

Definition standardisierter Randbedingungen zum Nachweis des feuchtetechnischen Verhaltens von Perimeterdämmstoffen in einem Laborversuch

PeriLab

Dr.-Ing. Sebastian Trembl

Christoph Werner

Michael Kamml

Nabil Akhtar

Christoph Sprengard

Im Auftrag von:

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)

Kolonnenstraße 30B

10829 Berlin

Deutschland



FIW München

Forschungsbericht FO-2022-10

FO-2022-10

Definition standardisierter Randbedingungen zum Nachweis des feuchtetechnischen Verhaltens von Perimeterdämmstoffen in einem Laborversuch

PeriLab

Im Auftrag von:

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Kolonnenstraße 30B
10829 Berlin
Deutschland

Der Bericht umfasst:

90 Seiten
50 Abbildungen
17 Tabellen

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Gräfelfing, den 28. Mai 2025

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm Christoph Sprengard

Dr.-Ing. Sebastian Tremel

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Problemstellung	5
2	Forschungsansatz	6
3	Stand des Wissens	8
3.1	Aufgaben von Perimeterdämmstoffen und Anforderungen entsprechend der Anwendungsrandbedingungen	8
3.2	Regulatorische Aspekte	8
3.3	Literaturrecherche	10
4	Definition der Randbedingungen	15
4.1	Flüssigwasserdruck	15
4.2	Bodentemperaturen	19
4.3	Mechanische Belastung	23
5	Abschätzungen zur Wasseraufnahme aufgrund kombinierter Beanspruchung durch Flüssigwasserdruck und Wasserdampfdiffusion	27
5.1	Wasseraufnahme bei erhöhtem Wasserdruck	27
5.2	Wasseraufnahme durch Diffusion	35
6	Definition des Prüfablaufs	42
7	Apparative Umsetzung und exemplarische Durchführung	44
7.1	Konzept	44
7.2	Prüfkammer	44
7.2.1	Beschreibung der Komponenten	44
7.2.2	Verschlussdeckel	47
7.2.3	Prüfkammerrahmen	48
7.2.4	Ringdichtungen und Dichtungssystem	50
7.2.5	Betongrundplatte	52
7.2.6	Heizmodul	53
7.2.7	Prüfkammerverspannung	54
7.2.8	Thermische Dämmung	55
7.3	Betrieb der Prüfkammer	55
7.3.1	Montage von Prüfkammer und Dämmstoffprobe	55
7.3.2	Befüllen und Entleeren	60
7.3.3	Demontage von Prüfkammer und Dämmstoffprobe	61
7.4	Hydraulische Versorgungssysteme	62
7.4.1	Konzept	62
7.4.2	Wasseraufbereitungssystem	64
7.4.3	Versorgungssystem	67
7.4.4	Heizungssystem	70
7.4.5	Temperiersystem	72
7.5	Messtechnik und Steuerung	75

8	Aktueller Stand	77
9	Ausblick	79
9.1	Anlagenbau	79
9.2	Forschungsbedarf	81
	Abbildungsverzeichnis	83
	Tabellenverzeichnis	86
	Literaturverzeichnis	87
	Fachartikel, Bücher und Onlinequellen	87
	Normen	88

1 Hintergrund und Problemstellung

Perimeterdämmstoffe werden zur Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses eingesetzt. Dabei können sowohl Kellerwände, als auch die Bodenplatte des Gebäudes gedämmt werden. Aufgrund des anliegenden Erddrucks, bzw. ggf. auch der aufliegenden Gebäudelast, ergeben sich Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Materials. Nachgewiesen werden muss also eine ausreichend hohe Druckfestigkeit und ggf. auch das Kriechverhalten des Dämmstoffs. Neben der mechanischen Beanspruchung werden die Materialien aber auch einer regelmäßigen Feuchtebeanspruchung ausgesetzt. Der Einbau erfolgt in der Regel ohne weitere Abdichtungsmaßnahmen gegenüber dem Erdreich. Je nach Grundwasserstand liegen also erdfeuchte Bedingungen oder auch Einwirkungen durch zeitweises oder andauernd drückendes Wasser vor. Eine Fechteaufnahme kann dabei sowohl durch flüssiges Wasser erfolgen, als auch durch Diffusionsprozesse verursacht sein.

Aufgrund der beschriebenen Anforderungen können ausschließlich Materialien mit ausreichend hoher Druckfestigkeit und hoher Feuchtebeständigkeit als Wärmedämmstoff im Perimeterbereich eingesetzt werden. In der DIN 4108-10 sind deshalb nur die geschlossenzelligen Materialgruppen XPS und Schaumglas für die genormten Anwendungen PW (außen liegende Wärmedämmung von Wänden gegen Erdreich außerhalb der Abdichtung) und PB (außen liegende Wärmedämmung unter der Bodenplatte gegen Erdreich außerhalb der Abdichtung) vorgesehen.

Während Laborversuche zur Prüfung des Verhaltens gegenüber lange andauernden Druckbelastungen (Kriechversuche nach DIN EN ISO 16534) sowie zur Fechteaufnahme durch Diffusion (Diffusionsversuche nach DIN EN ISO 16536) zum Stand der Technik gehören, existieren bislang keine genormten Prüfverfahren zum Nachweis des feuchtetechnischen Verhaltens von Perimeterdämmstoffen unter einer praxisrelevanten kombinierten Einwirkung von Druck durch Erdreich und Flüssigwasser sowie diffusionsgetriebener Fechteaufnahme.

Für die Festlegung von Fechtezuschlagsfaktoren und zum allgemeinen Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Perimeterdämmstoffen, werden deshalb bis heute Objektentnahmen gefordert. Dabei ist die Belastung der Perimeterdämmstoffe auf die konkret vorliegenden Randbedingungen von Einbau- und Eintauchtiefe beschränkt. Zudem können die während der Expositionsdauer vorliegenden Randbedingungen, insbesondere des Wasserdrucks, nur stichprobenartig untersucht werden. Es liegen somit keine dokumentierten Aussagen über den im Untersuchungszeitraum tatsächlich anliegenden Wasserdruck vor. Eine Beschränkung auf die jeweils vorliegenden Verhältnisse führt im Weiteren dazu, dass ein Nachweis der Tauglichkeit für eine bestimmte (auch größere) Eintauchtiefe nicht möglich ist, wenn keine geeigneten Objekte zur Verfügung stehen. Diese Aussagen gelten analog auch für die Fechteaufnahme aufgrund von Diffusionsvorgängen, die im Wesentlichen von der Bodentemperatur sowie der Nutzung des angrenzenden (Wohn-) Raums abhängen.

2 Forschungsansatz

Im Folgenden werden der Untersuchungsansatz und die daraus abgeleiteten Arbeitsinhalte beschrieben.

In dem Forschungsvorhaben werden zunächst die auf Perimeterdämmstoffe einwirkenden Randbedingungen untersucht und nach Möglichkeit quantifiziert. Im Einzelnen sind dies der anliegende Wasserdruck, der Erddruck sowie das Wasserdampfpartialdruckgefälle. Die Eigenschaften sind abhängig von der Einbau- und Eintauchtiefe sowie dem Standort und sind teilweise jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Aufgrund dieser räumlichen und zeitlichen Varianz können nicht alle denkbaren Fälle berücksichtigt werden. Die Untersuchungen dienen der Definition realistischer und angemessen anspruchsvoller Belastungsszenarien.

Während die Transportgleichungen zur Berechnung von Diffusionsströmen seit langem bekannt und in kommerziell erhältliche Rechenprogramme implementiert sind, existieren bislang keine Informationen zur funktionalen Abhängigkeit der Flüssigwasseraufnahme von Zeit und Wasserdruck. Um die Größenordnungen der jeweiligen Einzeleffekte abzuschätzen, werden deshalb ergänzend Untersuchungen zur Flüssigwasseraufnahme unter erhöhtem Wasserdruck durchgeführt. Dafür wird auch ein Versuchsaufbau getestet, der eine uniaxiale Beanspruchung mit Wasserdruck senkrecht zur Plattenoberfläche ermöglicht. Ermittelt werden soll die Flüssigwasseraufnahme in Abhängigkeit von Wasserdruck und Zeit. Mit auf diese Weise erhobenen Daten könnten perspektivisch die im praxisnahen Laborversuch ermittelten Verläufe der Wasseraufnahme ggf. in Kombination mit der durch Modellierung ermittelbaren diffusionsgetriebenen Feuchteaufnahme, nachvollzogen werden.

Zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Temperaturprofile gemäß Einbautiefe und dem Einfluss hinterlaufenden Wassers zwischen Dämmschicht und Kellerwand auf die Feuchteaufnahme, werden hygrothermische Simulationen durchgeführt.

Die zentrale Aufgabenstellung besteht jedoch in der Entwicklung eines laborbasierten Ansatzes zur praxisgerechten Simulation von Wasserdruck und Diffusionsbeanspruchung auf eine Perimeterdämmung. Hierzu wird ein geeigneter Prüfstand aufgebaut. Die Apparatur ermöglicht die Untersuchung eines repräsentativen Ausschnitts einer Perimeterdämmung mit Maßen von ca. 1 x 1 m. Die Größe der Prüffläche ermöglicht damit die Beanspruchung von Dämmstoffplatten mit voller Breite und praxisgerechter Fugenausbildung (d.h. einschließlich verspachtelter Längsstöße und T-Stöße). Das zu untersuchende Material wird dabei auf eine Betonplatte aus WU-Beton mit einem Bitumenkleber entsprechend der Definitionen in der Europäischen Technischen Bewertung aufgebracht. Die Verarbeitung kann also nach der gängigen Praxis mit vollflächig aufgebrachtem Klebstoff erfolgen, ermöglicht aber perspektivisch auch die Untersuchung von alternativen Verarbeitungen, bspw. mit Punkt-Wulst-Verklebung oder ohne Verspachtelung der Plattenstöße. Der Wasserdruck und die Wassertemperatur sowie die Temperatur auf der simulierten Innenseite sind regelbar.

Die Kammer enthält überdies auch eine Kiesschüttung zur Simulation des direkten Kontakts mit Erdreich. Während der Messung werden der Wärmestrom und der Temperaturgradient an der Dämmung gemessen. Aus diesen Daten lässt sich bereits im Betrieb eine ggf. vorhandene Änderung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung aufgrund erhöhter Feuchtegehalte, bzw. aufgrund eines Hinterlaufens der Dämmschicht feststellen. Nach definierten Zeiträumen kann das Material entnommen und die Wärmeleitfähigkeit, die Druckfestigkeit und der Feuchtegehalt bestimmt werden. Das Testszenario ermöglicht die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Perimeterdämmstoffen unter kontrollierten, realitätsnahen Bedingungen in Echtzeit und kann damit perspektivisch auch zur Validierung beschleunigter Verfahren zur künstlichen Alterung von Perimeterdämmstoffen verwendet werden.

3 Stand des Wissens

Im Folgenden wird der Stand des Wissens bzgl. regulatorischer Aspekte und Untersuchungen zur Feuchteaufnahme von Perimeterdämmstoffen zusammengefasst.

3.1 Aufgaben von Perimeterdämmstoffen und Anforderungen entsprechend der Anwendungsrandbedingungen

Die Perimeterdämmung kann auf der Außenseite von Wänden und unter der Bodenplatte des Kellergeschosses eines Gebäudes angebracht werden. Zweck ist es, die Konstruktion vor Frost und Tauwasser zu schützen und außerdem Wärmeverluste durch diese Bauteile zu begrenzen. Letzteres wird immer wichtiger, da der Keller heutzutage oft als zusätzlicher Wohnraum genutzt wird, was zu höheren Raumtemperaturen und damit zu erhöhten Anforderungen an den thermischen Komfort führt. Die Montage auf der Außenseite bietet im Vergleich zu einer prinzipiell möglichen Innendämmung mehrere Vorteile. Erstens werden Wärmebrücken minimiert, da durchgängige Schichten aus Dämmmaterial über die gesamte Außenwand bzw. Bodenplatte angebracht werden können, unterbrochen nur durch die (Streifen-)Fundamente des Gebäudes. Zweitens sind mögliche Abdichtungsmaßnahmen durch das Dämmmaterial mechanisch geschützt.

Aufgrund der Außenanbringung am Gebäudesockel ist die Perimeterdämmung konstanten mechanischen, hydraulischen und hygrischen Belastungen ausgesetzt. Konstante mechanische Lasten werden durch den verdichteten Boden und im Fall einer Dämmung unter der Bodenplatte durch das Gewicht des Gebäudes verursacht. Hydraulische Belastungen ergeben sich aus dem (ggf. zeitlich variablem) Wasserdruck. Hygrische Beanspruchung und die damit verbundene Feuchtezunahme über die Zeit können durch Flüssigwasser – sowohl drückendes als auch nicht drückendes Wasser – sowie durch den Diffusionsprozess (bedingt durch den Wasserdampfdruck) hervorgerufen werden.

Diese herausfordernden Einsatzbedingungen erfordern sehr robuste Dämmstoffe. Daher kann für die Perimeterdämmung nur ein eingeschränktes Materialspektrum verwendet werden. Am gebräuchlichsten sind extrudierte Polystyrolplatten (XPS) und Schaumglas (Cellular Glass, CG). Beide Materialien zeichnen sich durch eine geschlossene Zellstruktur aus, die das Eindringen von Wasser durch Flüssigwasser und diffusionsbedingte Prozesse verhindern soll und weisen zudem eine hohe Druckfestigkeit auf. Bei nicht drückendem Wasser können auch expandierte Polystyrolplatten (EPS) oder Polyurethanschaum (PU) eingesetzt werden.

3.2 Regulatorische Aspekte

Für Wärmedämmstoffe gelten in der Regel die harmonisierten Produktnormen (DIN EN 13162 bis DIN EN 13171), die Prüfverfahren für die wichtigsten

Eigenschaften im allgemeinen Anwendungsbereich enthalten. Für spezielle Anwendungen wie Perimeterdämmung können zusätzliche Eigenschaften notwendig sein, um die Leistungsfähigkeit des Produkts zu beschreiben, die in den entsprechenden Produktnormen (z.B. DIN EN 13164 für XPS) nicht erfasst sind. In diesem Fall kann für bestimmte Produkte eine alternative harmonisierte technische Spezifikation in Form einer Europäischen Technischen Bewertung (ETA) erteilt werden, basierend auf einem European Assessment Document (EAD). Für Perimeterdämmung aus XPS beschreibt der entsprechende EAD 040650-00-1201 Prüfverfahren für „Platten als tragende Schicht und/oder Wärmedämmung außerhalb der Abdichtung“. Zusätzlich zu den bereits in DIN EN 13164 enthaltenen Methoden sind speziellere Prüfverfahren zur Erfassung des Kriech- und Haftungsverhaltens von Produkten in Bezug auf die „Grundanforderung 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit“ enthalten, die relevant werden, wenn die Dämmung als tragende Schicht oder unter Bodenplatten eingesetzt wird.

Im Bereich nicht tragender Perimeterdämmung an Wänden gelten folgende Eigenschaften als besonders wichtig:

- Druckfestigkeit (CS) gemäß DIN EN ISO 29469
- Wasseraufnahme durch Langzeittauchen (WL(T)) gemäß DIN EN ISO 16535
- Feuchtaufnahme durch Diffusion (WD(V)) gemäß DIN EN ISO 16536
- Frost-Tauwechselbeständigkeit (FTC) gemäß DIN EN ISO 16546

Während es Aufgabe der Produktnorm oder einer ETA ist, die materialbezogenen Eigenschaften einheitlich zu beschreiben, definieren die nationalen Bauvorschriften anwendungsspezifische Anforderungen, die von den Produkten erfüllt werden müssen. Aufgrund unterschiedlicher Bauarten und Randbedingungen können diese Anforderungen in Europa variieren. So erlaubt zum Beispiel die deutsche Norm DIN 4108-2 die Verwendung von XPS und CG bei nicht drückendem Wasser und legt daher auch Mindestanforderungen an materialbezogene Eigenschaften dieser Materialgruppen in der DIN 4108-10 fest. Andererseits existieren für Anwendungen im drückenden Wasser solche Regelungen in den Normen nicht.

Basierend auf der Erfahrung der Bauaufsichtsbehörden können deshalb weitergehende Anforderungen sowohl an die Ausführung als auch an materialbezogene Eigenschaften definiert werden. Für die Anwendung von Perimeterdämmung im drückenden Wasser in Deutschland müssen die in Tabelle 1 aufgeführten Eigenschaften eingehalten werden.

Tabelle 1 Anforderungen an Perimeterdämmstoffe für den Einsatz im drückenden Wasser (in Anlehnung an Albrecht & Engelhardt 2018)

Material	CS	WL(T)	WD(V)	FTC	λ_d	Max. im- mersion depth in m
	in kPa	in Unit	in vol-%	In vol-%	in mW/(m.K)	
XPS	300 – 700	≤ 0.5 vol-%	≤ 3	≤ 2	35 – 41	$\leq 3.5 - 7$
CG	500 - 1000	≤ 0.5 kg/m ²	¹⁾	²⁾	42 - 52	≤ 12

¹⁾ keine Anforderungen, da praktisch diffusionsdicht

²⁾ keine Anforderungen, da intentionsgemäß keine Beanspruchung durch Frost-Tauwechsel

3.3 Literaturrecherche

Das Thema feuchteinduzierter Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften von Perimeterdämmungen wird in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt.

Treichler (1953) untersuchte die Feuchteaufnahme und den damit verbundenen Einfluss auf mechanische Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit von Proben aus Styropor, Blähglas, Korkplatten und Glasfaser, nachdem diese 400 Stunden lang in Wasser bei Raumtemperatur eingetaucht oder in einer Kammer bei hoher Luftfeuchte (Sättigungsbedingungen) und einer Temperatur von ca. 46 °C gelagert wurden. Er stellte fest, dass nach Tauchen in Wasser deutlich höhere Feuchtigkeitsgehalte erreicht wurden als bei Lagerung in hoher Luftfeuchte. Unter den getesteten Materialien zeigte Kork die höchsten Werte (ca. 14 Vol.-% nach Tauchen bzw. 5.5 Vol.-% bei hoher Luftfeuchte) und Blähglas die niedrigsten (ca. 3 Vol.-% nach Tauchen bzw. 1.5 Vol.-% bei hoher Luftfeuchte).

Bomberg (1983) verglich drei Laborverfahren zur Bestimmung der Feuchteaufnahme von Dämmstoffen – Tauchen, thermisch getriebene Feuchteaufnahme (Diffusionstests) und Frost-Tau-Wechsel. Er beschrieb mehrere Probleme bei den Tauchversuchen: Unterschiedliche Probekörpergrößen sind aufgrund des Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen nur begrenzt vergleichbar, und der Luftdruck beeinflusst die Feuchteaufnahme. Teil-Tauchtests könnten eine bessere Reproduzierbarkeit bieten, da der Einfluss der Tauchtiefe geringer ist. Allgemein nimmt die Feuchtigkeitsaufnahme mit zunehmender Wassersäule zu. Bei Diffusionstests sind Einflüsse durch Umkehrung der Diffusionsrichtung, Änderungen des Temperaturgefälles über die Materialdicke und das Abschotten einer Seite des Probekörpers nachweisbar. Bei Frost-Tau-Prüfungen wies er auf mögliche Einflüsse der Zyklusfrequenz, geometrische Effekte und die Bedeutung mechanischer Schäden an der Oberfläche hin.

Forgues (1983) berichtete über detaillierte Vergleiche der erwähnten Prüfverfahren an acht Dämmstoffen zusammen mit Felddaten nach 18 Monaten unterirdischer Perimeterbeanspruchung. Die Perimeterdämmung war in Form von 600 x 600 mm großen Proben an Teilen des Gebäudesockels zweier Bürogebäude installiert. Bei der vertikalen Anwendung lag die Oberkante auf Bodenniveau, bei der horizontalen Anwendung waren die Proben etwa 600 mm unter Geländeoberkante eingebaut. Der

Vergleich der Ergebnisse aus Tauch-, Diffusions- und Frost-Tau-Tests sowie der Feldexposition zeigte, dass sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen einem einzelnen Labortest und dem Verhalten unter realer Beanspruchung ableiten ließ. Als allgemeine Schlussfolgerung stellte der Autor fest, dass „der Feuchtegewinn in der Perimeterdämmung nicht durch einen einzigen Labortest genau vorhergesagt werden kann. Eine relative Leistungsbewertung ist nur anhand der Ergebnisse einer Kombination von Labortestmethoden möglich.“

Großkinsky und Künzel (1995) untersuchten die Auswirkungen von drückendem und nicht drückendem Wasser auf die Feuchtigkeitsaufnahme und die damit verbundenen Änderungen der Wärmeleitfähigkeit von Perimeterdämmung anhand eines Feldversuchs. Dazu wurde die Dämmung in einen speziellen Betonschacht eingebaut, der aus zwei getrennten Kammern mit jeweils ca. 3 m Tiefe bestand. Die Kammer, die den Innenraum repräsentierte, wurde beheizt, und in der Kammer mit der Dämmschicht wurden Erde und ein kontrollierter Wasserstand eingebracht. Mit Wärmestrommessplatten und Thermoelementen, die in der Bitumenkleberschicht zwischen Dämmung und Betonwand installiert waren, wurde die Wärmeleitfähigkeit über mehr als vier Jahre ermittelt. Aufgrund von Undichtigkeiten im Betonschacht wurde im Wesentlichen nur ein vergleichsweise geringer Wasserdruck von etwa 50 cm Wassersäule erreicht. Als Ergebnis wurden nur geringe Zunahmen der Wärmeleitfähigkeit im Zeitverlauf beobachtet. Außerdem wurden keine Unterschiede zwischen drückendem und nicht drückendem Wasser festgestellt. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit konnte die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit nicht eindeutig einer Wasseraufnahme zugeordnet werden.

Niu et al. (2021) untersuchten das Verhalten von extrudiertem Polystyrol (XPS) unter dem Einfluss von bis zu 400 Frost-Tau-Zyklen. In einer umfassenden Versuchsreihe wurden Proben des Materials wiederholt eingefroren und aufgetaut, um die Auswirkungen auf verschiedene physikalische Eigenschaften zu bewerten. Ermittelt wurden dabei die Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, uniaxiale Druckfestigkeit, der Elastizitätsmodul sowie das Kriechverhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wasseraufnahme und die Wärmeleitfähigkeit nur geringfügig durch die Frost-Tau-Zyklen beeinflusst wurden – die Wasseraufnahme stieg um lediglich 0.1 Vol.-%, die Wärmeleitfähigkeit veränderte sich nur minimal. Deutliche Veränderungen traten hingegen bei den mechanischen Kennwerten auf: Sowohl die Druckfestigkeit als auch das Elastizitätsmodul nahmen mit steigender Zyklenanzahl ab, wobei der größte Rückgang des Elastizitätsmoduls in den ersten 50 Zyklen beobachtet wurde. Das Kriechverhalten wurde als abklingendes Kriechen („decay creep“) klassifiziert und ließ sich gut mit einer exponentiellen Funktion beschreiben. Die Studie liefert damit Erkenntnisse über das Langzeitverhalten von XPS unter zyklischer Frost-Tau-Beanspruchung, insbesondere in Bezug auf mechanische Eigenschaften.

Molleti und Van Reenen (2022) untersuchten den Einfluss der Temperatur auf die langfristige Wärmeleitfähigkeit von geschlossenzelligen Dämmstoffen, insbesondere von Polyisocyanurat (PIR) und extrudiertem Polystyrol (XPS). In Laborversuchen wurden Proben bei drei unterschiedlichen Konditionierungstemperaturen (–10 °C, 23 °C

und 50 °C) gealtert, um den Einfluss auf die Alterungsprozesse durch Diffusion der Treibgase zu analysieren. Dabei zeigte sich, dass eine niedrigere Alterungstemperatur im Allgemeinen zu einer geringeren Veränderung der Wärmeleitfähigkeit über die Zeit führt. Für XPS konnte nach einer Äquivalentalterung von fünf Jahren bei 23 °C eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit um etwa 8–10 % festgestellt werden. Zudem zeigte sich bei XPS eine lineare Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der mittleren Prüftemperatur, mit einer Differenz von bis zu 23 % zwischen –10 °C und 40 °C. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Alterungstemperatur – insbesondere bei langfristigem Einsatz – einen bedeutenden Einfluss auf die thermischen Eigenschaften von Dämmstoffen haben kann. Da gängige Normen jedoch meist nur Messwerte bei einer einzigen Temperatur fordern, empfehlen die Autoren eine Aktualisierung der Standards, um temperaturabhängige Kennwerte systematisch zu erfassen.

Jiang et al. (2022) führten eine experimentelle Untersuchung zur Veränderung der Materialeigenschaften von XPS-Dämmplatten infolge von Frost-Tau-Wechseln (FTW) durch. In Laborexperimenten wurden über mehrere hundert FTW hinweg die Druckfestigkeit, die Wärmeleitfähigkeit sowie die volumetrische Wasseraufnahme der XPS-Proben analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Druckfestigkeit mit zunehmender Anzahl an FTW deutlich abnimmt – in Extremfällen um bis zu 33 %. Gleichzeitig nehmen sowohl die Wasseraufnahme als auch die Wärmeleitfähigkeit linear mit der Zahl der FTW zu. Die Wärmeleitfähigkeit stieg von ursprünglich 0.0329 W/(m·K) auf bis zu 0.0481 W/(m·K) an. Trotz dieser Veränderungen behielt das Material auch nach mehreren hundert FTW noch akzeptable dämmtechnische Eigenschaften. Zusätzlich wurde mittels numerischer Simulation die Eignung verschiedener Verlegemethoden des XPS in Tunnelbauwerken analysiert. Dabei zeigte sich, dass eine Oberflächenverlegung (SM) mit einer Mindestdicke von 6.5 cm besonders effektiv ist, um die Umgebungsgesteine vor Frost zu schützen. Für die Vermeidung von Frostschäden in der Sekundärverkleidung wurde eine Dicke von über 8.5 cm empfohlen. Die Studie liefert praxisrelevante Hinweise zur langfristigen Anwendung von XPS-Dämmungen im Tunnelbau unter Kälteklimabedingungen.

Leem et al. (2024) untersuchten die langfristige Stabilität von extrudiertem Polystyrol (XPS) unter dem Einfluss von Zeit und Wasserdampf, wobei auch phenolbasierter Hartschaum (PF) zum Vergleich herangezogen wurde. Der Fokus lag dabei auf physikalisch-chemischen Veränderungen, insbesondere im Hinblick auf Zellstruktur, Polymernetzwerk und chemische Zusammensetzung. Für XPS zeigte sich, dass die Zellstruktur im Laufe der Zeit heterogener wurde, jedoch keine signifikanten chemischen Veränderungen infolge von Wasserdampfeinwirkung festgestellt werden konnten. Auch die thermische Leitfähigkeit blieb unter feuchten Bedingungen weitgehend stabil. Im Gegensatz dazu wies PF deutliche strukturelle und chemische Veränderungen auf, insbesondere durch Hydrolyse und Polymerisation aus Rückständen. Die Ergebnisse bestätigen, dass XPS gegenüber feuchteinduzierter Degradation eine hohe Beständigkeit aufweist, was seine Eignung für langlebige Dämmanwendungen unter wechselnden Klimabedingungen unterstreicht.

Alvey et al. (2017) führten eine experimentelle Studie durch, um die Auswirkungen von Feuchtigkeit und Temperatur auf verschiedene Dämmmaterialien zu untersuchen, darunter drei Aerogel-Verbundmatten, zwei extrudierte Polystyrolschaumstoffe (XPS) und ein gespritzter Polyurethanschaum (PUR). Die Materialien wurden über fünf Wochen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen mit unterschiedlichen Feuchtigkeits- und Temperaturstufen (bis zu 65.6 °C und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit) getestet. Die wichtigsten Erkenntnisse für XPS sind, dass durch die Lagerung bei hoher relativer Luftfeuchte kein signifikanter Einfluss auf die thermische Leitfähigkeit besteht. Hohe Temperaturen führten sogar zu einer leichten Abnahme der Wärmeleitfähigkeit, vermutlich durch den Austausch von Gasen mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit im Material. Im Gegensatz dazu reagierten PUR-Schaum und einige Aerogelmatten empfindlich auf Feuchtigkeit, was zu einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und einer gewissen Degradation über die Zeit führte. Bei Aerogelmatten wurde zusätzlich festgestellt, dass hygroskopische Effekte und Volumenänderungen aufgrund von Feuchtigkeit und Temperatur eine Rolle spielen.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass XPS-Dämmstoffe hinsichtlich ihrer thermischen Leistung unter wechselnden Feuchtigkeitsbedingungen besonders stabil sind, was sie für Anwendungen in feuchtebeeinflussten Umgebungen attraktiv macht.

Kodippili et al. (2024) untersuchten die temperaturabhängige langfristige thermische Beständigkeit (LTTR) von geschlossenzelligen Dämmstoffen, darunter extrudierter Polystyrolschaum (XPS) sowie drei verschiedene Polyisocyanurat-Dämmstoffe (PIR). Ziel war es, den Einfluss verschiedener Konditionierungstemperaturen (−10 °C, 23 °C und 50 °C) auf die Wärmeleitfähigkeit über einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass XPS unter allen getesteten Bedingungen eine bemerkenswert konstante thermische Leistung aufwies. Die durch beschleunigte Alterung gewonnenen LTTR-Werte stimmten gut mit denen aus realer Langzeitlagerung überein, was auf eine hohe Dimensions- und Performance-Stabilität von XPS hinweist. Im Gegensatz zu den PIR-Dämmstoffen zeigte XPS keine ausgeprägte temperaturabhängige Abweichung in der thermischen Beständigkeit, selbst bei hohen oder niedrigen Alterungstemperaturen. Die Studie belegt, dass XPS gegenüber temperaturempfindlicher Alterung äußerst robust ist und liefert damit wichtige Erkenntnisse für die zuverlässige Langzeitanwendung geschlossenzelliger Schaumstoffe in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen.

Pontinha et al. (2023) untersuchten das thermomechanische Verhalten verschiedener Dämmstoffe, darunter extrudierter Polystyrolschaum (XPS), unter beschleunigten Alterungsbedingungen wie Trockenhitze, feuchter Hitze und Kältezyklen über 3 und 6 Wochen. Neben XPS wurden auch innovative, aerogelbasierte Verbundwerkstoffe mit recyceltem Gummi getestet. Die Studie zeigte, dass XPS zwar eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist, jedoch unter Kompression eine dauerhafte plastische Verformung erlitt und damit an mechanischer Rückstellfähigkeit verlor. Während sich bei den meisten Materialien die Wärmeleitfähigkeit nach Alterung nur leicht erhöhte – ein Effekt, der sich nach Trocknung weitgehend zurückbildete – blieb XPS in seiner thermischen Leistung vergleichsweise stabil. Jedoch nahm die Steifigkeit im Verlauf der Alterung auch bei XPS ab, was auf molekulare Veränderungen im Polymernetzwerk

hinweist. Insgesamt bestätigt die Studie, dass XPS hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit unter Feuchte- und Temperatureinfluss eine hohe Stabilität aufweist, jedoch mechanisch anfälliger für bleibende Verformungen ist. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, bei Anwendungen in extremen Klimazonen sowohl thermische als auch mechanische Alterungsprozesse zu berücksichtigen.

Die Auswertung der Literaturquellen unterstreicht den Neuheitscharakter des gewählten Forschungsansatzes. Abgesehen von Feldversuchen mit einem im Freiland aufgebauten, einseitig beheizten Betonschacht (vgl. Großkinsky und Künzel (1995)) sind keine Langzeituntersuchungen an einer praxisgerecht verklebten Perimeterdämmung unter kontrollierten Laborbedingungen bekannt.

4 Definition der Randbedingungen

Im Folgenden werden die Randbedingungen beim Einsatz von Perimeterdämmstoffen im drückenden Grundwasser beschrieben.

4.1 Flüssigwasserdruck

Die maximale Eintauchtiefe der Perimeterdämmung wird durch die Europäische Technische Bewertung festgelegt. Typische Werte liegen bei 3.5 m oder 7.0 m, was einem hydrostatischen Druck von ca. 0.343 bar, bzw. 0.686 bar entspricht. Der angegebene Wert bezieht sich jeweils auf die Unterkante der Dämmschicht – somit ist der Großteil der Dämmung einem geringeren hydrostatischen Druck ausgesetzt.

Die real vorliegende Eintauchtiefe eines bestimmten Abschnitts der Dämmung ergibt sich aus der Einbautiefe, also der Lage dieser Dämmschicht im Erdreich, und dem Grundwasserspiegel, der zudem jahreszeitlich periodisch oder beeinflusst durch singuläre Ereignisse (Hochwasser) schwanken kann.

Einflussfaktoren auf die generelle Höhe des Grundwasserspiegels sind geologische und hydrologische Gegebenheiten (Gesteins- bzw. Substratschichten) welche den Zu- und Ablauf beeinflussen sowie klimatische Bedingungen, insbesondere Niederschläge und Verdunstung. Auch die Bebauung und menschliche Eingriffe in die Umwelt können den Grundwasserspiegel beeinflussen. Allgemeine Informationen zum Grundwasserstand in Deutschland können dem hydrologischen Atlas von Deutschland entnommen werden.

Deutschland lässt sich demnach hydrogeologisch in fünf Regionen kategorisieren. Diese sind „Küste“, „Flachland und Lockergesteinsregionen“, „Deutsche Mittelgebirge“ und „Deutsche Alpen und Voralpen“. Abbildung 1 zeigt die Verteilung der genannten Grundwasserregionen in Deutschland und Abbildung 2 die Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen.

Es zu erkennen, dass ergiebige Grundwasservorkommen insbesondere in den Regionen der Kategorie „Flachland und Lockergesteinsregionen“ zu finden sind. Diese sind großräumig in Nord- und Süddeutschland zu finden sowie im Bereich des Oberrheingrabens und der niederrheinischen Bucht.

Daten zum Grundwasserstand werden an sogenannten Grundwassermessstellen ermittelt. Messstellen befinden sich in allen Bundesländern. Die Daten werden von den jeweiligen Landesämtern für Umwelt erhoben und statistisch aufbereitet. Der Grundwasserstand an einer bestimmten Messstelle wird dabei über sogenannte Ganglinien beschrieben. Neben dem Verlauf der Messwerte im betrachteten Zeitraum sind oft auch Hauptwerte aus langjährigen Reihen abrufbar.

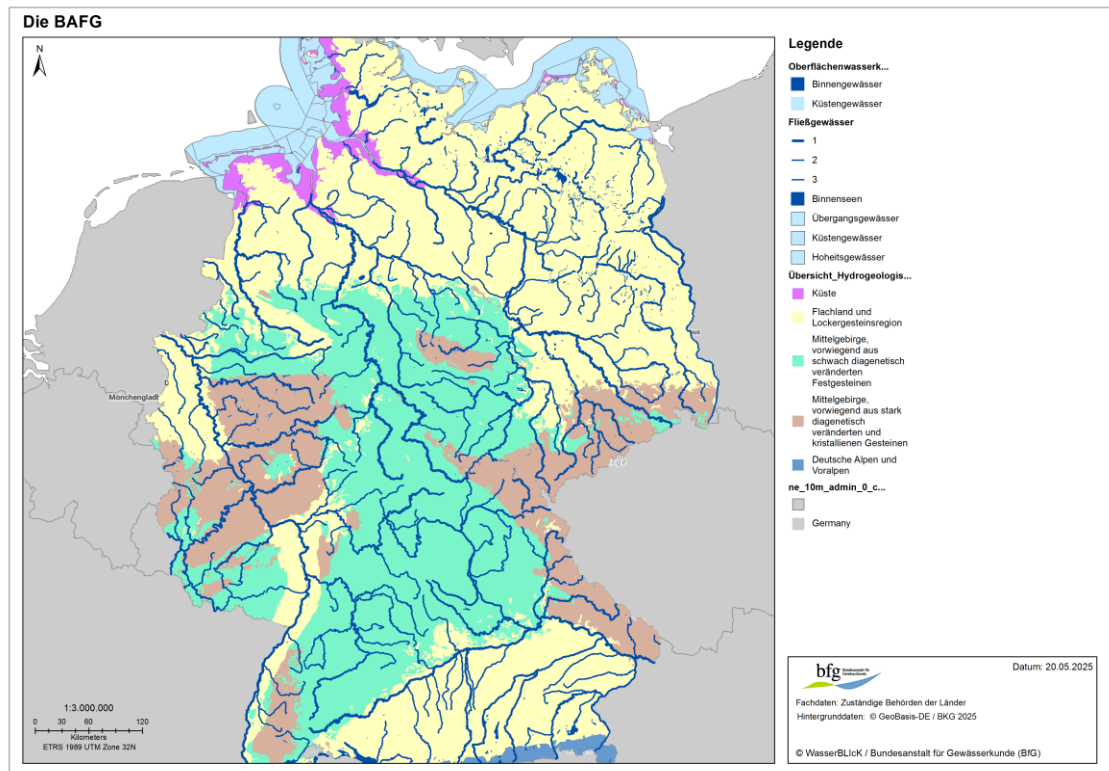


Abbildung 1 Kategorien von Grundwasserregionen in Deutschland. Eigene Darstellung erstellt mit (BfG, 2025)

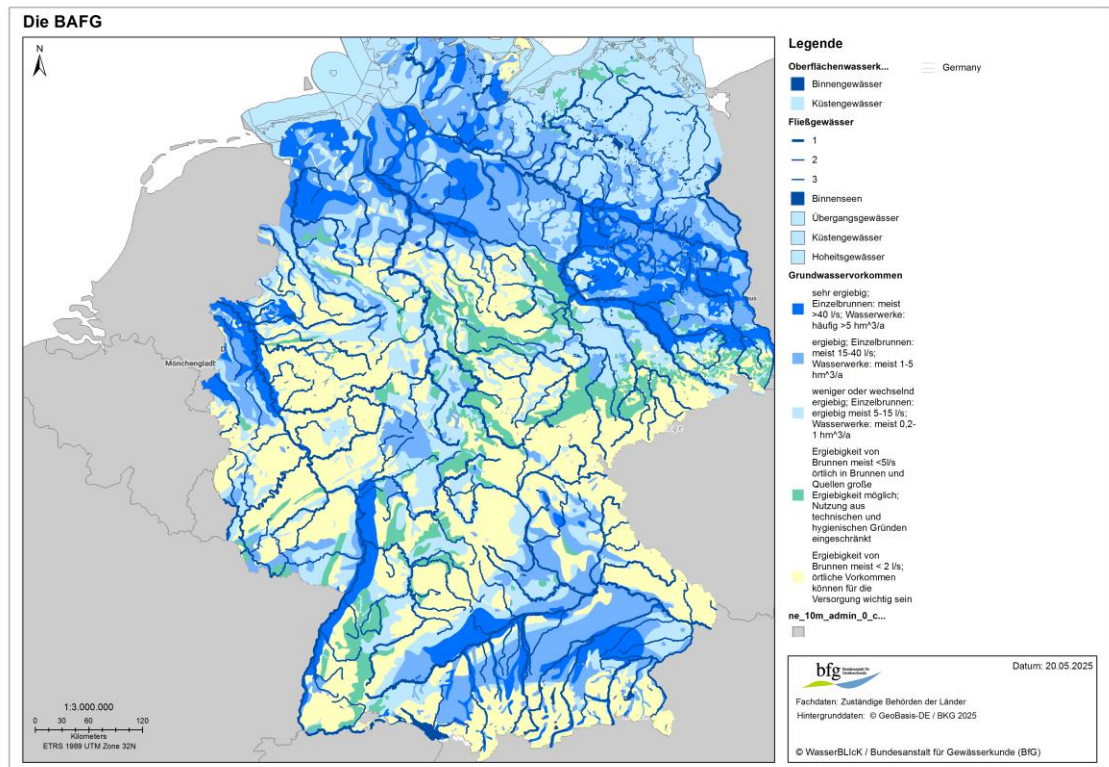


Abbildung 2 Grundwasservorkommen in Deutschland. Eigene Darstellung erstellt mit (BfG, 2025)

Wie in Abbildung 2 zu erkennen, ist Brandenburg ein Bundesland mit ergiebigem Grundwasservorkommen. Um einen Überblick über Schwankungen des Grundwasserspiegels zu erhalten wurden 18 Messstellen (Messkennzahlen (MKZ) siehe Tabelle 2) ausgewählt und die langjährigen Hauptwerte (Minimum = langjähriger Niedrigstwasserstand, Mittel = langjähriges Mittel, Hoch = langjähriger Höchstwasserstand) ausgewertet.

Tabelle 2 Grundwasserspiegel unterhalb der Geländeoberkante an 18 exemplarisch ausgewählten Standorten in Brandenburg, Deutschland [LFU Brandenburg]

Grundwasserspiegel unterhalb der Geländeoberkante ¹⁾ in m	Niedrig	Mittel	Hoch	Differenz
Minimum	-	1.4	-	-
Maximum	-	15.2	-	-
Mittelwert	4.3	3.7	2.6	1.8
Median	3.0	2.3	1.4	1.9

¹⁾ MKZ 43526000, 43453538, 42517005, 39506107, 39423103, 38451389, 38510161, 37441853, 35490289, 33520968, 33480246, 33427310, 31481994, 29490617, 29510999, 28453495, 29370009, 26390040

Der Median der langjährigen mittleren Grundwasserstände über alle Messstellen hinweg liegt demnach bei 2.3 m unter Geländeoberkante (GOK) und der Median der Höchstwerte bei 1.4 m unter GOK. Die Differenz zwischen dem langjährigen Niedrigst- und Höchstwasserstand liegt im Schnitt bei 1.9 m. Bei einer Betrachtung der Mittelwerte verschieben sich die Werte in Richtung tieferer Grundwasserstände, was auf eine rechtsschiefe Verteilung der Werte hindeutet.

Abhängig von Einzelereignissen wie Trockenperioden oder Starkregen in Kombination mit Schneeschmelze kann das Niveau des Grundwasserspiegels temporär auch deutlich unter oder über den langfristigen Mittelwerten liegen.

Ein Beispiel für ein extremes, singuläres Hochwasserereignis sind die Überschwemmungen aufgrund von anhaltendem Starkregen in Schwaben, Anfang Juni 2024. Regional fielen dort innerhalb von vier Tagen Regenmengen von 100 – 200 l/m², lokal bis zu 300 l/m² an. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Jahresganglinien der Messstelle Tafertshofen in der Nähe des Flusses Günz.

Die in der Graphik lila markierte Jahresganglinie zeigt den extremen Hochstand des Grundwassers Anfang Juni 2024, der im Vergleich zum langjährigen Mittel um ca. 2.2 m erhöht ist.

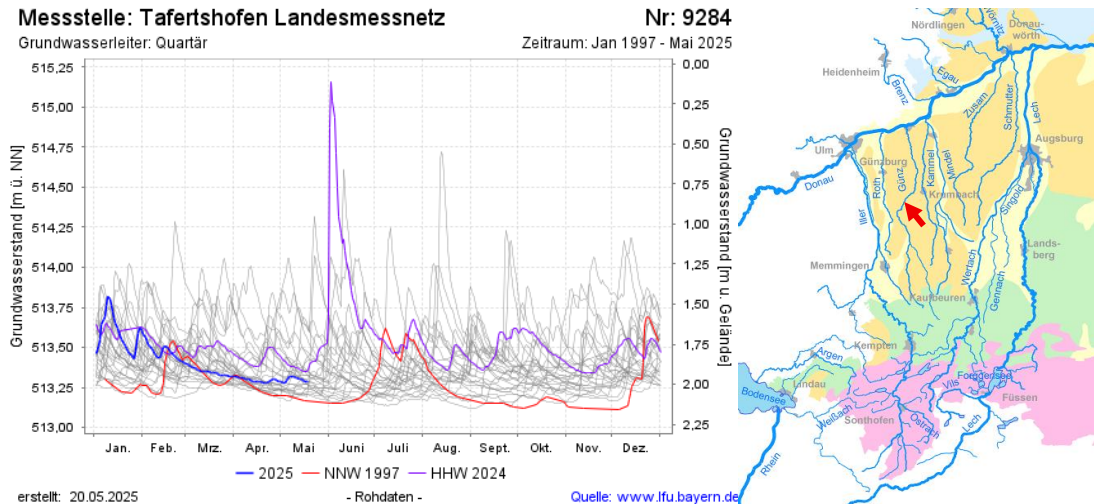


Abbildung 3 Links: Jahresganglinienvergleich der Messstelle Tafertshofen; Rechts: Übersicht der zugehörigen Grundwasserregion Iller-Lech-Bodensee mit Markierung der Messstelle Tafertshofen (roter Pfeil) [LfU (2025)]

Die an einem konkreten Standort vorliegende Grundwassersituation ist stets individuell und kann von großen oder kleinen Schwankungen sowie einem allgemein hohen oder niedrigem Niveau des Grundwasserstands gekennzeichnet sein. Für die Entwicklung eines hinsichtlich der zu erwartenden zunehmenden Häufigkeit von Hochwassern aufgrund von Starkregenereignissen auf der sicheren Seite liegenden Prüfverfahrens, bleibt zu überlegen inwieweit auch eine kurzzeitige Überschreitung der maximalen Eintauchtiefe abgebildet sein sollte.

Hierzu wäre zunächst zu konkretisieren auf welchen Wasserstand sich die maximale Eintauchtiefe gemäß der Europäischen Technischen Bewertung bezieht. Konkrete Angaben mit Bezug auf den Bemessungsgrundwasserstand (HGW), bzw. den Bemessungshochwasserstand (HHW) finden sich nur mit Verweis auf die Sicherung gegen Auftrieb.

Wie gezeigt kann aus exemplarisch ausgewerteten Daten eine durchschnittliche (oft jahreszeitlich periodische) Schwankung von ca. ± 1 m und eine extreme singuläre Erhöhung von +2 m gegenüber dem langjährigen Mittel abgeschätzt werden. Bezieht man die maximale Eintauchtiefe auf den langjährigen Höchststand bleiben also ca. 1 m Überschreitung der Eintauchtiefe als realistisches Szenario im Falle von singulären Extremwetterereignissen die in einem Prüfzenario abgebildet werden könnten.

Auch wenn nicht davon auszugehen ist, dass während eines verhältnismäßig kurzen Zeitraums der Überschreitung der maximalen Eintauchtiefe ein nennenswerter Einfluss auf die Flüssigwasseraufnahme geschlossenzelliger Hartschaumstoffe auftritt, so kann durch den erhöhten Wasserdruck aber durchaus die Gefahr eines initialen Hinterlaufens der Dämmung erhöht werden.

4.2 Bodentemperaturen

Im Grundsatz folgt die Bodentemperatur der Lufttemperatur im Jahresverlauf mit einer Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung, wird aber auch von den im Boden ablaufenden physikalischen und chemischen Reaktionen beeinflusst. Einfluss auf die Bodentemperatur haben neben der Lufttemperatur vor allem die Bodenart, der Bewuchs, Wärmeeinträge und -austräge durch Strahlung, der Wassergehalt sowie Verdunstungsprozesse. Auch eine im Winter vorhandene Schneedecke wirkt sich auf die Bodentemperaturen aus. Je tiefer die gemessene Bodenschicht liegt, umso gleichmäßiger und von den äußeren, lokal und zeitlich veränderlichen Einflussfaktoren unabhängiger, sind die Ergebnisse.

Für eine exemplarische Auswertung der Bodentemperaturen in unterschiedlichen Tiefen werden Messdaten der Säkularstation Potsdam ausgewertet. Die Säkularstation Potsdam befindet sich im Südwesten der Stadt Potsdam auf dem Telegrafenberg in einer Höhe von 81 m. An diesem Standort werden seit 1894 unter bis heute weitgehend unveränderten Randbedingungen Bodentemperaturen erfasst. Dabei ist auch zu erkennen, dass die Bodentemperaturen der allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgen [Böhme und Böttcher 2011].

Abbildung 4 zeigt die Temperaturverteilung in unterschiedlichen Tiefen, ermittelt an der Säkularstation Potsdam über ein Jahr (exemplarisch im Jahr 2005) [Böhme und Böttcher (2011)].

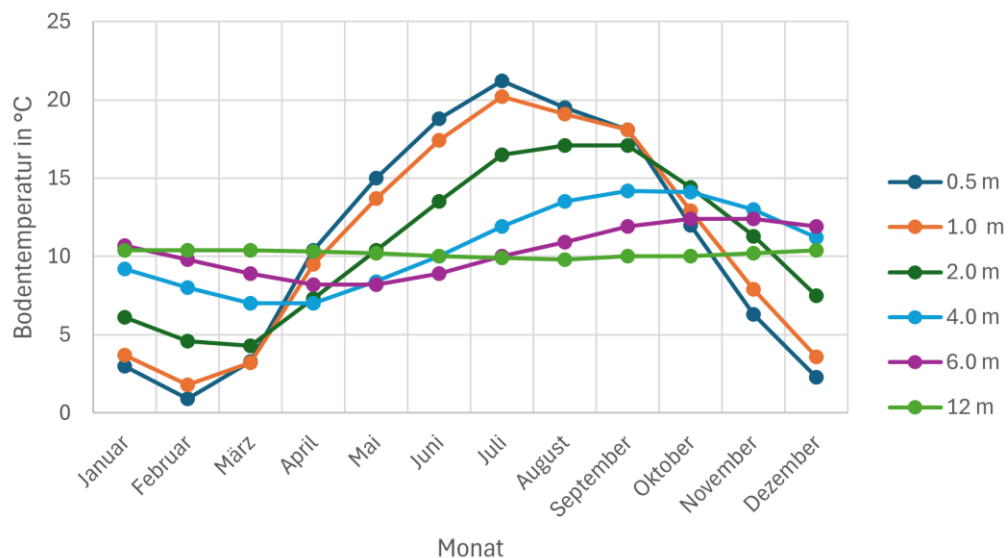


Abbildung 4 Monatliche Bodentemperaturen in Abhängigkeit von der Einbautiefe gemäß [Böhme und Böttcher 2011]

Die Datenpunkte stellen Monatsmittelwerte in den jeweiligen Tiefen dar. Die Darstellung mit linear interpolierten Zwischenwerten, dient zunächst lediglich der Verdeutlichung des Verlaufs.

Um für alle interessierenden Einbautiefen repräsentative Werte zu erhalten, wurden die Daten aufbereitet. Die vorgestellte Systematik kann auch auf andere Datensätze zu Bodentemperaturen auf Basis von Monatsmittelwerten angewendet werden.

Das Ziel ist die Ableitung in sich geschlossener, stetiger Jahrestemperaturverläufe für Tiefen von 1.0 m, 1.75 m, 3.5 m und 7.0 m. Hierfür wurden zunächst die vorhandenen Temperaturdaten als monatliche Mittelwerte in einer Tiefe von 0.5 m – 12 m gemäß Tabelle 3 ausgewertet.

Die statistische Auswertung zeigt, dass die Mittelwerte der Bodentemperatur über das Jahr hinweg in den betrachteten Tiefen von 0.5 m – 12 m nahezu konstant sind. Das arithmetische Mittel sinkt von ca. 10.9 °C (0.5 m) auf ca. 10.2 °C (12 m). Erwartungsgemäß zeigt der Median eine etwas höhere Varianz mit Werten von ca. 11.2 °C (0.5 m) auf ca. 10.2 °C (12 m). Dies spiegelt die höhere Varianz der Bodentemperatur in oberflächennahen Schichten wider. Eine deutliche Abhängigkeit von der Einbautiefe zeigt die Spanne der Temperaturänderung. Diese nimmt mit zunehmender Einbautiefe deutlich ab. Die Werte bei 12 m Einbautiefe schwanken nur noch mit ca. 0.6 °C um den Mittelwert, während die Werte bei 0.5 m Einbautiefe noch eine Spanne von 20.3 °C aufweisen.

Tabelle 3 Temperaturdaten in einer Tiefe von 0.5 m, 1 m, 2 m, 4 m, 6 m und 12 m gemäß [Böhme und Böttcher 2011]

Tiefe	Temperatur in °C					
	0.5 m	1.0 m	2.0 m	4.0 m	6.0 m	12 m
Januar	3	3.7	6.1	9.2	10.7	10.4
Februar	0.9	1.8	4.6	8.0	9.8	10.4
März	3.3	3.2	4.3	7.0	8.9	10.4
April	10.4	9.5	7.3	7.0	8.2	10.3
Mai	15	13.7	10.4	8.4	8.2	10.2
Juni	18.8	17.4	13.5	10.0	8.9	10
Juli	21.2	20.2	16.5	11.9	10.0	9.9
August	19.5	19.1	17.1	13.5	10.9	9.8
September	18.1	18.1	17.1	14.2	11.9	10
Oktober	12	12.9	14.4	14.1	12.4	10
November	6.3	7.9	11.3	13.0	12.4	10.2
Dezember	2.3	3.6	7.5	11.2	11.9	10.4
Min	0.9	1.8	4.3	7.0	8.2	9.8
Max	21.2	20.2	17.1	14.2	12.4	10.4
Spanne	20.3	18.4	12.8	7.2	4.2	0.6
Mittelwert	10.9	10.9	10.8	10.6	10.4	10.2
Median	11.2	11.2	10.9	10.6	10.4	10.2
Standardabw.	7.6	6.9	4.8	2.7	1.6	0.2

Das beschriebene, für die Bodentemperatur in Abhängigkeit der Tiefe charakteristische Verhalten, wird auch bei einer Darstellung der Bodentemperatur je betrachtetem Monat in Abhängigkeit der Einbautiefe deutlich (Abbildung 5). Hierbei ergibt sich eine

über der Tiefe trichterförmige Darstellung. Die Schwankungsbreite der Temperatur je Monat wird mit zunehmender Einbautiefe geringer.

Um für die interessierenden Einbautiefen charakteristische, sinusförmige Funktionsverläufe zu erhalten, werden zunächst Stützstellen als Monatsmittelwerte benötigt. Diese können aus der Darstellung der Messwerte gemäß Abbildung 5 gewonnen werden, da der sich ergebende Verlauf der Monatsmitteltemperatur je Einbautiefe im vorliegenden Fall mit sehr guter Näherung einem Polynom 3. Grades folgt. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße R^2 liegen zwischen 0.98 – 1.00. Der Ansatz erfolgt gemäß Formel (1).

$$T_m(ET) = a \cdot ET^3 + b \cdot ET^2 + c \cdot ET + d \quad (1)$$

Mit

T_m = Monatsmitteltemperatur

ET = Einbautiefe

a, b, c, d = Koeffizienten

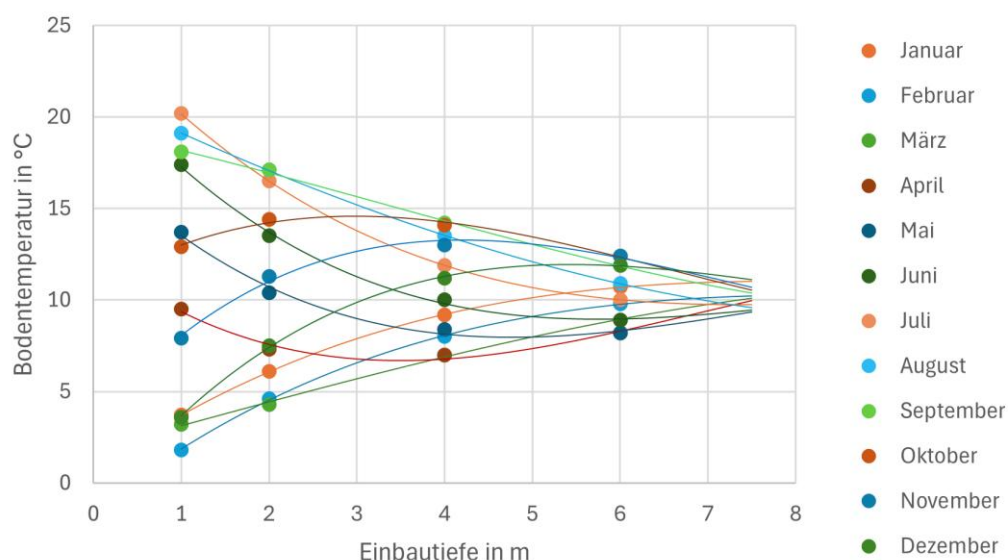


Abbildung 5 Bodentemperaturen je Monat in Abhängigkeit der Einbautiefe. Darstellung der Stützstellen (Datenpunkte) und Ausgleichsfunktionen als Polynom 3. Grades gemäß Tabelle 4

Die ermittelten Koeffizienten zeigt Tabelle 4. Die Bestimmtheitsmaße R^2 mit Werten zwischen 0.98 – 1.00, belegen die hohe Anpassungsgüte des Ansatzes aus Formel (1).

Tabelle 4 Koeffizienten zur Interpolation von Monatsmittelwerten der Bodentemperatur in Abhängigkeit der Tiefe auf Basis von Messdaten gemäß Tabelle 3

Monat	a	b	c	d	R ²
Januar	0.0111	-0.3419	3.3128	0.7295	1.00
Februar	0.0138	-0.3966	3.7698	-1.5467	1.00
März	-0.0049	0.0095	1.3065	1.8234	1.00
April	-0.0344	0.7037	-3.6613	12.3585	0.98
Mai	-0.0319	0.7296	-4.7826	17.6273	0.99
Juni	-0.0310	0.7552	-5.6180	22.1858	1.00
Juli	-0.0227	0.6148	-5.3657	24.9671	1.00
August	0.0031	0.0740	-2.2978	21.3383	1.00
September	0.0097	-0.0982	-0.9964	19.2575	1.00
Oktober	0.0315	-0.6228	2.8731	10.7078	0.99
November	0.0416	-0.9002	5.3615	3.5432	0.99
Dezember	0.0351	-0.8390	6.0034	-1.5448	1.00

Die so ermittelten Stützstellen (monatliche Mittelwerte) für beliebig wählbare Einbautiefen, müssen nun mit einer stetigen, im Jahresverlauf sich periodisch wiederholenden Funktion ausgeglichen werden. Im vorliegenden Fall bieten sich Sinusverläufe an. Gewählt wurde ein Ansatz gemäß Formel (2). Die Koeffizienten a, b und c verschieben, bzw. stauchen oder strecken die Funktion. Die Periodendauer des Sinus von 2π wurde einheitlich auf 365 Tage skaliert, um beim Übergang von Dezember auf Januar einen stetigen Temperaturverlauf zu garantieren, obwohl sich durch eine veränderliche Streckung in x-Achse eine Verbesserung der Anpassung erzielen ließe.

$$T(t) = (\sin(t + a) \cdot b) + c \quad (2)$$

Mit

$T(t)$ = Bodentemperatur als Funktion der Zeit

t = Zeit in Tagen

a, b, c = Koeffizienten

Tabelle 5 Koeffizienten zur Ermittlung der Bodentemperatur als stetige und periodische Funktion für unterschiedliche interessierende Einbautiefen, exemplarisch ermittelt aus Daten gemäß [Böhme und Böttcher 2011]

ET in m	a	b	c
1.0	0.0111	-0.3419	3.3128
1.75	0.0138	-0.3966	3.7698
3.5	-0.0049	0.0095	1.3065
7.0	-0.0344	0.7037	-3.6613

Abbildung 6 zeigt die Stützstellen sowie Ausgleichsfunktionen für eine Auswahl möglicher Einbautiefen von 1.0 m bis 7.0 m.

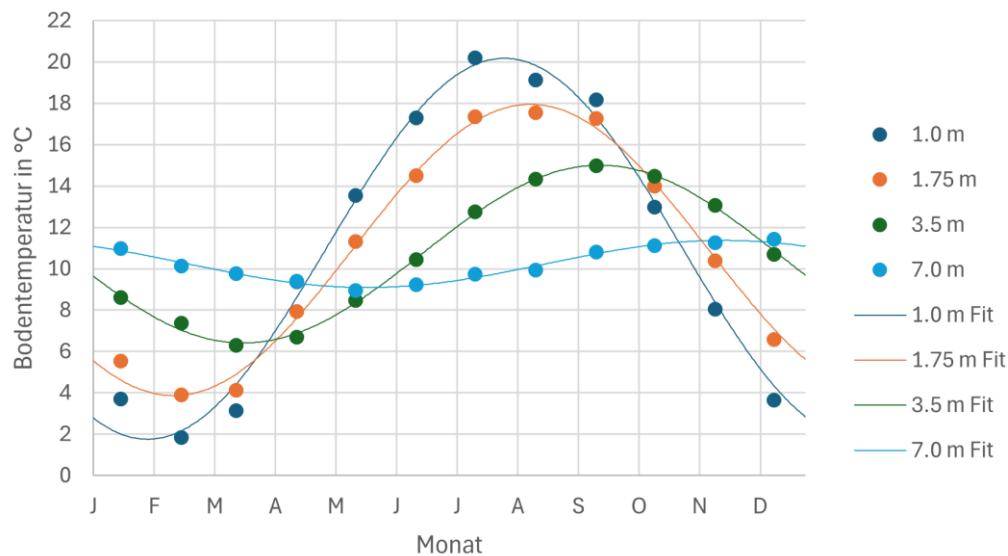


Abbildung 6 Ermittelte, stetige und periodische Funktionsverläufe der Temperatur für unterschiedliche interessierende Einbautiefen, exemplarisch ermittelt aus Daten gemäß [Böhme und Böttcher 2011]

4.3 Mechanische Belastung

Die mechanischen Beanspruchungen auf eine Perimeterdämmung im erdberührten Bereich ergeben sich aus einer Vielzahl potenzieller Lastsituationen. Zu den wichtigsten Einwirkungen zählen der seitlich anstehende Erddruck, mögliche Grund- oder Stauwasserdrücke, Verkehrslasten an der Oberfläche, sowie Zusatzlasten durch benachbarte Gebäude oder punktuelle Beanspruchungen durch grobkörniges Verfüllmaterial wie Kies. Auch besondere Situationen wie Hanglagen oder die Nähe zu größeren Einzelgewichten – etwa Bäume oder technische Einrichtungen – können sich auf die Belastungssituation auswirken. Insgesamt ergibt sich der anliegende Druck aus einer Überlagerung dieser Einwirkungen, wobei deren räumliche Lage, Ausdehnung, Entfernung sowie die Eigenschaften des Bodens und der eingebauten Materialien maßgeblich sind.

Der dominierende Bestandteil dieser Beanspruchung ist in der Regel der Erddruck. Dieser ergibt sich aus dem Eigengewicht des über der Dämmung liegenden Bodens und wirkt horizontal auf die vertikale Wandfläche. Die vertikale Spannung im Boden wächst linear mit der Tiefe und ist abhängig von der Wichte γ (kN/m³) des Materials. Die vertikale Spannung in einer Tiefe z ergibt sich zu: $\sigma_v(z) = \gamma \cdot z$. Um aus dieser vertikalen Spannung die seitlich wirkende horizontale Spannung σ_h zu bestimmen, wird sie mit einem Erddruckbeiwert K multipliziert: $\sigma_h = K \cdot \sigma_v$.

In den meisten Fällen im Kellerbereich geht man von Erdruchedruck aus. Der Erddruckbeiwert für den ruhenden Zustand (K_0) hängt maßgeblich vom Reibungswinkel φ des Bodens ab. Für nichtbindige Böden wie Sande oder Kiese kann er näherungsweise nach der Jaky-Formel mit $K_0 = 1 - \sin(\varphi)$ berechnet werden. Der horizontale Erddruck in einer Tiefe z beträgt dann: $\sigma_h(z) = K_0 \cdot \gamma \cdot z$

Dabei ist zu beachten, dass sich der Erddruck kontinuierlich über die Tiefe aufbaut und daher trapezförmig an der Wand verteilt ist – mit dem höchsten Wert in der maximalen Tiefe. Für homogene Böden kann dieser Aufbau einfach berechnet werden. In der Realität bestehen Böden jedoch häufig aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Dichten und Reibungswinkeln. Die jeweils vorliegende vertikale Spannung ergibt sich daher aus der Summe aller darüberliegenden Schichtgewichte. Für jede dieser Tiefen ist entsprechend der horizontale Druck separat zu berechnen, jeweils unter Verwendung des Erddruckbeiwerts der Schicht, in der sich der betrachtete Punkt befindet.

Tabelle 6 Anhaltswerte für den Erdruhedruck in kN/m^2 für verschiedene Bodenarten in Abhängigkeit der Einbautiefe (Quelle: FPX (2013))

ET in m	Ton und Schluff	Sand, Kies-Sand	Kies, Geröll
3	39	36	23
6	75	69	44
9	112	102	66
12	148	135	87
15	184	168	108

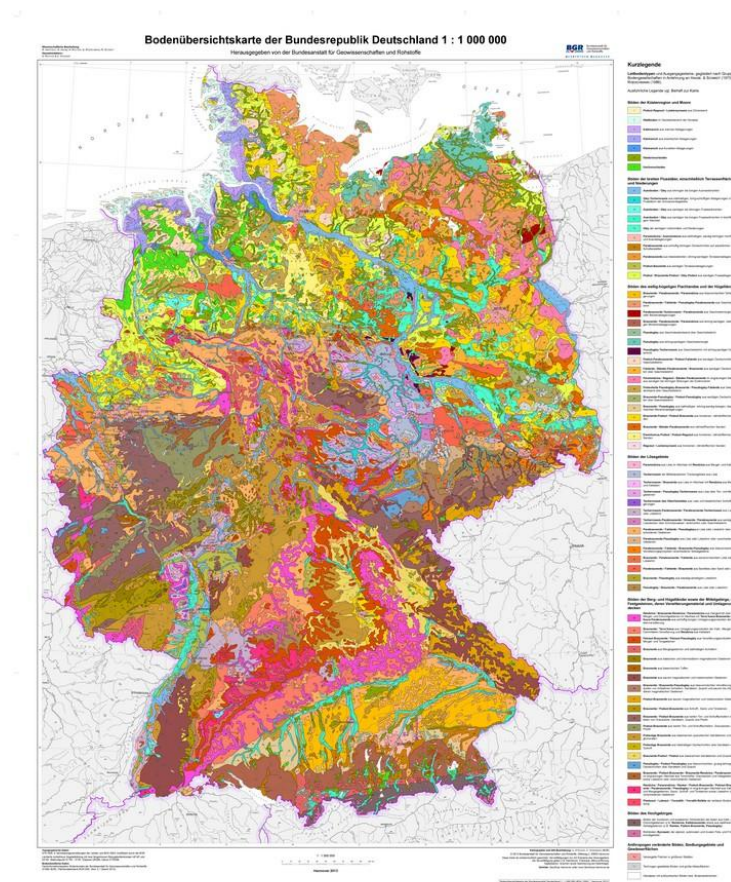


Abbildung 7 Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: BGR)

Abbildung 7 zeigt die großräumige Verteilung verschiedener Bodenarten in Deutschland. Deutlich wird die enorme Heterogenität der natürlichen Untergründe, die bereits auf dieser Maßstabsebene sichtbar ist. Noch ausgeprägter zeigt sich diese Vielfalt auf kleinräumiger Ebene, da sich Bodenverhältnisse oft selbst innerhalb weniger Meter stark unterscheiden können. Für Bauprojekte bedeutet dies, dass die tatsächlichen bodenmechanischen Eigenschaften eines Standorts nur über gezielte Bodenaufschlüsse, Sondierungen und Laborversuche zuverlässig ermittelt werden können. In der Praxis sind Schichtfolgen oft sehr inhomogen, was die präzise Bestimmung von Erddruckverhältnissen an Perimeterdämmungen erheblich erschwert.

Ungünstige Konstellationen ergeben sich dann, wenn schwere, Böden mit hoher Wichte auf lockere, wenig bindige Schichten treffen. An diesen Übergängen entstehen hohe vertikale Spannungen, die über einen hohen K_0 -Beiwert nahezu vollständig in horizontal wirkenden Druck umgewandelt werden können. Solche Szenarien sind in der Planung besonders zu berücksichtigen, da die resultierenden Beanspruchungen deutlich über denen eines homogenen Bodenaufbaus liegen können.

Zudem können durch grobkörniges Verfüllmaterial wie Kies punktuelle Lastspitzen entstehen, wenn einzelne Körner direkt gegen die Dämmung drücken, was zu lokal erhöhten Spannungen führt. Da das Langzeitkriechverhalten von Perimeterdämmstoffen in DIN EN ISO 16534 gut beschrieben ist, stellt sich die Frage, ob die Punktlasten einzelner Kiespartikel die Oberfläche der Dämmung in realistischer Weise beanspruchen können. Abbildung 8 zeigt die Oberfläche eines Prüfkörpers, der in einem der ersten Versuche über mehrere Wochen in dem Perimeterprüfstand eingebaut war. Die Kiesschicht (Korngröße 16/32) hatte eine Höhe von ca. 10 cm. Nach der Entnahme des Prüfkörpers zeigten sich deutliche Vertiefungen sowie auch vereinzelte Risse in der Oberfläche. Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit der Beschreibung natürlich bewitterter XPS-Perimeterdämmung [Großkinsky (1998)].



Abbildung 8 Links: Prüfkörper mit durch bituminösen Kleber gefüllten Fugen nach mehrwöchigem Einbau in eine Prüfkammer gemäß Kapitel 7; Rechts: Beschädigte Oberfläche mit Vertiefungen und gelegentlichen Rissen in der Deckschicht, verursacht durch Punktlasten des angrenzenden Erdreichs.

Die sichtbaren Beschädigungen an der Oberfläche, insbesondere die Risse, stellen eine Verletzung der Schäumhaut dar. Wie in Kapitel 5.1 gezeigt wird, bestehen

Unterschiede zwischen der Flüssigwasseraufnahme durch die Schäumhaut und dem angeschnittenen Kernbereich der XPS-Dämmstoffe. Gleiches gilt für die Diffusionswiderstände. Die partiellen Verletzungen der Schäumhaut können deshalb zu einer erhöhten Feuchtaufnahme des Dämmstoffs führen, und damit ggf. auch die wärmetechnischen Eigenschaften der XPS-Platten beeinflussen.

5 Abschätzungen zur Wasseraufnahme aufgrund kombinierter Beanspruchung durch Flüssigwasserdruck und Wasserdampfdiffusion

Im Folgenden werden exemplarische Versuche zur Abschätzung der Wasseraufnahme aufgrund von Flüssigwasserdruck und Wasserdampfdiffusion beschrieben. Alle Versuche wurden mit XPS eines einheitlichen Typs, aber teilweise aus unterschiedlichen Chargen durchgeführt.

5.1 Wasseraufnahme bei erhöhtem Wasserdruck

Aktuell gibt es kein genormtes Prüfverfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahme von Dämmstoffen bei erhöhtem Wasserdruck. DIN EN ISO 16535 bestimmt die Wasseraufnahme bei langzeitigem, teilweisem oder vollständigem Eintauchen. Bei dem Verfahren mit vollständigem Eintauchen sollen die Proben mit ihrer Oberseite 5 cm unter Wasser getaucht sein, wodurch sich kein nennenswerter hydrostatischer Druck aufbaut.

Um die Wasseraufnahme von Proben bei erhöhtem Wasserdruck zu untersuchen, stand ein Druckbehälter zur Verfügung (Abbildung 9). Die Proben wurden in einem Probenhalter fixiert und in dem mit Wasser gefüllten Druckbehälter installiert. Der Druckbehälter wurde anschließend mit Wasser geflutet. Der gewünschte Wasserdruck wurde über ein Manometer mit Druckluft eingestellt. Um die Wasseraufnahme zu untersuchen, wurde der Behälter zyklisch geöffnet, die Proben entnommen, mit Laborpapier vorsichtig abgetupft und auf 0.01 g genau gewogen.

Mit der Apparatur wurden Versuche an XPS-Proben mit den für die langfristige Wasseraufnahme typischen Maßen von 200 x 200 x Dicke [mm] bei unterschiedlichen, erhöhten Wasserdrücken durchgeführt. Um zu überprüfen, inwieweit die Ergebnisse von der Wasseraufnahme durch die angeschnittenen Randbereiche beeinflusst sind, wurden zusätzlich orientierende Versuche an runden Proben mit einem Durchmesser von ca. 100 mm und druckstabilem Randverguss durchgeführt. Zur Herstellung dieser Probekörper wurden einige Vorversuche unternommen.

Um eine absolut wasserdichte und druckstabile Randabdichtung zu erreichen, wurden die Proben in Kunststoffrohre eingegossen. Ein preisgünstiger Ansatz ist die Verwendung von KG-Rohren, die in unterschiedlichen Durchmessern erhältlich sind. Zunächst war geplant, Proben mit voller Dicke in ein KG-Rohr DN 100 einzugießen und auf einer Seite mittels einem Abschlussstopfen wasserdicht zu verschließen.

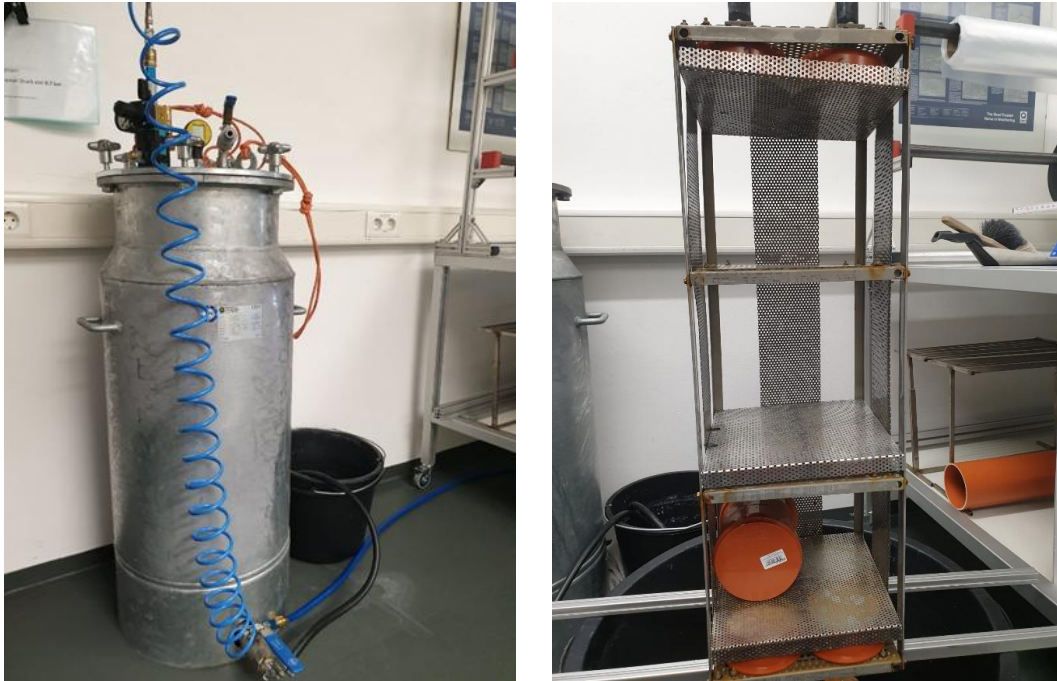


Abbildung 9 Links: Druckbehälter zur Unterwasserlagerung von Proben bei erhöhtem Druck; Rechts: Probenhalter

Um zu überprüfen, ob sich durch die Verwendung eines handelsüblichen Abschlussstopfens ein bei den geplanten Wasserdrücken wasserdichter Verschluss herstellen lässt, wurde zunächst ein leeres KG-Rohr mit Abschlussstopfen auf beiden Seiten und einer kleinen Menge Trockenmittel in der Drucktonne gelagert. Dabei zeigte sich, dass die Wiegeergebnisse von den in den Zwickeln zwischen Abschlussstopfen und KG-Rohr enthaltenen Wassertropfen beeinflusst wurden, die nicht sinnvoll abgetupft oder anderweitig entfernt werden konnten. Aufgrund der zu erwartenden, insgesamt geringen Wasseraufnahme wurde der entstehende Wiegefehler als kritisch eingestuft.

In einem zweiten Ansatz wurden deshalb Proben in Muffenstopfen von KG-Rohren eingelegt und vergossen. Hierdurch entstehen Probekörper mit einer nach außen hin geschlossenen Oberfläche ohne Hinterschneidungen. Diese Proben können vor dem Wiegen mittels Laborpapier abgetupft werden, so dass die Massenzunahme, dem in den Zellstrukturen eingelagerten Wasser entspricht und nicht von außen anhaftenden Wassertropfen bestimmt ist. Durch die Verwendung von Muffenstopfen als druckstabile Randbegrenzung ergab sich jedoch eine Beschränkung in der Höhe der Proben von 35 mm. Für die durchgeführten Versuche ergeben sich hieraus keine Einschränkungen in der Aussagekraft, da die Wasseraufnahme erwartungsgemäß auf die ersten Zellreihen beschränkt bleibt. Grundsätzlich könnten mit dem gleichen Ansatz auch Versuche an Proben mit voller Dicke durchgeführt werden. Hierzu müssten geeignete, einseitig geschlossene Kunststoffrohre (z. B. aus Polycarbonat) verwendet werden. Die Verwendung von transparenten Probenhaltern, würde überdies die Kontrolle evtl. Randleckagen ermöglichen. Nachteilig sind die zu erwartenden höheren Kosten der Kunststoffrohre, die nicht wiederverwendet werden können; zudem

wird das Verhältnis der Masse der gesamten Probe (Dämmstoffzylinder, Kunststoffrohr und Vergussmasse) zur erwarteten Wasseraufnahme ungünstiger.

Abbildung 10 zeigt die Maße und die Herstellung der Proben mittels CNC-Fräse. Die Proben wurden anschließend mittels einer Bandsäge aus der Platte herausgetrennt.

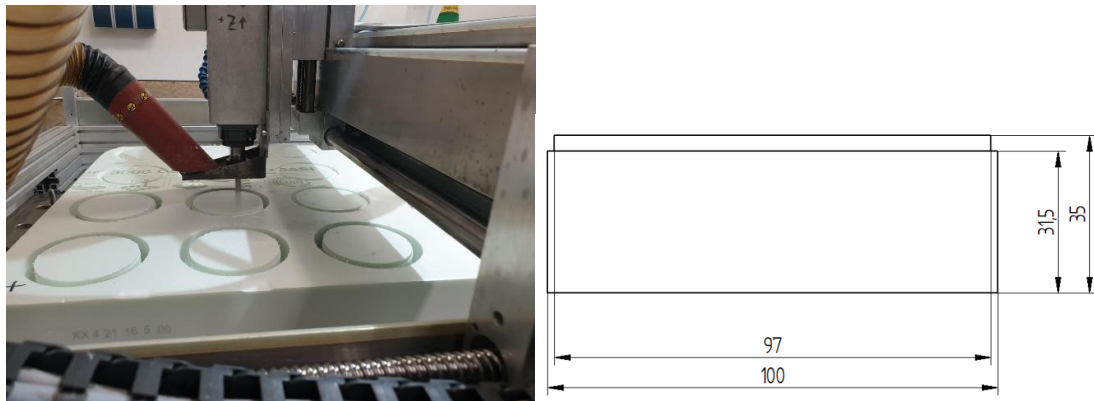


Abbildung 10 Links: Herstellung der Proben mittels CNC-Fräse; Rechts: Probenmaße im Querschnitt

Die Proben wurden anschließend in die KG-Muffenstopfen eingelegt und mit einem für Polystyrol geeigneten Epoxidharz vergossen. Bei der Wahl des Epoxidharzes ist auf die Verwendung entsprechend langsam aushärtender, hochviskoser Systeme zu achten, die eine geringe Temperaturentwicklung während der Aushärtung bieten. Um ein Überlaufen des Epoxidharzes in die Probenoberfläche zu verhindern, wurde eine Schablone aus dünnem Silikon aufgelegt und beschwert. Die Probe wurde anschließend auf einem Drehteller mit Epoxidharz vergossen (Abbildung 11).



Abbildung 11 Links: Eingießen der Probe mit Epoxidharz; Rechts: fertige Probe mit vergossenem Rand

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden sechs Proben hergestellt. Diese wurden bei einem Druck von 0.35 bar über einen Zeitraum von insgesamt 78 Tagen in der Drucktonne gelagert. Die Massenzunahme der Proben wurde nach 3, 10, 21, 28, 38 und 78 Tagen ermittelt. Die Wiegung erfolgte jeweils nachdem die Proben mit einem frischen Laborpapier abgetupft wurden, innerhalb weniger Minuten nach der Entnahme aus der Drucktonne. Zusätzlich wurde nach 78 Tagen die Masse der Proben nach ca. 2-stündiger Lagerung im trockenen Raumklima (Laborklima ca. 23 °C / 50 % r. F.) ermittelt. Tabelle 7 zeigt die ermittelten Werte.

Tabelle 7 Massenzunahme der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.35 bar (runde Proben mit Randverguss)

0.35 bar	Zeit in Tagen						78 (2h Rück- trocknung)
	Δm in g	3	10	21	28	38	78
Probe 1	0.15	0.28	0.37	0.43	0.48	0.59	0.5
Probe 2	0.18	0.29	0.38	0.44	0.5	0.6	0.51
Probe 3	0.16	0.24	0.34	0.37	0.43	0.66	0.51
Probe 4	0.42	0.39	0.53	0.6	0.71	0.85	0.53
Probe 5	0.32	0.43	0.61	0.61	0.62	0.77	0.54
Probe 6	0.25	0.32	0.44	0.53	0.56	0.65	0.53
Mittelwert	0.25	0.32	0.44	0.50	0.55	0.69	0.52
STABW	0.11	0.07	0.11	0.10	0.10	0.10	0.02

Die registrierten Massenänderungen sind mit Werten zwischen ca. 0.15 – 0.85 g gering. Nachteilig ist in diesem Zusammenhang auch das durch die verwendete Kunststoffmuffe recht hohe Gesamtgewicht der Proben im Bereich von ca. 140 g. Die Proben selbst hatten ein Trockengewicht von ca. 9 g.

Zu erkennen ist auch, dass die Proben nach 78-tägiger Wasserlagerung bereits nach einer ca. 2-stündigen Lagerung im trockenen Laborklima wieder signifikant Masse verlieren. Dies deutet darauf hin, dass sich ein Großteil der Wassereinlagerung in den obersten Zellreihen befindet. Unter Kenntnis der Trockenmasse der Probekörper und der Rohdichte wurde im Weiteren der Wassergehalt der Proben in Vol-% berechnet. Dabei ist zu beachten, dass sich die Angaben auf die reduzierte Probendicke von 35 mm beziehen. Tabelle 8 zeigt die berechneten Werte.

Tabelle 8 Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.35 bar (runde Proben mit Randverguss)

0.35 bar	Zeit in Tagen						78
	ψ in Vol-%	3	10	21	28	38	78
Probe 1	0.06%	0.11%	0.15%	0.17%	0.19%	0.24%	0.20%
Probe 2	0.07%	0.12%	0.15%	0.18%	0.20%	0.24%	0.20%
Probe 3	0.06%	0.10%	0.14%	0.15%	0.17%	0.26%	0.20%
Probe 4	0.17%	0.16%	0.21%	0.24%	0.28%	0.34%	0.21%
Probe 5	0.13%	0.17%	0.24%	0.24%	0.25%	0.31%	0.22%
Probe 6	0.10%	0.13%	0.18%	0.21%	0.22%	0.26%	0.21%
Mittelwert	0.10%	0.13%	0.18%	0.20%	0.22%	0.27%	0.21%
STABW	0.04%	0.03%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.01%

Nach 28-tägiger Lagerung erreichen die Proben bezogen auf 35 mm Dicke ein Feuchtegehalt von 0.20 Vol-%. Rechnet man das Ergebnis auf eine Plattendicke von 140 mm um, so ergibt sich für diesen Zeitraum ein Feuchtegehalt von 0.05 Vol-%.

Eine Verlängerung der Wasserlagerung führt zu einer weiteren Erhöhung des Feuchtegehalts. Nach 78-tägiger Lagerung erreichen die Proben bezogen auf 35 mm Dicke einen Feuchtegehalt von 0.27 Vol-%. Umgerechnet auf 140 mm Plattendicke entspricht dies 0.07 Vol-%.

Um zu überprüfen ob die Wasseraufnahme als Funktion der Zeit einem funktionalen Ansatz folgt, wurden die Daten graphisch aufgetragen und mittels unterschiedlicher Regressionsmodelle angepasst. Eine gute Anpassungsgüte ließ sich mit einer einfachen Potenzfunktion gemäß Formel (3) erzielen.

$$\Psi(t) = X_0 + m \cdot t^b \quad (3)$$

Mit

$\Psi(t)$ = Wassergehalt in Vol-% als Funktion der Zeit

X_0 = Offset im Nullpunkt

t = Zeit in Tagen

m, b = Koeffizienten

Die ermittelten Koeffizienten zeigt Tabelle 9. Die Messdaten sowie die ermittelte Ausgleichsfunktion zeigt Abbildung 12.

Tabelle 9 Koeffizienten zum Ansatz gemäß Formel (3) zum Ausgleich der Daten aus Tabelle 8

X_0	1.5921E-04
m	5.2685E-04
b	3.6649E-01

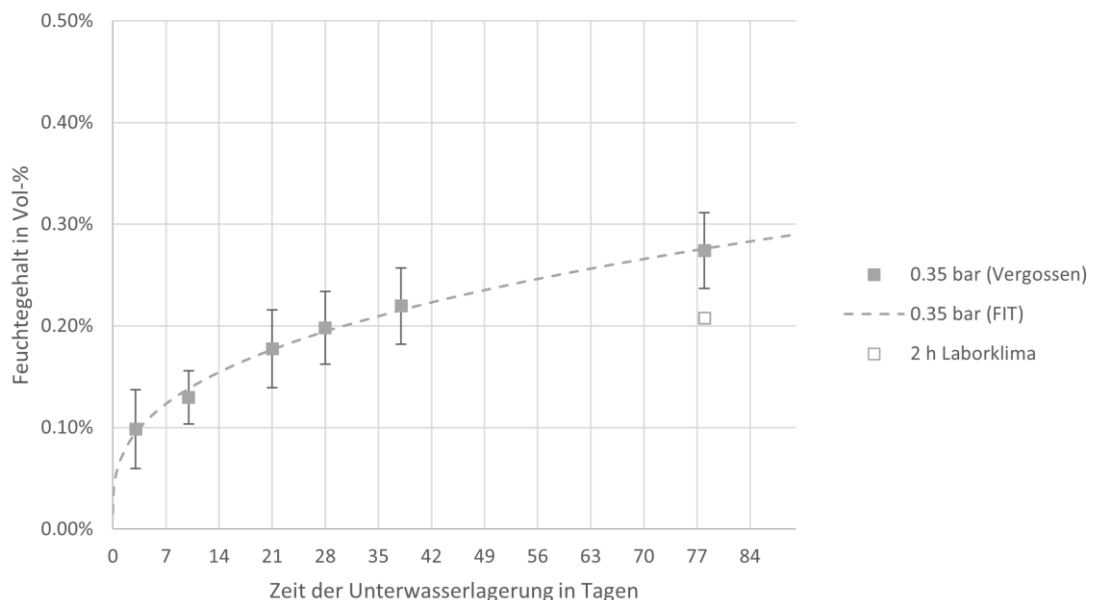


Abbildung 12 Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.35 bar inklusive Standardabweichung und Ausgleichsfunktion (runde Proben mit Randverguss)

Der Offset X_0 kann theoretisch als Wiegefehler bei der Bestimmung der Massenzunahme aufgrund oberflächlich anhaftender Wassermoleküle interpretiert werden und

könnte somit von den ermittelten Werten in Abzug gebracht werden. Unter Bezug auf die allgemein hohe Messunsicherheit des Versuchs aufgrund der geringen Massenzunahme in Kombination mit einem ungünstigen Verhältnis zwischen der Masse der Kunststoffrohre inkl. Randverguss und der Masse der eigentlichen Probe, wird auf diese Korrektur verzichtet. Interessant ist aber zumindest ein Vergleich des Wertes mit der Massenabnahme nach 2-stündiger Lagerung im trockenen Laborklima.

Gemäß Tabelle 8 ist die Differenz zwischen dem Feuchtegehalt direkt nach Entnahme aus der Drucktonne und nach 2-stündiger Abtrocknung ca. 0.06 Vol-%. Zieht man hiervon gerundet ca. 0.02 Vol-% Offset ab, bleiben ca. 0.04 Vol-% Feuchteverlust durch die Abtrocknung. Die Rücktrocknung der Proben innerhalb der 2-stündigen Lagerung bei trockenen Bedingungen ist also wahrscheinlich nicht ausschließlich auf eine unzureichende Trocknung der Probenoberfläche zurückzuführen.

Aufgrund der beschriebenen Problematik bezüglich der Herstellung eines druckstabilen und wasserdichten Randvergusses bei Prüfung an Proben mit vollständiger Dicke wurden in Ergänzung Proben mit 200 x 200 x Dicke [mm] wie diese für die Prüfung der Wasseraufnahme bei langfristigem vollständigen Untertauchen nach DIN EN ISO 16535 verwendet werden. Da sich in dem vorgestellten Versuch bei 0.35 bar Wasserdruck nur eine verhältnismäßig geringe Massenzunahme ergab, wurde der Wasserdruck erhöht. Untersucht wurde das Material im Standardversuch nach DIN EN ISO 16535 (ohne Überdruck) sowie bei 0.7 bar und 1.4 bar Überdruck.

Jeweils drei Proben mit den Maßen 200 x 200 x 140 mm wurden bei den genannten Bedingungen gelagert und die Massenzunahme nach 7, 14 und 28 Tagen ermittelt. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Randverguss werden die Proben nun von allen Seiten, d. h. der Ober- und Unterseite sowie über die angeschnittenen Randflächen mit dem Wasserdruck beaufschlagt. Gemäß DIN EN ISO 16535 gibt es unterschiedliche Verfahren, um den bereits beschriebenen Einfluss oberflächlich anhaftenden Wassers auf das Ergebnis zu reduzieren. Alle in der Norm genannten Möglichkeiten führen jedoch zu einer längeren Unterbrechung der Wasserlagerung, mit der Gefahr, dass der weitere Vorgang der Wasseraufnahme unterbrochen wird. Um einen aussagekräftigen zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme zu erhalten, wurden die Proben bei den Zwischenwiegungen nach 7 und 14 Tagen nach der Entnahme aus der Drucktonne auf einem Tuch abgetupft (Tuchwert) und direkt gewogen sowie nach der Wiegung direkt wieder untergetaucht. Nach der letzten Wiegung (28 Tage) wurde ein Wert direkt nach der Entnahme (5 s Wert), der Tuchwert, als auch das Ergebnis nach Abtropfen der Probe für einen Zeitraum von 10 min (Verfahren 2A nach DIN EN ISO 16535) gemessen. Aus den ermittelten Massenzunahmen wurden wieder die Feuchtegehalte in Vol-% berechnet. Die Ergebnisse für die Lagerung über einen Zeitraum von insgesamt 28 Tagen bei drei unterschiedlichen Wasserdrücken zeigen Tabelle 10, Tabelle 11 und Tabelle 12.

Tabelle 10 Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem vollständigem Untertauchen in Anlehnung an DIN EN ISO 16535 (quadratische Proben ohne Randverguss)

ohne Überdruck	Tuchwerte in Vol-%			<i>5 s Wert</i>	<i>10 min Wert</i>
Zeit in Tagen	7	14	28	28	28
Probe 1	0.30%	0.28%	0.29%	0.51%	0.24%
Probe 2	0.28%	0.32%	0.32%	0.49%	0.26%
Probe 3	0.30%	0.28%	0.29%	0.51%	0.24%
Mittelwert	0.29%	0.30%	0.30%	0.50%	0.25%
Standardabweichung	0.01%	0.02%	0.02%	0.01%	0.01%

Tabelle 11 Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem vollständigem Untertauchen unter Anwendung eines erhöhten Wasserdrucks von 0.7 bar (quadratische Proben ohne Randverguss)

0.7 bar	Tuchwerte in Vol-%			<i>5 s Wert</i>	<i>10 min Wert</i>
Zeit in Tagen	7	14	28	28	28
Probe 1	0.49%	0.61%	0.77%	0.96%	0.74%
Probe 2	0.50%	0.63%	0.82%	0.96%	0.80%
Probe 3	0.45%	0.52%	0.70%	0.82%	0.65%
Mittelwert	0.48%	0.59%	0.77%	0.91%	0.73%
Standardabweichung	0.03%	0.05%	0.06%	0.08%	0.07%

Tabelle 12 Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem vollständigem Untertauchen unter Anwendung eines erhöhten Wasserdrucks von 1.4 bar (quadratische Proben ohne Randverguss)

1.4 bar	Tuchwerte in Vol-%			<i>5 s Wert</i>	<i>10 min Wert</i>
Zeit in Tagen	7	14	28	28	28
Probe 1	0.64%	0.91%	1.25%	1.43%	1.23%
Probe 2	0.70%	0.86%	1.09%	1.20%	1.07%
Probe 3	0.97%	1.20%	1.51%	1.65%	1.49%
Mittelwert	0.77%	0.99%	1.28%	1.43%	1.26%
Standardabweichung	0.17%	0.19%	0.21%	0.22%	0.21%

Es ist zu erkennen, dass ein deutlicher Einfluss der Erhöhung des Wasserdrucks auf die ermittelten Werte des Feuchtegehalts nachweisbar ist. Mit zunehmendem Wasserdruck steigt auch die Standardabweichung der Werte deutlich an. Die zugehörigen Variationskoeffizienten steigen von ca. 3 – 8 % (0 bar), über 5 – 9 % (0.35 bar) auf 17 – 23 % (1.4 bar).

Im Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Werte der Wasseraufnahme bei Lagerung ohne erhöhten Druck (0 bar) bereits nach 7 Tagen stabilisieren. Eine weitere Erhöhung der Wasseraufnahme nach 14 Tagen bzw. 28 Tagen ist unter Beachtung der Streuung der Werte nicht signifikant. Demgegenüber führt eine Erhöhung der Lagerungsdauer bei der Anwendung erhöhten Wasserdrucks zu einer Zunahme der Wasseraufnahme über der Zeit.

Auf die ermittelten Werte wurde auch wieder das Regressionsmodell gemäß Formel (3) angewendet, wobei der Offset X_0 in diesem Fall auf Basis der Differenz zwischen dem Tuchwert und dem Wert nach 10 min Abtropfen geschätzt wurde. Dabei ergibt sich im Mittel aller drei Messreihen eine Differenz von 0.03 Vol-%, was zumindest der Größenordnung nach zu dem Wert von 0.02 Vol-% bei den Versuchen mit Randverguss passt. Zu beachten ist außerdem die deutlich größere Oberfläche der Proben ohne Randverguss. Die im Weiteren bestimmten Koeffizienten m und b zeigt Tabelle 13. Die Werte einschließlich Standardabweichung und die ermittelten Verläufe der Regression zeigt Abbildung 13.

Tabelle 13 Koeffizienten zum Ansatz gemäß Formel (3) zum Ausgleich der Daten aus Tabelle 10, Tabelle 11 und Tabelle 12

	0 bar	0.35 bar	0.70 bar
X_0	3.00E-04	3.00E-04	3.00E-04
m	2.51E-03	2.20E-03	3.54E-03
b	2.17E-02	3.60E-01	3.79E-01

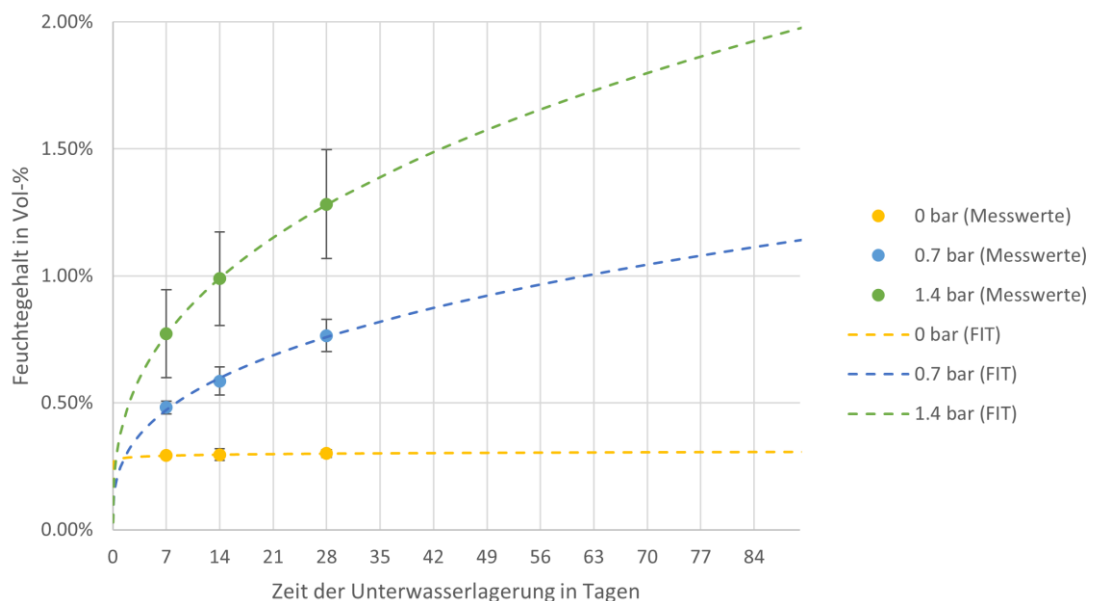


Abbildung 13 Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.7 bar und 1.4 bar (quadratische Proben ohne Randverguss)

Die erzielte Anpassung der Regression an die Messwerte ist analog zu den Versuchen an den Proben mit Randverguss gut. Der gewählte funktionale Ansatz besitzt keinen Grenzwert, ist jedoch stark degressiv. Eine Extrapolation auf längere Zeiträume kann aufgrund des eng beschränkten Beobachtungszeitraums allenfalls orientierenden Charakter haben, bzw. einer sehr pauschalen Überprüfung der Plausibilität des Ansatzes dienen.

Interessant ist jedoch ein Vergleich der Werte der Wasseraufnahme der Proben mit Randverguss mit den Werten des Versuchs ohne Randverguss.

Nach 28-tägiger Wasserlagerung der Proben bei 0.35 bar Druck mit Randverguss ergibt sich bei Umrechnung auf 140 mm Probendicke ein Feuchtegehalt von ca. 0.05 Vol-%.

Da die Versuche mit den Proben ohne Randverguss bei höheren Drücken durchgeführt wurden, stehen keine Messdaten zur Verfügung, die direkt bei 0.35 bar ermittelt wurden. Bei einem Vergleich der Werte bei 0.7 bar und 1.4 bar zeigt sich jedoch, dass das Verhältnis der Werte der beiden Druckstufen nahezu konstant ist, was auf eine Proportionalität der Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom Druck schließen lässt. Wendet man diese Proportionalität auf die Werte bei 0.7 bar an, um auf einen Wert der Wasseraufnahme nach 28 Tagen bei 0.35 bar umzurechnen, erhält man eine Wasseraufnahme von 0.46 Vol-% bei Prüfung ohne Randverguss. Rechnet man diesen Wert weiter entsprechend der Flächenverhältnisse von Randflächen und Plattenoberseite und -unterseite um, so bleiben noch ca. 0.2 Vol-%. Halbiert man diesen Wert entsprechend der Exponierung lediglich einer Oberfläche bei der Prüfung mit Randverguss so erhält man immer noch einen Wert von ca. 0.1 Vol-%. Gegenüber der Prüfung der Proben mit Randverguss entspricht dies in etwa einer Verdoppelung der Werte, woraus ersichtlich wird, dass die Wasseraufnahme durch die Oberfläche des XPS-Dämmstoffs mit Schäumhaut deutlich reduziert ist, gegenüber der Wasseraufnahme durch angeschnittene Flächen.

Einschränkend muss beachtet werden, dass bei den Versuchen an Proben ohne Randverguss sowohl bei der Beanspruchung mit 1.4 bar als auch bei der Beanspruchung mit 0.7 bar Wasserdruck eine erhebliche Verformung in der Plattenebene einsetzt. Die Proben werden ausgehend von einer maximalen Verformung in der Mitte der Plattendicke gestaucht, wobei die Verformung in Richtung Plattenoberfläche deutlich nachlässt. Der beschriebene Effekt wirkt überdies nur in einer Richtung. Es besteht also eine Anisotropie in der Druckfestigkeit sowohl zwischen den beiden Hauptachsen der Produktion, als auch quer zur Produktionsrichtung über der Plattendicke. Durch die entstehenden Verformungen können Beschädigungen an den Zellen nicht ausgeschlossen werden, welche die Wasseraufnahme beeinflussen können.

Der gewählte Ansatz zur Bestimmung der Wasseraufnahme bei erhöhtem Druck an Proben mit Randverguss ist unter diesem Gesichtspunkt zielführend und deutlich näher an der praktischen Einbausituation, in der die Platten ebenfalls nur uniaxial senkrecht zur Plattenebene beansprucht werden. Eine Weiterentwicklung des vorgestellten Ansatzes wäre aus diesem Grund zielführend.

5.2 Wasseraufnahme durch Diffusion

Die Feuchteaufnahme von Dämmstoffen durch Diffusion wird nach DIN EN ISO 16536 durch Lagerung von Proben über einem auf 50 °C beheizten Wasserbecken sowie Kühlung der Probenoberseite mittels einer Kühlplatte auf 1 °C untersucht. Durch das entstehende starke Wasserdampfpartialdruckgefälle, wird Wasserdampf

durch Diffusion in den Dämmstoff eingetrieben. Je nach Lage des Taupunkts im Material kondensiert der Wasserdampf in den Zellen aus und erhöht entsprechend den Feuchtegehalt.

Das Wasserdampfdiffusionsverhalten von Dämmstoffen ist gut erforscht und die physikalischen Zusammenhänge sind über das Fick'sche Gesetz beschrieben. Die für eine Berechnung von Feuchtetransportvorgängen aufgrund von Wasserdampfdiffusion notwendigen Koeffizienten lassen sich durch genormte Prüfverfahren bestimmen. Für Dämmstoffe sind dies DIN EN 12086, bzw. DIN EN ISO 12572. Das Wasserdampfdiffusionsverhalten wird durch den dimensionslosen μ -Wert als Quotient des Wasserdampfdiffusionswiderstands ruhender Luft und des Wasserdampfdiffusionswiderstands des Materials bestimmt. Durch Multiplikation mit der Dicke des Materials ergibt sich der sd-Wert, der als anschauliche Größe die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke in m beschreibt. Zu beachten ist eine ggf. vorhandene Feuchtevariabilität der Wasserdampfdiffusion.

Wie in Abschnitt 4.2 gezeigt, variiert die Bodentemperatur mit der Einbautiefe. Da der Wasserdampfpartialdruck bei Sättigung ausschließlich eine Funktion der Temperatur ist, führt eine Erhöhung des Wasserdrucks bei steigender Eintauchtiefe nicht zu einer Erhöhung des Wasserdampfpartialdrucks. Für die diffusionsgetriebene Feuchteaufnahme ist bei Sättigung deshalb ausschließlich das Temperaturprofil in Abhängigkeit von der Einbautiefe entscheidend.

Um die Zusammenhänge für eine Perimeterdämmung aus XPS darzustellen, werden im Folgenden die Feuchtegehalte der Dämmung mittels hygrothermischer Simulation über einen Zeitraum von 10 Jahren für drei unterschiedliche Einbautiefen (1.0 m, 3.5 m und 7.0 m) bei nicht hinterlaufender (Szenario A) und hinterlaufender Dämmung (Szenario B) berechnet. Im Folgenden wird das angewendete Berechnungsmodell beschrieben. Verwendet wurde die Software WUFI®Pro Version 6.8, Release: 6.8.0.2298.DB.27.5.8.105.

Tabelle 14 zeigt die von außen nach innen für das Modell verwendeten Materialschichten. Der μ -Wert für den Bitumenkleber wurde durch Messung entsprechend der Klimabedingungen der DIN EN 1931 (23°C, 0 – 75 % r. F.) an dem Produkt Pecimor DK, welches für die Verklebung der XPS-Dämmung im Perimeter-Prüfstand verwendet wurde, ermittelt. Der Bitumenkleber wurde hierzu in einer definierten Schichtdicke von ca. 2.5 mm auf eine diffusionsoffene Vliesunterlage aufgebracht. Nach Trocknung wurden aus dem so vorbereiteten Material runde Probekörper geschnitten, die anschließend in die Prüfschalen aus Aluminium eingebaut wurden. Der ermittelte μ -Wert von 44800 führt bei Annahme einer durchgängigen Schicht von 5 mm zu einem sd- Wert von 224 m zwischen der Dämmung und der Betonschicht.

Tabelle 14 Modellquerschnitt, Materialparameter und Herkunft der Daten

Nr.	Material	d in mm	ρ in kg/m ³	Φ in m ³ /m ³	c in J/(kg K)	λ in W/(m K)	μ in -	Quelle
1	XPS-Schäumhaut	10	40	0.95	1500	0.03	450	1)
2	XPS-Kern	120	40	0.95	1500	0.03	100	1)
3	XPS-Schäumhaut	10	40	0.95	1500	0.03	450	1)
4.1	Bitumenkleber (Szenario A)	5	2400	0.001	1000	0.5	44800	2)
4.2	Luftschicht (Szenario B)	5	1.3	0.999	1000	0.047	0.79	1)
5	Beton W/Z=0.5	240	2300	0.18	850	1.6	180	1)
6	Kalkzementputz	20	1900	0.24	850	0.8	19	1)

1) WUFI® DB

2) μ -Wert basierend auf Messungen

Untersucht werden zwei Fälle. Szenario A untersucht die Situation mit vollflächig aufgetragenen Bitumenkleber. Szenario B stellt den Fall nach, dass zwischen Dämmstoff und Beton dauerhaft ein vollflächiger Wasserfilm vorhanden ist (hinterlaufene Dämmung). Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen den Aufbau der Modelle und die Lage der Feuchtequelle im Szenario B.

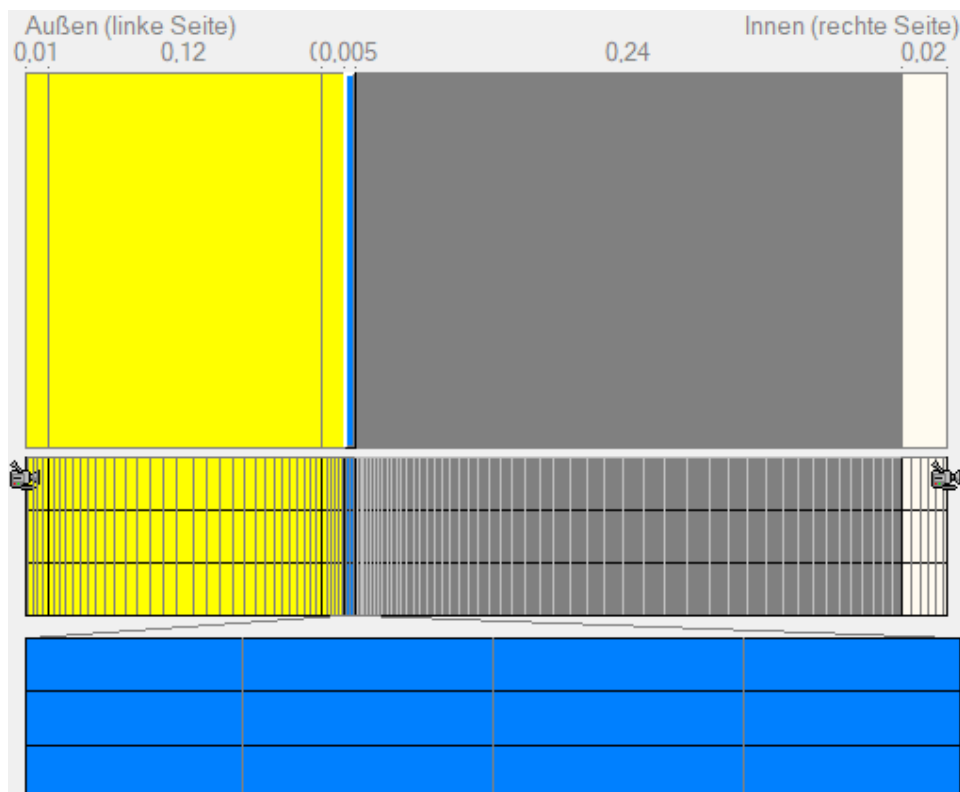


Abbildung 14 Aufbau des Modells für Szenario A (Bitumenkleber vollflächig zwischen Dämmstoff und Beton) in WUFI®, der Aufbau entspricht von links nach rechts den in Tabelle 14 definierten Materialschichten 1, 2, 3, 4.1, 5 und 6

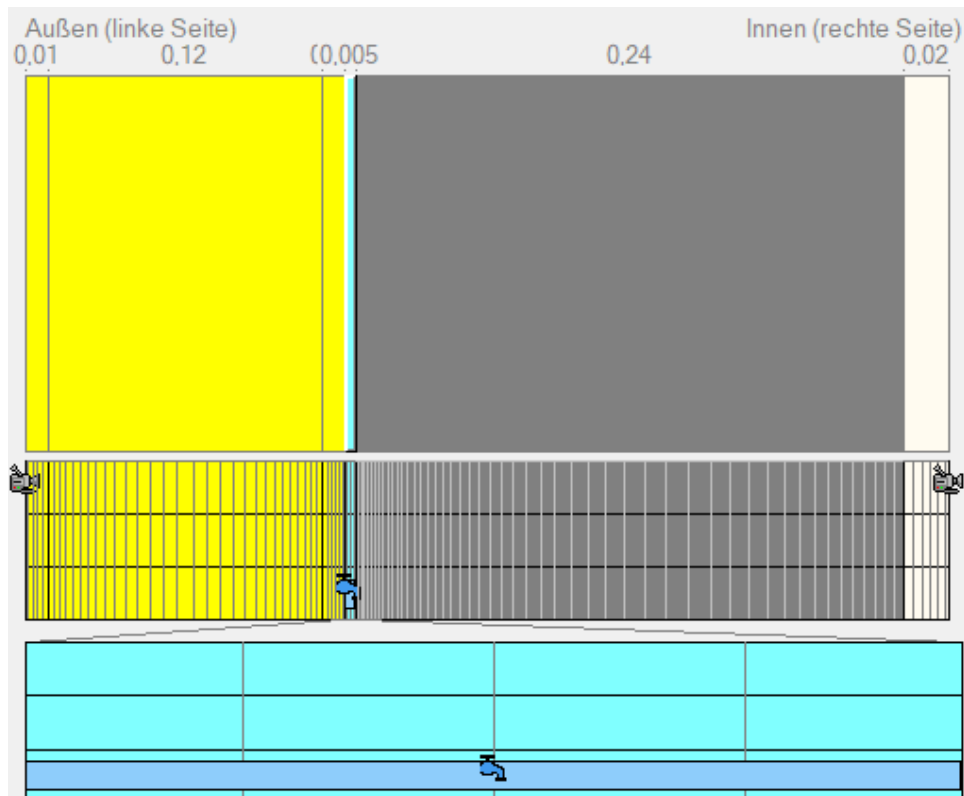


Abbildung 15 Aufbau des Modells für Szenario B (Dämmstoff mit Wasser hinterlaufen) in WUFI®, der Aufbau entspricht von links nach rechts den in Tabelle 14 definierten Materialschichten 1, 2, 3, 4.2, 5 und 6

Übergangsparameter

Die Übergangsparameter entsprechen der Situation bei Einbau im Erdreich. Es ergibt sich entsprechend $R_{s,e} = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$ und $R_{s,i} = 0.125 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$.

Außenklima

Die Außentemperatur in den unterschiedlichen zu untersuchenden Einbautiefen, lässt sich entsprechend Abbildung 6 im Jahresverlauf als Sinuskurve approximieren. Zur Hinterlegung der Temperaturdaten wird die in WUFI® implementierte Funktion genutzt, bei der ein Mittelwert der Temperatur, die Amplitude der Temperatur und der Tag des Maximums der Temperatur eingegeben werden. Die verwendeten Parameter zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15 Parameter zur Approximation des Außenklimas mittels Sinusfunktion in WUFI®

Einbautiefe in m	1.0		3.5		7.0	
Klima	T	φ	T	φ	T	φ
Mittelwert	10.8°C		10.7°C		10.1°C	
Amplitude	9.1 K	100 %	4.3 K	100 %	0.8 K	100 %
Monat des Maximums	Juli		September		November	

Raumklima

Das Raumklima wird in allen drei betrachteten Fällen einheitlich gewählt. Die Berechnung der Temperatur und relativen Feuchte erfolgt ebenfalls basierend auf einer Sinusfunktion. Die verwendeten Parameter zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16 Parameter zur Approximation des Raumklimas mittels Sinusfunktion in WUFI®

Klima	T	ϕ
Mittelwert	20 °C	50 %
Amplitude	2 K	10 %
Monat des Maximums	Juni	August

Anfangsbedingungen

Zu Beginn der Simulation wird in allen Bauteilschichten von einem Feuchtegehalt entsprechend 20°C und 80 % r. F. ausgegangen.

Simulationszeitraum

Der Simulationszeitraum beginnt am 01.10.2024 und endet am 31.09.2034. Die Ergebnisse beziehen sich auf den eingeschwungenen Zustand am Ende des Simulationszeitraums.

Ergebnisse

Ausgewertet wird der mittlere Feuchtegehalt der XPS-Dämmung in Vol-%.

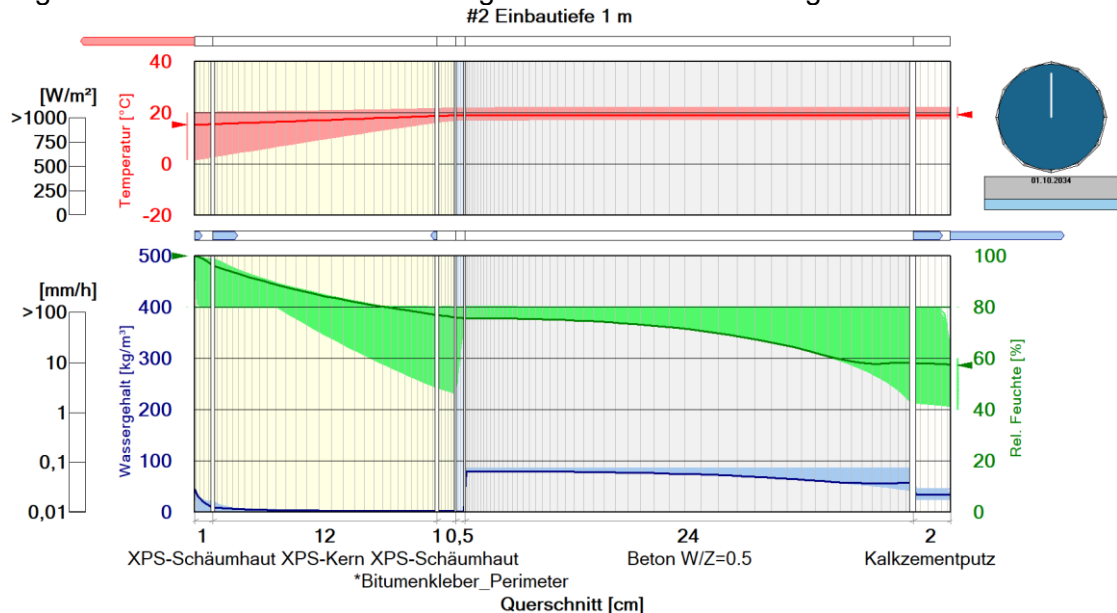


Abbildung 16 Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Wassergehalt im Simulationszeitraum von 10 Jahren für die Variante Einbautiefe 1.0 m ohne Hinterlaufen der Dämmung (Szenario A)

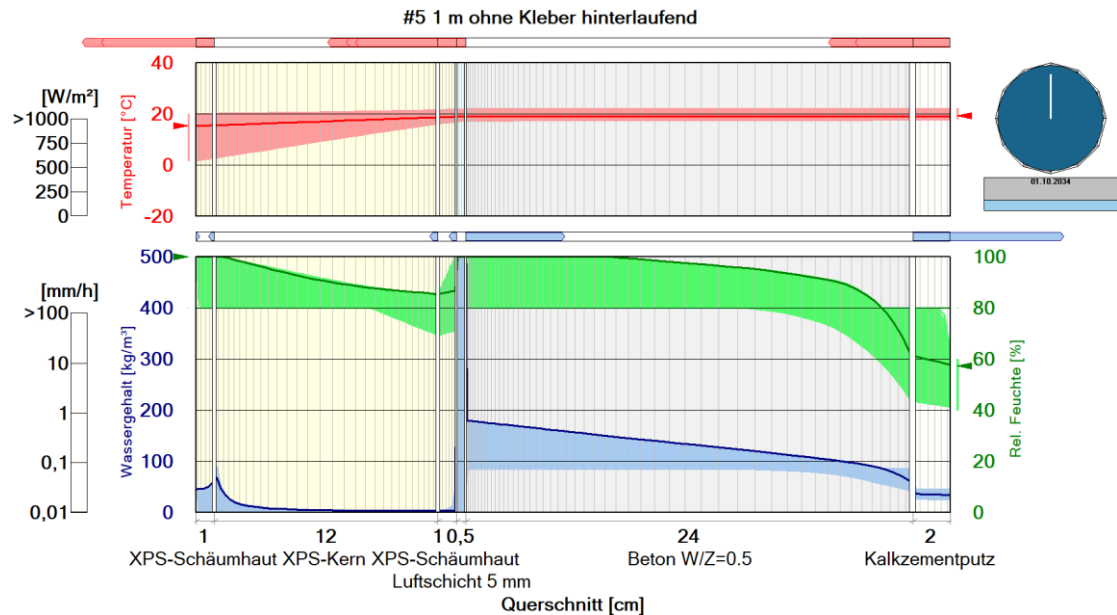


Abbildung 17 Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Wassergehalt im Simulationszeitraum von 10 Jahren für die Variante Einbautiefe 1.0 m mit Hinterlaufen der Dämmung (Szenario B)

Ein Vergleich der Feuchteaufnahme im Dämmstoff zwischen Szenario A und B zeigt, dass bei allen untersuchten Einbautiefen im Falle einer hinterlaufenden Dämmung (Szenario B) deutlich erhöhte Feuchtegehalte auftreten. Den Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Wassergehalt im Simulationszeitraum über den Querschnitt des Bauteils, zeigen Abbildung 16 und Abbildung 17 exemplarisch für die Fälle Einbautiefe 1.0 m mit und ohne Hinterlaufen der Dämmung.

Dabei wird deutlich, dass im Falle der hinterlaufenden Dämmung aufgrund der konstant hohen Feuchte zwischen Dämmstoff und Betonwand, sowohl die im winterlichen Fall dann Richtung Außenseite wirkende Wasserdampfpartialdruckdifferenz kleiner wird, als auch eine konstante Feuchteaufnahme des Dämmstoffs auf der Warmseite erfolgt.

Tabelle 17 zeigt die berechnete Wasseraufnahme für die zwei unterschiedlichen Szenarien im zehnten Jahr der Simulation zusammen mit den Daten zu den jeweils wirkenden Außentemperaturen in unterschiedlichen Einbautiefen.

Tabelle 17 Interpolierte Werte der mittleren Temperatur, der Temperaturamplitude, des Monats mit der maximalen Temperatur und des volumetrischen Wassergehalts $\Psi_{\max}$ im zehnten Jahr – für drei Einbautiefen im Fall (A) ohne Wassereintritt zwischen Dämmung und Beton sowie Fall (B) mit Wassereintritt zwischen Dämmung und Beton.

Einbautiefe in m	1.0	3.5	7.0
Θ_{mean} in °C	10.8	10.7	10.1
$(\Theta_{\text{max}} - \Theta_{\text{mean}})$ in K	9.1	4.3	0.8
Monat mit Θ_{max}	Juli	September	November
Ψ_{max} in Vol-% (A)	0.42	0.37	0.33
Ψ_{max} in Vol-% (B)	10.8 (ansteigend)		11.3 (ansteigend)

Im Szenario A führt die geringere Temperaturamplitude bei zunehmender Einbautiefe zu einem reduzierten mittleren Wasserdampfpartialdruckgefälle, was wiederum zu leicht verringerten Feuchteaufnahmewerten führt. Diese sinken von 0.42 Vol-% bei 1.0 m Einbautiefe auf 0.33 Vol-%.

Einen maßgebenden Einfluss auf die Feuchteaufnahme des Dämmstoffs hat aber das hinterlaufen der Dämmung. Im Vergleich zum Fall der nicht hinterlaufenden Dämmung steigen hier die Feuchtegehalte von 0.42 Vol-% auf 10.8 Vol-% (1.0 m Einbautiefe) bzw. von 0.33 Vol-% auf 11.3 Vol-% (7.0 m Einbautiefe) an.

6 Definition des Prüfablaufs

Basierend auf den Erkenntnissen über den Einfluss von Randbedingungen auf die Feuchteaufnahme lassen sich grundsätzlich verschiedene Testszenarien ableiten. Im Folgenden werden mögliche Prüfbedingungen zum Nachweis eines Materials mit einer maximalen Eintauchtiefe von 3.5 m vorgestellt. Die genannten Beispiele eignen sich dazu, die Empfindlichkeit des Dämmsystems gegenüber diffusionsbedingter Feuchteaufnahme, gegenüber Wassereintritt durch Fugen sowie das generelle Erholungspotenzial nach einem einzelnen Hochwasserereignis zu prüfen.

Testszenario A simuliert eine Einbau- und Eintauchtiefe von 1.0 m. Die Temperatur variiert entsprechend, und der Testzyklus kann jährlich wiederholt werden. Durch die deutlich höheren Temperaturen im Sommer, wird die diffusionsgetriebene Feuchteaufnahme verstärkt. (Abbildung 18)

Testszenario B simuliert eine Einbau- und Eintauchtiefe von 3.5 m. Gegenüber Testszenario A ist die Eintauchtiefe deutlich erhöht, was die Gefahr eines Hinterlaufens der Dämmung erhöht sowie zu einer erhöhten Flüssigwasseraufnahme führt. (Abbildung 18)

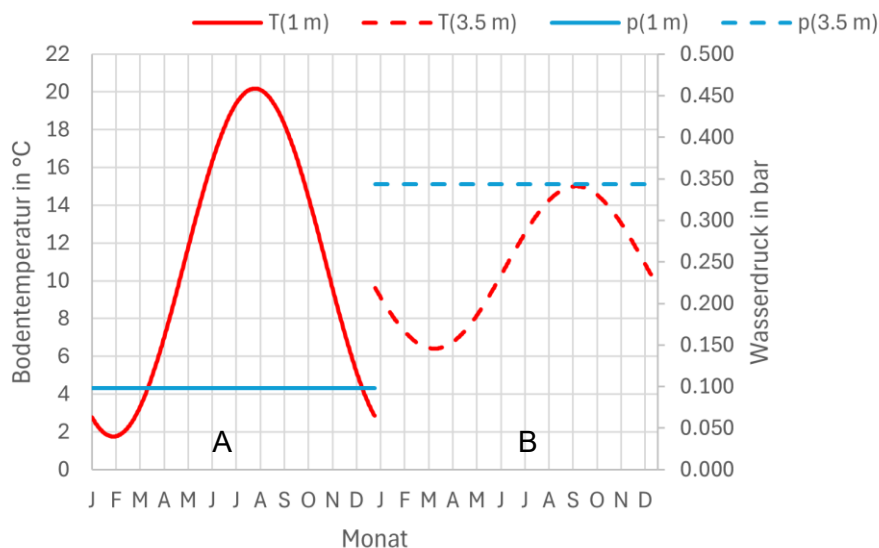


Abbildung 18 Mögliche Testszenarien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungen: A) Konstante Eintauchtiefe von 1.0 m (jährlich wiederholt); B) Konstante Eintauchtiefe von 3.5 m (jährlich wiederholt)

Testszenario C orientiert sich stärker an realen Bedingungen und berücksichtigt eine Variation des hydrostatischen Drucks (zwischen 2.5 m und 3.5 m) bei einer Einbautiefe von 4.5 m. Ein hoher Wasserdruck von 4.5 m zu Beginn des zweiten Jahres über einen Zeitraum von einem Monat simuliert dabei den Effekt eines Hochwasserereignisses. (Abbildung 19)

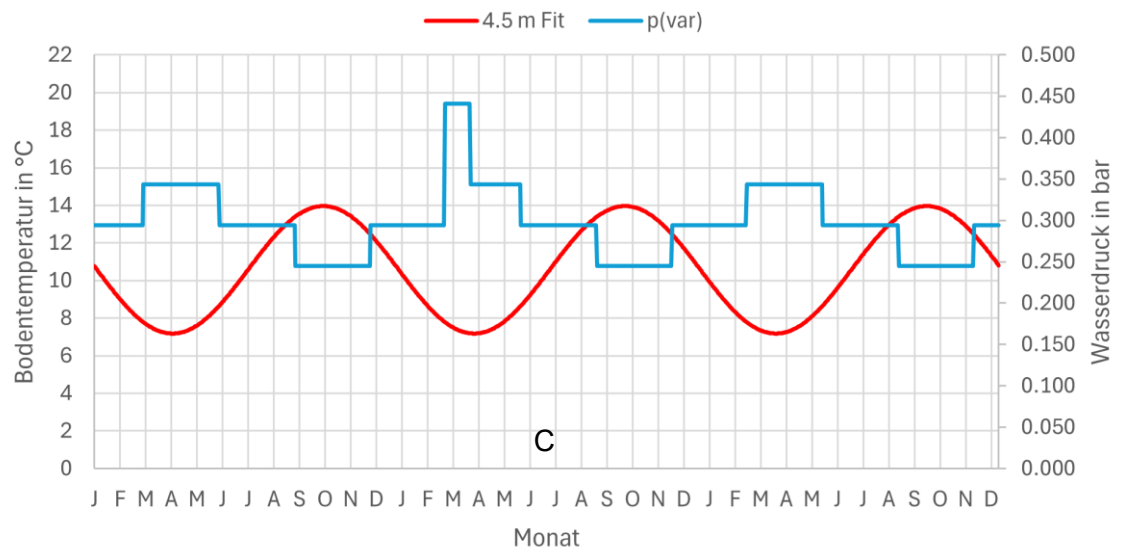


Abbildung 19 Mögliche Testszenarien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungen: C) Einbautiefe von 4.5 m mit variierender Eintauchtiefe zwischen 2.5 und 3.5 m, einschließlich eines einmaligen Hochwasserereignisses

7 Apparative Umsetzung und exemplarische Durchführung

7.1 Konzept

Die Prüfanlage für Perimeter-Dämmstoffe dient zur Bereitstellung einer laborgebundenen Prüfumgebung, welche realitätsnahe Umweltbedingungen im Bereich Temperatur, Feuchte, Wasserdruck und Beanspruchung des Dämmstoffs durch das anliegende Erdreich simuliert.

Um dies zu erreichen, verfügt die Prüfanlage über separat geregelte Prüfkammern, in denen die für Perimeter-Dämmstoffe relevanten Umgebungsbedingungen generiert werden. Die Prüfkammern werden dabei durch das Versorgungssystem der Prüfanlage beschickt, überwacht und reguliert. Basierend darauf lässt sich die Prüfanlage in drei Grundmodule unterteilen; diese sind erstens die Prüfkammern, zweitens die hydraulische Versorgungstechnik sowie drittens die Mess- und Regelungstechnik. Im Folgenden werden die einzelnen Anlagenmodule näher beleuchtet. Die Erläuterungen beziehen sich hierbei auf den aktuellen Entwicklungsstand.

7.2 Prüfkammer

7.2.1 Beschreibung der Komponenten

Die Prüfkammer (PK) repräsentiert im Allgemeinen die Einbausituation eines Perimeter-Dämmstoffs an einem Gebäude im Kellerbereich. Dabei stellt die PK einen Querschnitt der Einbausituation zwischen dem geheizten Kellerinnenraum und dem außen am Gebäude anliegenden Erdreich unter der Modellannahme einer unendlich ausgehenden Platte aus thermischer Sicht dar.

Die jeweiligen Elemente der Einbausituation sind von innen nach außen der Kellerinnenraum, die Außenwand des Gebäudes, die mit Bitumenkleber angebrachte Perimeter-Dämmung sowie das außen anliegende Erdreich mitsamt Grundwasser. Diese Elemente werden durch den Entwurf sowie die einzelnen Funktionsmodule der PK wiedergegeben. Dabei ist die Konfiguration der PK gegenüber der realen Einbausituation am Gebäude bezogen auf eine Wand um 90° rotiert; dies war erforderlich, um die Einbausituation in einer Laborumgebung sinnvoll umsetzen zu können, wobei diese Adaption keinen signifikanten Einfluss auf das feuchtetechnische Verhalten des Perimeter-Dämmstoffs während der Versuchsdurchführung haben sollte.

Im Allgemeinen besteht eine PK aus den folgenden Komponenten: Das Heizmodul (HM), die Betongrundplatte, den Prüfkammerrahmen (PR) mit je zwei Ringdichtungsätzen sowie dem Verschlussdeckel. Dabei wird der Prüfkammerraum durch den PR an den vier Seiten, die Betongrundplatte unten und den Verschlussdeckel oben begrenzt. In dem Prüfkammerraum befindet sich die mit Bitumenkleber auf der

Betongrundplatte aufgebraute Perimeter-Dämmstoffprobe. Das verbleibende Volumen des Prüfkammerraum bildet den Kiesraum (KR) über der Perimeter-Dämmstoffprobe, welcher kontinuierlich mit dem simulierten Grundwasser durchspült wird. Darüber hinaus ist der KR mit grobem gewaschenem Kies gefüllt, um die mechanische Auflast des Erdreichs an der Perimeter-Dämmstoffprobe anzudeuten. Das HM befindet sich unter der Betongrundplatte und setzt sich aus der Plattenheizung und der Heizungsmodulwanne. Der Innenraum der Heizungsmodulwanne umfasst die Maße 990 x 990 x 140 mm und setzt sich aus vier rahmenförmig angeordneten XPS-Elementen zusammen. Außen ist das HM mit Aluminiumklebeband ummantelt; dies dient einerseits der Erhaltung der geometrischen Integrität des HM sowie andererseits der IR-Strahlungsabschirmung des HM gegenüber der Umgebung. In der Heizungsmodulwanne befindet sich die Plattenheizung bestehend aus Gipsfaserplatten in welche die Heizrohrschleifen eingebettet sind. Der restliche Raum stellt den Heizraum (HR) dar, wobei der HR dem beheizten Kellerinnenraum in der Realität entspricht. Unter dem HM befindet sich eine Lastpalette, auf welcher die gesamte PK ruht.

Um den Prüfkammerraum wasserdicht zu verschließen wird die PK oben mittels 16 M16-Schrauben über den Verschlussdeckel und den PR verspannt; unten erfolgt die Verspannung mittels 16 M12-Schrauben über den PR und an die Betongrundplatte angebrachten Winkelschienen aus Stahl. Zwischen PR und Verschlussdeckel sowie PR und Betongrundplatte befinden sich die Dichtungsebenen der PK, in welchen sich die in Nuten am PR eingelegten redundanten Ringdichtungen aus Silikon verortet sind. Eingelegte Distanzhülsen halten dabei die Spalthöhe konstant, um eine definierte Kompaktierung der Ringdichtungen zu gewährleisten.

In Abbildung 20 ist das gerenderte CAD-Modell der PK in Seitenansicht zu sehen; Abbildung 21 visualisiert das gerenderte CAD-Modell der PK in isometrischer Ansicht.

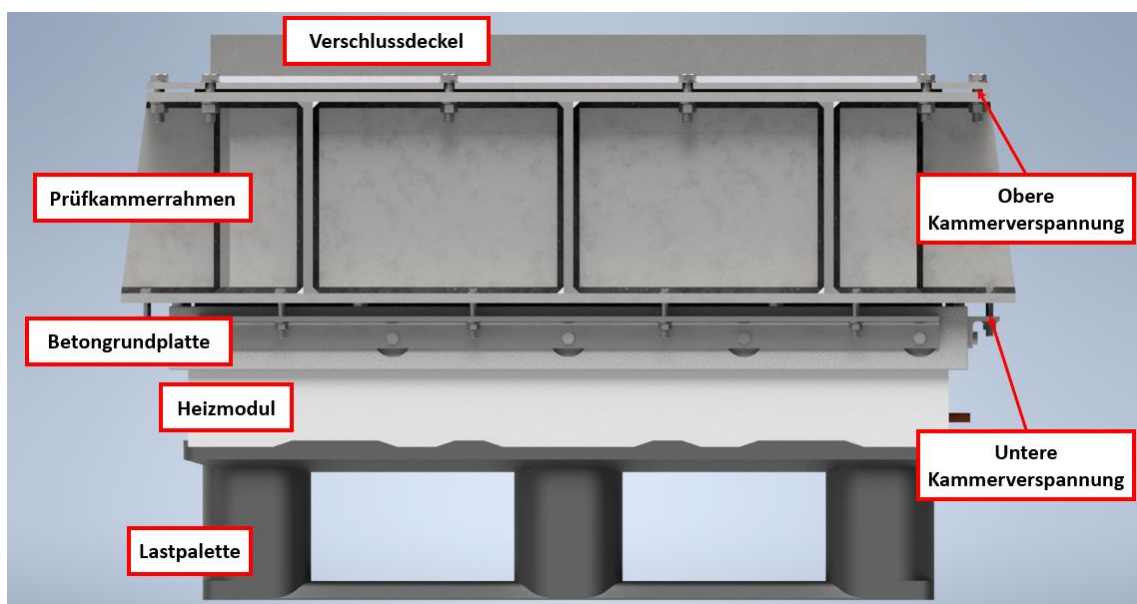


Abbildung 20 CAD-Modell der PK in Seitenansicht

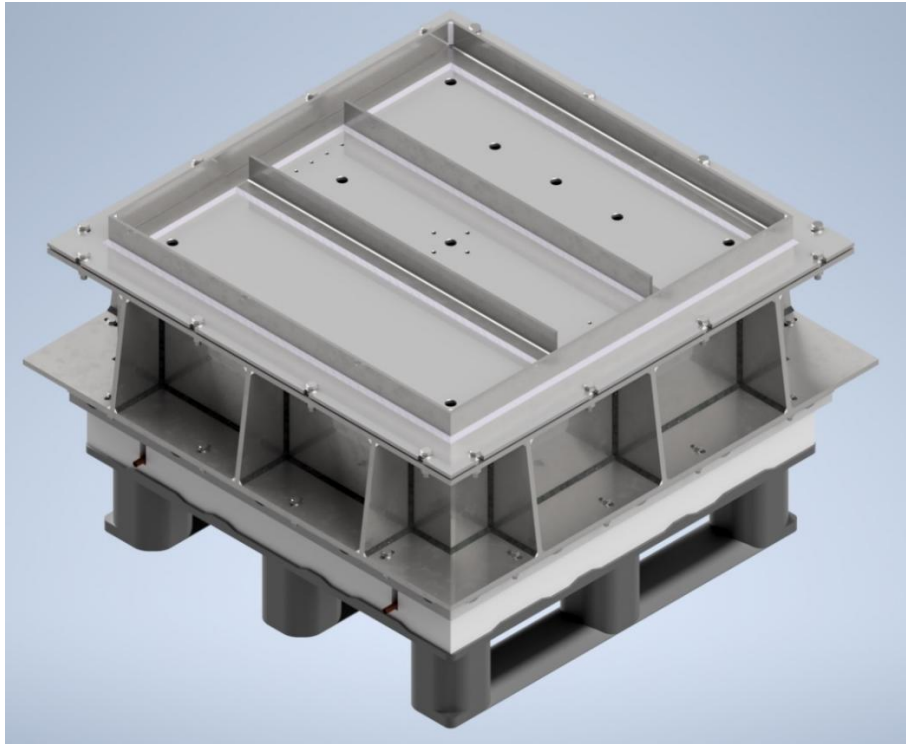


Abbildung 21 **Aktuelles CAD-Modell in Isometrie**

Abbildung 22 zeigt den Querschnitt der PK. Dabei ist die Repräsentation der Einbausituation im Kellerbereich von Gebäuden ersichtlich: Der untere Bereich der PK stellt den Kellerinnenraum des Gebäudes dar und wird durch das HM simuliert; die Betongrundplatte als Gebäudeaußenwand trennt den Kellerinnenraum vom Erdreich und ist entsprechend an ihrer Außenseite mit den Perimeterdämmstoffplatten versehen. Das Erdreich mitsamt dem zirkulierenden Grundwasser wird durch den Kiesraum der PK über der Perimeterdämmstoffprobe abgebildet. Alle relevanten Komponenten der PK sind in der Querschnittsansicht beschriftet und Abbildung 22 zu entnehmen.

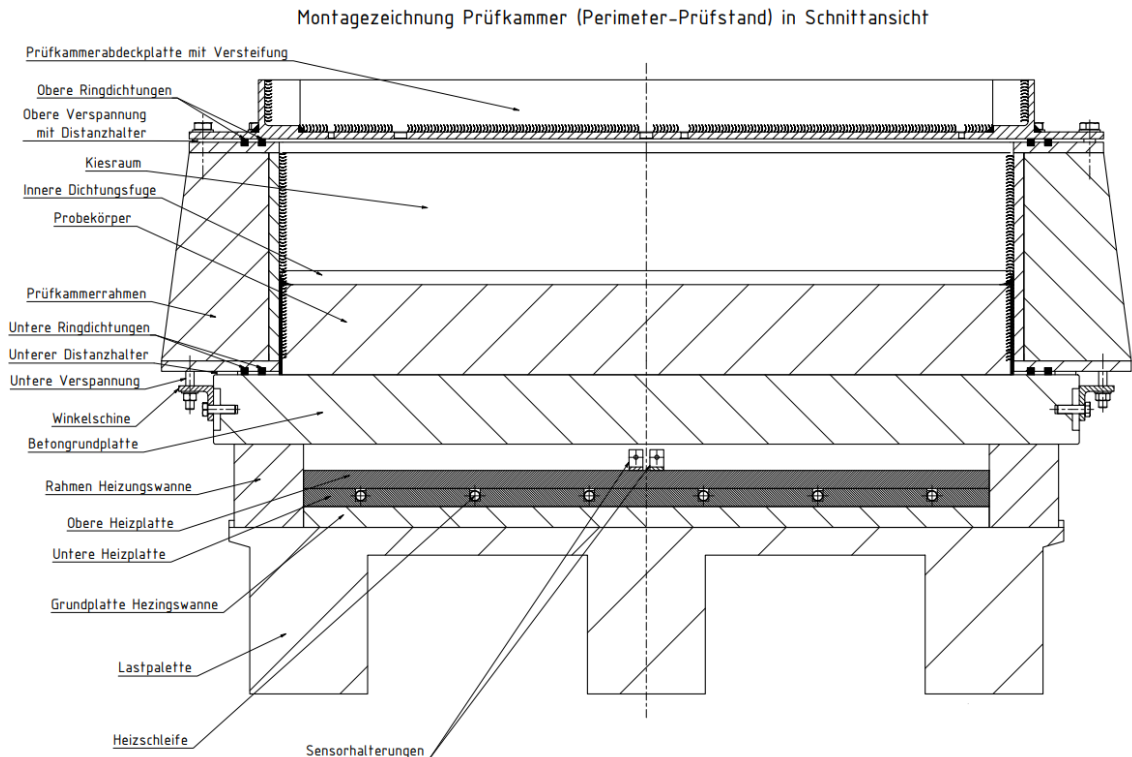


Abbildung 22 Schnittansicht der PK mit Kennzeichnung ihrer Komponenten

In den folgenden Sektionen werden die einzelnen Komponenten der PK im Detail erläutert.

7.2.2 Verschlussdeckel

Der Verschlussdeckel ist als Schweißkonstruktion ausgeführt und aus verzinktem Stahl gefertigt, um die Oberflächen korrosionsbeständig zu machen. Dabei setzt sich der Verschlussdeckel aus einer 10 mm starken Platte und rahmenartig angeordneten L-Profilen zusammen, wobei letztere auf die Platte geschweißt sind, um der Konstruktion eine höhere Biegesteifigkeit zu verleihen. Des Weiteren sind am Verschlussdeckel Öffnungen für die Anschlüsse der Versorgungsinfrastruktur sowie Messtechnik vorgesehen. Außerdem sind an den Rändern des Verschlussdeckels je vier äquidistant angeordnete Einfräsungen für die obere Verspannung der PK eingebracht.

In Abbildung 23 ist die PK unter Benennung ihrer Hauptkomponenten in isometrischer Ansicht visualisiert. Dabei ist auch der Verschlussdeckel zu erkennen, welcher die PK wasserdicht verschließt und mittels der oberen Kammerverspannung die eingelegten Ringdichtungen aus Silikon auf dem PR kompaktiert.

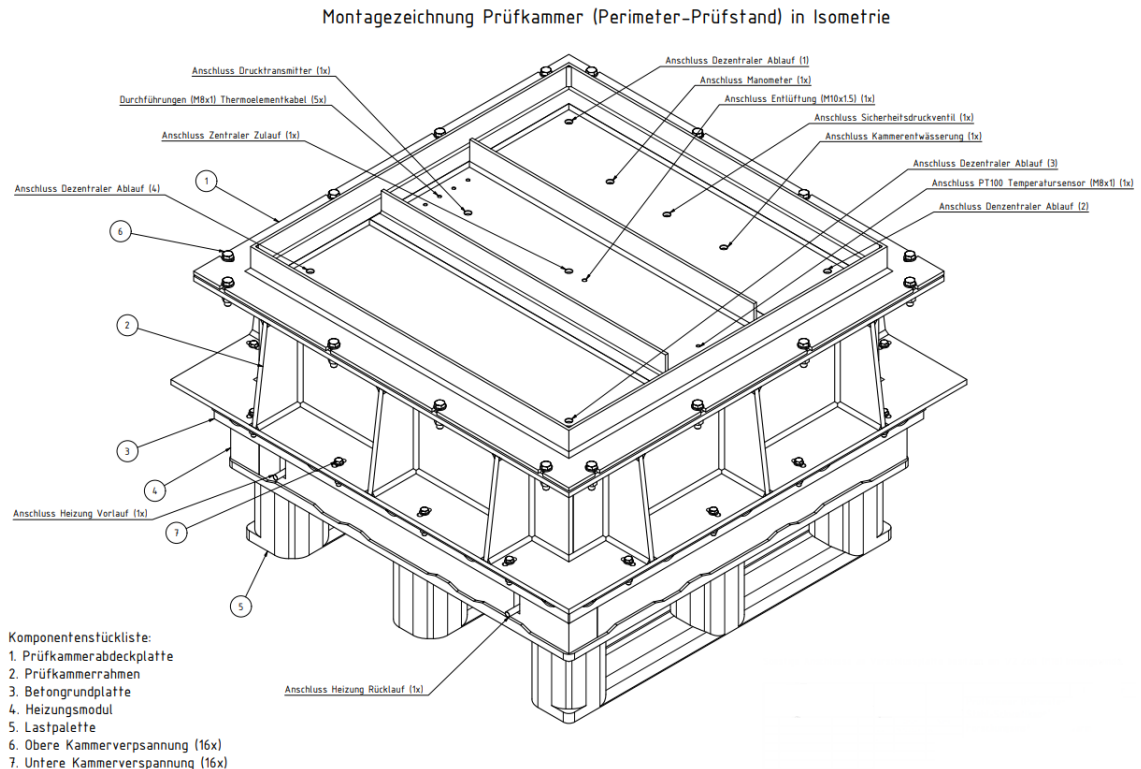


Abbildung 23 Ansicht des Verschlussdeckels mit den Anschlüssen für die Versorgungsinfrastruktur

Die Komponenten des Verschlussdeckels sind die Verschlussplatte, vier auf Gehrung geschnittene L-Profile für die rahmenartige Randanordnung sowie zwei L-Profile für die zentrale Anordnung der Versteifung des Verschlussdeckels. Bei der Montage der PK sind der Verschlussdeckel und der obere Flansch des PR bündig zueinander angeordnet, was die Ausrichtung beider Komponenten erleichtern soll. Der Verschlussdeckel wird mit 15 Millimeter dicken FEF-Schaummatten überdämmt, um thermische Brücken zu eliminieren und den Wärmetransfer zu minimieren.

7.2.3 Prüfkammerrahmen

Der Prüfkammerrahmen (PR) ist als Schweißkonstruktion ausgeführt und aus verzinktem Stahl gefertigt, um die Oberflächen korrosionsbeständig zu machen. Dabei bildet der PR die seitliche räumliche Begrenzung der PK. Die Hauptaufgabe des PR ist somit die Aufnahme und Abtragung der mechanischen Lasten, welche durch den internen Wasserdruck sowie durch die Kammerverspannungen hervorgerufen werden. Simultan muss der PR eine ausreichend hohe Steifigkeit bereitstellen, um die dauerhafte strukturelle Integrität der PK zu gewährleisten. Dies wird durch das konstruktive Zusammenwirken des oberen und unteren Flansches sowie der integrierten Versteifungsrippen erreicht. Um unerwünschte radiale Verschiebungen der oberen und unteren Ringdichtungen zu unterbinden, verfügt der PR über entsprechende eingefräste Nuten an seinem unteren und oberen Flansch, in welche die Ringdichtungen vor dem Verspannen der PK eingelegt werden. Die eingebrachten Langlöcher an den Rändern des unteren und oberen Flansches des PR dienen der Verspannung der PK mittels M12-Schrauben (unten) sowie M16-Schrauben (oben). Für die unteren und

oberen Kammerverspannungen sind die Langlöcher an den beiden zu verspannen- den Komponenten jeweils orthogonal zueinander angeordnet, um ein Spiel für das optimale Ausrichten der Komponenten relativ zueinander während der Montage der PK zu ermöglichen. Um thermische Brücken zu eliminieren und die energetische Effizienz der PK zu maximieren sind sowohl der Verschlussdeckel als auch der PR thermisch zu isolieren; dabei empfiehlt sich eine kombinierte Verwendung von XPS und FEF-Schaummatten.

Abbildung 24 zeigt den PR als gerendertes Bild des zugehörigen CAD-Modells. Die Bestandteile des PR sind benannt.

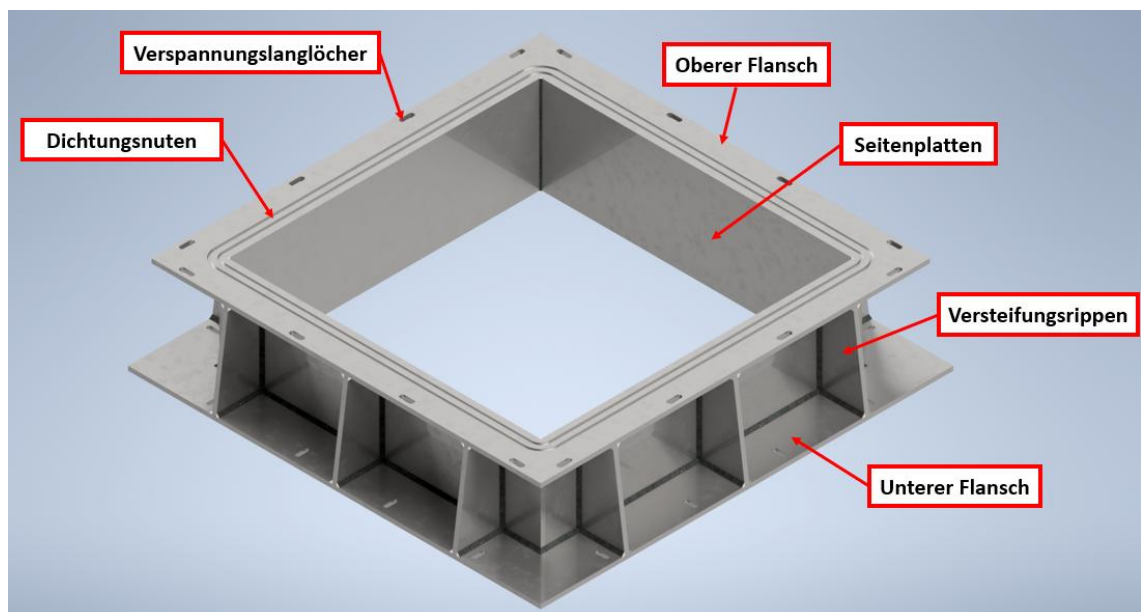


Abbildung 24 Prüfkammerrahmen als Schweißkonstruktion in Isometrie

Basierend auf den Innenmaßen des PR betragen die Abmessungen der PK 1060 x 1060 x 330 Millimeter. Abbildung 25 stellt den gefertigten PR als Schweißkonstruktion aus verzinktem Stahl im ungedämmten Zustand dar.



Abbildung 25 Gefertigter Prüfkammerrahmen als Schweißkonstruktion aus verzinktem Stahl

7.2.4 Ringdichtungen und Dichtungssystem

Die Ringdichtungen wurden für die PK aus Silikon mit einer Shore-A-Härte von SH-A 40 maßgefertigt und verfügen über ein quadratisches Profil sowie einen quadratischen Grundriss mit abgerundeten Ecken, sodass sie sich in die vorgesehenen Nuten am PR einlegen lassen. Das Dichtungssystem der PK ist mit einem inneren sowie äußeren Dichtungsring redundant ausgelegt, was sowohl für die Dichtungsebene zwischen dem Verschlussdeckel und dem PR als auch zwischen dem PR und der Betongrundplatte gilt. Des Weiteren ist eine Dichtungsfuge zwischen dem oberen Rand der Perimeterdämmstoffprobe und den Seitenwänden des PR eingezogen, welche beim Abdichten der PK gegen Wasseraustritt und dem Verhindern eines Hinterlaufens der eingebauten Dämmstoffprobe während dem Betrieb die Hauptlast tragen muss.

Es ist zu erwarten, dass die oberen Ringdichtungen, welche zwischen dem Verschlussdeckel und dem PR installiert sind, größeren Belastungen durch den hydraulischen Innendruck ausgesetzt sein werden als die unteren Ringdichtungen. Diese dienen lediglich der Sicherheit, um die PK nach unten hin gegen Wasseraustritt abzudichten für den Fall, dass die Dichtungsfuge versagen sollte, bzw. die Dämmung aufgrund eines Versagens der Verspachtelung zwischen den Platten hinterlaufen sollte.

Die Dichtungsfuge zwischen dem PR und der Perimeterdämmstoffprobe stellt neben den oberen Ringdichtungen im Dichtungssystem der PK die am stärksten belastete Dichtungsebene dar und muss ohne Redundanz dauerhaft funktional bleiben. Für die Ausführung der Dichtungsfuge bieten sich dauerhaft flexible, hoch belastbare und

hydrolysebeständige Dichtungsmassen an, wie diese bspw. zur Abdichtung von Betonfugen im Tiefbau verwendet werden.

Während die Ringdichtungen beim Zusammenbau der PK in die dafür vorgesehenen Nuten am PR eingelegt werden und anschließend mittels eingelegten Distanzhülsen (untere Kammerverspannung) oder Unterlegscheiben (obere Kammerverspannung) auf einen vordefinierten Kompaktierungsgrad verspannt werden, so muss die Dichtungsfuge nach dem Einbau der Dämmstoffprobe manuell mittels eines Fugenwerkzeugs eingezogen werden und aushärten. Beim Ausbau der Dämmstoffprobe wird die Dichtungsfuge wieder entfernt. Der Ein- und Ausbau der Dämmstoffprobe in die PK sowie das Vorgehen bei der Montage sind in Abschnitt 7.3 und 7.3.3 näher spezifiziert. Insbesondere ist beim Einbau der Dämmstoffprobe in die PK zu beachten, dass die unteren Ringdichtungen gegen eine Kontamination mit dem Bitumenkleber von innen geschützt sind, um eine Zerstörung der Dichtungen durch Komplikationen bei der Demontage der PK zu verhindern. Abschließend stellt Abbildung 26 die Konfiguration des Dichtungssystems im eingebauten Zustand in der PK dar.

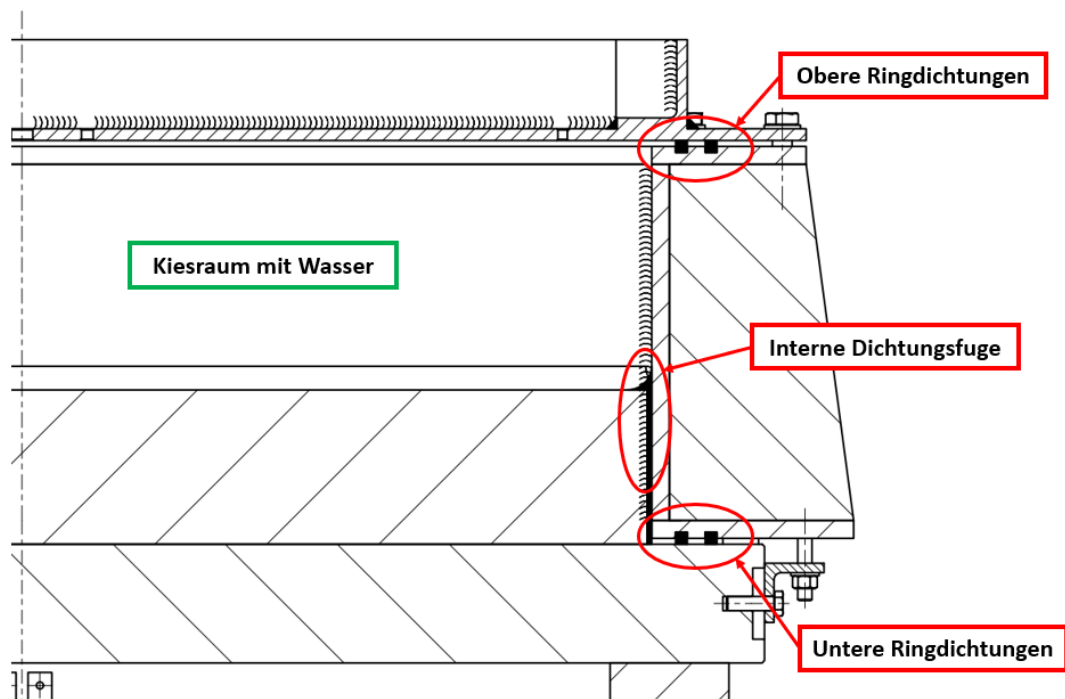


Abbildung 26 **Bestandteile und Konfiguration des Dichtungssystems der Prüfkammer in eingebautem Zustand**

In Abbildung 27 sind die in die Dichtungsuten am PR eingelegten Silikondichtungen zu sehen.

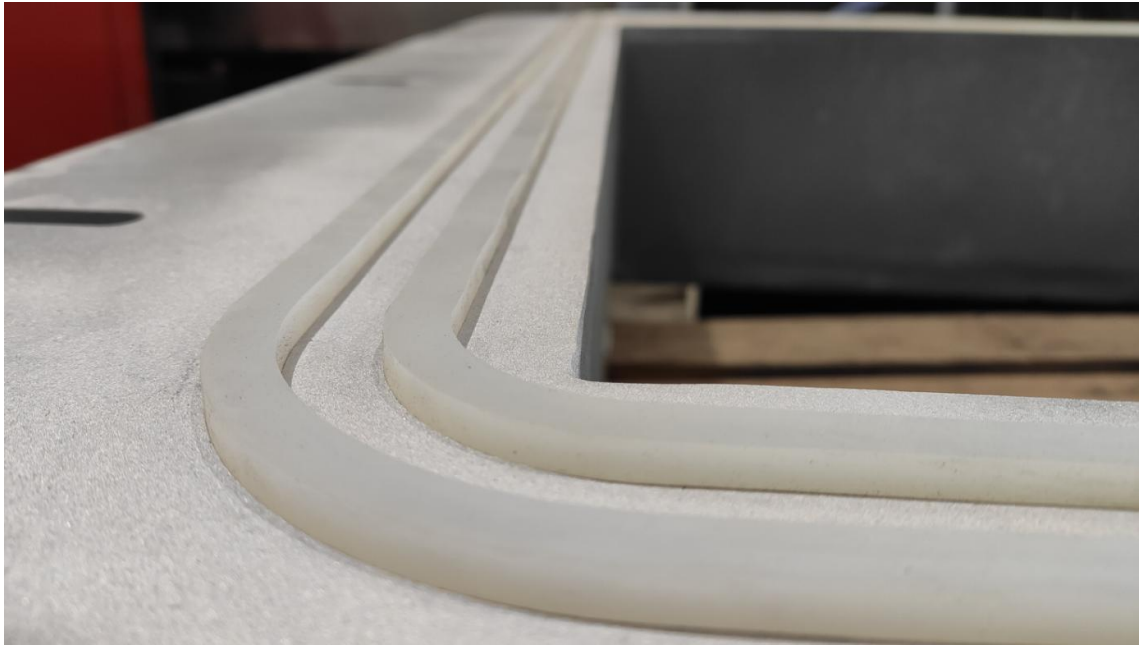


Abbildung 27 Am Prüfkammerrahmen eingebrachte Ringdichtungen

7.2.5 Betongrundplatte

Die Betongrundplatte bildet die thermische Schnittstelle sowie räumliche Trennung zwischen dem Prüfkammerraum oberhalb der Betongrundplatte und dem Heizraum des Heizmoduls (HM) unterhalb der Betongrundplatte. Die Betongrundplatte wurde als Betonguss mit integrierter Stahlarmierung gefertigt. Die vier Winkelschienen für die untere Kammerverspannung werden auf den vier Seiten der Betongrundplatte an dafür vorgesehenen M12 Gewindehülsen montiert. Auf der Seite des Prüfkammer-raums wird der zu prüfende Aufbau aus Perimeterdämmplatten auf die Betongrundplatte mittels eines Bitumenklebers installiert; zwischen der Betongrundplatte und der Dämmstoffprobe wird dabei eine vollflächige Verklebung angestrebt. Abbildung 28 zeigt die Betongrundplatte auf dem Heizraum.



Abbildung 28 Unterer Teil der Prüfkammer: Heizmodul auf Lastpalette mit aufgesetzter Betongrundplatte

7.2.6 Heizmodul

Das Heizmodul (HM) ist für die Simulation des Kellerinnenraums zuständig und beinhaltet eine in die Heizungswanne eingebettete Plattenheizung, welche nach dem Vorbild einer Bodenheizung aufgebaut ist. Das Ziel des Heizmoduls ist es eine zeitlich konstante Raumtemperatur von 18 °C im Heizraum unter der Betongrundplatte bereitzustellen, sodass sich zwischen dem Heizraum (bzw. Kellerinnenraum) und dem Prüfkammerraum (bzw. Erdreich) ein Temperatur- und Diffusionsgradient ausbilden kann, welcher die physikalischen Gegebenheiten an realen Gebäuden möglichst präzise nachbilden soll. In Abbildung 29 ist das HM zu sehen; rechts sind die Heizschleifen, welche in der unteren Heizplatte eingelegt sind dargestellt und links ist das HM im vollständig montierten Zustand zu sehen.

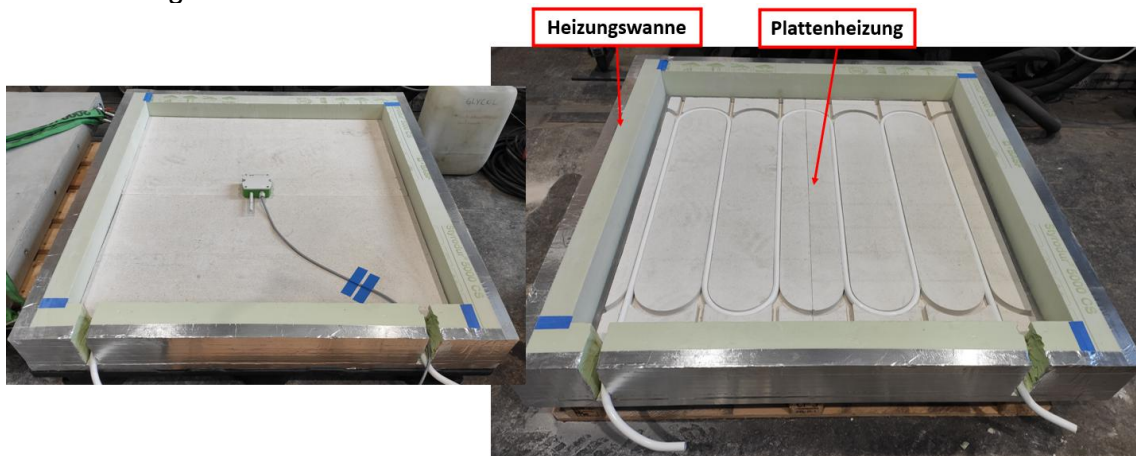


Abbildung 29 Heizungsmodul der Prüfkammer

Das HM wird über das Heizkreissystem der Anlage mit einem Wasser-Glykol-Gemisch zur Temperierung versorgt; an einem Anschluss befindet sich der Vorlauf, an dem zweiten Anschluss der Rücklauf. Die Heizmodulwanne ist aus XPS-Elementen gefertigt; dabei muss das XPS-Material die nötige Dauerdruckfestigkeit besitzen, um eine langzeitstabile Auflagebasis für den oberen Teil der PK zu bieten. Die Heizungsmodulwanne ruht ihrerseits auf der Lastpalette.

7.2.7 Prüfkammerverspannung

Das Schema der Prüfkammerverspannung ist in der technischen Zeichnung in Abbildung 30 verbildlicht. Nach dem Ausrichten von Verschlussdeckel, PR und Betongrundplatte zueinander werden diese über die jeweiligen Prüfkammerverspannung manuell miteinander verspannt, bis es zu einem Aufliegen auf den Distanzhaltern kommt. Die Verspannung erfolgt bei der oberen Prüfkammerverspannung (Verschlussdeckel auf PR) mittels 16 verzinkten M16-Sechskantschrauben mit den zugehörigen Muttern und Unterlegscheiben; bei der unteren Prüfkammerverspannung (PR auf Betongrundplatte) wird die Verspannung über 16 verzinkte M12-Sechskantschrauben mit den zugehörigen Muttern und Unterlegscheiben realisiert, wobei die Klemmkkräfte über Winkelschienen in die Betongrundplatte abgeleitet werden. Dabei werden die Schrauben in die für die Prüfkammerverspannung vorgesehenen Langlöcher eingehängt.

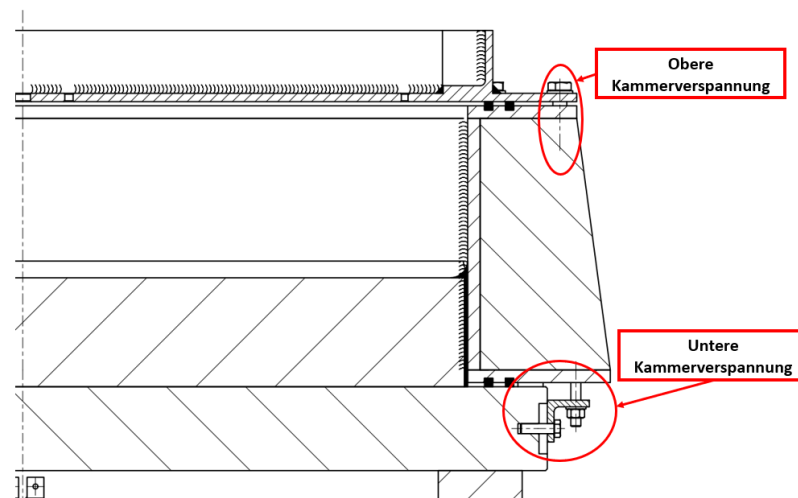


Abbildung 30 Technische Zeichnung der oberen und unteren Prüfkammerverspannung

Die Prüfkammerverspannung wurde für den oberen sowie unteren Teil der PK jeweils konstruktiv separat umgesetzt; auf der einen Seite wäre eine durchgängige Prüfkammerverspannung von der Betongrundplatte bis zum Verschlussdeckel aus mechanischer Sicht günstiger, jedoch würde sich der Aufwand während dem Durchführen von innerbetrieblichen Wartungsarbeiten an der PK signifikant erhöhen, da vor dem Öffnen der PK aus Sicherheitsgründen das Wasser komplett abgepumpt werden müsste, sofern an der PK eine durchgängige Prüfkammerverspannung realisiert worden wäre. Ein weiteres Problem der durchgängigen Prüfkammerverspannung gegenüber der separaten Prüfkammerverspannung stellt die Gefahr von Verschiebungen des PR und der Probe relativ zur Betongrundplatte dar; derartige Verschiebungen können potenziell zu einer Beschädigung der internen Dichtungsfuge zwischen der Probe und dem PR führen, welche es zu vermeiden gilt. Basierend auf diesen Aspekten wurde für die PK das Prüfkammerverspannungs-Konzept mit der räumlichen Trennung in vertikaler Richtung gewählt und umgesetzt.

7.2.8 Thermische Dämmung

Eine leistungsfähige thermische Dämmung ist für die Maximierung der energetischen Effizienz während des Langzeitbetriebs der Prüfanlage unerlässlich. Dabei müssen die gravierendsten thermischen Brücken zwischen der Umgebung der PK und ihrem Inneren eliminiert werden; dies betrifft im Falle der aktuellen Konstruktion der PK insbesondere den Verschlussdeckel sowie den PR, welche beide aus Stahl gefertigt sind.

Der Verschlussdeckel ist inklusive der Versteifungsprofile mit 15 Millimeter dicken FEF-Schaumplatten beklebt. Die angeschlossenen hydraulischen Zu- und Ableitungen sind mit passenden FEF-Rohrdämmungen versehen. Der PR ermöglicht aufgrund seiner Geometrie aus dem oberen und unteren Flansch sowie den Versteifungsrippen das zusätzliche Einkleben von XPS-Blöcken in die daraus gebildeten Hohlräume. Dadurch kann die Geometrie ausgeglichen werden, was dann den Einbau der 15 Millimeter FEF-Matten erleichtert. Das Verwenden von XPS-Blöcken für die Hohlräume des PR in Kombination mit einer FEF-Schaummantelung sollte eine ausreichend dimensionierte thermische Dämmung des PR bereitstellen; schließlich stellt der PR mit den Flanschen und Versteifungsrippen jenes Bauteil mit der größten Oberfläche in der Konstruktion der PK dar. Die Betongrundplatte ist verglichen mit dem Verschlussdeckel und PR weniger kritisch hinsichtlich des unerwünschten Wärmeaustauschs, kann jedoch ebenfalls optional mit FEF-Schaummatten beklebt werden. Das HM verfügt bereits mit seiner aus XPS gefertigten Wanne über eine optimale thermische Isolierung.

7.3 Betrieb der Prüfkammer

7.3.1 Montage von Prüfkammer und Dämmstoffprobe

Bevor die Perimeterdämmstoff-Probe in die PK eingebaut werden kann, müssen zwei Schritte durchgeführt werden:

- Vorbereitung der Probe.
- Vormontage der PK.

Die Perimeterdämmstoffprobe besteht aus vier Teilstücken, um T-Stöße der verklebten Dämmplatten im Messbereich abzubilden (Abbildung 31). Zunächst müssen die vier Einzelteile der Probe passend zugeschnitten werden, sodass die Probe in ihrer vorgesehenen Konfiguration zusammengefügt werden kann; beim Zuschnitt muss ein geeignetes Aufmaß berücksichtigt werden, da die Probe nach dem Verkleben der Stöße auf das Innenmaß des PR formatiert wird. Die vier Segmente der Probe werden anschließend an ihren Stufenfalzen mit Bitumenkleber per Zahnkelle eingestrichen und miteinander durch Einschwimmen verklebt. Dabei muss eine bestimmte Reihenfolge beachtet werden, welche sich aus der Konfiguration der Dämmstoffprobe ergibt. Sobald die Probensegmente an ihren gemeinsamen seitlichen Stoßstellen verklebt

wurden, muss die Probe etwa 2-3 Tage ruhen, sodass der Bitumenkleber eine ausreichende Festigkeit erreichen kann. Vor dem Einbau in die PK wird die Probe abschließend präzise auf das Innenmaß des PR der PK mittels einer Bandsäge zugeschnitten. Das Ziel ist es hierbei den Innenraum der PK möglichst effizient auszufüllen und die entstehenden seitlichen Lücken zwischen der Probe und der Innenwand des PR zu minimieren.

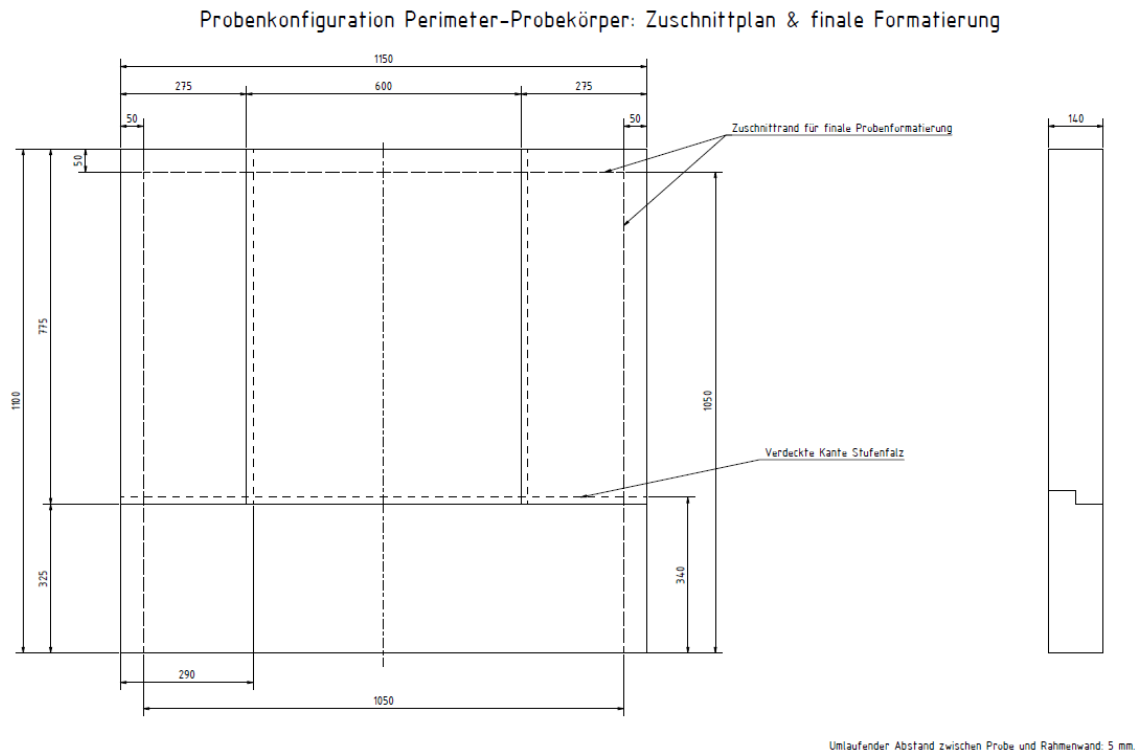


Abbildung 31 Konfiguration des Probekörpers aus vier Einzelteilen zur Ausbildung von Längs- und T-Stößen

Im nächsten Schritt wird die PK für den Einbau der Probe vorbereitet. Das HM ruht bereits auf der Lastpalette und die Betongrundplatte wurde mittels eines Krans auf dem HM platziert. Als nächstes muss der PR auf der Betongrundplatte installiert werden. Während dem Absenken des PR mithilfe des Krans müssen die unteren Ringdichtungen in die Nuten des PR sowie die acht Distanzhülsen zwischen PR und Betongrundplatte eingelegt werden. Danach kann der PR über die 16 Schrauben der unteren Prüfkammerverspannung verspannt werden. Dabei sollte der PR auf allen acht Distanzhülsen (zwei je Seite) gleichermaßen aufliegen; dadurch werden die Ringdichtungen auf ihre Zielhöhe kompaktiert. Beim Einlegen der unteren Ringdichtungen muss zudem innerhalb der inneren Ringdichtung eine Barriere zum Schutz der Dichtungen gegen eine Kontamination mit dem möglicherweise eindringenden Bitumenkleber vorgesehen werden. Dies kann entweder durch das Abkleben des Dichtungsspalt zwischen den Innenwänden des PR und der Betongrundplatte unter Zuhilfenahme von geeigneten langzeitstabilen Klebebändern (idealerweise Aluminiumband) erfolgen, oder alternativ durch das Einlegen einer geschlossenen Dichtschnur. In jedem Fall muss ein Kontakt zwischen dem Bitumenkleber und der inneren unteren Ringdichtung unbedingt vermieden werden, da die Ringdichtung dann

irreparabel beschädigt wäre und nicht mehr für einen weiteren Einsatz in einer PK verwendbar wäre. Sollte ein Klebeband verwendet werden, so ist darauf zu achten, dass der Klebefalz auf der Betongrundplatte möglichst klein ist, damit der PR möglichst einfach per Kran bei der Demontage der PK abgehoben werden kann; gleichzeitig muss die errichtete Klebebandbarriere stabil genug sein, um den zwischen der Probe und der Betongrundplatte potentiell austretenden Bitumenkleber aufzuhalten.

Des Weiteren erfolgt die Installation der fünf unteren Typ-T Thermoelemente auf der Betongrundplatte an ihren vordefinierten Positionen. Siehe dazu Abbildung 32. Die Thermoelemente werden mit einem geeigneten Klebeband auf der Betongrundplatte fixiert. Die Kabel werden aus der PK hinausgeführt und an den Schaltkasten der Messdatenerfassung der jeweiligen PK über TC-Stecker angeschlossen. Die Thermoelement-Kabel müssen innerhalb der PK in geeigneter Weise verlegt und mit Klebeband fixiert werden; hierbei ist wichtig darauf zu achten, dass die Thermoelement-Kabel den Einbau der Probe nicht behindern oder durch diesen beschädigt werden können.

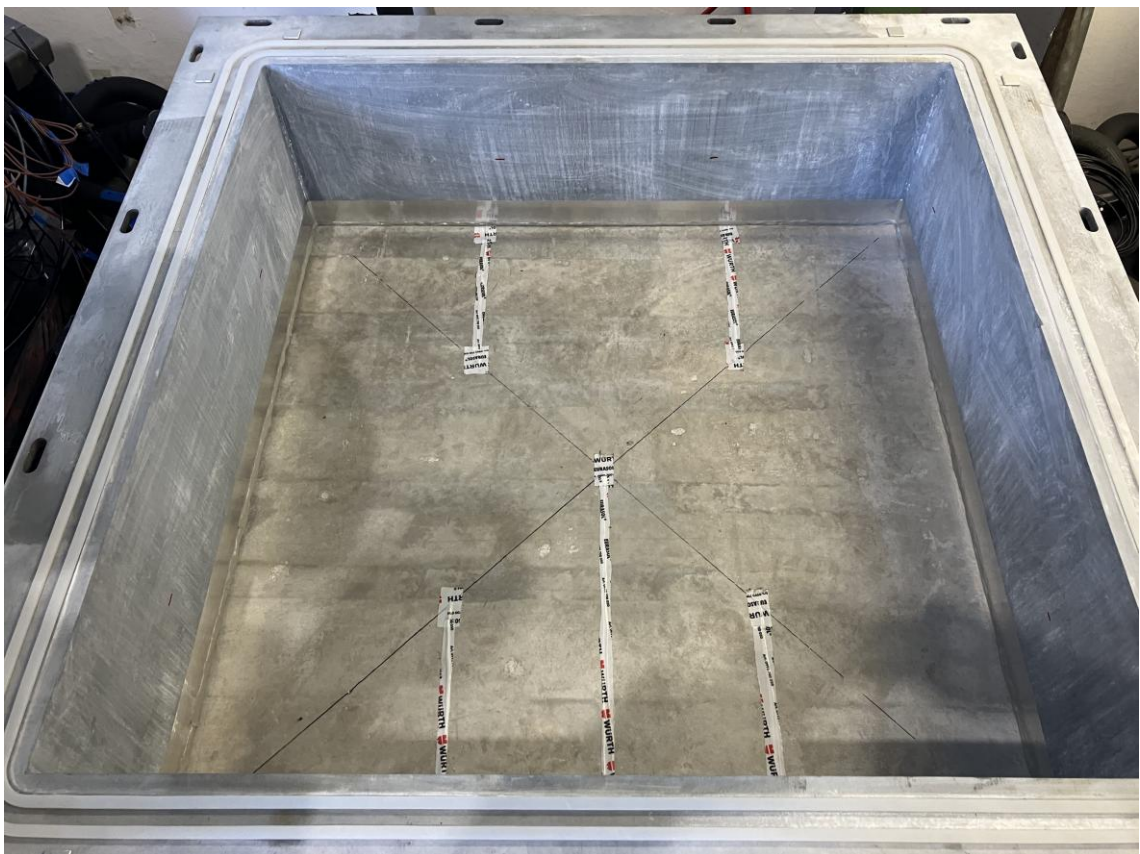


Abbildung 32 Betongrundplatte mit fünf Thermoelementen und der aufgesetzten Prüfkammer

Hiernach kann nun der Einbau der Perimeterdämmstoff-Probe in die PK erfolgen. Dazu wird nun die Unterseite der formatierten Probe per Zahnkelle mit Bitumenkleber eingestrichen. Anschließend wird die Probe behutsam in den PR eingelassen und zunächst manuell kontrolliert abgesenkt, bis die Probe mitsamt der aufgetragenen Bitumenkleberschicht auf der Betongrundplatte aufliegt. Während dem manuellen

Absenken der Probe in den PR ist darauf zu achten, dass die Probe nicht verkantet, da dies ihre Kanten und möglicherweise sogar die bereits geklebten Stöße beschädigen kann. Ebenso dürfen die Thermoelemente und ihre Kabel nicht beschädigt werden.

Sobald die Probe auf der Betongrundplatte aufliegt, wird sie mit einer am PR verspannten Schraubenpresse mittels eines geeigneten XPS-Stempels in ihre vorgesehene vertikale Endposition gedrückt, welche durch die vordefinierte Dicke der Bitumenkleberschicht bestimmt wird. Diese vordefinierte Dicke der Bitumenkleberschicht wurde über vorangegangene Verpressungsexperimente derart ermittelt, dass das Vorliegen einer vollflächigen Verklebung der eingebauten Probe mit dem Betonsubstrat in guter Näherung angenommen werden kann.

Nach dem erfolgten Einbau der Messprobe folgt eine Sequenz weiterer Schritte:

1. Einziehen der internen Dichtungsfuge in zwei Schritten mit ausreichender Aushärungszeit.
2. Installation der fünf Thermoelemente auf der Messprobe an ihren Positionen.
3. Befüllen des Kiesraums der PK mit gewaschenem Kies.
4. Einbringen und Anschließen des Saugstutzens für die PK-Entwässerung.
5. Einlegen der oberen Ringdichtungen.
6. Verschließen der PK mit dem Verschlussdeckel.
7. Verspannen der PK mittels der oberen Prüfkammerverspannung.
8. Anschließen der hydraulischen Versorgungstechnik.
9. Anschließen der verbleibenden Messtechnik.

Die interne Dichtungsfuge wird aus Sika-Flex-Dichtmasse manuell mittels eines Fugenwerkzeugs und einer Silikonspritzpistole mit dünner Düse in zwei Schritten generiert: Zunächst wird der Spalt zwischen der eingebauten Probe und den Seitenwänden des PR mit einer großzügigen Menge an Dichtmasse aufgefüllt. Dabei wird die Silikonpistole mit ihrer dünnen Düse an dem Spalt angesetzt; die Dichtmasse wird unter mehrmaligem Pumpen der Silikonpistole in den Spalt gedrückt. Währenddessen wird die Silikonpistole sehr langsam entlang des Spaltes geführt. Überstehendes Material muss mit einer Spachtel rundherum in den Spalt gedrückt werden und anschließend plan abgestrichen werden. Das Ziel ist es den umlaufenden Spalt zwischen der Probe und dem PR vollständig zu versiegeln; dabei muss gewährleistet sein, dass sich genügend Dichtmasse mit einer ausreichend großen Schichtdicke in vertikaler Richtung in den Spalten ausbildet. Dabei ist hier mit Inhomogenitäten zu rechnen, da der Befüllungsprozess der Spalte mit Dichtmasse nicht visuell überwacht und überprüft werden kann. Daher ist es wichtig darauf zu achten, dass Dichtmasse in ausreichend hohen Mengen an jedem Punkt entlang der Spalte in diese hineingedrückt wird. Der hohe Materialverbrauch wird durch die Anforderung eines sicheren Dauerbetriebs der PK gerechtfertigt und muss an dieser Stelle in Kauf genommen werden. Sobald der umlaufende Spalt zwischen Probe und PR-Innenwänden mit Dichtmasse optimal versiegelt und plan abgestrichen ist, folgt eine Aushärungszeit von 24 Stunden; somit wäre der erste Aufbauschritt der internen Dichtungsfuge abgeschlossen.

Für den zweiten Aufbauschritt der Dichtungsfuge wird nun zusätzlich ein Fugenwerkzeug benötigt. Die eingezogene Fuge sollte ausreichend groß dimensioniert sein, um den Nachteil der fehlenden Redundanz der internen Dichtungsfuge zu kompensieren; somit ist der größtmögliche Radius für das Einziehen des oberen Teils der Fuge am Fugenwerkzeug zu wählen. Nach dem Einziehen der Dichtungsfuge mit dem Fugenwerkzeug sollten ggf. die Ecken manuell nachgebessert werden; das Ziel des zweiten Aufbauschritts ist die Schaffung einer geschlossen-umlaufenden Dichtungsfuge mit konstantem Radius, welche möglichst tangential mit den Wandebenen des PR und der Probenoberfläche abschließt. Dies ist wichtig, um eine günstigere Verteilung des auf der Dichtungsfuge lastenden Wasserdrucks bei gefüllter PK zu erreichen; je größer die Fuge und je stetiger die Übergänge zwischen den verschiedenen Materialien, desto geringer die lokale Spannungskonzentration an der Fuge, was wiederum insgesamt in einer geringeren mechanischen Belastung der internen Dichtungsfugen durch den anliegenden Wasserdruck resultiert. Dies ist ebenfalls essenziell für einen störungsfreien Dauerbetrieb der PK. Auch die zweite Aufbaustufe der internen Dichtungsfuge wird mit einem 24-stündigen Aushärtungsintervall abgeschlossen.

Darauffolgend kann mit der Installation der Thermoelemente auf der Probenoberfläche fortgefahren werden. Die Thermoelemente werden wie unter der eingebauten Probe, an ihren vorgesehenen Positionen mit Klebeband fixiert; die Positionen müssen deckungsgleich mit denen der Thermoelemente auf der Betongrundplatte sein. Dabei befinden sich in jeder Ecke sowie in der Mitte des Prüffeldes jeweils ein Thermoelement über der Probe und deckungsgleich dazu je ein Thermoelement unter der Probe; über diese Messkonfiguration wird der Temperaturgradient im Prüffeld in orthogonaler Richtung zur Probenebene erfasst. Die Kabel der Thermoelemente werden über die fünf Kabeldurchführungen im Verschlussdeckel aus dem Kiesraum der PK geführt; die Kabel sollten darüber hinaus mit Klebeband in geeigneter Weise verlegt und fixiert sein. Die Thermoelemente, werden an den Schaltkasten der Messdatenerfassung der jeweiligen PK angeschlossen.

Nach der Installation der Thermoelemente erfolgt noch das Platzieren des Saugstutzens für die PK-Entwässerung auf einer beliebigen Position auf der Probenoberfläche; der abgehende Schlauch wird an die entsprechende hydraulische Schnittstelle an der Unterseite des Verschlussdeckels angeschlossen.

Danach können die oberen Ringdichtungen in ihre jeweiligen Nuten am oberen Flansch des PR eingelegt werden. Vor dem Verschließen der PK muss noch die Befüllung des Kiesraums erfolgen. Im Idealfall ist der Kiesraum der PK nach der Befüllung bis etwa fünf Zentimeter unter der Dichtungsebene des oberen PR-Flansches befüllt. Der Kies sollte homogen über das gesamte Prüffeld verteilt sein.

Nun kann mit dem Kran der Verschlussdeckel auf den PR aufgesetzt und mittels der oberen Prüfkammerverspannung verspannt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Sensorkabel und der Entwässerungsschlauch nicht abgeknickt oder eingeklemmt werden. Beim Verspannen des Verschlussdeckels auf den PR müssen die Schrauben der oberen Prüfkammerverspannung mit je gleichvielen Unterlegscheiben bestückt

sein; die Unterlegscheiben dienen im System der oberen Prüfkammerverspannung als Distanzhülsen, welche einen konstanten Dichtungsspalt zwischen dem Verschlussdeckel und dem PR-Flansch einstellen und aufrechterhalten. Hierbei wird, wie im Fall der unteren Prüfkammerverspannung, eine definierte Kompaktierung der oberen Ringdichtungen erzielt.

Nachdem die PK nun verschlossen wurde, muss noch die hydraulische Versorgungstechnik über die auf dem Verschlussdeckel vorinstallierte Verrohrung angeschlossen werden. Dabei müssen die folgenden hydraulischen Schnittstellen zwischen der PK und der Versorgungsanlage hergestellt werden:

1. Zentraler Zulauf für VE-Wasser.
2. Zentraler Ablauf für VE-Wasser.
3. Anschluss PK-Entwässerung.
4. Bypass Sicherheitsdruckventil.
5. Bypass VE-Wasserzulauf.
6. Bypass VE-Wasserablauf.
7. Anschluss Heizmodul Vorlauf.
8. Anschluss Heizmodul Rücklauf.

Zum Schluss müssen noch die verbleibenden Elemente der Mess- und Steuerungsinfrastruktur der PK an die Steuerung angeschlossen werden. Nach einer Funktionsprüfung der Messtechnik kann dann die neu aufgebaute PK in Betrieb genommen werden und zum hydraulischen Versorgungsnetz dazugeschaltet werden.

7.3.2 Befüllen und Entleeren

Beim Befüllen der PK mit VE-Wasser muss die Entlüftung unbedingt geöffnet sein, da es sonst zur Formierung von komprimierten Luftkissen unter den Verschlussdeckel der PK kommen kann; dies ist unzulässig für den Messbetrieb, da sich die Anlage im Bereich der unzureichend entlüfteten PK aus hydraulischer Sicht unkontrollierbar und instationär verhalten würde. Sobald die Wassersäule in dem Entlüftungsrohr hochsteigt, kann die Entlüftung geschlossen werden. Sobald die Wassersäule den Überlauf erreicht und der vordefinierte Wasserdruck in der PK erreicht wurde, geht die PK in den stationären Betrieb über und die automatische Regelung übernimmt, nachdem die entsprechenden Parameter für die Temperierung und Durchflussraten spezifiziert wurden. Unregelmäßigkeiten im Betriebszustand werden mittels der automatisierten Anlagenüberwachung sofort über Fehlermeldungen und ggf. Alarmsignale angezeigt.

Der stationäre Betrieb und die Regelung bzw. Automatisierung der Anlage wird in Abschnitt 7.5 genauer beschrieben.

Für den Fall, dass eine PK für Wartungsarbeiten oder aufgrund der Beendigung der Messung außer Betrieb genommen werden muss, wird der Zuström des VE-Wassers in die PK unterbrochen. Das unter Druck stehende Wasser in der Zulaufleitung wird über den Hahn am VE-Wasserzulauf-Bypass abgelassen. Sobald die Leitungen

drucklos geschaltet sind, kann über die primäre Hebepumpe (HP1) das Wasser aus der PK über den Saugstutzen abgepumpt werden. Mittels HP1 wird das Wasser von der PK in das Bypass-Sammelbecken (BSB) transferiert. Das Wasser wird in der PK auf einen Pegelstand von etwa fünf Millimetern mittels der HP1 abgepumpt. Nun ist die PK leergepumpt, hydraulisch von der Versorgungsanlage abgekoppelt und somit bereit für die Demontage bzw. den Ausbau der Dämmstoffprobe. Das hydraulische Versorgungssystem wird detailliert in Kapitel 7.4 beschrieben.

7.3.3 Demontage von Prüfkammer und Dämmstoffprobe

Nachdem die PK außer Betrieb genommen wurde, kann diese geöffnet werden, um die Probe auszubauen. Hierzu müssen zunächst alle hydraulischen und elektrischen Verbindungen, soweit möglich, entfernt werden, um den nötigen Bewegungsraum des Verschlussdeckels für die Demontage zu schaffen. Nun sind die Schrauben der oberen Prüfkammerverspannung zu lösen; der Verschlussdeckel kann dann mit dem Kran von der PK abgehoben werden. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass die PT100-Sensorkabel und der Entwässerungsschlauch nicht beschädigt werden. Als nächstes muss der Kies aus dem Kiesraum der PK entfernt werden. Sobald der Kies und der Saugstutzen entfernt sind, können die Reste des Wassers auf der Probe mit einem saugfähigen Lappen aufgenommen werden; anschließend die Probenoberfläche mit Laborpapier trockenwischen. Darauffolgend sind die Sensoren von der Probenoberfläche zu entfernen und aus den Kabeldurchführungen des Verschlussdeckels auszufädeln. Die oberen Ringdichtungen können optional aus den Nuten des PR genommen werden.

Nun ist die PK geöffnet und trockengelegt; die Dämmstoffprobe kann im Rahmen der nächsten Schritte ausgebaut werden. Hierzu muss zunächst die interne Dichtungsfuge an den Rändern der Probe weggeschnitten werden, sodass die Probe von den Innenwänden des PR losgelöst ist. Nachdem die interne Dichtungsfuge von den Innenseiten des PR gelöst wurde, können als nächstes die Schrauben des unteren Prüfkammerverspannung gelöst werden. Zum Lösen der Prüfkammerverspannungsschrauben (oben und unten) muss ggf. die FEF-Schaumverkleidung (äußere thermische Dämmschicht) vom PR gelöst werden, um Zugang zu den Verschraubungen zu erhalten. Nach dem Lösen der unteren Prüfkammerverspannung kann nun der PR langsam und vorsichtig schrittweise mit dem Kran angehoben werden. Es ist zu beachten, dass der PR unten rundherum mit Klebeband an der Betongrundplatte fixiert ist, um die unteren Ringdichtungen vor einer Kontamination mit Bitumenkleber zu schützen. Im Idealfall reißt das Klebeband (z.B. Aluminiumband) beim Anheben des PR selbstständig ab. Ist dies nicht der Fall, dann kann das bedeuten, dass evtl. Bitumenkleber in den Spalt zwischen der eingeklebten Probe und dem PR gedrungen ist.

Im optimalen Fall lässt sich der PR leicht per Kran von der Betongrundplatte herunterheben. Danach können die unteren Ringdichtungen und die Distanzhülsen eingesammelt und verwahrt werden. Nun liegt die auf der Betongrundplatte mit

Bitumenkleber aufgeklebte Dämmstoffprobe frei und ruht mitsamt der Betongrundplatte auf dem HM. Die Dämmstoffprobe wird im nächsten Schritt mittels einer Drahtsäge von der Betongrundplatte heruntergesägt. Da die nachfolgenden Prüfungen eine saubere Oberfläche der Proben voraussetzen, läuft der Sägedraht optimalerweise knapp über der Bitumenkleberschicht durch das XPS-Material der Probe. Nach dem erfolgten Sägeprozess kann nun die heruntergeschnittene Probe aufgenommen werden und für die weiteren Prüfungen zerlegt und weiterverarbeitet werden.

Als letzten Schritt gilt es noch die Betongrundplatte so aufzubereiten, dass diese wiederverwendet werden kann. Nach dem Herunterschneiden der Dämmstoffprobe von der Betongrundplatte müssen die Reste der Bitumenkleberschicht von der Betongrundplatte entfernt werden. Hierfür kommen mechanische Prozesse in Frage, welche zusätzlich noch um chemische Prozesse ergänzt werden können. Eine abschließende gründliche Reinigung aller PK-Komponenten mit geeigneten Reinigungsmitteln schließt die Aufbereitungsprozedur ab.

7.4 Hydraulische Versorgungssysteme

7.4.1 Konzept

Die hydraulischen Versorgungssysteme (HVS) sind für die unterbrechungsfreie Aufrechterhaltung der folgenden Funktionen der Perimeter-Prüfanlage zuständig:

1. Kontinuierliche Zirkulation des simulierten Grundwassers in den PK mit einem regelbaren Volumenstrom.
2. Kontinuierliche und regelbare Temperierung des zirkulierenden Grundwassers individuell für jede einzelne PK.
3. Kontinuierliche und regelbare Temperierung der HM individuell für jede einzelne PK.
4. Aufbauen eines vordefinierten konstanten Wasserdrucks individuell für jede einzelne PK.

Neben diesen Funktionen müssen die HVS den folgenden Anforderungen gerecht werden:

1. **Sicherheit.** Die Prüfanlage muss auch bei einem partiellen oder totalen Ausfall der Regelungstechnik in einem stabilen Betriebszustand verbleiben; es dürfen sich in keinem Anlagenteil unzulässig hohe Drücke einstellen; ein manuelles Eingreifen in den Betrieb des HVS muss unabhängig vom Status der automatischen Steuerung jederzeit möglich sein. Überdies muss ein unkontrollierter Wasseraustritt aus der Anlage umgehend einen Alarm auslösen und die Anlage ggf. stromlos schalten.
2. **Modularer Aufbau.** Das HVS muss modular konzipiert sein, um das Zu- oder Abschalten einzelner PK zu ermöglichen, wobei die anderen PK in ihrem

- Betrieb nicht beeinträchtigt werden dürfen. Ein einfaches Anschließen und Lösen von hydraulischen Verbindungen an die PK sollte gewährleistet sein.
3. **Kontinuierliche Wasseraufbereitung.** Das simulierte Grundwasser muss kontinuierlich aufbereitet werden, um die Anlage vor Schäden durch biologische, chemische und partikuläre Verunreinigungen während des Dauerbetriebs zu schützen. Dennoch ist ein regelmäßiger halbjährlicher kompletter Wasserwechsel mit einer begleitenden Komplettreinigung der Anlage empfohlen.
 4. **Energetische Effizienz.** Das HVS muss aus thermischer Sicht möglichst effizient funktionieren; Wärmeverluste- und -gewinne sind in den Versorgungsleitungen und Anlagenteilen zu minimieren, Rekuperationen sind an geeigneten Stellen vorzusehen.
 5. **Einfache Wartung.** Das HVS muss derart beschaffen sein, dass alle Anlagenteile und Komponenten für Inspektionen möglichst einfach zugänglich sind.

Das sich aus den funktionalen Anforderungen ergebende komplette HVS ist in Abbildung 34 abgebildet und wird in die folgenden Subsysteme untergliedert:

1. Aufbereitungssystem
2. Versorgungssystem
3. Heizungssystem
4. Temperiersystem

Zum Zwecke der besseren Orientierung ist die gesamte Systemarchitektur der Perimeter-Prüfanlage in Abbildung 33 schematisch dargestellt; in diesem Kapitel wird das HVS und seine Subsysteme im Detail beschrieben.

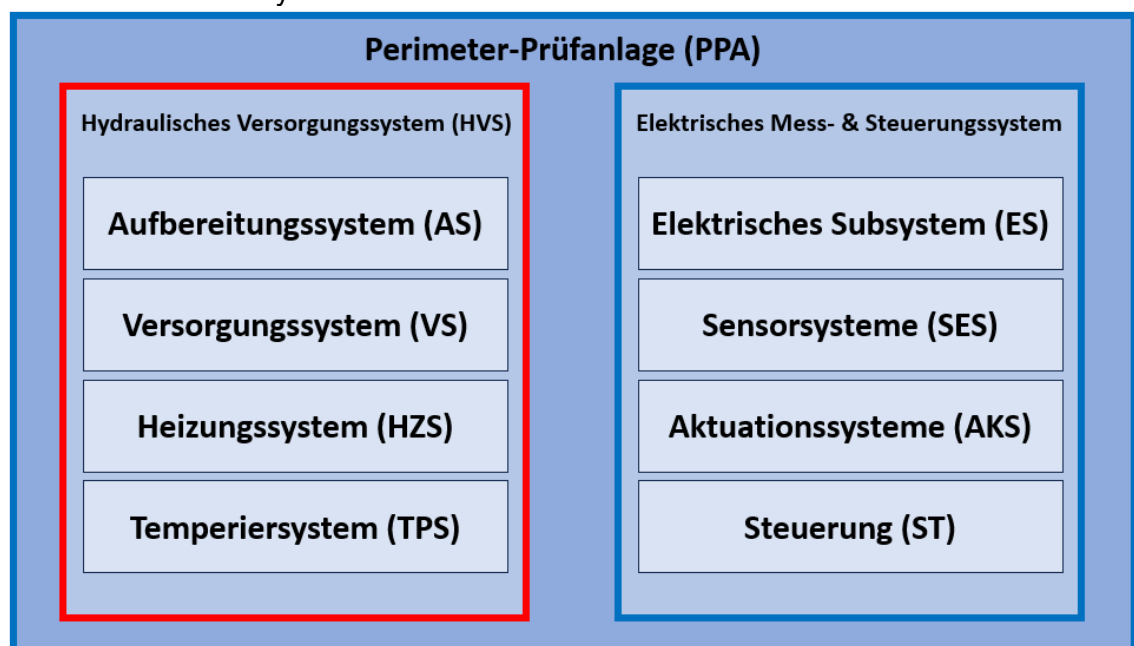


Abbildung 33 Systemarchitektur der Perimeter-Prüfanlage; in diesem Kapitel wird das hydraulische Versorgungssystem (HVS) beschrieben und erläutert

Der in Abbildung 34 dargestellte Schaltplan des HVS stellt den aktuellen Entwicklungsstand dar und ist Gegenstand der detaillierten Beschreibungen der Konfiguration und Funktion der einzelnen Subsysteme des HVS in den nachfolgenden Sektionen. Im Schaltplan ist der Übersichtlichkeit halber nur eine der PK dargestellt; die PK sind dabei von 1...n durchnummeriert.

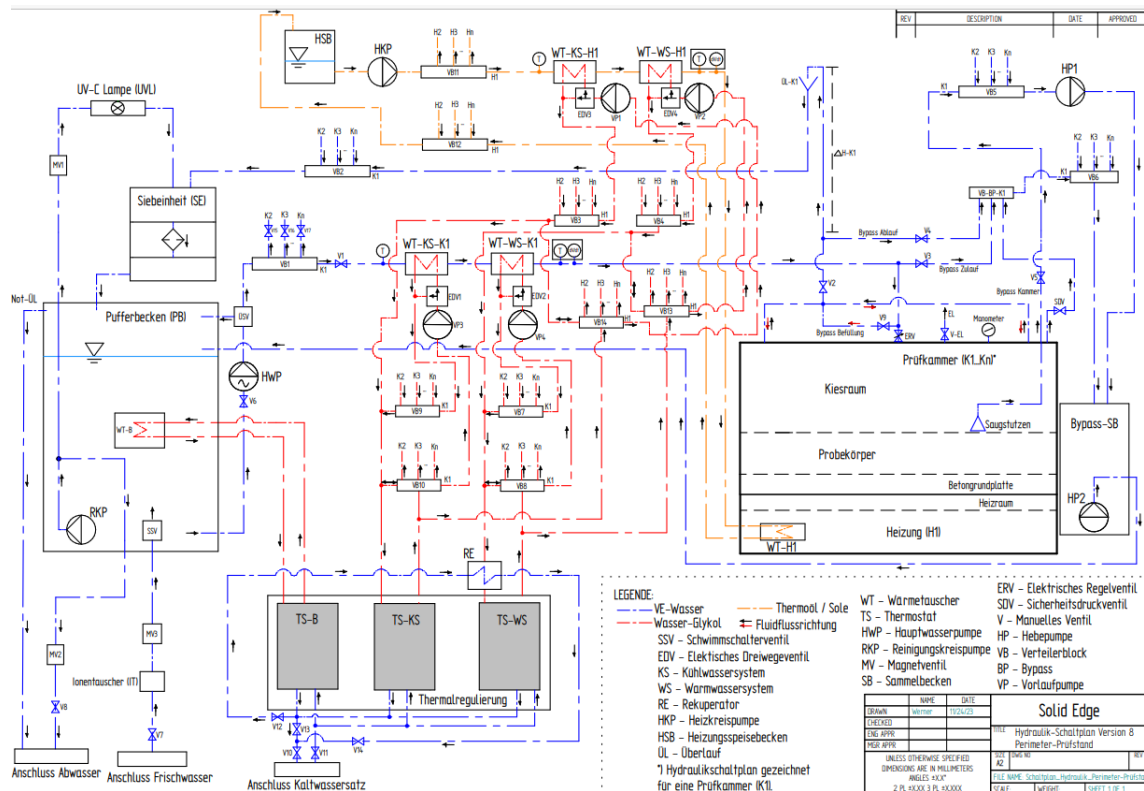


Abbildung 34 Kompletter Schaltplan des HVS der Perimeter-Prüfanlage mit Legende

7.4.2 Wasseraufbereitungssystem

Das Aufbereitungssystem (AS) ist für das kontinuierliche Reinigen, Speichern, Vor-temperieren und Umwälzen des simulierten Grundwassers zuständig. Dabei ist das AS mit dem Versorgungssystem und mit dem Temperiersystem hydraulisch bzw. thermisch gekoppelt. Die Komponenten des AS sind in Abbildung 36 links schematisch im Detail dargestellt. In Abbildung 36 rechts sind einige der Komponenten des AS an der realen Anlage dargestellt und benannt.

Die zentrale Komponente des AS ist das wärmeisolierte Pufferbecken (PB), in welchem das simulierte Grundwasser für die Versorgung der PK vorgehalten wird. Dabei wird das Wasser vortemperiert; hierfür ist ein wassergekühlter Thermostat (TS-B) an einen Spiralwärmetauscher, welcher im PB installiert ist, angeschlossen. Die kontinuierliche Reinigung und Umwälzung des gespeicherten Wassers im PB erfolgt über einen Reinigungskreis (RK). Der RK wird über eine Reinigungskreispumpe (RKP) beschickt, welche am Boden des PB installiert ist. Die RKP ist als Kreislumpumpe ausgeführt und wird konstant mit 30 % ihrer Maximalleistung betrieben, was für die Umwälzung des Wassers im PB ausreichend ist. Die kontinuierliche Umwälzung des

Wassers im PB soll auch die Vortemperierung des Wassers auf 10 °C erleichtern, da der Behälter sodann als ideal gemischt angenommen werden kann und die Ausbildung von Temperaturschichtungen im PB unterbunden werden kann. Der Spiralwärmetauscher (WT-B) von TS-B ist im oberen gefluteten Bereich des PB installiert. Daraus ergibt sich zusätzlich zur Umwälzung durch die RKP auch eine natürliche Konvektion des Wassers im PB, da der WT-B i.d.R. im Kühlbetrieb arbeitet, wodurch das abkühlende Wasser aus dem oberen Bereich des PB nach unten sinkt. Der Rücklauf des RK befindet sich oben am PB.

Die RKP saugt das Wasser unten im PB an und führt es im RK durch eine UV-C Lampe (UVL) (siehe in Abbildung 35) und eine nachgeschaltete Siebeinheit (SE), in welcher ein Siebbogenfilter verbaut ist. Die UVL befindet sich im Dauerbetrieb und sorgt für die kontinuierliche Eliminierung von biologischen Kontaminationen des Wassers. Überdies ist die SE für die kontinuierliche Entfernung von partikulären Verunreinigungen aus dem Wasser zuständig. Aus diesem Grund wird der Rücklauf aller Prüfkammern nicht direkt zurück in das PB geführt, da die PK die Hauptquelle für partikuläre Verunreinigungen darstellen; daher passiert der Rücklauf der PK ebenfalls die SE bevor er in das PB gelangt. Um den Siebbogenfilter zu regenerieren ist eine manuelle Reinigung erforderlich, welche in regelmäßigen Intervallen durchgeführt wird. Alle Komponenten sowie hydraulischen Leitungen des RK sind mittels FEF-Schaumdämmungen thermisch isoliert.

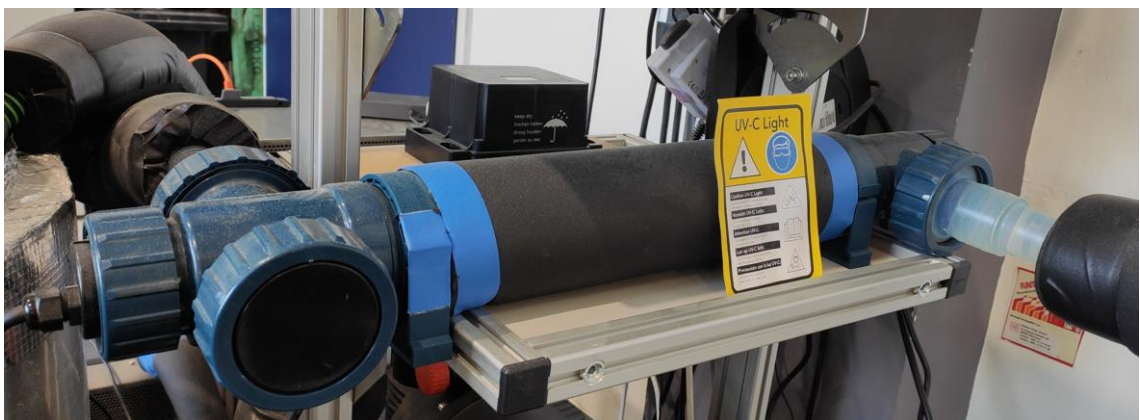


Abbildung 35 UV-C Lampe als Teil des Reinigungskreises des Aufbereitungssystems zur kontinuierlichen Eliminierung von biologischen Kontaminationen im simulierten Grundwasser

Des Weiteren ist das AS dafür zuständig die Menge des in der gesamten Prüfanlage zirkulierenden Wassers zu überwachen und zu regeln; dies erfolgt über eine elektronische Pegelstandsregelung. Dabei übernimmt die Pegelstandsregelung die Überwachung des Pegelstands im PB sowie die Ansteuerung der entsprechenden Magnetventile MV1, MV2 und MV3, um eine Zu- oder Abfuhr von Wasser zu erreichen.

Soll überschüssiges Wasser aus der Anlage abgeführt werden, weil der zulässige maximale Pegelstand im PB überschritten wird, so erfolgt eine Öffnung von MV2 und simultane Schließung von MV1. Dadurch wird der RK hydraulisch temporär abgekoppelt und die RKP wird genutzt, um das überschüssige Wasser aus dem PB in den Abwasseranschluss der Anlage zu pumpen. Hat sich der Pegelstand im PB wieder

normalisiert, so wird MV1 wieder geöffnet, während MV2 wieder geschlossen wird, wodurch der RK wieder von der RKP beschickt wird; das AS kehrt dabei wieder in seinen Normalbetrieb zurück. Ein zusätzlicher Not-Überlauf (Not-ÜL) an der Position des maximalen Pegelstandes im PB, welcher in den Abwasseranschluss der Prüfanlage mündet, sorgt für zusätzliche Sicherheit, im Falle eines vollständigen Ausfalls der Pegelstandsregelung.

Für den Fall, dass der Pegelstand im PB unter das minimal zulässige Niveau sinken sollte, so kann die Pegelstandsregelung frisches Leitungswasser in das PB zuführen, indem MV3 geöffnet wird. Das Wasser aus dem Frischwasseranschluss der Anlage wird zunächst über einen Ionentauscher (IT) geführt, um eine Teilenthärtung bzw. Enthärtung zu erreichen. Dies soll die Prüfanlage vor gravierenden Verkalkungsschäden bewahren und die auftretende interne Verkalkung verlangsamen und abmildern; eine vollständige Unterbindung der Kalkbildung kann jedoch nicht erreicht werden, da laufend Mineralien aus den Kiesbetten in den PK ausgespült werden, wodurch eine regelmäßige Inspektion der Anlage erforderlich ist. Außerdem benötigten die in der Anlage integrierten Durchflussmessgeräte an den PK-Zuläufen einen gewissen elektrischen Mindestleitwert des Wassers, um zuverlässige Werte für die Volumenströme für die Regelung zu liefern.

Ein Schwimmerschalterventil (SSV) bildet das Verbindungsglied zwischen dem Zulaufstrang und dem PB; es dient der redundanten Absicherung des Zulaufstrangs und soll den Zufluss von Frischwasser beenden, falls aufgrund eines Ausfalls der Pegelstandsregelung oder von MV3 der maximale kritische Pegelstand im PB erreicht werden sollte.

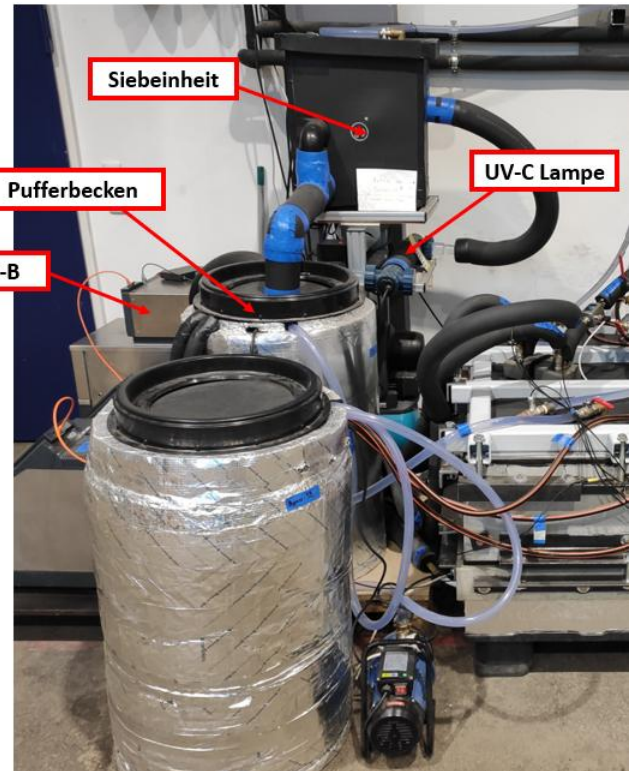
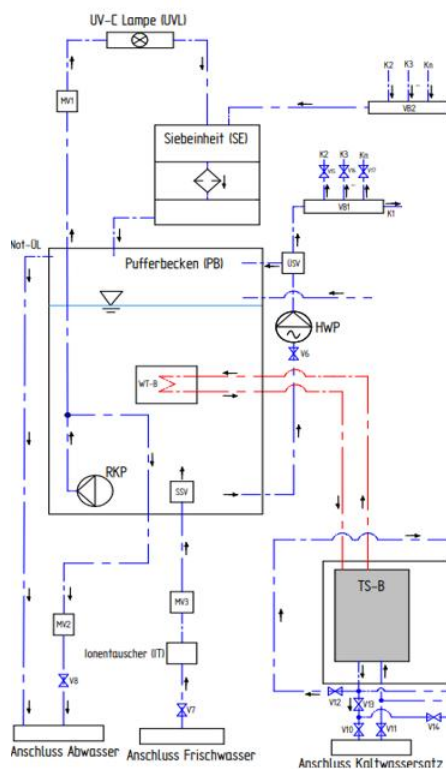


Abbildung 36 Detaillierte Ansicht des Aufbereitungssubsystems des HVS

7.4.3 Versorgungssystem

Das Versorgungssystem (VS) ist für die Verteilung und kontinuierliche Zuführung des simulierten Grundwassers zu den einzelnen PK zuständig. Dabei wird die Zuführung des Wassers für jede PK separat überwacht und geregelt. Ebenso das Sammeln und Zurückführen des Wassers aller PK-Rückläufe und Bypass-Leitungen in das PB des AS sowie die hydraulische Bedruckung der PK wird von dem VS übernommen. Das VS ist mit dem AS und dem Temperiersystem hydraulisch bzw. thermisch gekoppelt. Die Komponenten des VS sind in Abbildung 37 im Detail dargestellt.

Um die einzelnen PK mit dem vortemperierten Wasser aus dem PB zu beschicken wird eine Hauptwasserpumpe (HWP) eingesetzt. Die HWP entnimmt das Wasser aus dem PB und baut einen Druck von zwei bar in den Versorgungsleitungen auf. Ein Überströmventil (ÜSV) mit Bypass stromab der HWP sichert das VS gegen das Entstehen eines unzulässig hohen hydraulischen Druckes ab.

Hinter der HWP folgt der Verteilerblock, welcher den Hauptzulaufstrang auf die einzelnen Zulaufstränge zu den jeweiligen PK aufteilt; dabei sind alle Zulaufstränge mit manuellen Kugelhähnen ausgestattet. Dadurch können für Wartungszwecke einzelne PK vom Netz genommen werden ohne, dass der Betrieb der verbleibenden PK beeinträchtigt wird. Die HWP und der Verteilerblock 1 sind in Abbildung 38 an der realen Anlage zu sehen.

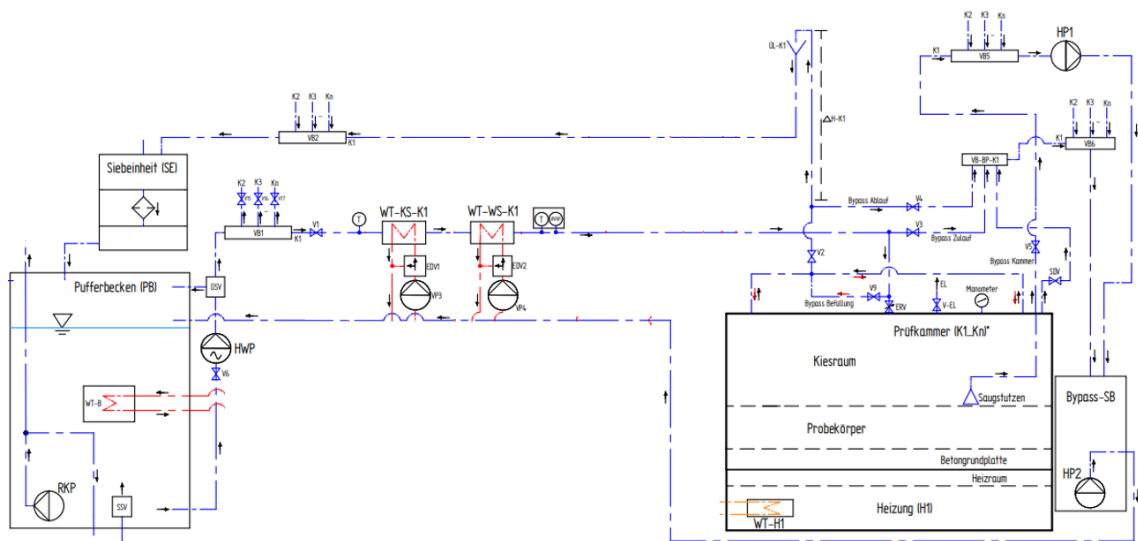


Abbildung 37 Detaillierte Ansicht des Versorgungssubsystems des HVS

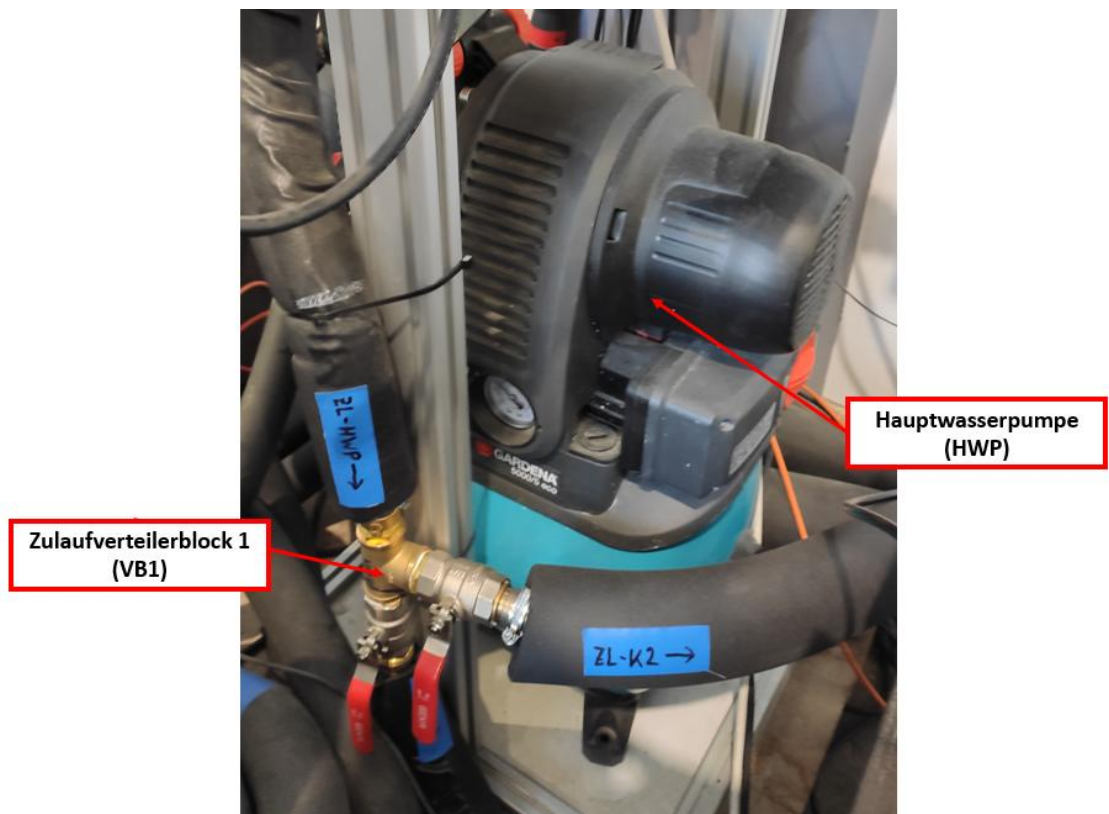


Abbildung 38 Hauptwasserpumpe und Zulaufverteilerblock an der realen Anlage.

Jeder Zulaufstrang wird nach dem Verteilerblock 1 für jede PK individuell temperiert; hierfür wird das Wasser durch zwei seriell geschaltete Wärmetauscher, welche durch das Temperiersystem bedient werden, geführt. Der erste Wärmetauscher wird dabei zum Kühlen eingesetzt, wobei der zweite Wärmetauscher zum Erwärmen des Wassers genutzt wird. Vor und hinter den beiden WT wird die Temperatur des Wassers in der Leitung über PT100-Sensoren, welche in Tauchhülsen installiert sind, erfasst und an das Regelungsautomatik übergeben. Zusätzlich wird der Volumenstrom

erfasst. Hinter dem Durchflussmessgerät mündet der Zulaufstrang in die jeweilige PK; dabei wird das Wasser zentral über den Zulaufventilblock von oben in den Kiesraum der PK eingespeist.

Die Anschlussinstallationen an der Prüfkammer bilden die hydraulische Schnittstelle zwischen dem VS und der Prüfkammer; ihre schematische Darstellung erfolgt in Abbildung 39. Die korrespondierende Installation an der realen Anlage ist in Abbildung 40 dargestellt.

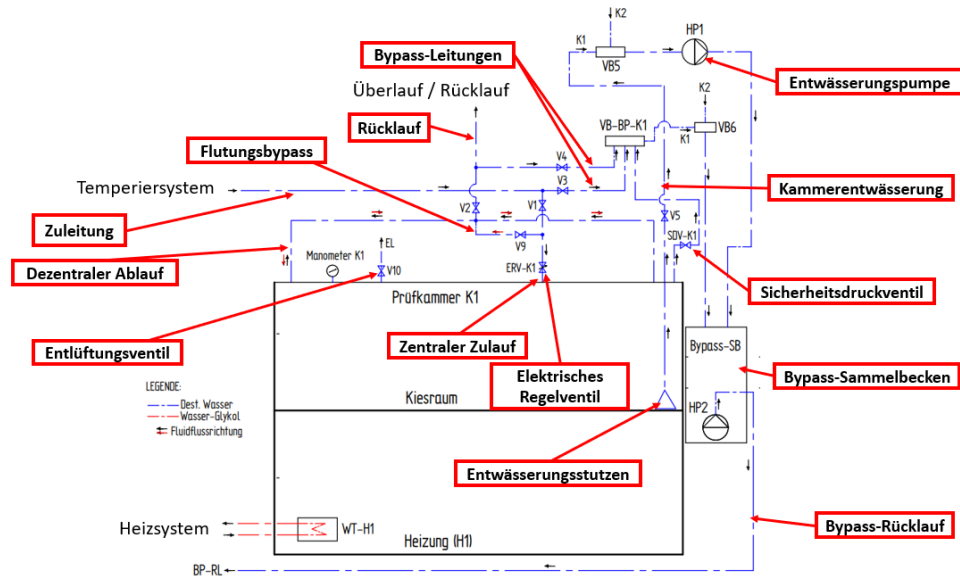


Abbildung 39 Anschlussdiagramm der Prüfkammer mit Bezeichnung der relevanten Komponenten

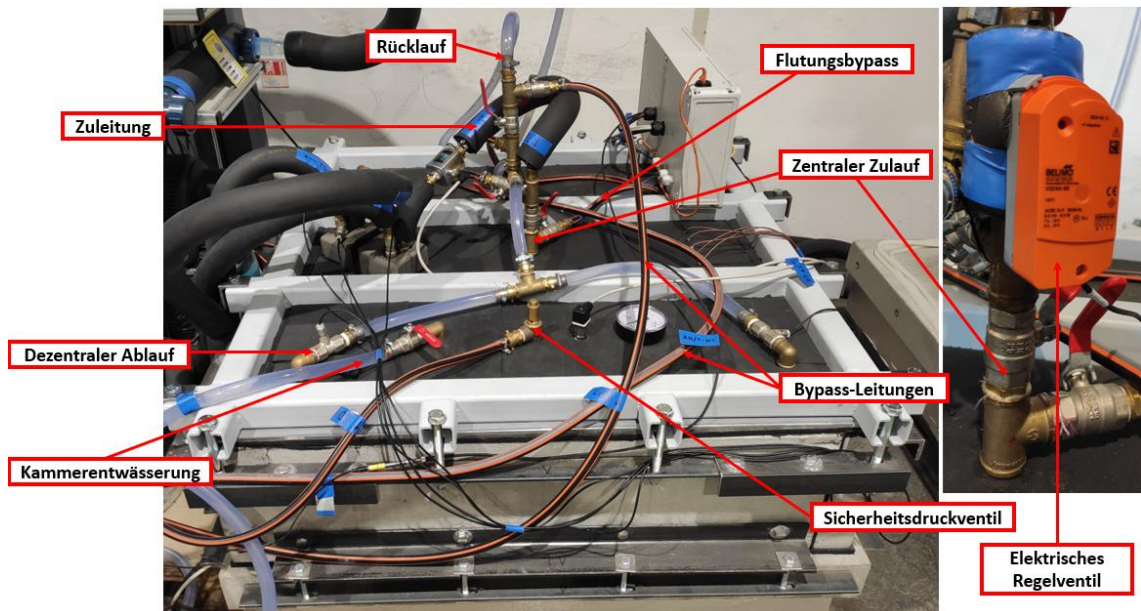


Abbildung 40 Reale Anschlusskonfiguration des Versorgungssystems an eine Prüfkammer mit Beschriftungen der wichtigsten Komponenten

Der Zulaufventilblock der PK setzt sich aus zwei seriell geschalteten Kugelhahnventilen zusammen; das erste Ventil kann manuell bedient werden (V1), das zweite Ventil stellt das elektrische Regelventil (ERV-K1) dar, welches von der Steuerung bedient

wird. Das ERV stellt den Volumenstrom zu der jeweiligen PK ein und sorgt dafür, dass dieser konstant gehalten wird. Des Weiteren geht von dem Zulaufblock eine Ablaufbypassleitung ab, welche über ein manuelles Ventil (V3) geöffnet werden kann. Die Ablaufbypassleitung dient dazu den Zulaufstrang zu der PK drucklos zu schalten, für den Fall, dass die PK gewartet werden soll. Das abgeführte Wasser wird über die Ablaufbypassleitung in den Bypass-Sammelbehälter (SB) geleitet. Außerdem befindet sich am Zulaufventilblock der Anschluss zum Flutungsby-pass (FBP) inklusive des manuellen Ventils (V9), über welches der FBP beim Befüllen der PK mit Wasser zugeschaltet werden kann, um den Befüllungsprozess zu beschleunigen.

Das über den Zulaufventilblock in die PK zugeführte Wasser läuft sodann über die vier dezentralen Anschlüsse des Ablaufventilblocks der PK ab. Die Rücklaufstränge werden auf einen zentralen Rücklaufstrang geführt, an welchem auch der FBP angeflanscht ist. Der Rücklaufstrang geht über ein Druckventil in die Rücklaufleitung über, welche in der Siebeinheit endet. Das Ventil kann stufenlos verstellt werden und stellt den hydraulischen Druck in der PK ein. Dieser kann über das an der PK installierte Manometer abgelesen werden; zusätzlich ist ein Drucktransmitter an der PK angebracht, welcher die Druckdaten auch elektronisch an die Datenbank übermittelt. Die PK wird über ein mechanisches Sicherheitsdruckventil (SDV) gegen unzulässig hohe hydraulische Drücke gesichert. Sollte sich aufgrund eines Störfalls der Anlage der hydraulische Druck in der PK unkontrolliert erhöhen, so löst das SDV bei einem internen Druck von 1.25 bar aus und leitet das Wasser in den Bypass-SB ab.

7.4.4 Heizungssystem

Das Heizungssystem ist für die Temperierung und Beschickung der Heizmodule (HM) der Prüfkammern (PK) zuständig. Um diese Aufgabe zu erfüllen, besitzt das Heizungssystem eine thermische Schnittstelle mit dem Temperiersystem. In Abbildung 41 ist das Schema des Heizungssystems dargestellt.

Das Heizungssystem besteht aus einem Heizkreis, welcher alle HM der PK in einer Parallelschaltung mit einem Wasser-Glykol-Gemisch zum Zwecke der Temperierung versorgt. Das Wasser-Glykol-Gemisch wird dabei im Heizungsspeisebehälter (HSB) vorgehalten und gesammelt. Der HSB besitzt eine Drucksonde zur Überwachung des Füllstands sowie ein Thermoelement zur Überwachung der Temperatur. Eine nachgeschaltete Heizkreispumpe (HKP), welche als Kreiselpumpe ausgeführt ist und mit einer konstanten Drehzahl betrieben wird, entnimmt das Wasser-Glykol-Gemisch aus dem HSB und fördert es in den Heizkreis. Der Zulaufstrang von der HKP wird über einen Verteilerblock (VB11) auf die einzelnen Zulaufstränge aufgeteilt und danach in die einzelnen Heizmodule der jeweiligen PK geführt. Um einen hydraulischen Abgleich zwischen allen Zulaufsträngen durchführen zu können sind diese mit hydraulischen Volumenstromregelventilen ausgestattet, wodurch sichergestellt werden kann, dass alle HM mit dem identischen Volumenstrom durchflossen werden.

Bevor das Wasser-Glykol-Gemisch in die einzelnen HM geleitet wird, passiert es das Temperiermodul des Temperiersystems. Dabei besteht das Temperiermodul aus zwei seriell durchflossenen Wärmetauschern, wobei der erste Wärmetauscher zum Kühlen und der zweite Wärmetauscher zum Heizen eingesetzt wird. Zusätzlich wird für die Regelung die Temperatur des durchlaufenden Wasser-Glykol-Gemischs am Ein- und Austritt der Temperiermodule erfasst. Im HM durchfließt das Wasser-Glykol-Gemisch die Heizschleifen der Plattenwärmetauscher und tritt über die Rücklaufleitung aus dem HM aus. Die Rücklaufleitungen aller HM werden über einen zweiten Verteilerblock (VB12) zusammengeführt und dann in den HSB zurückgeleitet. Alle Komponenten und Leitungen des Heizungssystems sind stets thermisch isoliert.

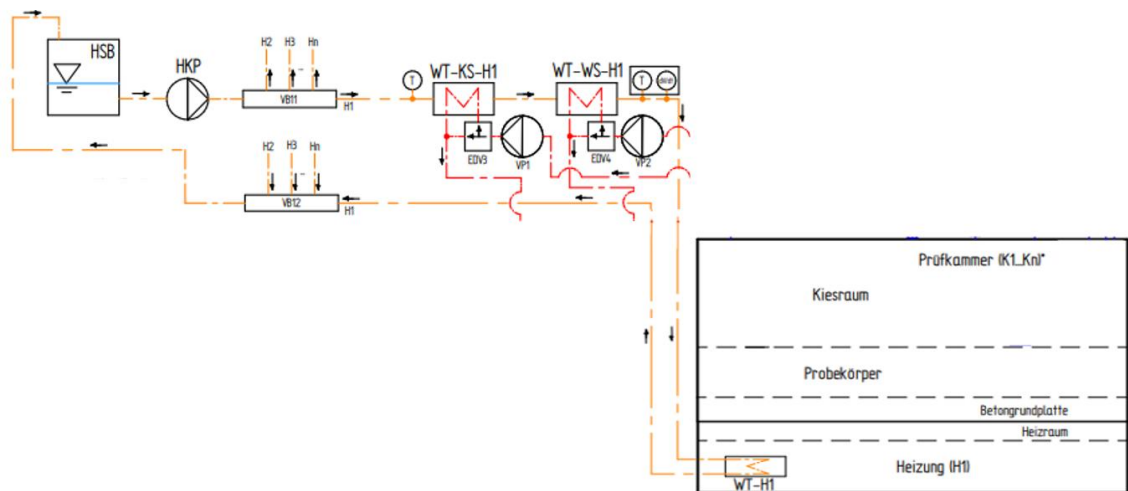


Abbildung 41 Schematische Darstellung des Heizungssubsystems

In Abbildung 42 ist das zentrale Heizungskreismodul, bestehend aus dem HSB und der HKP, dargestellt; zu sehen sind auch der Vor- und Rücklauf des Heizungssystems mit den hydraulischen Stellventilen.



Abbildung 42 Zentrales Heizungskreismodul

7.4.5 Temperiersystem

Das Temperiersystem (TPS) stellt die zentrale Einheit zur Temperierung der Prüfkammern (PK) und der zugehörigen Heizmodule (HM) dar. Um diese Funktion zu bedienen, besitzt das TPS jeweils thermische Schnittstellen zu dem VS und dem Heizungssystem. In Abbildung 43 ist das Schema des TPS dargestellt.

Im Allgemeinen besteht das TPS aus zwei separaten hydraulischen Temperierkreisen, welche durch je einen luftgekühlten Thermostat bedient werden. Dabei dient das Kühlsystem (KS) zum Kühlen und das Heizsystem (HS) zum Heizen des Arbeitsmediums, also dem Wasser im VS oder dem Wasser-Glykol-Gemisch im Heizungssystem. Der Thermostat TS-K(S) beschickt den KS und der Thermostat TS-H(S) bedient den HS jeweils mit Wasserethylen glykol (1:1-Gemisch). Dabei wird das Wasser-Glykol-Gemisch für beide Temperierkreise auf einer von der Regelung vorgegebenen konstanten Temperatur gehalten und durch das KS und das HS zirkuliert. Über Verteilerblöcke werden die Stränge der beiden Temperierkreise aufgeteilt und im Sinne einer parallelen Verschaltung den einzelnen Verbrauchern zugeführt, den sogenannten Temperiermodulen. Ein solches Temperiermodul ist in Abbildung 44(a) dargestellt mit den Bezeichnungen aller Komponenten.

Je PK gibt es zwei TPM, eines vor dem Zulauf des Wassers in den Kiesraum der PK und eines vor dem Zulauf des Wasser-Glykol-Gemischs aus dem Heizungskreis des Heizungssystems in das HM der jeweiligen PK. Die Rücklaufstränge aller Temperiermodul werden wieder über Verteilerblöcke in ihrem jeweiligen Zirkulationskreis (also

KS oder HS) zusammengeführt und in die jeweiligen Thermostate zurückgeführt, wo das Wasserethylen glykol in den Temperierbädern gesammelt und umgewälzt wird; dadurch schließen sich die beiden Temperierkreise.

Der HS-Kreis hat gegenüber dem KS-Kreis noch eine Besonderheit: Vor dem Eintritt in den TS-H(S) kann ein Wärmetauscher integriert werden, welcher als Rekuperator dient. Dieser soll Wärme aus dem Kühlwasserrücklauf aller drei Thermostate zurückgewinnen und dem rücklaufenden Wasserethylen glykol wieder zuführen, um die energetische Effizienz der Anlage zu optimieren; so muss der Thermostat TS-H(S) weniger Energie zum Wiederaufheizen der Temperierfluids aufwenden.

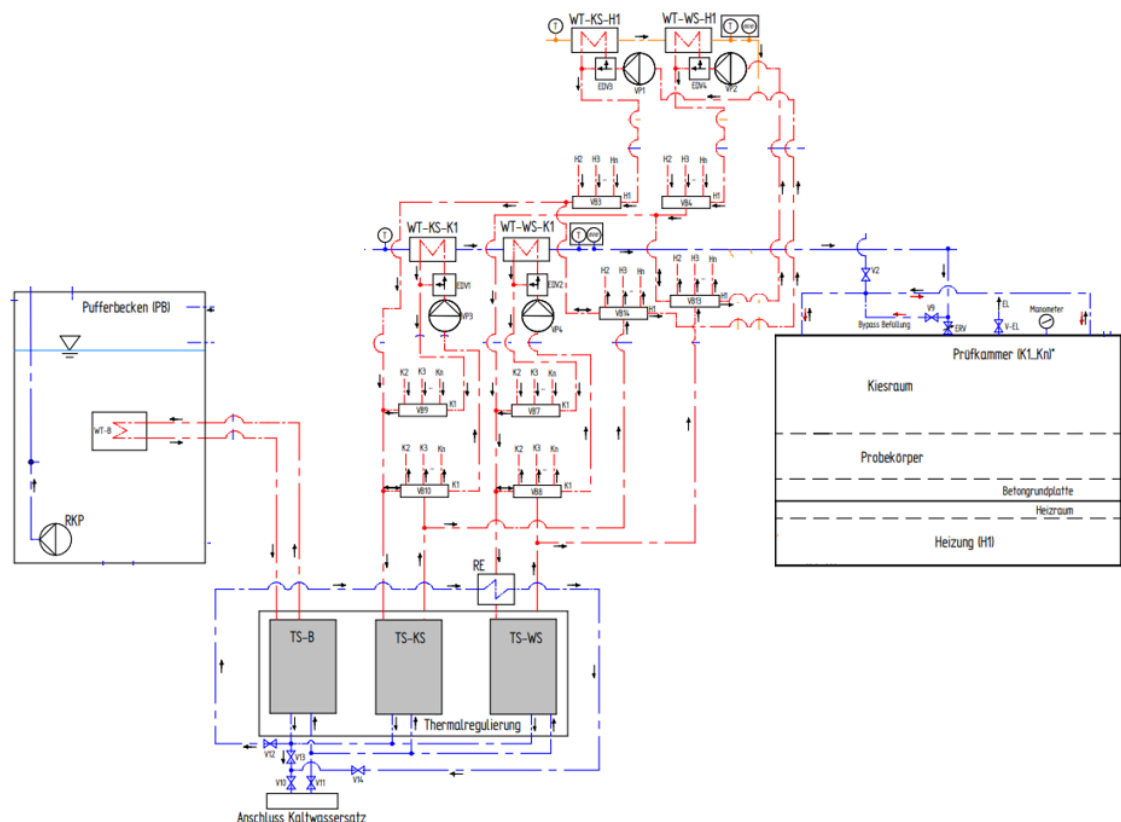
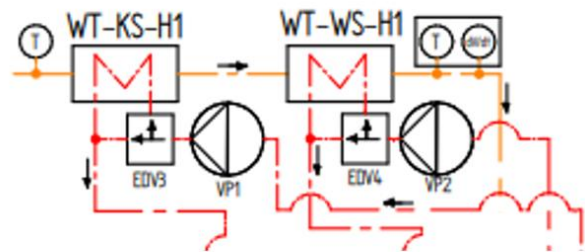


Abbildung 43 Schematische Darstellung des Temperiersystems

Beide Temperierkreise sind über eine Überströmleitung intern hydraulisch entkoppelt, sodass neben den Umwälzpumpen der Thermostate auch die einzelnen Vorlaufpumpen der Temperiermodule betrieben werden können. Das hydraulische Schema eines Temperiermoduls ist in Abbildung 44 (b) vergrößert wiedergegeben. Eine Prüfanlage mit zwei PK besitzt demnach insgesamt vier TPM, jeweils zwei für die Temperierung der Kiesräume der PK und zwei für die Temperierung der zugehörigen HM.



(a) Temperiermodul (TPM); unvollständig



(b) Temperiermodul: Hydraulisches Schema

Abbildung 44 Temperiermodul für die Temperierung der Kiesräume und Heizmodule der Prüfkammern

Allgemein setzt sich das Temperiermodul aus den beiden seriell auf den Strang des zu temperierenden Fluids aufgeschalteten Wärmetauschern (WT) zusammen; der erste WT wird dabei immer vom KS beschickt und dient dem Kühlen des Fluids, wobei der zweite darauffolgende WT vom HS bedient wird und dem Aufheizen des Fluids dient. An den Zuläufen der beiden WT auf Seiten des KS-Kreises bzw. des HS-Kreises befinden sich je eine Vorlaufpumpe, welche das Wasserethylen glykol aus den jeweiligen Temperierkreisen entnehmen und durch ein nachgeschaltetes elektrisch gesteuertes Dosierventil in den WT fördern. Der Anteil des Volumenstroms, welcher nicht durch den WT geleitet wird, gelangt über den dritten Anschluss des elektrisch gesteuerten Dosierventils in einen Bypass und von diesem in den Rücklaufstrang vom jeweils überbrückten WT und von dort zurück in den Temperierkreis.

Durch dieses Konzept kann jede beliebige Temperatur in dem für die Prüfung relevanten Bereich (typischerweise $5\text{ °C} - 20\text{ °C}$) angefahren werden. Die Steuerung stellt dabei je nach Bedarf die Temperatur des PB so ein, dass die vorgehaltene Wassertemperatur in der Mitte des benötigten Temperaturbereiches liegt, um den Energieeinsatz beim Heizen oder Kühlen durch das Temperiermodul entsprechend zu minimieren. Die relevanten Betriebsmodi der Temperiermodule definieren sich, wie folgt:

- Temperatur $> 10\text{ °C}$: elektrisch gesteuertes Dosierventil des KS ist auf 0 %; elektrisch gesteuertes Dosierventil des HS muss eine Ventilstellung $> 0\text{ %}$ aufweisen; nur WT zum Heizen wird bedient
- Temperatur $< 10\text{ °C}$: elektrisch gesteuertes Dosierventil des HS ist auf 0 %; elektrisch gesteuertes Dosierventil des KS muss eine Ventilstellung $> 0\text{ %}$ aufweisen; nur WT zum Kühlen wird bedient.

- Keine Temperierung: elektrisch gesteuertes Dosierventil von HS und KS sind beide auf 0 %; keiner von beiden WT wird mit dem Temperierfluid beschickt.

Zwischen diesen beiden Extrema im Betriebsbereich des Temperiermodul liegen alle weiteren Betriebspunkte. Das TPS bzw. die gesamte Perimeter-PA in einem optimalen Betriebszustand einzuregeln ist die Aufgabe der Steuerung, welche auf der SPS der Regelungsinfrastruktur läuft, die in Kap. 7.5 näher charakterisiert wird.

7.5 Messtechnik und Steuerung

Das elektronische System des Prüfstands untergliedert sich in zwei Hauptkomponenten. Für die Versorgung mit elektrischer Energie steht der Versorgungskasten zur Verfügung. Dieser bietet mehrere 230 V Abgänge, welche zum Schutz von Personen und Anlage über einen 30 mA Fehlerstromschutzschalter (FI) abgesichert sind. Die zwei Schaltnetzteile stellen die 24 V DC Spannung für die Messtechnik zur Verfügung. Des Weiteren befindet sich in dem Versorgungskasten ein Industrie-Computer (IPC), welcher über EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) mit dem Messtechnikkasten verbunden ist. Der Computer übernimmt auch die Steuerung und Regelung der einzelnen Anlagenkomponenten.

Jede Prüfkammer hat einen eigenen Messkasten. Die Trennung erlaubt den modularen Aufbau der Anlage und einfache Erweiterung. Die Aufteilung der elektrischen Komponenten wurde auch für das bessere Thermomanagement gewählt. Um die Klemmen in ihrem spezifizierten Temperaturbereich zu halten, wurden die großen Wärmequellen (IPC/Netzteile) ausgelagert. Dies ermöglicht, die höchste Präzision der Klemmen zu erreichen. In dem Messkasten befinden sich die einzelnen Klemmen, welche die elektrischen Signale (μV , mA, Ω) sowie die verschiedenen Bussysteme (IO-Link, Modbus) auf das EtherCAT Feldbus-System umwandeln.

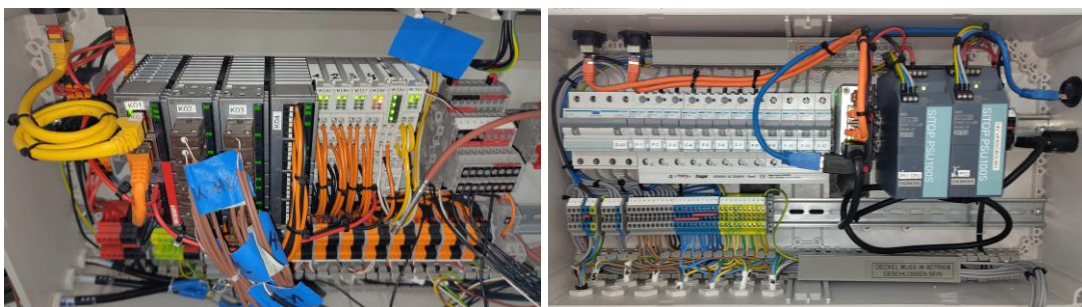


Abbildung 45 Links: Versorgungskasten mit Sicherungen, IPC und Schaltnetzteilen. Rechts: Messtechnikkasten mit den einzelnen Komponenten zur Erfassung der Signale

Für die Kontrolle der Anlage und zum schnellen Eingriff bei Bedarf ist an dem Prüfstand ein Bildschirm angebracht. Die Benutzeroberfläche zeigt einerseits ein Schaubild der Anlage mit Live-Anlagenparametern. Die Position der Stellventile kann über die Auswahl des Handbetriebs direkt über die Benutzeroberfläche verändert werden, indem der „Hand“-Button gedrückt wird und über die blau hinterlegten Eingabefelder Werte vorgegeben werden.

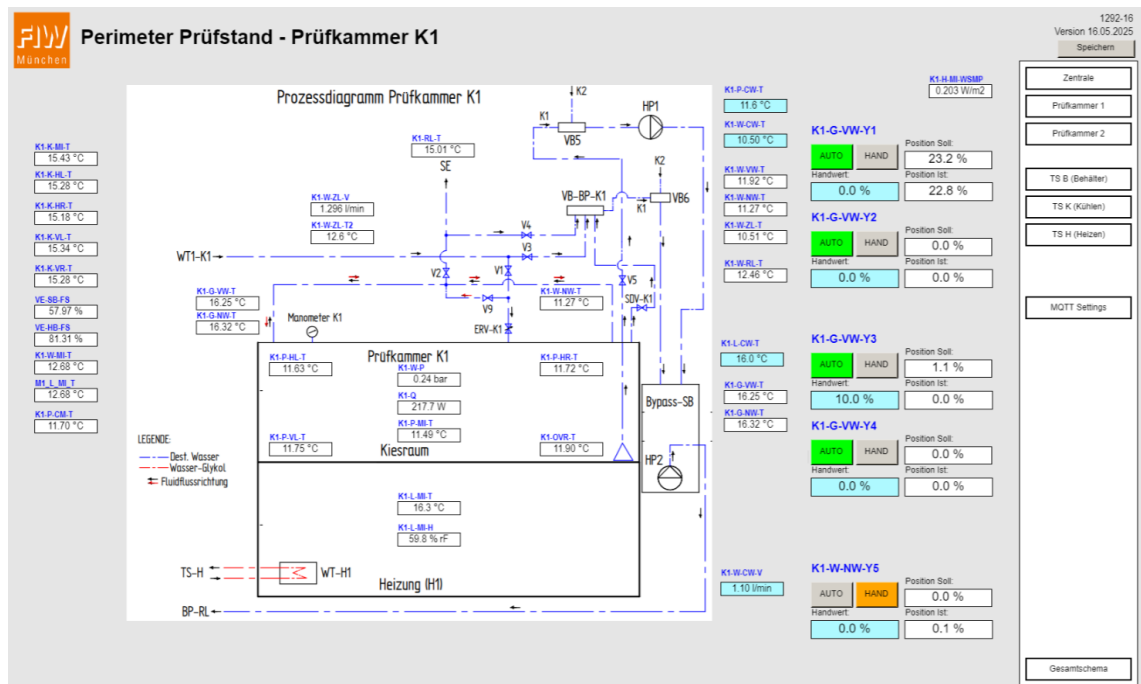


Abbildung 46 Benutzeroberfläche mit Schaubild der Prüfkammer und live Werten der Anlage sowie Eingabefelder (blau) zur Steuerung der Anlage im Handbetrieb

Im Regelbetrieb der Anlage werden die Temperaturen des Heizraums und die Temperatur des simulierten Grundwassers über eine Tabelle vorgegeben. Die Tabelle enthält dabei Werte für das Grundwasser mit dem zeitlichen Verlauf. Die Daten werden in die Steuerung eingelesen und die Anlage regelt über den zeitlichen Verlauf die Temperatur des Wassers sowie die Temperatur im Heizraum.

Die Ermittlung der Regelparameter erfolgte über die Aufnahme einer Sprungantwort der Regelstrecke. Daraus wurden die Parameter für den PI-Regler berechnet. Die Werte der Tabelle werden aus real gemessenen Daten berechnet, siehe dazu das Kapitel 4.2 Bodentemperaturen. Nach gleichem Schema kann auch der Durchfluss durch die Kammer geregelt werden. Eine zeitliche Stauchung des Verlaufs ist möglich, um beschleunigte Temperaturwechsel zu erhalten.

8 Aktueller Stand

Das große Gewicht der Kammern (ca. 1.4 t pro Kammer) sowie der erhöhte Platzbedarf aufgrund der Erweiterung um eine zweite Prüfkammer führten zu der Entscheidung, die gesamte Anlage in ein neues Gebäude zu verlagern. Im Rahmen des Neuaufbaus wurden Verbesserungen in der Leitungsführung sowie in der Anordnung der hydraulischen Komponenten implementiert. Die Versorgungseinheit sowie die Kammern wurden ebenfalls neu gruppiert, um einer zukünftigen Erweiterung der Anlage Rechnung zu tragen. Seit dem Wiederaufbau läuft die Kammer 1 mit einem komprimierten Jahrestemperaturverlauf des Grundwassers. Dieser Test hat das Ziel, die Regler zu überprüfen und gegebenenfalls erforderliche Optimierungen vorzunehmen. Die testweise Erhöhung des Drucks zur Überprüfung der hydraulischen Verbindungen auf Leckagen führte in einem Vorversuch zu einem Bruch der Betonplatte. Diese stellt den unteren Abschluss der Kammer dar und ist aufgrund des Risses nicht mehr vollständig wasserdicht. Aktuell arbeitet die Anlage nahezu drucklos, und das austretende Wasser wird gesammelt (ca. 0.2 l/d).

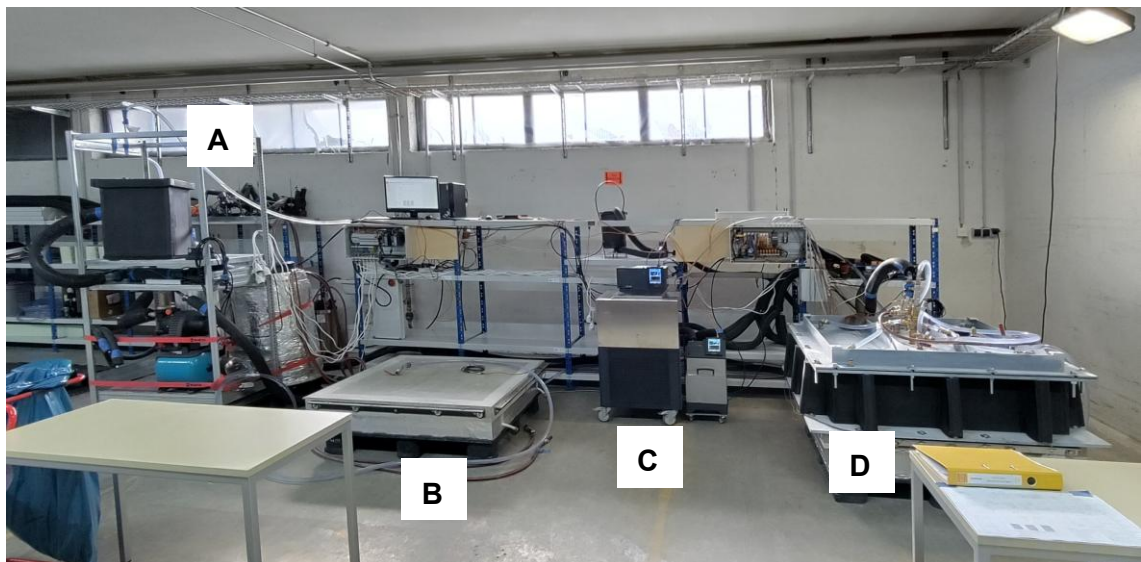


Abbildung 47 Aktueller Aufbau der Anlage. Links befindet sich die Versorgungseinheit (A), in der Mitte die bereits im Aufbau befindliche Prüfkammer 2 (B) sowie die Thermostate (C), und rechts ist die derzeit in Betrieb befindliche Prüfkammer 1 (D) zu sehen

Für die Überprüfung der Temperaturregelung spielt der Druck in der Kammer keine wesentliche Rolle. Die Versorgungseinheit sowie die Kammer 1 funktionieren zum Zeitpunkt der Berichtstellung seit 12 Wochen ohne Schwierigkeiten, wobei davon die letzten zwei Wochen mit aktiver Temperaturregelung betrieben wurden. In Abbildung 48 sind beispielhaft die Messdaten für einen Zeitraum von ca. 200 Stunden dargestellt.

Auf der x-Achse ist die Zeit in Stunden dargestellt, während die primäre y-Achse auf der linken Seite die Temperatur anzeigt. Die sekundäre y-Achse zeigt die Ventilposition zur Regelung der Wassertemperatur in der Kammer. Die Ventilstellung im Zulauf zum Warmwasserwärmetauscher ist in orange dargestellt und die für den

Kaltwasserwärmetauscher in hellblau. 100 % entsprechen einer vollständigen Öffnung und maximaler Leistungsabnahme. 0 % entsprechen einem geschlossenen Ventil und keiner Leistungsabnahme.

Deutlich zu erkennen ist, dass in Richtung höherer Temperaturen noch viel Potential vorhanden ist. Der Regler lastet das Ventil bei dem aktuellen Temperaturprofil lediglich zu 25 % aus, was auf die hohe Vorlauftemperatur von 25 °C zurückzuführen ist. Die hohe Spreizung zur Sollwerttemperatur erfordert nur eine geringe Ventilöffnung.

Um eine Vereisung des Systems zu vermeiden, beträgt die Vorlauftemperatur im Kaltwasserkreis aktuell 2 °C. Durch die geringe Spreizung zur Sollwerttemperatur muss das Ventil deutlich weiter öffnen, um die entsprechende Kühlleistung abzurufen. Aktuell sind mit dem verbauten Wärmetauscher unter günstigen Betriebsbedingungen Temperaturen von ca. 5 °C möglich. Um niedrigere Temperaturen zu ermöglichen, kann die Vorlauftemperatur des Kaltwasserkreislaufs weiter reduziert werden und in Ergänzung die Wärmetauscher Fläche und/oder der Durchfluss des Kältemittels durch den Wärmetauscher erhöht werden.

Die gezeigten Temperaturen sind immer Mittelwerte aus fünf Thermoelementen. Die Wassertemperatur in Hellblau folgt der berechneten Sollwerttemperatur in lila. Diese ist aus den Grundwassertemperaturen berechnet. Die in Grün dargestellte Proben-Temperatur zeigt eine verzögerte Reaktion auf die Wassertemperatur, bedingt durch die thermische Trägheit. In schwarz dargestellt ist die Temperatur des Klebers. Die Temperatur folgt in gedämpfter Form der Wassertemperatur in hellblau.

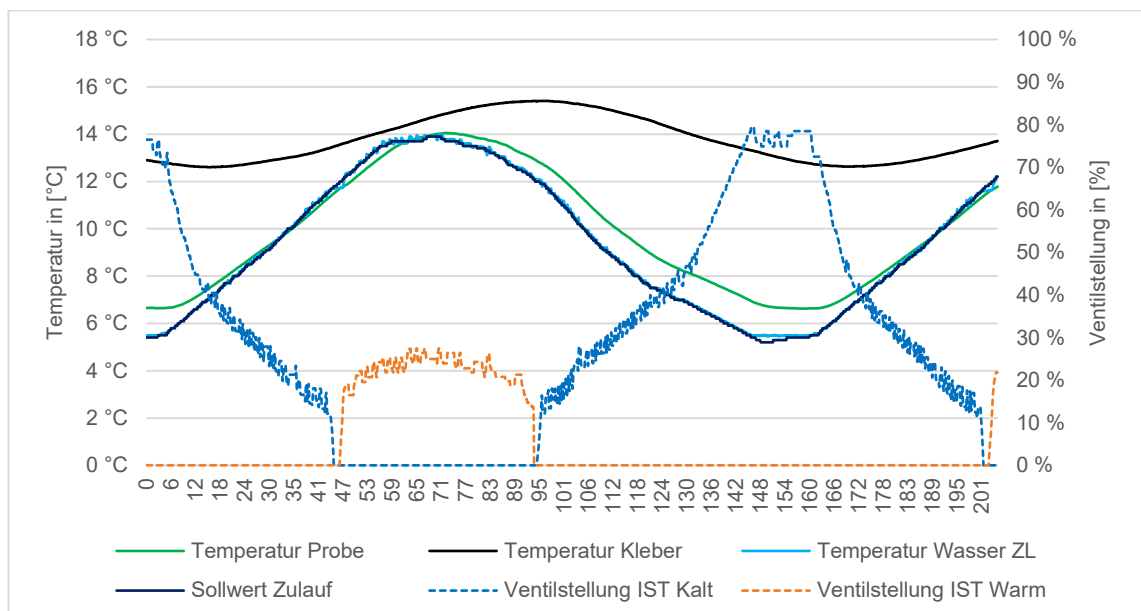


Abbildung 48 Temperaturverläufe und Ventilstellungen der Prüfkammer 1 mit aktiver Temperaturregelung

9 Ausblick

Im Folgenden werden bereits geplante Erweiterungen im Anlagenbau und zukünftiger Forschungsbedarf beschrieben.

9.1 Anlagenbau

Wie in Abbildung 47 dargestellt, befindet sich eine zweite Kammer bereits im Aufbau. Diese enthält eine Reihe von Verbesserungen aufgrund der Erfahrungen bei Aufbau und Betrieb des ersten Prototyps.

Ein zentraler Punkt bei der Optimierung der Kammern betrifft die Betongrundplatte. Der aktuelle Kammernaufbau basiert auf einer Platte aus WU-Beton mit einer Dicke von 100 mm und einer einfachen Bewehrungsmatte. Zur Befestigung der Randwinkel sind M12 Gewindehülsen mit einer axialen Auszugskraft von 500 kg eingegossen. Die Dimensionierung erfolgte zu Projektbeginn in Absprache mit einem Hersteller von Betonfertigteilen basierend auf den damals vorhandenen Informationen zum Betrieb. Wie beschrieben traten im Betrieb bei einem Druck von ca. 0.5 bar Risse in der Betonplatte auf, die zu einer Leckage führten. Leckagen traten dabei insbesondere im Bereich der Durchführung der Thermoelemente auf, die aktuell lediglich unter der umlaufenden unteren Silikondichtung nach außen geführt wurden. Da Wasser an der umlaufenden, unteren Ringdichtung anliegt, ist also davon auszugehen, dass durch den Bruch der Betonplatte auch ein Abriss in der umlaufenden Dichtungsebene und/oder in der Bitumenverspachtelung zwischen den Platten provoziert wurde. Die Erkenntnisse fließen in die Optimierung des Prüfstands folgendermaßen ein.

Für die neuen Betonplatten wurde eine Statik in Auftrag gegeben. Diese berücksichtigt nun einen Maximaldruck von 1 bar. Dieser Druck entspricht dem Ansprechdruck des Sicherheitsventils. Die erhöhte Druckstabilität wird durch eine verbesserte Bewehrung und eine Dicke von 150 mm erreicht. Zusätzlich werden die Gewindehülsen im Beton durch eine größere Ausführung (M18) mit verbesserter Auszugsfestigkeit von 1600 kg ersetzt. In die Oberflächen der Platten werden Nuten eingeplant, in welche die Thermoelemente zur Temperaturmessung eingelegt und anschließend im Beton eingegossen werden. Hierdurch entfällt die potentielle Leckage im Bereich der Durchführung der Thermoelemente unter der Ringdichtung im Falle einer hinterlaufenden Dämmung. Abbildung 49 zeigt die neue Betongrundplatte mit Nuten für die Temperatursensoren.

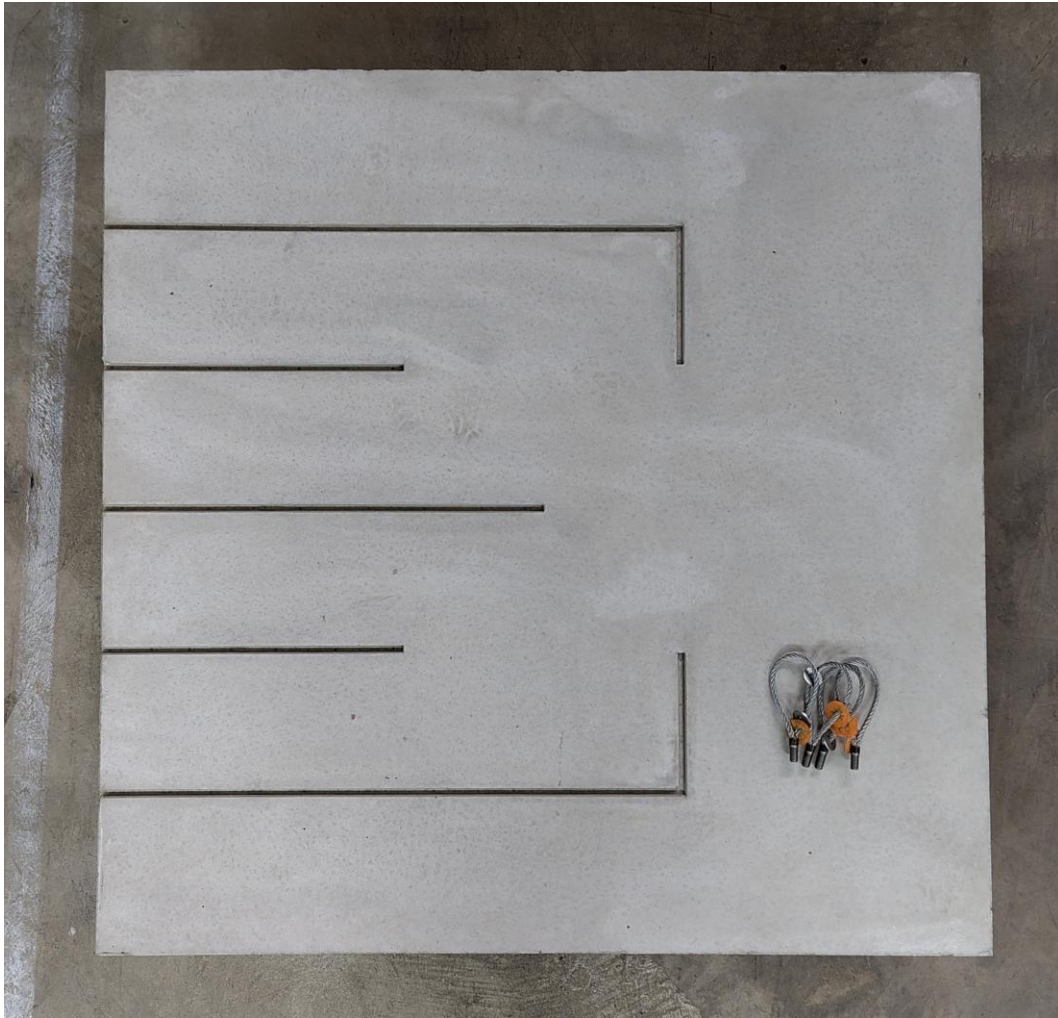


Abbildung 49 Neue Betongrundplatte mit Nuten für die Temperatursensoren und Ankerschlaufen zum Anheben der Platte

Ein weiterer Punkt zur Optimierung betrifft die Wärmetauschermodule. Wie beschrieben besteht mit dem aktuellen Aufbau eine gewisse Limitation hinsichtlich niedrigerer Temperaturen. Um auch bei höheren Umgebungstemperaturen noch die gewünschten Temperaturprofile anfahren zu können, werden die Module mit leistungsfähigeren Plattenwärmetauschern ausgestattet, welche die Wärmeübertragung verbessern (Abbildung 50). Damit werden die Fahrwege der Ventile geringer und die Amplitude der Wassertemperatur kann im Bedarfsfall weiter vergrößert werden. Zudem wird die Anordnung von Pumpen und Ventilen optimiert, um den Verschleiß zu minimieren. Des Weiteren kommt eine Festverrohrung zum Einsatz, um die Leitungsverluste zu reduzieren. Zusätzlich wird die Durchflussregelung weiter verbessert, um auch die geringfügigen Durchflussänderungen zu minimieren, die beim Anlauf der Pumpen auftreten.



Abbildung 50 Neuer Plattenwärmetauscher mit erhöhter Wärmeübertragungsleistung und Dämmschale zur Reduzierung der Wärmeverluste

9.2 Forschungsbedarf

Forschungsbedarf ergibt sich sowohl bei der Weiterentwicklung einfacherer Laborversuche zur Flüssigwasseraufnahme bei erhöhtem Druck, als auch bei der Erprobung des Perimeter-Prüfstands.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Flüssigwasseraufnahme bei erhöhtem Wasserdruck, unterstreichen die Notwendigkeit, durch den Versuchsaufbau eine uniaxiale Beanspruchung der Proben zu erreichen. Elementar ist dabei die Herstellung von Probekörpern mit einer druckstabilen Einhausung ohne Hinterschneidungen und Fugen, um bei der Wiegung keine Fehler durch anhaftende Wassertropfen zu erhalten. Der gezeigte Ansatz mit dem eingießen der Proben in Kunststoffrohre erscheint grundsätzlich zielführend, müsste methodisch jedoch noch weiterentwickelt werden. Beim eingießen von Proben mit voller Dicke, besteht sowohl das Problem, dass die Vergussmasse ggf. nicht vollständig und blasenfrei einläuft, als auch das Problem eines ungünstigen Verhältnisses der gesamten Probenmasse (Dämmstoffzylinder, Kunststoffrohr und Vergussmasse) zur registrierten Wasseraufnahme.

Ein alternativer Ansatz der die bestehenden Probleme vermeidet, wäre das eingießen der Proben in einen Dichtungsflansch, so dass nur wenige cm der Probe im Bereich der Oberfläche eingegossen werden. Der Dichtungsflansch könnte an ein druckführendes Gefäß angekoppelt werden, um den Wasserdruck auf die Oberfläche der Probe aufzubringen. Die restliche Mantelfläche der Probenzylinder könnte mit einer diffusionsdichten Aluminiumfolie beklebt werden. Ggf. könnte auf der trockenen Seite ein weiterer Dichtungsflansch angebracht werden, der Trocknungsmittel enthält, um

parallel zur Flüssigwasseraufnahme auch eine Feuchteaufnahme durch Diffusion zu generieren.

Wie beschrieben traten bereits bei geringer Dicke der aufliegenden Kiesschicht, deutliche Deformierungen der Probenoberfläche auf. Trotz intensiver Recherche wurden keine Publikationen oder Informationen zur Höhe von Punktlasten durch einzelne Kiespartikel von Bodensubstraten bei einem bestimmten mittleren Erddruck gefunden. Es ist aber davon auszugehen, dass Spannungsspitzen an einzelnen Kiespartikeln entstehen. Perimeterdämmungen werden oft durch Schutzschichten (z. B. Noppenbahnen) mechanisch geschützt. Zur Prüfung der Funktionstauglichkeit solcher Schutzmaßnahmen und auch zur Entwicklung von mechanischen Vorbehandlungen von Probenoberflächen vor einer Prüfung der Flüssigwasseraufnahme bei erhöhtem Druck durch kleinere Versuchsaufbauten (siehe Kapitel 5.1) wäre die Ermittlung von Größenordnungen der Punktlasten in dieser Exponierung interessant. Proben zur Bestimmung der langfristigen Wasseraufnahme bei uniaxialer Wasserdruckbeanspruchung unter erhöhtem Druck, könnten dann beispielsweise durch eine vorherige Druckbeanspruchung der Probenoberflächen mit einem speziellen Druckstempel, der eine definierten Struktur aufweist, vorbehandelt werden.

Die Entwicklung des Anlagenkonzepts und die Realisierung der prototypischen Kammer war wesentlich aufwändiger als zu Beginn des Projekts absehbar. Bevor das in diesem Bericht beschriebene Konzept umgesetzt wurde, erfolgten zahlreiche Vorversuche mit alternativen Ansätzen zur Ausbildung der Druckkammer. Dabei wurden sowohl alternative Baustoffe für die Kammer erprobt (Druckkammer direkt aus dem zu prüfenden Dämmstoff, Beton) sowie unterschiedliche Ansätze zur Montage und Demontage der Prüfkammern (Zerlegbarer Prüfkammerrahmen). Ein zentrales Problem war die Sicherstellung der Wasserdichtheit der Anschlüsse und Verbindungen zwischen den Komponenten bei den zu untersuchenden erhöhten Wasserdrücken

Die wichtigsten Ansätze zur Weiterentwicklung der Prüfkammern sind in Kapitel 9.1 beschrieben. Bereits jetzt zeigen die Messdaten, dass die berechneten Regelparameter gut zur Regelstrecke passen und die Wassertemperatur dem eingestellten Sollwert nahezu perfekt folgt. Sobald ein optimiertes Kammerlayout umgesetzt ist, müssen Langzeitversuche folgen, bei denen die Funktionsfähigkeit der Mess- und Regelungstechnik erprobt werden kann.

Durch die direkte Nachstellung der realen Einbaubedingungen ist eine Validierung theoretisch nicht nötig. Zur Validierung könnte jedoch ein Dämmstoffzwilling an einem Gebäude verbaut werden. Die Kammer könnte dann die Grundwassertemperaturen und Druckbeanspruchung des im Erdreich verbauten Materials nachfahren. Ein Vergleich der Änderungen der Dämmstoffeigenschaften im Labormodell mit den Ergebnissen aus dem Freilandversuch nach drei Jahren könnte zeigen, ob die Kammer den aufwändigen Praxistest ins Labor übertragen kann.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Kategorien von Grundwasserregionen in Deutschland. Eigene Darstellung erstellt mit (BfG, 2025)	16
Abbildung 2	Grundwasservorkommen in Deutschland. Eigene Darstellung erstellt mit (BfG, 2025)	16
Abbildung 3	Links: Jahresganglinienvergleich der Messstelle Tafertshofen; Rechts: Übersicht der zugehörigen Grundwasserregion Iller-Lech-Bodensee mit Markierung der Messstelle Tafertshofen (roter Pfeil) [LfU (2025)]	18
Abbildung 4	Monatliche Bodentemperaturen in Abhängigkeit von der Einbautiefe gemäß [Böhme und Böttcher 2011]	19
Abbildung 5	Bodentemperaturen je Monat in Abhängigkeit der Einbautiefe. Darstellung der Stützstellen (Datenpunkte) und Ausgleichsfunktionen als Polynom 3. Grades gemäß Tabelle 4	21
Abbildung 6	Ermittelte, stetige und periodische Funktionsverläufe der Temperatur für unterschiedliche interessierende Einbautiefen, exemplarisch ermittelt aus Daten gemäß [Böhme und Böttcher 2011]	23
Abbildung 7	Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: BGR)	24
Abbildung 8	Links: Prüfkörper mit durch bituminösen Kleber gefüllten Fugen nach mehrwöchigem Einbau in eine Prüfkammer gemäß Kapitel 7; Rechts: Beschädigte Oberfläche mit Vertiefungen und gelegentlichen Rissen in der Deckschicht, verursacht durch Punktlasten des angrenzenden Erdreichs.	25
Abbildung 9	Links: Druckbehälter zur Unterwasserlagerung von Proben bei erhöhtem Druck; Rechts: Probenhalter	28
Abbildung 10	Links: Herstellung der Proben mittels CNC-Fräse; Rechts: Probenmaße im Querschnitt	29
Abbildung 11	Links: Eingießen der Probe mit Epoxidharz; Rechts: fertige Probe mit vergossenem Rand	29
Abbildung 12	Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.35 bar inklusive Standardabweichung und Ausgleichsfunktion (runde Proben mit Randverguss)	31
Abbildung 13	Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.7 bar und 1.4 bar (quadratische Proben ohne Randverguss)	34
Abbildung 14	Aufbau des Modells für Szenario A (Bitumenkleber vollflächig zwischen Dämmstoff und Beton) in WUFI®, der Aufbau entspricht von links nach rechts den in Tabelle 14 definierten Materialschichten 1, 2, 3, 4.1, 5 und 6	37
Abbildung 15	Aufbau des Modells für Szenario B (Dämmstoff mit Wasser hinterlaufen) in WUFI®, der Aufbau entspricht von links nach rechts den in Tabelle 14 definierten Materialschichten 1, 2, 3, 4.2, 5 und 6	38
Abbildung 16	Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Wassergehalt im Simulationszeitraum von 10 Jahren für die Variante Einbautiefe 1.0 m ohne Hinterlaufen der Dämmung (Szenario A)	39

Abbildung 17	Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Wassergehalt im Simulationszeitraum von 10 Jahren für die Variante Einbautiefe 1.0 m mit Hinterlaufen der Dämmung (Szenario B)	40
Abbildung 18	Mögliche Testszenarien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungen: A) Konstante Eintauchtiefe von 1.0 m (jährlich wiederholt); B) Konstante Eintauchtiefe von 3.5 m (jährlich wiederholt)	42
Abbildung 19	Mögliche Testszenarien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungen: C) Einbautiefe von 4.5 m mit variierender Eintauchtiefe zwischen 2.5 und 3.5 m, einschließlich eines einmaligen Hochwasserereignisses	43
Abbildung 20	CAD-Modell der PK in Seitenansicht	45
Abbildung 21	Aktuelles CAD-Modell in Isometrie	46
Abbildung 22	Schnittansicht der PK mit Kennzeichnung ihrer Komponenten	47
Abbildung 23	Ansicht des Verschlussdeckels mit den Anschlüssen für die Versorgungsinfrastruktur	48
Abbildung 24	Prüfkammerrahmen als Schweißkonstruktion in Isometrie	49
Abbildung 25	Gefertigter Prüfkammerrahmen als Schweißkonstruktion aus verzinktem Stahl	50
Abbildung 26	Bestandteile und Konfiguration des Dichtungssystems der Prüfkammer in eingebautem Zustand	51
Abbildung 27	Am Prüfkammerrahmen eingebrachte Ringdichtungen	52
Abbildung 28	Unterer Teil der Prüfkammer: Heizmodul auf Lastpalette mit aufgesetzter Betongrundplatte	53
Abbildung 29	Heizungsmodul der Prüfkammer	53
Abbildung 30	Technische Zeichnung der oberen und unteren Prüfkammerverspannung	54
Abbildung 31	Konfiguration des Probekörpers aus vier Einzelteilen zur Ausbildung von Längs- und T-Stößen	56
Abbildung 32	Betongrundplatte mit fünf Thermoelementen und der aufgesetzten Prüfkammer	57
Abbildung 33	Systemarchitektur der Perimeter-Prüfanlage; in diesem Kapitel wird das hydraulische Versorgungssystem (HVS) beschrieben und erläutert	63
Abbildung 34	Kompletter Schaltplan des HVS der Perimeter-Prüfanlage mit Legende	64
Abbildung 35	UV-C Lampe als Teil des Reinigungskreises des Aufbereitungssystems zur kontinuierlichen Eliminierung von biologischen Kontaminationen im simulierten Grundwasser	65
Abbildung 36	Detaillierte Ansicht des Aufbereitungssubsystems des HVS	67
Abbildung 37	Detaillierte Ansicht des Versorgungssubsystems des HVS	68
Abbildung 38	Hauptwasserpumpe und Zulaufverteilerblock an der realen Anlage.	68
Abbildung 39	Anschlussdiagramm der Prüfkammer mit Bezeichnung der relevanten Komponenten	69
Abbildung 40	Reale Anschlusskonfiguration des Versorgungssystems an eine Prüfkammer mit Beschriftungen der wichtigsten Komponenten	69
Abbildung 41	Schematische Darstellung des Heizungssubsystems	71
Abbildung 42	Zentrales Heizungskreismodul	72
Abbildung 43	Schematische Darstellung des Temperiersubsystems	73

Abbildung 44	Temperiermodul für die Temperierung der Kiesräume und Heizmodule der Prüfkammern	74
Abbildung 45	Links: Versorgungskasten mit Sicherungen, IPC und Schaltnetzteilen. Rechts: Messtechnikkasten mit den einzelnen Komponenten zur Erfassung der Signale	75
Abbildung 46	Benutzeroberfläche mit Schaubild der Prüfkammer und live Werten der Anlage sowie Eingabefelder (blau) zur Steuerung der Anlage im Handbetrieb	76
Abbildung 47	Aktueller Aufbau der Anlage. Links befindet sich die Versorgungseinheit (A), in der Mitte die bereits im Aufbau befindliche Prüfkammer 2 (B) sowie die Thermostate (C), und rechts ist die derzeit in Betrieb befindliche Prüfkammer 1 (D) zu sehen	77
Abbildung 48	Temperaturverläufe und Ventilstellungen der Prüfkammer 1 mit aktiver Temperaturregelung	78
Abbildung 49	Neue Betongrundplatte mit Nuten für die Temperatursensoren und Ankerschlaufen zum Anheben der Platte	80
Abbildung 50	Neuer Plattenwärmetauscher mit erhöhter Wärmeübertragungsleistung und Dämmschale zur Reduzierung der Wärmeverluste	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Anforderungen an Perimeterdämmstoffe für den Einsatz im drückenden Wasser (in Anlehnung an Albrecht & Engelhardt 2018)	10
Tabelle 2	Grundwasserspiegel unterhalb der Geländeoberkante an 18 exemplarisch ausgewählten Standorten in Brandenburg, Deutschland [LFU Brandenburg]	17
Tabelle 3	Verwendete Temperaturdaten in einer Tiefe von 0.5 m, 1 m, 2 m, 4 m, 6 m und 12 m gemäß [Böhme und Böttcher 2011]	20
Tabelle 4	Koeffizienten zur Interpolation von Monatsmittelwerten der Bodentemperatur in Abhängigkeit der Tiefe auf Basis von Messdaten gemäß Tabelle 3	22
Tabelle 5	Koeffizienten zur Ermittlung der Bodentemperatur als stetige und periodische Funktion für unterschiedliche interessierende Einbautiefen, exemplarisch ermittelt aus Daten gemäß [Böhme und Böttcher 2011]	22
Tabelle 6	Anhaltswerte für den Erdruchdruck in kN/m ² für verschiedene Bodenarten in Abhängigkeit der Einbautiefe (Quelle: FPX (2013))	24
Tabelle 7	Massenzunahme der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.35 bar (runde Proben mit Randverguss)	30
Tabelle 8	Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem Untertauchen bei erhöhtem Wasserdruck von 0.35 bar (runde Proben mit Randverguss)	30
Tabelle 9	Koeffizienten zum Ansatz gemäß Formel (3) zum Ausgleich der Daten aus Tabelle 8	31
Tabelle 10	Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem vollständigem Untertauchen in Anlehnung an DIN EN ISO 16535 (quadratische Proben ohne Randverguss)	33
Tabelle 11	Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem vollständigem Untertauchen unter Anwendung eines erhöhten Wasserdrucks von 0.7 bar (quadratische Proben ohne Randverguss)	33
Tabelle 12	Wasseraufnahme in Vol-% der Proben bei langfristigem vollständigem Untertauchen unter Anwendung eines erhöhten Wasserdrucks von 1.4 bar (quadratische Proben ohne Randverguss)	33
Tabelle 13	Koeffizienten zum Ansatz gemäß Formel (3) zum Ausgleich der Daten aus Tabelle 10, Tabelle 11 und Tabelle 12	34
Tabelle 14	Modellquerschnitt, Materialparameter und Herkunft der Daten	37
Tabelle 15	Parameter zur Approximation des Außenklimas mittels Sinusfunktion in WUFI®	38
Tabelle 16	Parameter zur Approximation des Raumklimas mittels Sinusfunktion in WUFI®	39
Tabelle 17	Interpolierte Werte der mittleren Temperatur, der Temperaturamplitude, des Monats mit der maximalen Temperatur und des volumetrischen Wassergehalts $\Psi_{\max}$ im zehnten Jahr – für drei Einbautiefen im Fall (A) ohne Wassereintritt zwischen Dämmung und Beton sowie Fall (B) mit Wassereintritt zwischen Dämmung und Beton.	40

Literaturverzeichnis

Fachartikel, Bücher und Onlinequellen

Alvey, J.B., et al., 2017. Experimental study on the effects of humidity and temperature on aerogel composite and foam insulations. *Energy and Buildings*.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2025. Grundwasserstände im Gebiet Iller–Lech. [online] Verfügbar unter: https://www.nid.bayern.de/grundwasser/iller_lech [Zugriff am 27. Mai 2025].

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2025. Grundwasserstand Tafertshofen – Jahresvergleich. [online] Verfügbar unter: https://www.nid.bayern.de/grundwasser/iller_lech/tafertshofen-9284/jahresvergleich [Zugriff am 27. Mai 2025].

Böhme, M. und Böttcher, F., 2011. Bodentemperaturen im Klimawandel: Auswertungen der Messreihe der Säkularstation Potsdam. *DWD Klimastatusbericht 2011*.

Bomberg, M.T., 1983. Laboratory methods for determining moisture absorption of thermal insulations I: review. *Journal of Thermal Insulation*, 6, pp.232–249.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2013. *Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BUEK1000)* [Online-Karte]. Hannover: BGR. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Bilder/Bod_BUEK1000_2_g.jpg?__blob=normal&v=6 [Zugriff am 27. Mai 2025].

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), 2025. *Eigene Karte erstellt mit: HAD – Hydrologischer Atlas von Deutschland* [Online-Kartenanwendung]. Verfügbar unter: <https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html?lang=de&vm=2D> [Karte erstellt am 20. Mai 2025].

Fachvereinigung Polystyrol-Extruderschäumstoff (FPX), 2013. *Merkblatt für den Wärmeschutz erdberührter Bauteile*. [online] Fachvereinigung Extruderschäum e.V. Verfügbar unter: https://xps-spezialdaemmstoff.de/wp-content/uploads/FPX_Merkblatt_Waermeschutz_erdberuehrter_Bauteile_DE.pdf [Zugriff am 27. Mai 2025].

Forgues, A.O., 1983. Laboratory methods for determining moisture absorption of thermal insulations II: Comparison of three water absorption test methods with field performance data. *Journal of Thermal Insulation*, 7 (October).

Großkinsky, T., 1998. *Bestimmung der Stoffeuchte von Extruderschäumplatten als Perimeterdämmung bei drückendem Wasser*. IBP-Bericht FB-2/1998. Fraunhofer-Institut für Bauphysik.

Großinsky, T. und Künzel, H., 1995. *Untersuchungen zum Verhalten von Extruderschaumplatten als Perimeterdämmung bei drückendem Wasser*. IBP-Bericht FB-57/1995. Fraunhofer-Institut für Bauphysik.

Jiang, H., et al., 2022. Experimental investigation on performance degradation of insulation materials induced by freeze–thaw cycles and its applications. *Construction and Building Materials*.

Kodippili, D.P.A., Molleti, S. und Van Reenen, D., 2025. Temperature dependent long-term thermal resistance of closed-cell foam insulations. In: U. Berardi, ed. *Multiphysics and Multiscale Building Physics*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 554. Singapore: Springer.

Leem, Y., et al., 2024. Long-term stability and water vapor induced degradation of physico-chemical properties of XPS and PF. *Developments in the Built Environment*, 18.

Molleti, S. und Van Reenen, D., 2022. Effect of temperature on long-term thermal conductivity of closed-cell insulation materials. *Buildings*, 12, p.425.

Niu, F., et al., 2021. Performance degradation of polymer material under freeze-thaw cycles: A case study of extruded polystyrene board. *Polymer Testing*, 96.

Pontinha, A.D.R., et al., 2023. Thermomechanical performance assessment of sustainable buildings' insulating materials under accelerated ageing conditions. *Gels*, 9, p.241.

Treichler, W.J., 1953. *An investigation of the heat transmission and mechanical properties of several types of perimeter insulation under dry and saturated conditions*. Master's thesis. Michigan State College of Agriculture and Applied Science, Department of Mechanical Engineering.

Normen

DIN 4108-2:2013-02, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 4108-10:2021-11, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 16535:2019-10, *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 16536:2019-11, *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Wasseraufnahme durch Diffusion*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 16546:2024-09, *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchung*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 12572:2025-03, *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 13162:2015-04, *Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 13164:2015-04, *Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) – Spezifikation*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 13171:2015-04, *Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) – Spezifikation*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 16534:2024-09, *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1931:2001-03, *Abdichtungsbahnen - Bitumen-, Kunststoff und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 29469:2023-02, *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 12086:2013-06, *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit*, Beuth Verlag, Berlin.

EAD 040650-00-1201, *External thermal insulation composite system (ETICS) with rendering on thermal insulation materials*, Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA).



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing
Geschäftsführender Institutsleiter:

Bauaufsichtlich anerkannte
Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle
von Baustoffen und Bauteilen.

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des
Wärme- und Feuchteschutzes

T+49 89 85800-0 | F +49 89 85800-40
info@fiw-muenchen.de | www.fiw-muenchen.de
Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm