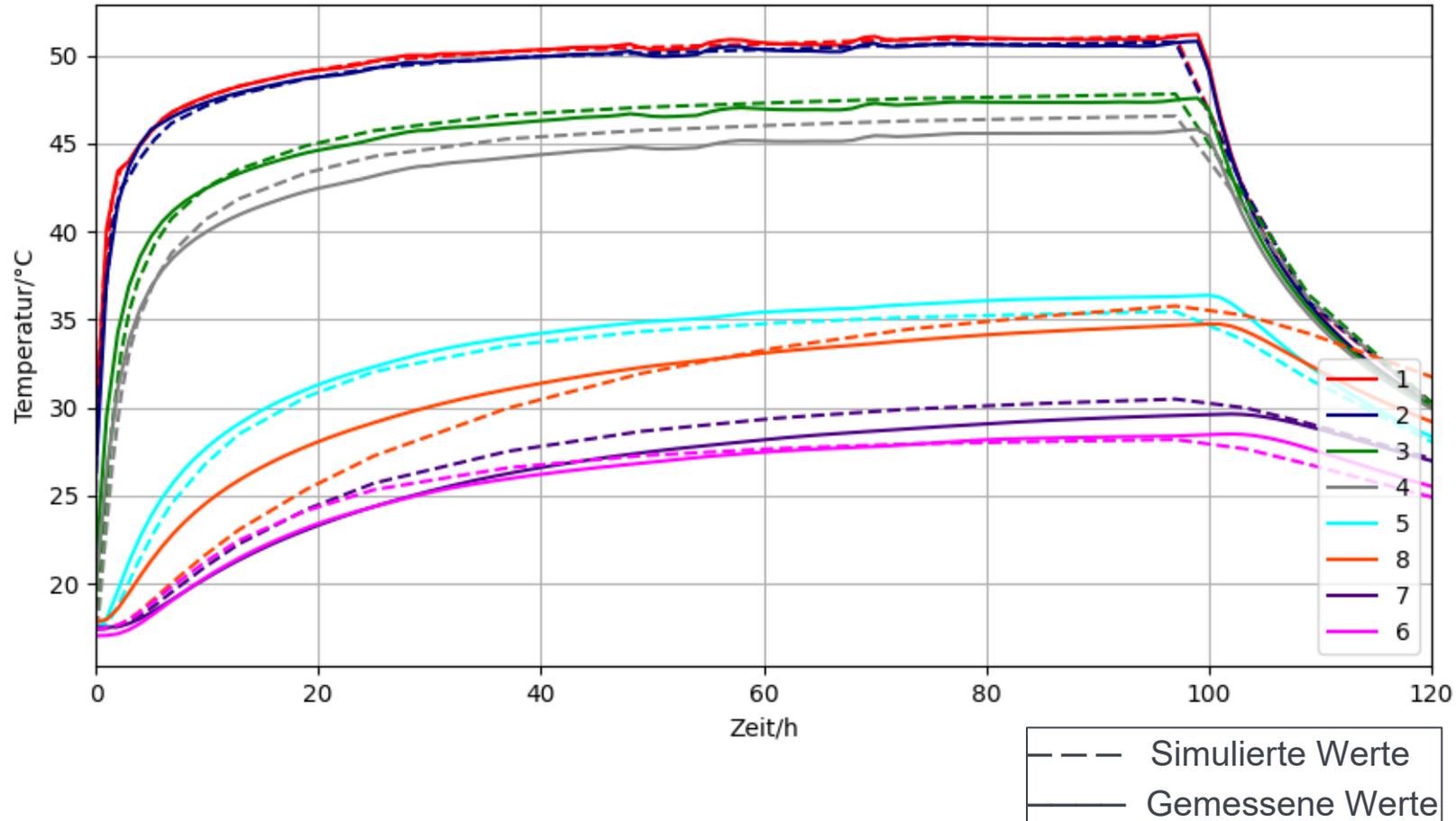
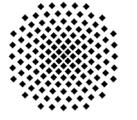
- Normwert:

$$\lambda = 0,4 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$



Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

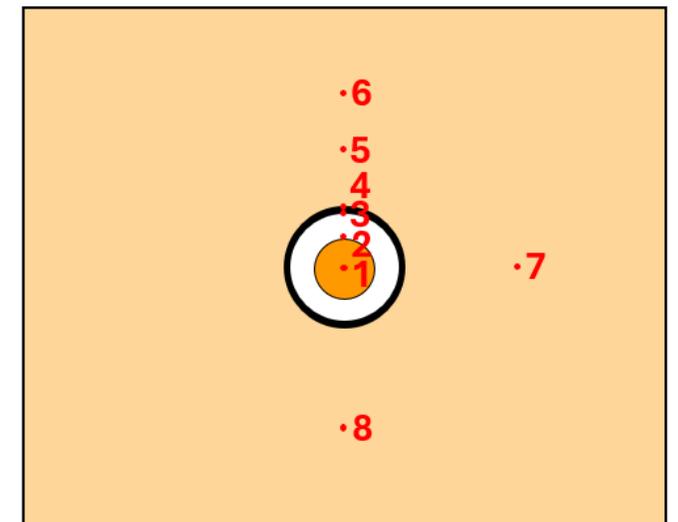
Thermische Zeitverläufe im trockenen Zustand



- max. Leitertemperatur:
51°C

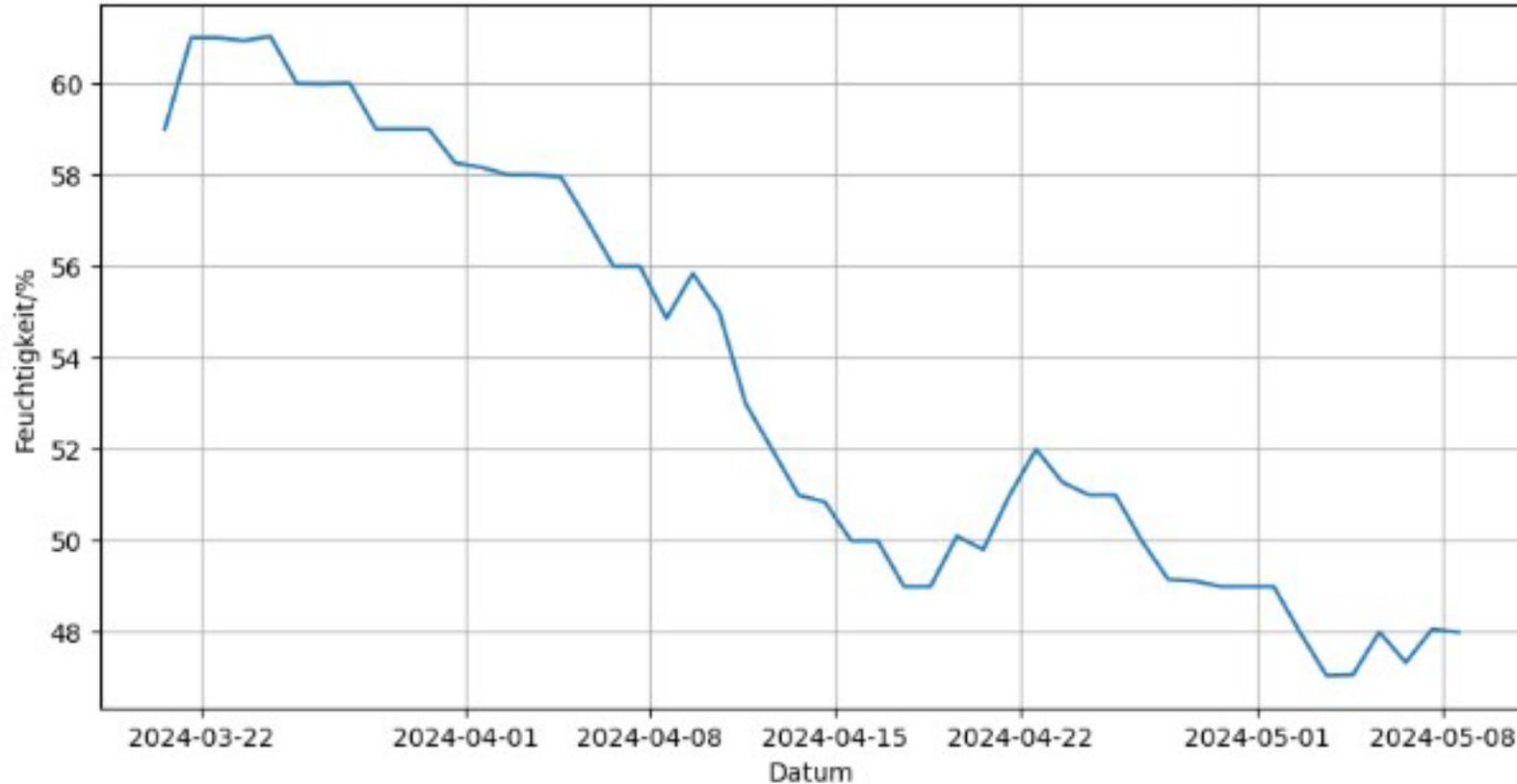
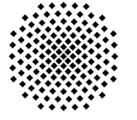
- angepasster Wert:

$$\lambda = 0,15 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$



Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Stationäre Werte im nassen Zustand



- Feuchtigkeitskurve des Bettungsmaterials im Zeitraum vom 20. März bis zum 8. Mai
- Innerhalb des Zeitraums Oberflächentemperatur des Kabels eine Übertemperatur von 15 – 40°C

Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Stationäre Werte im nassen Zustand

- Leitertemperatur 45,1°C :

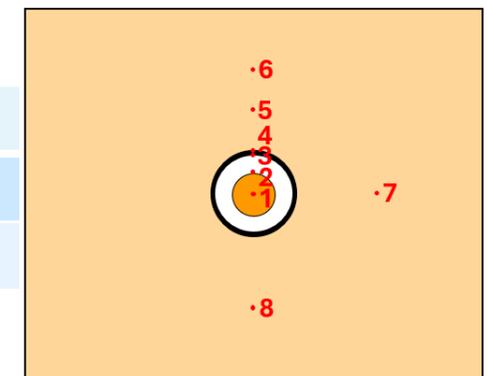
	2	3	4	5	6	7	8
Sensoren	44,1°C	36,8°C	33°C	28,5°C	24,5°C	26,4°C	29°C
Simulation	44,2°C	35,6°C	33,1°C	28,4°C	25°C	26°C	29,2°C
Δ	0,1	1,2	0,1	0,1	0,5	0,4	0,2

- Leitertemperatur 51,3°C :

Sensoren	50,2°C	41,8°C	37,5°C	32,2°C	27,9°C	32,2°C	32,2°C
Simulation	50,2°C	40°C	37°C	31,4°C	27,4°C	32,4°C	32,4°C
Δ	0	1,8	0,5	0,8	0,5	0,2	0,2

- Leitertemperatur 62,4°C:

Sensoren	60,9°C	49,8°C	44,3°C	37,6°C	32,9°C	32°C
Simulation	60,9°C	48,7°C	42,6°C	37,1°C	30,7°C	31,3°C
Δ	0	1,1	1,7	0,5	1,2	0,7



Messung und Modellierung der Temperaturverteilung von Erdkabeln

Zusammenfassung

- Jahr 2045 vollständige Dekarbonisierung geplant
- Um Reserven für den kommenden Netzausbau auszuschöpfen, wird an der Kabelstrecke Herrenberg – Gültstein Temperaturmonitoring und temperaturstabilisiertes Bettungsmaterial getestet
- Bodenbereich in der Nähe des Kabels trocknet langsamer als erwartet aus
=> Strombelastbarkeit im nassen Sand möglicherweise höher als aus den Berechnungen
- Für eine korrekte Modellierung ist es nötig die thermischen Eigenschaften und die Feuchtigkeit der Kabelumgebungen präzise zu bestimmen

Ausblick:

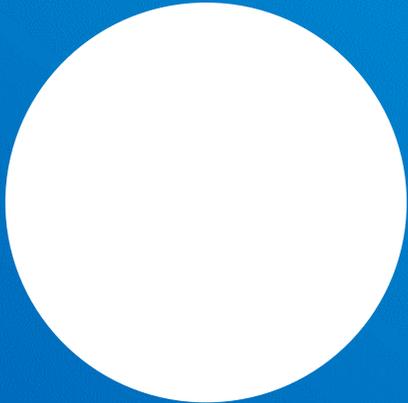
- Thermisches Modell in Kombination mit Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren zur Bestimmung der Kabelleitertemperatur bzw. Strombelastbarkeit an realen Kabelstrecken



Universität Stuttgart

Institut für Energieübertragung und
Hochspannungstechnik

Vielen Dank!



Phu Bach Dang

phubachdang@hotmail.com

Martin Schultheiß

Kabeltechnik HS

m.schultheiss@netze-bw.de

Tel. 0711/289 - 83267

Universität Stuttgart

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik

Pfaffenwaldring 47, Stuttgart

Netze BW GmbH

Schelmenwasenstr. 15

70568 Stuttgart