

Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 164

bast

Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

von

Roberto Cudmani
Dirk Heyer
Emanuel Birle
Paula Möller

Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik,
Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 164

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 05.0190

Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Fachbetreuung

Michael Bürger

Referat

Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und Erdbaustoffe im Straßenbau

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-647-4

Bergisch Gladbach, November 2021

Kurzfassung – Abstract

Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Der Einsatz veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff soll zukünftig erhöht werden. Da sich allerdings ihre bodenmechanischen Eigenschaften nach dem Lösen aus dem Gebirgsverband unter Witterungseinflüssen bereits während der Bauzeit unterschiedlich stark verändern können, ist ihr Einsatz bisweilen noch zögerlich. Systematische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten zeigten bereits auf, dass die bodenmechanischen Eigenschaften nicht nur von ihrer Zusammensetzung und den inneren Bindungskräften, sondern auch vom Einbauzustand und dem Verwitterungszustand abhängen. Zum anderen wurde festgestellt, dass bei veränderlich festen Gesteinen das Quellvermögen sogar erst durch eine Lösung der diagenetischen Verbindungen aktiviert werden kann. Um den Einsatz veränderlich fester Gesteine oberflächennah zu ermöglichen, und das Quellpotential abschätzen zu können, wurden Quellversuche an sechs unterschiedlich stark quellfähigen Böden und Gesteinen abhängig vom Einbau- und Verwitterungszustand durchgeführt.

Da ein linearer Zusammenhang zwischen Quelldruck und Quelldehnungen besteht, kann zunächst mit Hilfe des Quelldruckversuches beurteilt werden, ob überhaupt Quelldehnungsversuche erforderlich sind. Bei Bodengruppen mit einem höheren Feinkornanteil ($d < 0,06 \text{ mm}$) $> 15 \text{ M.-%}$ sowie bei Böden, die schnell zu einem feinkörnigen Boden zerfallen können ($I_{d2} < 60\%$) sollte ein Quelldruckversuch durchgeführt werden. Liegen zu diesen Grenzen der Klassifikationsparameter die maximalen Quelldrücke $\sigma > 100 \text{ kPa}$, sind zusätzlich Quellhebungsversuche und eine Tonmineralanalyse zur Erfassung quellfähiger Tonminerale zu ergänzen.

Zusammenfassend können veränderlich feste Gesteine grundsätzlich als Erdbaustoff eingesetzt werden. Aufgrund ihrer Verwitterungsempfindlichkeit ergeben sich höhere Anforderungen an die Erdbauprozesse. Nach dem Lösen aus dem Gebirgsverband können diese Gesteine bis zum Einbauen und Verdichten schnell zu einem gemischt- bis feinkörnigen

Boden zerfallen. Dieser verwitterungsbedingte Zerfall kann zu einer Verschlechterung der bodenmechanischen Eigenschaften führen. Daher sollte eine Zwischenlagerung ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen wegen der Erhöhung des Feinkornanteils vermieden werden. Denn je höher der Feinkornanteil eines Bodens und damit seine spezifische Oberfläche ist, desto mehr Wasser kann an die Oberfläche der zugänglichen Tonminerale angelagert werden. Um das Sackungs- und Quellpotential weiter zu reduzieren, sind beim Einbau Luftporenanteile $n_a \leq 6 \text{ Vol.-%}$ anzustreben. Der Einbau veränderlich fester Gesteine sollte wegen ihrer Witterungsanfälligkeit mindestens 1 m unterhalb der Böschungsoberfläche bzw. dem Planum erfolgen. Aufgrund ihrer Heterogenität sind außerdem Probefelder zur Überprüfung der Einbau- und Verdichtungsvorgaben zwingend erforderlich.

Investigations of the swelling of variable weak rocks used as earthwork materials

With the aim of improving sustainability and resource efficiency, the use of variable weak rocks as earthwork material must be increased in the future. The problem of variable weak rocks is that their soil-mechanical properties can change after being released from the mountain range under the influence of weathering processes. Therefore, their utilization is still hesitant. Systematic investigations of the bearing capacity and deformation behavior have already shown that the soil-mechanical properties depend not only on their composition and the internal binding forces, but also on their initial conditions and the degree of decay. Moreover, it was found that the swelling potential can be activated even by a disintegration of the diagenetic bonds. In order to be able to use variable weak rocks in earthworks close to the surface, a possible swelling potential should also be taken into account. Therefore, systematic swelling tests were carried out on six different swellable soils and rocks, depending on the initial conditions and the degree of decay.

Since there is a linear relationship between swelling pressure and swelling strain, it can first be assessed with the help of the swelling pressure test whether swelling strain tests are necessary in the first place. For soils with a higher fine grain content

($d < 0,06 \text{ mm}$) $> 15 \text{ M.-%}$, and for soils that disintegrate quickly into a fine-grained soil ($I_{d2} < 60\%$), swelling pressure tests should be carried out first. If, at the described limits of the classification parameters, the maximum swelling pressures are higher than $\sigma > 100 \text{ kPa}$, then swelling strain tests and a clay mineral analysis must be additionally carried out.

To summarize, variable weak rocks can be principally used as earthworks materials. Due to their weathering sensitivity, higher requirements on the earthmoving processes are necessary. After being released from the mountain range, variable weak rocks can disintegrate completely into a finer grained soil during the earthmoving processes. This decay leads to a deterioration of the soil-mechanical properties. Therefore, temporary storing without additional protective measures should be avoided because of the increase in the proportion of fine grains. Because the higher the fine grain content of a soil and thus its specific surface, the more water can be adsorbed onto the surface of the clay minerals. In order to reduce the sagging and swelling potential, a limitation of the air pores of $n_a < 6 \text{ Vol.-%}$ should be targeted. The installation should be carried out at least 1 m below the slope surface or below the levelled ground due to its weathering sensitivity. However, due to their heterogeneity, test fields are absolutely necessary for checking the placing and compaction specifications.

Summary

Investigations of the swelling of variable weak rocks used as earthwork materials

1 Introduction

With the aim of improving sustainability and resource efficiency, the amount of less suitable and already existing on-site geological materials as earthwork materials must be increased to avoid the consumption of natural mineral earthworks materials. Variable weak rocks (or weak rocks of varying strength), which can be found in a significant extent near the surface in southern and central Germany, belong to these materials and thus represent an essential part of the available earthwork materials. Their utilization is still hesitant due to a lack of experience on the bearing capacity and deformation behavior, as well as the swelling behavior, so that often landfill or pit filling is preferred.

The problem of variable weak rocks is that their soil-mechanical properties can change after being released from the mountain range under the influence of weathering processes. Already few changes between drying and wetting, which can take place during the construction period and thus during the associated earthmoving processes (loosening, loading, conveying, temporary storing, placing and compacting) are often unavoidable. This leads to variable strength properties, which can accelerate the decay processes and result in the complete disintegration of the rock. During the lifetime of the earth structure, these weathering processes may lead at first to sagging or swelling and, in consequence of progressive weathering to lasting deformations.

In previous research studies (e. g. STIEGELER et. al, 2006; MÖLLER and HEYER, 2014; BÖNSCH, 2006) it was already found that the soil-mechanical properties depend on their composition and the internal binding forces, as well as the initial conditions (initial water content, initial density) and the degree of decay. On the other hand, it was found that the swelling potential can be activated even by a disintegration of the diagenetic bonds (e. g. due to cracking by dehydration), by decay due to weathering processes (drying-wetting-changes) and by mechanical action (relief during exposure, processing and compaction). In order to be able to use variable

weak rocks in earthworks close to the surface, a possible swelling potential should also be taken into account. In particular, the swelling processes associated with considerable increases in volume can lead to damage of the earthwork structures and thus lead to an impairment of their serviceability.

Causes of the swelling processes associated with significant increases in volume are swellable clay minerals or chemical swelling processes, e. g. the conversion of anhydrite to gypsum. There are various publications dealing with the swelling behavior of swellable soils and rocks, especially in the field of tunneling (e. g. RAUH, 2009) but also at in situ rocks (e. g. PIMENTEL, 1996). However, for variable weak rocks, which are to be replaced and compacted as earthwork material, systematic investigations of the swelling potential depending on the initial conditions and the degree of decay are still missing.

With the help of the previous research (STIEGELER et. al, 2006; MÖLLER and HEYER, 2014) and investigations presented in this work, it should be shown that it is fundamentally possible to use variable solid rocks as earthwork materials. Moreover, this work should show classification possibilities for the description of the specific variability as well as technical requirements for the use of such rocks and soils.

2 Investigation methods

The aim of this research project was to investigate the swelling behavior of selected variable solid rocks depending on the initial conditions (initial water content, initial density) and the degree of decay.

Initially, for these investigations, five different soils were extracted from construction projects or deposits: Opalinus claystone, bentonite, dark red marl, Emscher marl and decomposed fire-letten. For these soils classification tests with the determination of the grain size distribution, the consistency limits, the water absorption capacity, the grain density as well as an analysis of the clay mineralogical properties were carried out. To characterize the variability of these soils, qualitative drying wetting cycles as well as quantitative tests such as the slake durability test according to TP BF-StB, Teil C 20 or

the drying-humidification test according to NICKMANN (2009) were carried out. On the basis of this classification and the weathering tests four of the five soils (Opalinus claystone, bentonite, dark red marl, decomposed fire-letten) were selected for the swelling investigations.

First of all, for these four new soils as well as for the two other soils clay marl stone and tertiary clay from the research work of MÖLLER and HEYER (2014), the proctor curves for the existing weathering conditions were determined to show the two initial conditions (proctor optimum and degree of compaction $D_{Pr} = 97\%$ on the dry side of the proctor optimum). Degree of decay 1 (VZ 1) defines the unweathered initial state of the sample. Degree of decay 2 according to MÖLLER and HEYER (2014) was not taken into account here. For the degree of decay 3 (VZ 3) and 4 (VZ 4), the development of the decay up to a limit curve, where the decay is almost completed, should be determined. For this purpose, the materials were artificially weathered in the laboratory under one or more drying wetting cycles. The procedure was already applied in the investigations of MÖLLER and HEYER (2014). For VZ 3, about 50% of the expected decay should have occurred. This was intended to simulate the decay of a variable weak rock by temporary storing. For VZ 4, approximately 90% of the expected decay should have occurred, which is the limit of an almost completely weathered material.

For the determination of the relationship between swelling pressure and swelling strain, combined experiments were carried out for VZ 1 and VZ 3 in large oedometers with a diameter of 30 cm and a sample height of 6 cm. For this purpose, the swelling pressure was first measured with impeded axial expansion. Subsequently, the sample was gradually relieved, whereby the swelling strains were determined under the respective pressure. The stresses for the swelling strain steps were selected as a function of the maximum swelling pressure.

Since the samples in VZ 4 were often too impermeable due to the high proportion of fine grains and therefore the swelling pressure development of the 6 cm high sample was not completed even after weeks, the experiments had to be carried out in standard oedometers with a diameter of 10 cm and a sample height of 2 cm. The

technology of the software-controlled press units was not geared to the smaller forces, so that mechanical loading benches were used. Therefore, a direct relationship between swelling pressure and swelling strain could not be clearly determined for these experiments, since both parameters were determined on two instead of one sample. To compare both methods, both types of experiments were carried out on VZ 4 of the tertiary clay and decomposed fire-letten.

The influence of weathering processes in the compacted state on the swelling strain was investigated on two soils with comparable initial conditions (clay marl stone, Opalinus claystone). For this purpose, the samples were subjected to six drying wetting cycles in the large oedometer under a constant load of 50 kN/m^2 . The drying was done by means of compressed air and the wetting by adding water through the base of the sample. Both experiments lasted approximately three months.

3 Investigation results

This research work has revealed a relationship between the swelling pressure and swelling strain from the combined experiments. With increasing swelling pressure the swelling strain also increases. Thereby, the swelling pressure depends significantly on the initial condition and the degree of decay.

The degree of the swelling pressure is determined by the pore space and the specific surface of the clay minerals. The higher the proportion of air pores in the soil, the more water can be absorbed into the pore space. Analogous to MÖLLER and HEYER (2014), the results from the swelling tests proved that the potential of sagging and swelling can be raised through drier initial conditions and higher pore space. In conclusion, a limitation of the air pores of $n_a < 6 \text{ Vol.-%}$ should be complied with, in order to reduce deformations. An increase of the swelling pressure and thus the swelling strain was also observed with an increase in the degree of decay and thus with an increase in the fine grains. Because the higher the fine grain content of a soil and thus its specific surface, the more water can be ad-

sorbed onto the surface of the clay minerals. In order to avoid swelling strains, a temporary storing without additional protective measures is not effective, because the proportion of fine grain is increased by the decay through weathering processes.

Since there is a linear relationship between swelling pressure and swelling strain, it can first be assessed with the help of the swelling pressure test whether swelling strain tests are necessary in the first place. For soils with a higher fine grain content ($d < 0,06 \text{ mm}$) $> 15 \text{ M.-%}$, which presumably leads to a lower proctor density $\rho_{Pr} < 1,90 \text{ g/cm}^3$, and a higher plasticity index $I_P > 21 \%$, and for soils that disintegrate quickly into a fine-grained soil ($I_{d2} < 60\%$) may have a remarkable swelling potential. In this case, swelling pressure tests should be carried out first. If, at the described limits of the classification parameters, the maximum swelling pressures are higher than $\sigma > 100 \text{ kPa}$, then swelling strain tests and a clay mineral analysis must be additionally carried out.

To summarize, variable weak rocks can be principally used as earthworks materials. First of all, the recognition of their variability via weathering tests (drying wetting cycles, slake durability test, drying-humidification test according to NICKMANN) is decisive, in order to assess the results of classifying investigations in particular and to determine correctly the higher requirements in the earthmoving processes (loosening, loading, conveying, temporary storing, placing and compacting). Since a description according to DIN EN ISO 14688-1 or a division into soil groups according to DIN 18196 based on the grain size distribution is not possible, they should be considered as an independent soil group. Further classifying investigations (Proctor test, swelling pressure test) should always be carried out on the material to be installed, since weathering-related changes between loosening and compacting cannot be ruled out. Temporary storing should be avoided because of the increase in the fines content. The installation of variable weak rocks should be carried out at least 1 m below the slope surface or below the levelled ground due to its weathering sensitivity. In order to reduce the sagging and swelling potential, a limitation of the air pores of $n_a < 6 \text{ Vol.-%}$ should be targeted. However, due to the heterogeneity of variable weak rocks, test

fields are absolutely necessary for checking the placing and compaction specifications.

Inhalt

1	Einführung.....	13
2	Zielsetzung und Konzeption.....	15
3	Theoretische Grundlagen.....	18
3.1	Charakterisierung veränderlich fester Gesteine.....	18
3.1.1	Definition und Charakterisierung.....	18
3.1.2	Mechanismen des Zerfalls.....	18
3.1.3	Zerfallsrelevante Eigenschaften.....	20
3.2	Quellen bei veränderlich festen Gesteinen.....	21
3.2.1	Allgemeines.....	21
3.2.2	Definition Quellen und Schwellen.....	21
3.2.3	Grundlagen Tonminerale.....	22
3.2.4	Physikalisches Quellen.....	24
3.2.5	Eindimensionales Modell zum Quellen.....	26
4	Probengewinnung und Aufbereitung.....	27
4.1	Allgemeines.....	27
4.2	Opalinustonstein.....	29
4.3	Bentonit.....	30
4.4	Dunkelroter Mergel.....	30
4.5	Emscher Mergel.....	30
4.6	Feuerletten-Zersatz.....	30
4.7	Tonmergelstein.....	30
4.8	Tertiärer Ton.....	31
5	Methodik der Laborversuche.....	32
5.1	Allgemeines.....	32
5.2	Bodenmechanische Klassifizierung.....	32
5.3	Erkennen und Klassifizieren der Veränderlichkeit.....	32
5.3.1	Allgemeines.....	32
5.3.2	Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel.....	32
5.3.3	Siebtrommelversuche.....	34
5.3.4	Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche nach NICKMANN.....	35
5.4	Versuche zur Verdichtbarkeit.....	36
5.5	Quellversuche.....	39
5.5.1	Allgemeines.....	39
5.5.2	Versuchsdurchführung.....	39

5.5.3	Versuchsauswertung	41
6	Ergebnisse der klassifizierenden Versuche	42
6.1	Allgemeines.....	42
6.2	Bodenmechanische Klassifizierung.....	43
6.3	Erkennen und Klassifizieren der Veränderlichkeit.....	49
6.3.1	Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel.....	49
6.3.2	Siebtrommelversuche	53
6.3.3	Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche nach NICKMANN	55
6.4	Versuche zur Verdichtbarkeit.....	56
7	Ergebnisse der Quellversuche	63
7.1	Allgemeines zur Durchführung und Auswertung.....	63
7.2	Opalinustonstein.....	65
7.2.1	Opalinustonstein VZ 1, UB I.....	65
7.2.2	Opalinustonstein VZ 1, UB II.....	68
7.2.3	Opalinustonstein VZ 3, UB III.....	68
7.2.4	Opalinustonstein VZ 3, UB IV.....	70
7.2.5	Opalinustonstein VZ 4, UB V.....	74
7.2.6	Opalinustonstein VZ 4, UB VI.....	78
7.2.7	Zusammenfassung Opalinustonstein	84
7.3	Tonmergelstein.....	88
7.3.1	Tonmergelstein VZ 1, UB I.....	88
7.3.2	Tonmergelstein VZ 1, UB II.....	91
7.3.3	Tonmergelstein VZ 3, UB VII.....	93
7.3.4	Tonmergelstein VZ 3, UB VIII.....	96
7.3.5	Tonmergelstein VZ 4, UB IX.....	98
7.3.6	Tonmergelstein VZ 4, UB X.....	102
7.3.7	Zusammenfassung Tonmergelstein	105
7.4	Dunkelroter Mergel.....	109
7.4.1	Dunkelroter Mergel VZ 1, UB I	109
7.4.2	Dunkelroter Mergel VZ 1, UB II	112
7.4.3	Dunkelroter Mergel VZ 4, UB III	114
7.4.4	Dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV.....	118
7.4.5	Zusammenfassung dunkelroter Mergel	121
7.5	Tertiärer Ton	125
7.5.1	Tertiärer Ton VZ 1, UB I.....	125
7.5.2	Tertiärer Ton VZ 1, UB II.....	128
7.5.3	Tertiärer Ton VZ 4, UB IV	131
7.5.4	Tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2).....	134

7.5.5	Tertiärer Ton VZ 4, UB V	138
7.5.6	Tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)	140
7.5.7	Zusammenfassung tertiärer Ton	144
7.6	Feuerletten-Zersatz	148
7.6.1	Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I.....	148
7.6.2	Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II.....	150
7.6.3	Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III.....	153
7.6.4	Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)	156
7.6.5	Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV	159
7.6.6	Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2).....	161
7.6.7	Zusammenfassung Feuerletten-Zersatz	164
7.7	Bentonit.....	168
7.8	Zusammenfassung der Quellversuche	179
7.8.1	Allgemeines	179
7.8.2	Quelldruck in Abhängigkeit von den Klassifikationsparametern.....	179
7.8.3	Quelldruck in Abhängigkeit vom Einbau- und Verwitterungszustand	180
7.8.4	Quelldehnung in Abhängigkeit des Quelldruckes.....	185
8	Ergebnisse der Trocken-Befeuchtungs-Wechsel im verdichteten Zustand	188
9	Folgerungen und Empfehlungen.....	190
9.1	Allgemeines.....	190
9.2	Klassifizierung veränderlich fester Gesteine	190
9.3	Laborversuche an veränderlich festen Gesteinen.....	191
9.4	Verwendung veränderlich fester Gesteine.....	192
9.5	Zusammenfassung	194
10	Zusammenfassung.....	196
Literatur.....		198
Normen.....		201
Bilder.....		202
Tabellen.....		210
Anlagen		212

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einführung

Mit der Verabschiedung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms von 2012 durch die Bundesregierung soll die Entnahme und Nutzung natürlicher Rohstoffe nachhaltiger gestaltet und damit die Umweltbelastungen reduziert werden. Im Erd- und Straßenbau soll aus diesem Grund der Verbrauch natürlicher mineralischer Erdbaustoffe in Zukunft reduziert und im Gegenzug der Anteil an Sekundärrohstoffen (u. a. Bodenaushub, Recycling-Baustoffe, industrielle Nebenprodukte) sowie vor Ort anstehender, aber bautechnisch weniger geeigneter Materialien erhöht werden. Zu den erdbautechnisch als schwierig zu beurteilenden Baustoffen zählen auch die veränderlich festen Gesteine, die vor allem in Süd- und Mitteldeutschland in nicht unerheblichem Umfang oberflächennah anstehen und damit einen wesentlichen Teil der verfügbaren Erdbaustoffe darstellen. Ihr Einsatz ist aufgrund fehlender Erfahrungen sowohl zum Trag- und Verformungsverhalten als auch zum Quellverhalten noch zögerlich, so dass bisweilen eine Deponierung oder Grubenverfüllung vorgezogen wird.

Die Problematik veränderlich fester Gesteine besteht darin, dass sich ihre bodenmechanischen Eigenschaften nach dem Lösen aus dem Gebirgsverband unter Witterungseinflüssen unterschiedlich stark verändern können. Bereits wenige Wechselvorgänge zwischen Austrocknung und Befeuchtung, die während der Bauzeit und den damit verbundenen Erdbauprozessen (Lösen, Laden, Fördern, Zwischenlagern, Einbauen und Verdichten) stattfinden können und oft nicht zu vermeiden sind, führen zu veränderlichen Festigkeitseigenschaften, die einen mehr oder weniger starken Zerfall derartiger Gesteine bewirken. Zudem hängen deren bodenmechanische Eigenschaften stark von ihrer Zusammensetzung, der inneren Bindungskräfte sowie dem vorliegenden Verwitterungszustand ab. Vor dem Hintergrund ihrer spezifischen Gesteinseigenschaften und starken Verwitterungsempfindlichkeit treten in der Praxis häufig Fragen zur Einsetzbarkeit dieser Böden auf. Insbesondere verbleibt eine große Unsicherheit hinsichtlich ihres Trag- und Verformungsverhaltens beim Einsatz im Erd- und Straßenbau, da es während einer jahrzehntelangen Nutzung infolge von Witterungseinflüssen zu veränderlichen Festigkeitseigenschaften kommen kann,

die zunächst zu Sackungen bzw. Quellhebungen und infolge fortschreitender Verwitterung zu anhaltenden Verformungen in Erdbauwerken führen können.

Um das Trag- und Verformungsverhalten zu analysieren, wurden bereits Untersuchungen im Rahmen von durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durchgeführt und sind in den Berichten von STIEGELER et al (2006) sowie von MÖLLER und HEYER (2014) dokumentiert. Neben der Boden- bzw. Gesteinsart und der Zusammensetzung konnte in beiden Untersuchungen gezeigt werden, dass die erdbautechnischen Eigenschaften veränderlich fester Gesteine stark vom Einbauzustand (Einbauwassergehalt, Einbaudichte) abhängen. Weiterhin konnte in den Untersuchungen von MÖLLER und HEYER (2014) Unterschiede im Verformungs- und Scherfestigkeitsverhalten eines natürlich anstehenden veränderlich festen Gesteins bei unterschiedlichen Verwitterungszuständen festgestellt werden. Die zum einen festgestellte Reduktion der Steifigkeit und der Scherfestigkeit mit zunehmendem Verwitterungszustand wurde auch von z. B. BÖNSCH (2006) beobachtet. Zum anderen wurde festgestellt, dass bei bestimmten veränderlich festen Gesteinen in Abhängigkeit vom Einbauzustand bei Wasserzufuhr Quellerscheinungen auftreten können, wobei das Quellmaß auch vom Verwitterungszustand und den damit verbundenen veränderten Materialeigenschaften abhängt. Das bedeutet, dass bei veränderlich festen Gesteinen das Quellvermögen sogar erst durch eine Lösung der diagenetischen Verbindungen, z. B. infolge von Rissbildung durch Austrocknung, durch Zerfall infolge von Verwitterungsvorgängen (Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel) und durch mechanische Einwirkung (Entlastung bei Freilegung, Aufbereitung und Verdichtung) aktiviert werden kann.

Neben den verwitterungsabhängigen bodenmechanischen Eigenschaften ist bei quellfähigen veränderlich festen Gesteinen auch deren Quellpotential im Anwendungsbereich Erd- und Straßenbau zu berücksichtigen. Hierbei sind die mit erheblichen Volumenvergrößerungen verbundenen Quellvorgänge bei veränderlich festen Gesteinen nachteilig, wenn das Quellen behindert wird, so dass sich ein Quell-

druck entwickeln kann. Demzufolge können Schäden an der Oberfläche eines Erdbauwerks infolge von Quellhebungen auftreten und damit zu einer Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit führen.

Ursächlich für die mit erheblichen Volumenvergrößerungen verbundenen Quellvorgänge bei veränderlich festen Gesteinen sind Anteile an quellfähigen Tonmineralen oder chemische Quellprozesse, wie z. B. die Umwandlung von Anhydrit zu Gips. Es gibt eine Vielzahl von Publikationen, die sich mit dem Quellverhalten quellfähiger Böden und Gesteine, v. a. im Bereich des Tunnelbaus (z. B. RAUH, 2009) aber auch bei anstehenden Gesteinen (z. B. PIMENTEL, 1996), beschäftigen. Allerdings fehlen für veränderlich feste Gesteine, die im Erdbau als Erdbaustoff wieder eingebaut und verdichtet werden sollen, systematische Untersuchungen zum Quellvermögen in Abhängigkeit vom Einbauzustand und Verwitterungszustand.

Erschwerend für die Verwendung veränderlich fester Gesteine im Erd- und Straßenbau ist, dass eindeutige Vorgaben sowohl zur Klassifikation, einer möglichen Verwitterung als auch zu erdbautechnischen Anforderungen an die Einbauzustände auf Grundlage der vorliegenden Regelwerke nicht umfassend vorliegen. Es existieren aber Empfehlungen. Die Veränderlichkeit eines Gesteins ist nach der aktuellen Fassung der DIN EN 14689 durch einen Wasserlagerungstest zu beurteilen. Dass dabei manche Gesteine erst zerfallen, nachdem sie getrocknet wurden, wird erstmals in der aktuellen Fassung der DIN EN 14689 gegenüber der früheren Fassung DIN EN 14689-1 erwähnt. Dass zum Erkennen der veränderlichen Festigkeit von Gesteinen eine reine Wasserlagerung nicht ausreichend ist, da veränderlich feste Gesteine im bergfeuchten Zustand bei Wassereinwirkung häufig keinen Zerfall zeigen, konnte bereits in diversen Veröffentlichungen und Forschungen festgestellt werden (NICKMANN, 2009; STIEGELER et. al, 2006 sowie MÖLLER und HEYER, 2014). Weitere Verwitterungsversuche sind teilweise geregelt. Während der Siebtrommelversuch in der TP BF-StB, Teil C 20 zwar geregelt ist, muss dieser aber nicht zwingend für veränderlich feste Gesteine durchgeführt werden. Für Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel gibt es auch keine einheitlichen Vorgaben. Ebenso fehlen in den Normen und Regelwerken Hinweise zu

den besonderen bodenmechanischen Eigenschaften, v. a. hinsichtlich der Bestimmung der Korngrößenverteilung. Aufgrund der Wasserempfindlichkeit liefern derartige Untersuchungen nicht immer zutreffende Ergebnisse. Hinsichtlich der Einbauanforderungen wird in den ZTV E-StB ein Luftporenanteil von 6 Vol.-% empfohlen, aber nur 12 Vol.-% verbindlich festgelegt. Bereits in den Untersuchungen von MÖLLER und HEYER (2014) hatte sich gezeigt, dass eine Begrenzung des Luftporenanteils auf 6 Vol.-% anzustreben ist.

Aufgrund ihrer veränderlichen Festigkeit und den damit verbundenen Unsicherheiten sowie auch erforderlichen höheren Anforderungen wird ihr Einsatz im Zweifel verworfen. Um eine erdbautechnische Verwendung zu ermöglichen, soll daher mit Hilfe der durchgeführten Forschungsarbeiten (STIEGELER et. al, 2006 sowie MÖLLER und HEYER, 2014) und der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen aufgezeigt werden, dass eine Verwendung veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff grundsätzlich möglich ist. Diese Arbeit soll Klassifikationsmöglichkeiten zur Beschreibung der spezifischen Veränderlichkeit als auch erdbautechnische Anforderungen zur Verwendung derartiger Gesteine und Böden aufzeigen. Dabei sind zudem konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Wasserzutritt unerlässlich, da ein zerfallsrelevanter Verwitterungsvorgang erst bei Wasseraufnahme bzw. Wasserabgabe durch das Material auftreten kann.

2 Zielsetzung und Konzeption

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens war es, das Quellvermögen von ausgewählten veränderlich festen Gesteinen in Abhängigkeit vom Einbauzustand (Einbauwassergehalt und Einbaudichte) und Verwitterungszustand zu untersuchen. Darüber hinaus sollte erforscht werden, inwieweit anfänglich unterschiedlich stark verwitterte Böden im Zuge einer weiteren Verwitterung im verdichteten Zustand Volumenänderungen durch Quellvorgänge erfahren können.

Mit Hilfe dieser Untersuchungen sollte geklärt werden, wie zum Quellen neigende veränderlich feste Gesteine für Erdbauwerke qualitativ hochwertig verwendet werden können und welche Maßnahmen dabei in Abhängigkeit vom Quellvermögen der Materialien gegebenenfalls getroffen werden müssen. Mögliche Maßnahmen sind u. a. an die Quellneigung angepasste Verdichtungsanforderungen (hinsichtlich Einbaudichte und Luftporenanteil), konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung des Wasserzutrittes und Vorgaben hinsichtlich zulässiger Einbaubereiche in Erdbauwerken unter Berücksichtigung der erforderlichen Überschüttungen, bei denen das Quellen überdrückt wird. Die Entwässerungsbedingungen spielen stets eine wesentliche Rolle, da ein Wasserzutritt zu Schäden an Erdbauwerken führen kann.

Veränderlich feste Gesteine werden in der Natur in einer großen Variabilität angetroffen. Auf den ersten Blick erscheinen die Veränderlichkeit und das mechanische Verhalten verschiedener veränderlich fester Gesteine kaum vergleichbar. Für die Entwicklung und Anwendung effizienter und effektiver Bauverfahren ist es allerdings erforderlich, gemeinsame Verhaltensmuster von unterschiedlichen veränderlich festen Gesteinen zu identifizieren.

Die Forschungsergebnisse sollten die Ergebnisse des bisherigen Forschungsvorhabens nach MÖLLER und HEYER (2014) insbesondere hinsichtlich des Quellvermögens ergänzen. Baupraktisch sollten mit dieser Arbeit weitere Erkenntnisse über die Einsatzgrenzen veränderlich fester Gesteine im Erdbau in Bezug auf Quellvorgängen gewonnen werden. Somit war diese Arbeit ein weiterer Baustein des geplanten erdbautechnischen Kon-

zeptes zur nachhaltigen Verwendung von veränderlich festen Gesteinen in Erdbauwerken, das mittel- und langfristig in die Regeln der Technik einfließen soll. Insbesondere sollten unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben nach MÖLLER und HEYER (2014) weitere baupraktische Empfehlungen zum Umgang mit veränderlich festen Gesteinen im Erdbau gegeben werden. Außerdem sollten ggf. Vorschläge für Ergänzungen bzw. Modifikationen im erdbautechnischen Regelwerk gegeben werden.

Im ersten Schritt sollten anhand einer Literaturstudie die Grundlagen und der Wissensstand zum Mechanismus des Quellens von veränderlich festen Gesteinen erforscht werden. Darauf basierend sollte mit den nachfolgenden Laborversuchen herausgearbeitet werden, bei welchen Typen von veränderlich festen Gesteinen in der Regel Quellhebungen auch im verdichteten Zustand erwartet werden können.

Für die Durchführung der Quellversuche sollten im zweiten Schritt zunächst Proben von vier bis fünf veränderlich festen Gesteinen entnommen werden. An diesen Gesteinsarten war jeweils eine bodenmechanische Klassifizierung durchzuführen. Diese umfasste die Bestimmung der Korngrößenverteilung, der Plastizitätsgrenzen, des Wasseraufnahmevermögens, der Korndichte und die Analyse der tonmineralogischen Eigenschaften. Zur Charakterisierung der Veränderlichkeit der Gesteine sollten qualitative Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel sowie quantitative Versuche wie der Siebtrommelversuch sowie der Trocknungs-Befeuchtungs-Versuch nach NICKMANN durchgeführt werden. Auf Basis der Klassifikationsuntersuchungen und den Verwitterungsversuchen sollten für weitergehende Untersuchungen von diesen untersuchten Gesteinen quellfähige Gesteine ausgewählt werden.

An diesen quellfähigen Gesteinen sowie zwei weiteren quellfähigen Gesteinen, die bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens nach MÖLLER und HEYER (2014) untersucht wurden, sollten die Quellversuche durchgeführt werden. Dazu mussten im folgenden dritten Schritt zunächst die Verdichtungseigenschaften ermittelt werden. Um den Einfluss des Verwitterungszustandes auf das bodenmechanische Verhalten zu berücksichtigen, sollten

dabei drei Verwitterungszustände betrachtet werden. Analog zu MÖLLER und HEYER (2014) definiert Verwitterungszustand 1 den unverwitterten Ausgangszustand bzw. Zustand bei Probenentnahme. Verwitterungszustand 2 nach einem Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel wurde hier nicht betrachtet. Für die Verwitterungszustände 3 und 4 sollte der Zerfallsverlauf des Bodens bis zu einer Grenzkurve, wo der Zerfall weitgehend abgeschlossen ist, ermittelt werden. Hierzu wurden die Materialien im Labor künstlich verwittert, in dem sie einem bzw. mehreren Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen werden. Die Vorgehensweise wurde bereits in den Untersuchungen nach MÖLLER und HEYER (2014) verwendet. Für Verwitterungszustand 3 sollte ca. 50 % des zu erwartenden Zerfalls eingetreten sein. Damit sollte der Zerfall eines veränderlich festen Gesteins durch Zwischenlagerung simuliert werden. Für den in dieser Forschungsarbeit neuen Verwitterungszustand 4 sollte ca. 90 % des zu erwartenden Zerfalls eingetreten sein, was den Grenzzustand eines fast vollständig verwitterten Materials entspricht.

Für jeden der ermittelten Verwitterungszustände sollen die Verdichtungseigenschaften ermittelt werden. Auf Basis dieser Proctorversuche waren für die einzelnen Böden und Verwitterungszustände die zu untersuchenden Einbauzustände (Einbauwassergehalt und Trockendichte bzw. Luftporenanteil) festzulegen. Es sollten jeweils zwei Einbauzustände (Proctoroptimum und Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 97\%$ auf der trockenen Seite des Proctoroptimums) untersucht werden.

Im vierten Schritt sollten für die Verwitterungszustände 1 und 3 Kompressionsversuche mit veränderter Seitendehnung in Großödometer mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Probenhöhe von 6 cm durchgeführt werden. Diese Versuche dienten zur Ermittlung der Beziehung zwischen Quelldruck und Quelldehnung bei veränderlich festen Gesteinen in Abhängigkeit vom Verwitterungszustand und dem Einbauzustand. Bei diesen kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuchen wurde zunächst der Quelldruck bei behinderter axialer Dehnung gemessen. Anschließend wurde die Probe stufenweise entlastet, wobei die Quelldehnungen unter dem jeweiligen Druck ermittelt wurden. Die Druckspannungen für die zu ermittelnden Quelldehnungen sollten

in Abhängigkeit des maximalen Quelldruckes gewählt werden. Dabei sollten die Quelldehnungen für drei bis vier Spannungen ermittelt werden.

Im Vergleich zu einem einfachen Quellhebungs- und separaten Quelldruckversuch konnte mit diesem kombinierten Versuch der direkte Zusammenhang zwischen Quelldrücken und Quelldehnungen an nur einer Bodenprobe bestimmt werden. Für den Verwitterungszustand 4, bei dem die Probe fast vollständig zu einem feinkörnigen Boden verwittert war, würde die Quelldruckentwicklung in den Großödometern aufgrund der geringeren Durchlässigkeit zu lange dauern, so dass die Versuche im Standard-Ödometer mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Probenhöhe von 2 cm durchgeführt werden sollten. Um den Einfluss des experimentellen Verfahrens auf den Quelldruck und die Quelldehnung zu quantifizieren, sollten an ausgewählten Materialien sowohl Quellhebungs- und Quelldruckversuche als auch kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche durchgeführt werden und die Ergebnisse der beiden Methoden miteinander verglichen werden.

Im fünften Schritt sollte der Einfluss von Verwitterungsvorgängen im verdichteten Zustand auf die Quelldehnungen untersucht werden. Dazu sollten die Proben im Großödometer unter konstanter Auflastspannung sechs Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen werden, wobei die Trocknung mittels Druckluft und die Befeuchtung durch Wasserzugabe über die Basis der Probe erfolgt. Aufgrund des dazu erforderlichen Zeitaufwands je Versuch von ca. drei Monaten beschränkten sich die Untersuchungen auf zwei Materialien.

Abschließend sollte die zusammenfassende Auswertung und Bewertung erfolgen. Für die untersuchten Böden sollten die Abhängigkeiten zwischen dem Verwitterungszustand, Einbauzustand und der Quelldehnung bzw. des Quelldrucks aufgezeigt werden. Darüber hinaus sollten die untersuchten veränderlich festen Gesteine hinsichtlich der zu erwartenden Quelldehnungen in Abhängigkeit von den materialspezifischen Indexparametern (Gesteinsart, tonmineralogische Zusammensetzung), den bodenmechanischen Kenngrößen (Korngrößenverteilung, Plastizitätsgrenzen, Wasseraufnahmevermögen) und der Zerfallscharakteristik in Gruppen unterteilt werden. Auf Grundlage dessen sollte überprüft werden, inwiefern für quellfähige

veränderlich feste Gesteine auf der Basis der Indexparameter, evtl. ohne Durchführung von Quellversuchen bzw. mit einem reduzierten Versuchsaufwand, die Modellparameter abgeschätzt werden können. Darüber hinaus sollten Folgerungen und Empfehlungen für die Erdbaupraxis gegeben werden. Insbesondere sollten die Klassifikationsmöglichkeiten zur Beschreibung der spezifischen Veränderlichkeit als auch erdbautechnische Anforderungen zur Verwendung derartiger Gesteine und Böden aufgezeigt werden.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Charakterisierung veränderlich fester Gesteine

3.1.1 Definition und Charakterisierung

Veränderlich feste Gesteine stellen aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften eine eigene Gesteinsgruppe dar und nehmen dabei eine Art Mittelstellung zwischen den beiden großen Gesteinstypen, den Festgesteinen und den Lockergesteinen, ein. Da sie weder eindeutig in den Bereich der Felsmechanik noch der Bodenmechanik zugeordnet werden können, fällt es in der Praxis noch immer schwer, den Begriff der Veränderlichkeit und damit die Bandbreite der veränderlich festen Gesteinsarten zu erfassen. Aus zahlreichen neueren Forschungen (MÖLLER und HEYER, 2014; NICKMANN, 2009) geht basierend auf bereits existierenden Definitionsansätzen zum Begriff der „veränderlich festen Gesteine“ (siehe u. a. KEIL, 1951; HEITFELD, 1985; PRINZ und STRAUSS, 2006) hervor, dass diese Gesteine durch die folgenden drei Kriterien gekennzeichnet sind.

Einerseits weisen veränderlich feste Gesteine im ursprünglichen Zustand einen deutlichen Zusammenhang ihrer Komponenten und damit einen Festgesteinscharakter auf. Die Stärke ihrer meist diagenetisch entstandenen Bindungen übersteigt die der Lockergesteine deutlich. Begrifflich lässt sich dieser Festgesteinscharakter durch den Zusatz „-Stein“ (z.B. Tonstein, Schluffstein, etc.) unterstreichen.

Weiterhin können veränderlich feste Gesteine durch die Exposition gegenüber Atmosphärien infolge anthropogener Freilegung ihren Zusammenhalt irreversibel, d. h. ohne Wiederherstellung ihres Ausgangszustandes, verlieren und so zu Gesteinen mit Lockergesteinscharakter, d. h. zu einem gemischt- bis feinkörnigen Boden zerfallen. Sie bleiben dagegen unverändert, solange sie unter der Erdoberfläche den konstanten Bedingungen ausgesetzt sind. Der nach Exposition beginnende Zerfall bzw. Zerlegung des Gesteins erfolgt innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne von Tagen bis Monaten (bzw. Jahren). Demnach laufen die Veränderungen der Festigkeit in Abhängigkeit von der Verwitterungsempfindlichkeit der veränderlich festen Gesteine in

für Bauprozesse und Erdbauwerke maßgeblichen Zeiträumen ab. Im Gegensatz dazu findet die oft mit dem Zerfall verwechselte (geologische) Verwitterung in einem sehr langen Zeitraum statt, wobei eine Zersetzung der Gesteine in Erdoberflächennähe nicht nur durch physikalische-mechanische, sondern auch durch chemische und biologische Verwitterungsvorgänge stattfindet.

Neben dem Festgesteinscharakter sowie dem kurzen baupraktisch relevanten Zeitraum, in dem der irreversible Zerfall stattfindet, spielt der dritte Faktor Wasser für die Veränderlichkeit derartiger Gesteine die mitunter wichtigste Rolle. Veränderlich feste Gesteine verlieren schnell ihre innere Bindung und Festigkeit teils durch Änderungen des Wassergehalts, aber insbesondere durch wiederholte Trocknungs- und Befeuchtungsvorgänge oder auch durch jahreszeitlich bedingte Frost- und Tauprozesse (HOLZHAUSER, 2011; WICHTER et al., 1991; NICKMANN, 2009).

Veränderlich feste Gesteine treten in zahlreichen Gesteinsarten auf, wobei sie unter erdbautechnischen Gesichtspunkten im Wesentlichen auf die Sedimentgesteine (z.B. Tonsteine, Schluffsteine, Mergelsteine, Sandsteine) und metamorphen Gesteine (z.B. Glimmerschiefer, Phyllit) reduziert werden können. Diese bilden weite Teile der deutschen, - aber auch mitteleuropäischen Mittelgebirge. Sie werden daher bei großräumigen, nahe der Oberfläche stattfindenden Erdbautätigkeiten angegriffen und sind folglich für die erdbautechnische Verwendung in nennenswerten Mengen relevant.

3.1.2 Mechanismen des Zerfalls

Der Zerfall eines veränderlich festen Gesteins kann durch eine Reihe von Mechanismen und Belastungen ausgelöst werden. In der Regel ist dabei kein einzelner Faktor, sondern erst das Zusammenspiel mehrerer Faktoren für den Zerfall verantwortlich. Darüber, welcher Mechanismus welchen Einfluss auf den Zerfall hat, gibt es verschiedene Ansichten. Nach NICKMANN (2009) sind für alle Zerfallsmechanismen das Maß der Porensättigung im Ausgangszustand des Gesteins sowie eine Veränderung des Wassergehalts durch die Exposition aus-

schlaggebend. Ein Gestein kann im gesättigten Zustand kein zusätzliches Wasser mehr aufnehmen. Kann dagegen Wasser in einen ungesättigten Porenraum durch vorhandene Schwächezonen eindringen, kommt es dagegen zu einer Ausdehnung, verbunden mit einem Druck auf das Mineralgefüge, welches dann auseinanderbrechen kann. (NICKMANN, 2009; STIEGELER et al., 2006)

Die zerfallscharakterisierenden Mechanismen für die Betrachtung veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff sind demnach die Entlastung durch Ausheben bzw. Abtragung des Gesteins gefolgt von Wassergehaltsänderungen in Form von insbesondere Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln. Durch diese Freilegung können sich primäre Schwächezonen (z.B. bestehende Trennflächen / Klüfte oder Schichtungen) aufweiten. Durch Spannungsänderung kann es zu weiteren Zerlegungen des Gesteins bevorzugt an den Trennflächen, die Schwachstellen mit geringerer Festigkeit darstellen, kommen. Außerdem kann an den Trennflächen Wasser besser ins Gestein eindringen, was die Kohäsion dort weiter reduziert und zusätzliche Vorgänge, wie die chemische Umwandlung, möglich macht. (NICKMANN, 2009)

Weiterhin charakterisierend für die Veränderlichkeit eines Gesteins sind die nach Gesteinsfreilegung einwirkenden Wechsel zwischen Austrocknung und Befeuchtung. Zunächst kann bergfrisches Gestein aufgrund von Wassersättigung unempfindlich gegen Wasserzutritt sein. Das Gestein trocknet aber nach Freilegung sehr leicht aus, wodurch es zu Veränderungen im Gestein kommt. Abhängig vom Anteil an quellfähigen Tonmineralen schrumpft das Gestein und es kommt zur Rissbildung. Schon beim ersten Wechsel von feucht auf trocken, wird die Gesteinsfestigkeit verringert. Bei der Wiederbefeuchtung des Materials kommt es in jedem Einzelaggregat zu Eigenspannungen aufgrund von Quellungen an der Oberfläche. Dieser Spannungszustand tritt in Form von Zugspannungen im noch trockenen Kern auf. Da die Zugfestigkeit der Mineralbindungen von veränderlich festen Gesteinen relativ gering ist, kommt es zur Bildung weiterer Risse und damit zu einem Voranschreiten der Entfestigung. Meist reichen wenige Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel um ein ursprünglich felsartiges Gestein zerfallen zu lassen. Ein monolithisches Gesteinsstück zerfällt dabei nach und nach in verschieden geformte

Bruchstücke und Bröckchen von Sand- bis Kiesgröße. (EINSELE und LEMPP, 1981; STIEGELER et al., 2006)

Ein weiterer Effekt, der bei Wassergehaltsänderung zu einer Zerlegung des Gesteins beitragen kann, ist der so genannte Vorgang des „Air breakage“ (NICKMANN, 2009). Wird durch hohe Kapillarwirkung sehr schnell Wasser in die äußeren Poren eines teilgesättigten Gesteins aufgenommen, kann die Luft in den inneren Poren nicht entweichen und wird zusammengepresst. Dadurch kann sich ein hoher Druck aufbauen, welcher zu unterschiedlich starken Zerbrechen des Gesteins führen kann.

Frost-Tau-Wechsel haben eine ähnlich schädigende Wirkung wie Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel. Das Wasser im Gestein gefriert nicht gleichmäßig in den Poren. Es lagert sich an Eiskristallen, den sogenannten Kristallisationskernen, an, welche sich schon in größeren Poren, Mikrorissen oder Schichtflächen gebildet haben. Durch den entstehenden Kristallisationsdruck kommt es zu einer Erweiterung der Trennflächen. Tauen die Gesteine wieder auf, zerfallen diese an den erweiterten Gefügerissen. Im Vergleich zu den Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln, vor allem bei Tonsteinen, lösen Frost-Tau-Wechsel oder Hitze-Kälte-Tests jedoch einen wesentlich geringeren Zerfall aus (STIEGELER et al., 2006).

Die Entfestigung aus Trocknungs-Befeuchtungs- bzw. Frost-Tau-Wechsel eines Gesteins schreitet grundsätzlich von außen nach innen fort. Dabei erfolgt der Zerfall im natürlich anstehenden Gelände verständlicherweise langsamer als bei einer Simulation im Labor (STIEGELER et al., 2006). In der Natur wurde von EINSELE und LEMPP (1981) innerhalb weniger Wochen auf einer frischen Geländeoberkante ein sichtbarer Bröckchenzerfall durch klimabedingte Entfestigung in Tiefen zwischen 0,1 m bis 0,3 m beobachtet. Nach und nach kommt es zu einer Teilplastifizierung des Gesteins, die Bröckchenbildung greift aber auch nach zwei Jahren nicht tiefer ins Gebirge ein, da das noch unverwitterte felsartige Material durch die darüber entstehende Bröckchenschicht geschützt ist (EINSELE und LEMPP, 1981). Diese Überdeckung kann nach STIEGELER et al. (2006) als eine Art Schutzhülle

angesehen werden, deren bindige, tonige Bestandteile eindringendes Wasser speichern und damit zurückhalten.

3.1.3 Zerfallsrelevante Eigenschaften

Die Veränderlichkeit eines Gesteins und damit ob und wie schnell ein Gestein zerfällt, ist nach NICKMANN (2009) grundsätzlich von verschiedenen Faktoren abhängig, vor allem jedoch von der Wechselwirkung zwischen dem Gestein und der einwirkenden Flüssigkeit. Diese zerfallsrelevanten Eigenschaften, wie in Bild 3.1 dargestellt, können in vier Gruppen eingeteilt werden.



Bild 3.1: Zerfallsrelevante Gesteinseigenschaften nach NICKMANN (2009)

Beschaffenheit des Porenraums:

Hinsichtlich der Porosität eines Gesteins kann sich ein großer Gesamtporenraum mit großem nutzbarem Porenraum positiv auf die Dauerhaftigkeit des Gesteins auswirken, da kein Porendruck und damit keine Sprengwirkung entstehen können. Dagegen deutet ein großer Gesamtporenraum mit geringem nutzbarem Porenraum auf einen hohen Tonanteil des Gesteins hin, was sich negativ auf die Dauerhaftigkeit auswirkt.

Eine geringere Durchlässigkeit ist von Vorteil, da Wasser langsamer und in geringerer Menge eintreten kann, woraus eine geringere Sprengwirkung im Gestein resultiert.

In sehr kleinen Poren kann eine Saugspannung entstehen, die eine erhöhte Festigkeit bewirkt. Über-

wiegend große Poren führen dazu, dass sich im Gestein keine Saugspannung aufbauen kann, womit die Gesteinsfestigkeit geringer ist.

Ungleichförmige Porengrößenverteilungen sind ebenfalls ungünstig, da durch große Poren Wasser relativ schnell ins Gestein eindringen kann und in den kleinen Poren dadurch Überdrücke entstehen können.

Je höher die Wassersättigung eines Gesteins ist, desto geringer ist seine Festigkeit. Ein hoher Wassergehalt deutet auf einen hohen Anteil quellfähiger Tonminerale und damit auf Quell- und Schwindvorgänge im Gestein hin.

Kornbindungsfestigkeit:

Die Korngrößenverteilung beeinflusst die Art der möglichen Bindungen und das Gefüge und wirkt sich damit auf die Festigkeit eines Gesteins aus.

Bezüglich der mineralischen Zusammensetzung sind v. a. die Art und der Anteil der Tonminerale ausschlaggebend. Auch Nicht-Tonminerale wie lösliche Minerale (Gips, Calcit) oder chemisch anfällige Minerale (Pyrit) können für einen Zerfall relevant sein.

Die Festigkeit eines Gesteins ist umso größer, je besser seine Komponenten eingeregelt sind.

Der Verfestigungsgrad ist ausschlaggebend für Kornbindungsfestigkeit eines Gesteins. Stabilisierend wirken die Bindungen aus der Diagenese als auch die Ausbildung eines Bindemittels.

Zerbrechungsgrad:

Der Zerbrechungsgrad kann in verschiedenen Maßstäben von kleinen Mikrorissen bis zu weitreichenden Trennflächen auftreten. Dabei sind v. a. Anzahl und Reichweite von Trennflächen wichtige Faktoren für die Veränderlichkeit eines Gesteins.

Physikalische Eigenschaften:

Die Quellfähigkeit eines Gesteins ist abhängig von Art und Anteil quellfähiger Minerale (v.a. Tonminerale), da der Aufbau eines Quelldrucks zum Zerfall führen kann. Das Quellen ist vom Sättigungsgrad sowie einer gegenwirkenden Auflast abhängig. Schwellung ist v.a. an nicht quellfähige Minerale gebunden, grundsätzlich ähnlich zu Quellen, jedoch in abgeschwächter Form. Die Grundlagen zum Thema

Quellen sollen nachfolgend genauer erläutert werden.

3.2 Quellen bei veränderlich festen Gesteinen

3.2.1 Allgemeines

Die Verwitterungs- und Entfestigungsneigung von veränderlich festen Gesteinen ist davon abhängig, ob tonige und schluffige Bestandteile und Bindemittel vorhanden sind. Dabei sind die Art und der Anteil der Tonminerale relevant. Darüber hinaus kann die Veränderlichkeit eines Gesteins durch quellfähige Tonminerale stärker ausgeprägt sein. Im Folgenden soll daher das Ton-Quellen als physikalischer Prozess sowie die zugehörigen Grundlagen näher betrachtet werden. Chemische Umwandlungen in Form von Anhydrit-Quellen, bei der es ebenfalls zu einer Volumenvergrößerung des Gesteins kommt, werden hier nicht weiter betrachtet.

3.2.2 Definition Quellen und Schwellen

Das Quellen kann allgemein als zeitabhängige Volumenveränderung definiert werden, die sich in einem Gestein aufgrund einer physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser einstellt. Der Quellprozess ist immer mit einer gleichzeitigen oder unmittelbar vorangegangenen Abnahme der Spannung infolge z. B. Entlastung gekoppelt.

Die Definitionen verschiedener Autoren diesbezüglich differieren. So hat HARTGE et al. (1991) die Quellung bereits als Volumenvergrößerung durch Wasseraufnahme des Bodensubstrats beschrieben. Er stellt einen unmittelbaren Zusammenhang zur Wasseradsorption, d. h. Wasseranlagerung an die Oberfläche von Bodenpartikeln, bedingt durch die Ursache der inner- bzw. intrakristallinen Quellung her. Hier kommt es erst zur Trennung der einzelnen Bodenpartikel aufgrund von Wasseranlagerung bzw. -einlagerung an die Partikeloberfläche. PIMENTEL (2007) stimmt mit HARTGE et al. (1991) in seiner Ansicht überein. Er beschreibt veränderte Kontakteigenschaften zwischen Partikeln, wenn es

zu einer Wasseraufnahme in die Struktur der Gesteine kommt. Das Ausmaß des Quellens hängt demnach vom Vorhandensein quellfähiger Tonminerale ab.

Schwellen wird einerseits in der älteren Literatur häufig als Synonym zum Quellen verwendet. Beispielsweise führt KEIL (1954) an, dass Schwellen als „die Umkehrung des Schwindens oder Schrumpfens“ verstanden wird, wobei die Rede von Quellen ist. Andererseits wird aber unter dem Begriff des „Schwellens“ z. B. nach PIMENTEL (1996) die mineralische und damit chemische Umwandlung von Anhydrit in Gips („hydration of anhydrite“) im Gegensatz zum Quellen („swelling of argillaceous rock“) als physikalischer Vorgang verstanden. Diese chemisch bedingte Änderung der mineralischen Zusammensetzung bestätigt RAUH (2009) in seinem Glossar in Abgrenzung zum „Quellen“, das nur über die Volumenzunahme von Tonstein durch Wasseraufnahme definiert wird. PRINZ et al. (2011) sowie DIN 18135 hingegen beschreiben das Schwellen als eine Dehnung infolge einer Verminderung der wirksamen Spannungen. Schwellen kann im Erdbau auch z. B. als elastische Rückverformung einer verdichteten Schicht nach dem Walzenübergang entstehen. Zusätzlich zur DIN 18135 wird in der europäischen Norm DIN EN ISO 17892-5 unter dem Begriff Schwellen nicht nur eine Dehnung infolge einer Verminderung der Spannung, sondern auch eine Dehnung infolge einer Zunahme des Wassergehalts verstanden.

Unter dem Begriff Quellen soll in dieser Arbeit auch nicht die entlastungsbedingte Volumenzunahme infolge Wasseraufnahme in den Porenraum bzw. Sättigung verstanden werden. In PIMENTEL (1996) wird bei diesen mechanischen Vorgängen von einem „mechanischen Quellen“ gesprochen, wobei diese Begriffsdefinition nicht mit dem zuvor definierten Quellen als Wasseraufnahme in die Mineralstruktur übereinstimmt.

Zusammenfassend lässt sich bei Betrachtung der Definitionen nach DIN 18135 als Definitionen feststellen, dass Quellen als eine Zunahme der Probenhöhe durch Wasseraufnahme in die Mineralstruktur verstanden werden kann, die sowohl durch Wassereinlagerungen in die Tonminerale (Ton-Quellen) als auch durch chemische Vorgänge, z. B. Anhydrit-

Quellen, resultieren kann. Die Zunahme der Probenhöhe beim Schwellen resultiert dabei auch aus Abnahme der effektiven Spannungen, was die Umkehr der Kompression bedeutet.

3.2.3 Grundlagen Tonminerale

Bei der Veränderlichkeit von Festgesteinen spielt der Anteil der Tonfraktion eine entscheidende Rolle, da die darin enthaltenen Tonminerale eine besondere Bindungsqualität verursachen. Nach Untersuchungen von NICKMANN (2009) stellt dabei nicht nur die absolute Korngröße, sondern auch die Art der Tonminerale einen wichtigen Einflussfaktor dar. Im Folgenden sollen daher die Grundlagen zu Tonmineralen dargestellt werden, um so ein besseres Verständnis für die Quellprozesse bei veränderlich festen Gesteinen zu erlangen.

Tone (Korngröße $< 2 \mu\text{m}$) sind unverfestigte Sedimentgesteine, die v. a. aus blättchen- bzw. plättchenförmigen silicatischen Tonmineralen bestehen. Diese Tonminerale bestimmen die aus der Bodenmechanik bekannten spezifischen Eigenschaften der Tone wie Plastizität, Wasserbindevermögen, Viskosität sowie die Quellfähigkeit. Die Quellung der Tone beruht dabei insbesondere auf der Schichtstruktur der Tonminerale, ihrer Ladung und den zum Ladungsausgleich angelagerten Kationen. Diese Grundlagen nach HEIM (1990) und JASMUND et al. (1993) sollen daher im Folgenden näher betrachtet werden.

Tonmineralstrukturen bestehen aus bestimmten Abfolgen von Elementarschichten, die durch Zwischenschichten getrennt sind. Die Elementarschichten sind i. A. aus Tetraeder- (SiO_4) und Oktaederschichten ($\text{M}(\text{O},\text{OH})_6$) zusammengesetzt, wobei die Tetraederschicht (T) nicht alleine, sondern nur in Verbindung mit einer Oktaederschicht (O) auftreten kann. Die Elementarschicht eines Tonminerals kann als Zweischicht- (T-O, Bild 3.2), Dreischicht- (T-O-T, Bild 3.3) oder Vierschichtmineral (T-O-T-O) aufgebaut sein. Die Elementarschichten werden dabei über die Zwischenschichten entweder durch Kationen oder durch Wasserstoffbrückenbindungen, in einzelnen Fällen auch durch die schwächeren van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten. Die Bin-

dungskräfte zum Zusammenhalten der Elementarschichten sind allerdings viel schwächer als die Bindungen innerhalb dieser Elementarschichten. Ungeladene Elementarschichten wie bei den Zweischichtmineralen (Bild 3.2) werden über Wasserstoffbrückenbindungen und in Ausnahmen über van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten. In den Zwischenschichten sind keine Kationen, womit eine inner- bzw. intrakristalline Quellung ebenso unterbunden ist wie bei den Vierschichtmineralen, bei denen die zusätzliche Oktaederschicht die Kationen der Zwischenschicht vollständig belegt. Sind diese Elementarschichten jedoch geladen wie bei den Dreischichtmineralen (Bild 3.3), können zum elektrostatischen Ausgleich in der Zwischenschicht Wassermoleküle oder Gegenionen eingelagert werden. Bei Wasseraufnahme in die Zwischenschicht kann es zu einer Aufweitung kommen, die als innerkristalline Quellung (siehe Kapitel 3.2.4) bezeichnet wird. Ob Dreischichtminerale innerkristallin quellen, hängt von der Bindungsstärke ab. Diese wird durch die Ladung der Elementarschicht, die wiederum die Menge der Zwischenkationen bestimmt, und der Art und Wertigkeit der in der Zwischenschicht vorhandenen Kationen ab. Daher existieren sowohl nicht quellfähige Dreischichtminerale, wie z. B. Illit und Glimmer, als auch quellfähige Minerale wie z. B. Smektit mit Montmorillonit als bekanntesten Vertreter.

Charakterisierend für das Quellen von Tonmineralen ist demnach der Tonmineralbestand (Schichtstruktur), Tongehalt und ihre Kationenaustauschfähigkeit. Während also Dreischichtminerale ihre Ionen auch in den Zwischenschichten austauschen können, wodurch eine intrakristalline Quellung möglich ist, besitzen Zweischichtsilikate austauschfähige Ionen nur an der äußeren Oberfläche bzw. Rändern. Dadurch können sie zwar nicht innerkristallin quellen, dennoch aber Wasser anlagern und damit osmotisch quellen. Die innerkristallinen und osmotischen Quellvorgänge sind in Kapitel 3.2.4 beschrieben.

Die Eigenschaften der Tone werden außerdem durch die Größe, Form und das Durchmesser/Dicken-Verhältnis der Tonminerale bestimmt. Beispielsweise ist Illit durch seine leistenförmige Struktur stabiler als Montmorillonit, das aus dünnen Kristallen besteht, die an Stellen geringer Überdeckung auseinanderbrechen können. Die Teilchengröße

3.2.4 Physikalisches Quellen

Physikalische Quellvorgänge bei Tonen werden in zwei Phasen unterschieden: inner- oder intrakristalline und osmotische Quellung. Im Folgenden werden diese Vorgänge basierend auf den Grundlagen nach HEIM (1990) und JASMUND et al. (1993) näher

erläutert. Eine Übersicht zu den Arten gebundenen Wassers und den mit diesen Anlagerungsenergien verbundenen Quellmechanismen ist in Bild 3.4 abgebildet. Zudem sind für diese drei physikalischen Quellvorgängen die theoretischen maximalen Quelldrücke σ_{max} und Verformungen ϵ_{max} in Tab. 3.1 dargestellt.

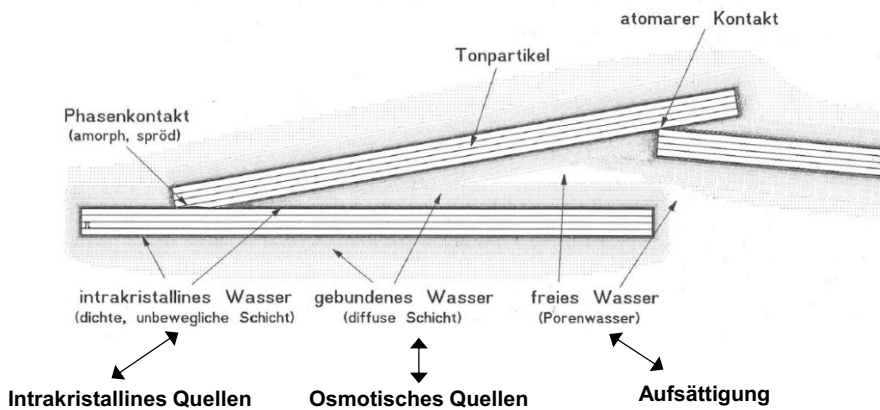


Bild 3.4: Arten von gebundenem Wasser und damit verbundenen Quellmechanismen nach PIMENTEL (1996)

Art der Wasseraufnahme	Materialverhalten	Quellmechanismus	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]
Intrakristallin	Fest	Intrakristallin	100	100
Absorbiert (gebunden)	Diffuse Schicht	Osmotisch	10	20
Frei	Flüssig	Aufsättigung	$\ll 1$	< 1

Tab. 3.1: Vergleich theoretischer maximaler Quelldrücke σ_{max} und Verformungen ϵ_{max} bei physikalischen Quellvorgängen nach BÖNSCH, 2006

Die Quelleigenschaften sind, wie bereits erwähnt, von der Ladung der Elementarschichten sowie der vorhandenen Zwischenschicht-Kationen abhängig. Bei der inner- bzw. intrakristallinen Quellung findet eine Hydratation der austauschbaren Kationen statt, d. h. die Kationen werden von Wasser umlagert. Dies ist nur bei intrakristallin quellfähigen Dreischichtmineralen (v. a. Montmorillonit) auf kurzer Distanz bei Schichtabständen $< 20 \text{ \AA}$ möglich. Hierbei werden allerdings die höchsten Quelldrücke bis 100 MPa erreicht (siehe Tab. 3.1). Innerkristallines Quellen ist i. d. R. vor der Diagenese abgeschlossen, kann aber unter hohen Temperaturen wieder rückgängig gemacht werden. Bei ca. 90°C beginnt das Zwischenschichtwasser zu entweichen und wird ab ca. 250°C vollständig ausgetrieben. Außerdem

kann durch Tonmineralneubildungen infolge von Verwitterungsvorgängen die Hydratation in den Zwischenschichten begünstigt werden. Hydrationsstufen der Dreischicht-Tonminerale nach JASMUND (1993) sind schematisch in Bild 3.5 dargestellt.

Bei Schichtabständen $< 20 \text{ \AA}$ herrscht noch eine quasikristalline Ordnung mit beweglichen Zwischenschichtkationen vor. Unter bestimmten Randbedingungen kann es jedoch bei Schichtabständen $> 20 \text{ \AA}$ zu weiteren kontinuierlichen Wassereinlagerungen kommen, die dann zu einer Trennung der einzelnen Elementarschichten voneinander und damit zu einem Verlust bis hin zu einer Zerstörung der kristallinen Struktur führen können. Bei der Aufwei-

tion bildet sich eine diffuse Ionenschicht bzw. Doppelschicht (Bild 3.6), die sich aus den an der Tonoberfläche negativ geladenen Ionen und dem Ionenschwarm innerhalb dieser Schicht zusammensetzt. Um den Konzentrationsunterschied zwischen der diffusen Doppelschicht und der Elektrolytkonzentration im Porenwasser des Gesteins auszugleichen, findet durch Ansaugen von Wasser ein osmotischer Vorgang statt. Kann also Wasser eindringen, werden die Tonmineraleilchen zum Konzentrationsausgleich auseinandergetrieben, was als osmotisches Quellen bezeichnet wird (Bild 3.8). Dieses Quellen kann auch bei nicht quellfähigen Tonmineralen stattfinden, wenn auch in geringerem Ausmaß als bei quellfähigen Tonmineralen.

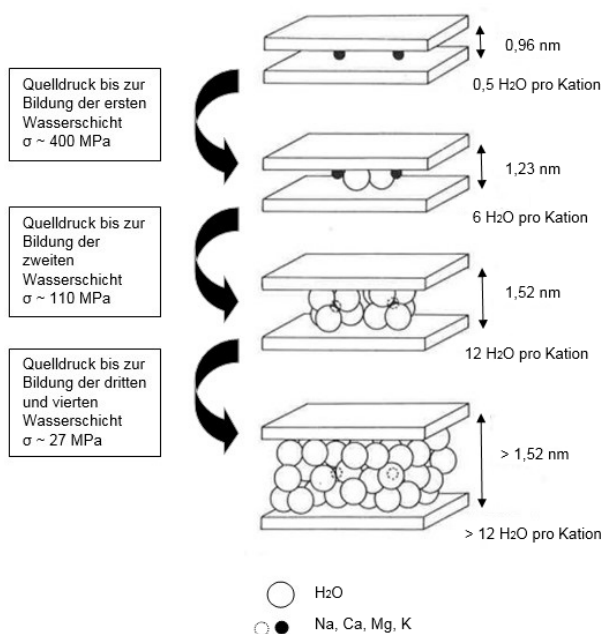


Bild 3.5: Hydrationsstufen der Dreischicht-Tonminerale nach JASMUND (1993)

Das Ausmaß des osmotischen Quellens hängt wiederum von den Eigenschaften der Tonminerale ab, insbesondere von der spezifischen Tonmineraloberfläche und deren Ladung. Je größer die für Wasser zugängliche innere und äußere Oberfläche der Tonminerale ist, desto höher ist auch ihre Quellfähigkeit. Die spezifische Oberfläche (m^2/g) erhöht sich mit abnehmender Korngröße, zunehmendem Anteil an Schichtsilicaten sowie quellfähigen Bestandteilen. Auch die bereits beschriebene Größe, Form und Durchmesser/Dicken-Verhältnis der Mi-

nerale bestimmen die Ionenkonzentration und Ladungsverteilung und damit die osmotische Quellfähigkeit. Je blättchenartiger die Form, desto größer ist die Fläche pro Volumeneinheit, an der sich Wassermoleküle anlagern können. Montmorillonit-Teilchen sind dabei wesentlich dünner als Kaolinit oder Illit. Auch die Art und Wertigkeit der Zwischenschichtkationen beeinflussen das osmotische Quellen. Beispielsweise begünstigen Kationen mit geringer Hydratationsenergie und nicht zu großen Ionenradien das osmotische Quellen (z. B. Na^+).

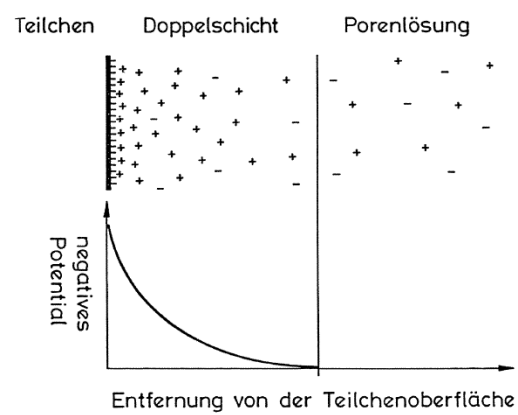


Bild 3.6: Diffuse Doppelschicht nach JASMUND (1993)

Im Gegensatz zum innerkristallinen Quellen findet das osmotische Quellen auf deutlich längerer Distanz bis zu Schichtabständen von ca. 5000 \AA statt. Demnach entwickeln sich auch deutlich geringere Quelldrücke als beim innerkristallinen Quellen (siehe Tab. 3.1). Im Allgemeinen können sich Quelldrücke nur bei behinderter Ausdehnung aufbauen. Sobald der Quellvorgang ungehindert stattfinden kann, findet jedoch wiederum eine Entfestigung des Gesteins statt. Ein Schema des behinderten Quellens ist dem Bild 3.7 zu entnehmen.

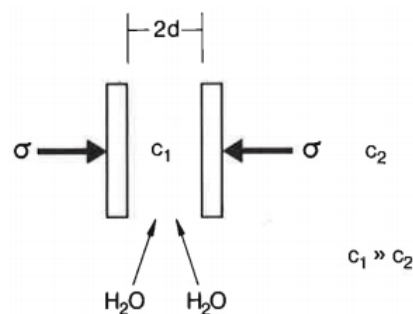


Bild 3.7: Schema des behinderten Quellens nach JASMUND (1993)

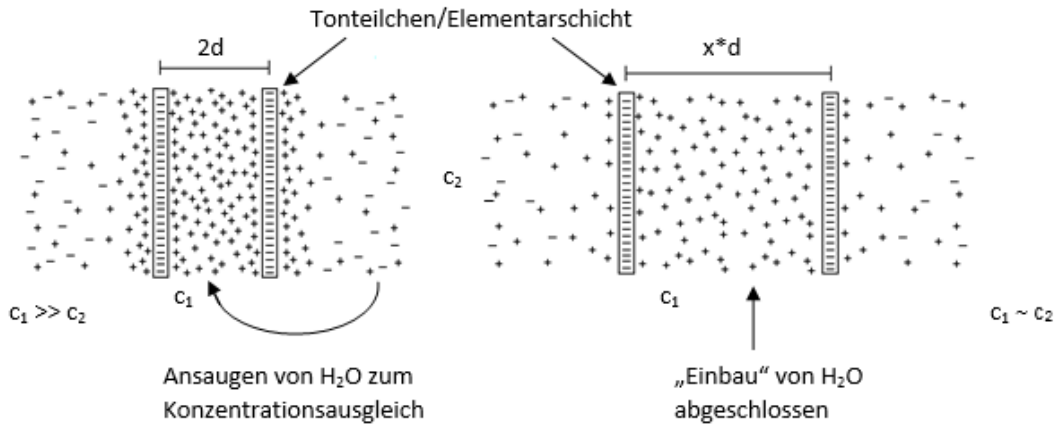


Bild 3.8: Osmotisches Quellen nach JASMUND (1993)

3.2.5 Eindimensionales Modell zum Quellen

Grundlage für die Auswertung der Ergebnisse ist der logarithmische Ansatz nach GROB (1972). Basierend auf den Ergebnissen von HUDER und AMBERG (1970) formulierte er für die Beziehung zwischen quellbedingten Spannungen und Quelldehnungen das folgende eindimensionale Quellgesetz für $\sigma_{z,max} \geq \sigma_z \geq \sigma_c$:

$$\epsilon_{z,q} = K_{z,q} \cdot \log\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z,max}}\right)$$

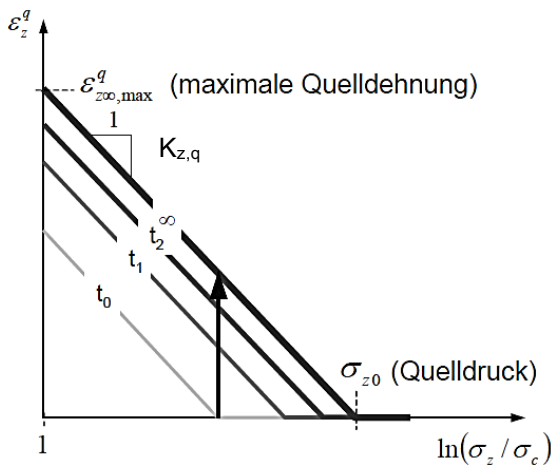


Bild 3.9: Eindimensionales Quelldehnungsmodell nach WOLFFERSDORFF und HEIDKAMP (2005)

In Bild 3.9 ist σ_c eine Mindestspannung, bei deren Unterschreitung das Quellen stark zunimmt und das

behinderte Quellen in ein freies Quellen übergeht. Die Steigung der Geraden und damit das Maß der Quelldehnungen in Abhängigkeit von der Spannungen wird durch den Quellparameter $K_{z,q}$ beschrieben.

Die Spannung, bei der die Quelldehnungen null werden, wird als Quelldruck σ_{z0} bzw. hier in dieser Forschungsarbeit als Quelldruck $\sigma_{z,max}$ bezeichnet.

Bei der Formulierung nach GROB (1970) ist zu beachten, dass, wie bereits erwähnt, der Ansatz auf der Versuchsdurchführung nach HUDER und AMBERG (1970) basiert. Zudem wurde das vollständige Abklingen der Quelldehnungen je Entlastungsstufe abgewartet.

4 Probengewinnung und Aufbereitung

4.1 Allgemeines

Zur Gewinnung geeigneter quellfähiger veränderlich fester Gesteine wurde eine Vielzahl von Bauunternehmen sowie Ämter und Institute verschiedenster Art, wie z. B. Bauämter, Straßenbauamtsämter und geologische Ämter der Bundesländer und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), für eine mögliche Probenahme kontaktiert. Die fünf entnommenen Proben wurden schließlich im Rahmen von Baumaßnahmen oder aus zugänglichen Lagerstätten gewonnen. Bei den in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellten Proben handelt sich um einen

Opalinustonstein aus der Schweiz (siehe Kapitel 4.2), einen Bentonit aus Bayern (siehe Kapitel 4.3), einen dunkelroten Mergel aus Stuttgart (siehe Kapitel 4.4), einen Emscher Mergel aus Essen (siehe Kapitel 4.5) und einen Feuerletten-Zersatz aus Forchheim (siehe Kapitel 4.6). Bildhafte Darstellungen der Probengewinnung und Aufbereitung dieser Böden und Gesteine befindet sich zusammenfassend in Anlage A sowie nachfolgend ausschnittsweise in Bild 4.1 bis Bild 4.7.

Neben den neu zu gewinnenden Proben sollten außerdem aus vorhergehenden Forschungsuntersuchungen nach MÖLLER und HEYER (2014) der Tonmergelstein (Bild 4.6) und der tertiäre Ton (Bild 4.7) verwendet werden.



Bild 4.1: Opalinustonstein, Entnahmestelle Zwischenlager (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)



Bild 4.2: Bentonit, Entnahmestelle Aushub (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)



Bild 4.3: dunkelroter Mergel, Entnahmestelle Baugrubensohle (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)



Bild 4.4: Emscher Mergel, Entnahmestelle an der Ortsbrust (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)



Bild 4.5: Feuerletten-Zersatz, Entnahmestelle nahe Geländeoberfläche (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)



Bild 4.6: Tonmergelstein, Entnahmestelle Zwischenlager (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)



Bild 4.7: tertiärer Ton, aufbereitete Proben < 31,5 mm

4.2 Opalinustonstein

Der untersuchte Opalinustonstein stammt aus St-Ursanne in der Schweiz. Hier wird im Rahmen des internationalen Mont Terri Projekts die Opalinuston-Formation hinsichtlich seiner hydrogeologischen, geochemischen und geotechnischen Eigenschaften charakterisiert, um zunächst die Frage zu beantworten, ob radioaktive Abfälle im Opalinustonstein sicher eingelagert werden können. Das entnommene Material stammte dabei von einer Abraumhalde aus einer Exkavation, welche im Jahr 2012 mit pneumatischen Hämmern und Teilschnittfräse durchgeführt wurde. Die Überlagerung betrug ca. 270 m. Das nicht mehr bergfrische Material lag zwar in einem

vor der Witterung geschützten Bereich im Berg, war jedoch über die Jahre dem Luftaustausch ausgesetzt und damit auch eher starken Temperatur- (ca. -10°C bis $+20^{\circ}\text{C}$) sowie Feuchtigkeitsschwankungen unterworfen.

Die Veränderlichkeit des Opalinustonsteins aus der Schweiz wurde bereits in den dort ansässigen Felslabors untersucht und konnte auch in den Versuchen zum Verwitterungsverhalten (siehe Kapitel 6.3) bestätigt werden. Eine Quellneigung zeigen öffentlich zugängliche Informationen des Mont Terri Projekts.

4.3 Bentonit

Da die Suche nach geeigneten quellfähigen veränderlich festen Gesteinen sehr schwierig war und sich zudem halbfeste bis feste Tone bei Wassergehaltsänderungen wie veränderlich feste Gesteine verhalten, wurde ein Boden mit eindeutig tonquellfähigen Eigenschaften herangezogen. Dieser vulkanisch entstandene Bentonit wurde aus einer Lagerstätte bei Gammelsdorf (Bayern) aus einem Tonbereich mit einer Mächtigkeit von ca. 1,5 m gewonnen. Die Überlagerung betrug ca. 18 m. Für den Aushub genügte eine einfache Baggerschaufel.

4.4 Dunkelroter Mergel

Im Gegensatz zum eindeutig tonquellfähigen Bentonit sollte zu Vergleichszwecken ein veränderlich festes Gestein ohne nennenswerten großen Anteil an quellfähigen Tonmineralen gewonnen werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projektes Stuttgart 21 der dunkelrote Mergel aus einer Baugrube in Stuttgart gewonnen. Die Probenentnahme erfolgte in einer Tiefe von ca. 6,50 m unter GOK an der Baugrubensohle per Handschaufel. Der violett braune Schlufftonstein war allerdings bereits stark verwittert bzw. zersetzt/entfestigt. Dies hatte zur Folge, dass die Anzahl größerer Bruchstücke nur für ausgewählte Verwitterungsversuche ausreichte.

4.5 Emscher Mergel

Im Gegensatz zum dunkelroten Mergel (siehe Kapitel 4.4) sollte der Emscher Mergel quellfähige Eigenschaften aufweisen und wurde daher für diese Forschungsarbeit herangezogen. In welchem Umfang quellfähige Tonminerale enthalten sind, zeigen die Ergebnisse der Mineralanalysen in Kapitel 5.2. Der Emscher Mergel wurde im Rahmen der Erweiterung des Emscher Abwasserkanal-Systems aus einer Entnahmetiefe von ca. 9 m gewonnen. Das an der Ortsbrust gelöste Material wurde über Loren an die Oberfläche gefördert und dort direkt neben der Baugrube abgelagert, wo es nahezu frisch nach dem Aushub per Handschaufel für diese Forschungsarbeit gewonnen werden konnte. Ähnlich wie der dunkelrote Mergel war der Emscher Mergel

bereits stark zum Boden entfestigt und größere Bruchstücke daher nur in begrenztem Umfang vorhanden.

4.6 Feuerletten-Zersatz

Zu den veränderlich festen Gesteinen zählt ebenso der Feuerletten. Im Rahmen der Neubaustrecke zwischen München und Berlin wurde dieser in Bayern mehrmals angetroffen. Veröffentlichte Untersuchungen an derartigem Material finden sich u.a. in WOLFFERSDORFF und HEIDKAMP (2005). Zum Zeitpunkt dieser Forschungsarbeit ergab sich jedoch nur noch eine oberflächennahe Entnahmestelle eines Feuerletten-Zersatzes in der Nähe von Forchheim. Aufgrund vorangegangener Niederschläge wurden die oberen 30 cm bis 50 cm mit Hilfe des in Bild 4.5 dargestellten Baggers abgetragen. Dadurch sollte außerdem die Entnahme einer möglichst homogenen Probe ermöglicht werden. Da der Zersatz bereits ein zum Boden zerfallenes Gestein ist, waren größere Bruchstücke für Verwitterungsversuche, insbesondere für Siebtrommelversuche und Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel nicht vorhanden. Daher sind die scheinbar größeren Bruchstücke des Feuerletten-Zersatzes in Bild 4.5 lediglich zusammengeklebte Feianteile.

4.7 Tonmergelstein

Der bereits in den Forschungen von MÖLLER und HEYER (2014) untersuchte Tonmergelstein stammte aus dem Gebiet Jena-Göschwitz. Das Gestein wurde im Zuge des sechsstreifigen Neubaus des Autobahnabschnittes der A4 im Bereich des ca. 3 km langen Tunnels Jagdberg als Aushubmaterial gewonnen. Das Material stammte dabei von zwei Baugruben innerhalb des östlichen Teils des Tunnels, das geologisch im Pelitröt, dem mittleren oberen Bundsandstein, liegt. Das Gestein zeigte sowohl gräuliche als auch rötliche Verfärbungen und war mit Fasergipseinlagerungen durchzogen (siehe Bild 4.6).

Der Aushub des Tonmergelsteins erfolgte im Januar 2012. Bereits nach einer kurzen, ungeschützten Lagerungszeit von ca. zwei Wochen zeigte das

Material erste Veränderungen infolge der Verwitterung, insbesondere durch den starken Niederschlag. Die Oberfläche war aufgeweicht und erste Risse sowie Zerbröckeln des Aushubmaterials waren erkennbar. Bild 4.6 zeigt die Entnahmestelle am Jagdbergtunnel beim Anschluss Jena-Göschwitz.

Zum Zeitpunkt der Probenahme war das Material in den oberen 10 cm bis 20 cm nasser, während darunterliegendes Material noch relativ trocken und nur teilweise angefeuchtet war. Für eine ausreichend homogene Materialmenge bezüglich eines einheitlichen Wassergehaltes musste das Material bei Zimmertemperatur getrocknet werden und dabei mehrmals vermischt werden. Der aufbereitete Tonmergelstein ist rechts in Bild 4.2 dargestellt.

4.8 Tertiärer Ton

Um einen weiteren quellfähigen Vertreter zu untersuchen, wurde neben dem Tonmergelstein auch der bereits in den Forschungen von MÖLLER und HEYER (2014) untersuchte tertiäre Ton herangezogen. Er stammte aus Baugrunduntersuchungen zur 2. S-Bahnstammstrecke in München. Die Proben wurden 2007 in der Nähe vom Ostbahnhof aus einer Tiefe von 20 m bis 30 m entnommen. Bild 4.7 zeigt den aufbereiteten Ton.

5 Methodik der Laborversuche

5.1 Allgemeines

In den folgenden Kapiteln sollen die Methoden der einzelnen Laborversuche sowie deren Besonderheiten im Hinblick auf die Eigenschaft der Veränderlichkeit kurz vorgestellt werden.

5.2 Bodenmechanische Klassifizierung

Es wurden an den in Kapitel 4 vorgestellten Versuchsböden die folgenden klassifizierenden Versuche zum bodenmechanischen Verhalten durchgeführt:

- Beurteilung nach DIN EN ISO 14688-1 bzw. DIN EN ISO 14689
- Beurteilung nach DIN 18196
- Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4
- Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach DIN EN ISO 17892-12
- Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens nach DIN 18132
- Bestimmung der Korndichte nach DIN EN ISO 17892-3
- Bestimmung des Kalkgehaltes nach DIN 18129
- Bestimmung des Glühverlustes nach DIN 18128
- Tonmineralanalyse

Wie bereits in den vorhergehenden Forschungen (STIEGELER et. al, 2006 sowie MÖLLER und HEYER, 2014) festgestellt, ist die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 bei veränderlich festen Gesteinen nur bedingt möglich. Je nach Ausgangszustand des Gesteins bzw. Bodens kann bereits die Wassereinwirkung bei der Versuchsdurchführung zu Veränderungen des Materialgefüges führen, wobei Art und Dauer der Wassereinwirkung eine bedeutende Rolle spielen. Daher nimmt sowohl die Art der Probenvorbereitung, insbesondere bei der Sedimentationsanalyse, als auch die Art der Durchführung, Trockensiebung, Nasssiebung oder Sedimentationsanalyse, Einfluss auf das Versuchsergebnis. Infolge dieser Problema-

tik bei der Bestimmung einer eindeutigen Korngrößenverteilung ist auch eine eindeutige Beschreibung nach DIN EN ISO 14688-1 sowie Einstufung in eine Bodengruppe nach DIN 18196 nur bedingt möglich.

Die Tonmineralanalyse bei veränderlich festen Gesteinen ist insofern vorteilhaft, um quellfähige Tonminerale zu erkennen. Außerdem geben andere Mineralbestandteile wie Anhydrit oder Gips Hinweise darauf, ob neben dem Tonquellen auch andere Quellvorgänge auftreten können.

5.3 Erkennen und Klassifizieren der Veränderlichkeit

5.3.1 Allgemeines

Zum Erkennen und Klassifizieren der Veränderlichkeit der in Kapitel 4 vorgestellten Versuchsböden wurden die folgenden Versuche durchgeführt:

- Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel
- Siebtrommelversuch nach TP BF-StB, Teil C 20
- Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche nach NICKMANN (2009)

5.3.2 Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel

Zum Erkennen der veränderlichen Festigkeit von Gesteinen ist eine reine Wasserlagerung nicht ausreichend, da veränderlich feste Gesteine im bergfeuchten Zustand bei Wassereinwirkung häufig keinen Zerfall zeigen. Dies konnte bereits in diversen Veröffentlichungen und Forschungen festgestellt werden (siehe NICKMANN, 2009; STIEGELER et. Al, 2006 sowie MÖLLER und HEYER, 2014). Dass manche Gesteine erst zerfallen, nachdem sie getrocknet wurden, wird erstmals in der aktuellen Fassung der DIN EN 14689 gegenüber der früheren Fassung DIN EN 14689-1 erwähnt.

Ebenso ist auch ein Zerfall bei einmaliger Wasserlagerung kein zwingender Hinweis auf eine veränderliche Festigkeit. Der Zerfall kann beispielsweise auch durch Strukturstörungen der Probe oder Entspannungsprozesse bei der Probennahme und dem

Lösen aus dem Gebirgsverband hervorgerufen werden wie letzteres z.B. bei mürben Sandsteinen, die nach der Freilegung ihren Zusammenhalt bei Wasserzugabe sofort verlieren.

Bei ausschließlicher Beurteilung der Veränderlichkeit anhand einer Wasserlagerung besteht daher die Gefahr, eine veränderliche Festigkeit bzw. Veränderlichkeit nicht zu erkennen. Daher ist bei einer Vielzahl veränderlich fester Gesteine zum grundsätzlichen Erkennen der Veränderlichkeit eine Abtrocknung und Wiederbefeuchtung erforderlich. Diese so genannten Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel (TBW) dienen zur qualitativen Beurteilung der Zerfallsneigung nach Freilegung und demnach zur Einschätzung über die Art und Geschwindigkeit des Zerfallsprozesses.

Die Versuchsdurchführung von Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln ist nicht standardisiert, auch wenn eine Vielzahl verschiedener Durchführungsmöglichkeiten in diversen Literaturquellen vorliegt (Übersicht siehe NICKMANN (2009)). Häufig werden drei bis fünf TBW zur qualitativen Erfassung des Zerfallsprozesses durchgeführt. Aufgrund fehlender Standards ist allerdings eine Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen mit großen Unsicherheiten behaftet.

Für diese Forschungsarbeit wurden ein bis mehrere Brocken abwechselnd 24 h unter Wasser gelagert und danach bis zur Volumenkonstanz ofengetrocknet. Am (frischen) Ausgangsgestein wurde mit einer Wasserlagerung begonnen, um die Sofortreaktion und die Reaktion nach 24 h Wasserlagerung zu erfassen. Anschließend begannen die Wechsel aus Trocknung und Befeuchtung. Die Trocknung erfolgte im Ofen bei 105°C bis zur Massenkonstanz. Bei veränderlich festen Gesteinen, die ggf. bei dieser Temperatur zur Verfestigung neigen würden, wurde die Trocknungstemperatur auf 50°C reduziert. Für die Wasserlagerung wurde Leitungswasser verwendet.

Um die qualitativen TBW beurteilen zu können, wurde das Beurteilungsschema nach dem Jar-Slake-Test nach SANTI (2006) herangezogen. Anhand von sechs Zerfallstypen (siehe Bild 5.1 und Tab. 5.1) lässt sich der Zerfall visuell erfassen und beschreiben. Auch wenn diese Grundtypen häufig in Kombination auftreten und nicht immer eindeutig voneinander abgegrenzt werden können, können

sie bei einer Vielzahl von veränderlich festen Gesteinen erkannt werden. Die Anzahl der Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel, nach der das Beurteilungsschema angewendet werden soll, ist nicht klar definiert. Bei dieser Forschungsarbeit wurde analog zum charakterisierenden Zerfallsbeständigkeitsindex I_{d2} (siehe Kapitel 5.3.3) eine Beschreibung nach SANTI nach zwei TBW vorgenommen, um so die Böden und Gesteine miteinander vergleichen zu können.

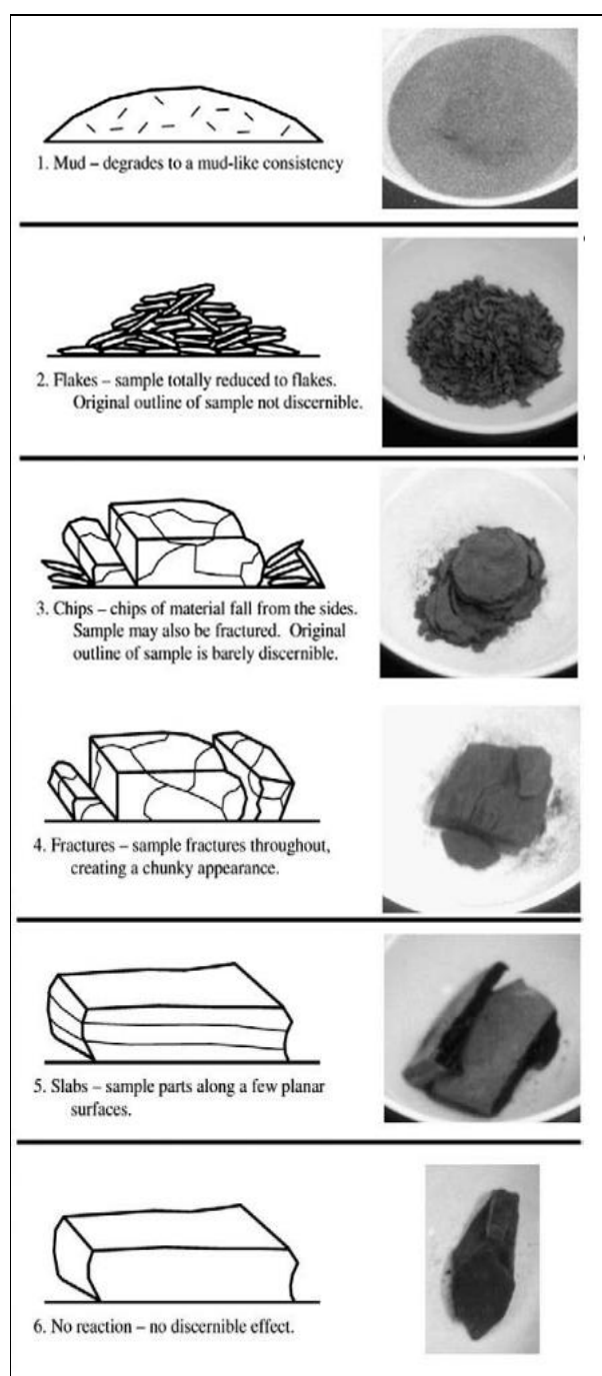


Bild 5.1: Jar-Slake-Test nach SANTI (2006)

Zerfallstyp	Bezeichnung
1	Auflösung
2	Bröckchenzerfall
3	Abblätterung
4	Brockenbildung
5	Plattenbildung
6	keine Veränderung

Tab. 5.1: Zerfallstypen nach dem Jar-Slake-Test

Um außerdem den Zerfallsverlauf zu quantifizieren, wurden die TBW an einzelnen Bruchstücken durchgeführt, wobei nach jeder Trocknung die Masse des größten verbleibenden Reststückes erfasst wurde. Als Ergebnis ergibt sich analog zu den Versuchen nach NICKMANN (2009) ein Diagramm, dass die Masse des größten verbleibenden Reststückes über die Anzahl der Zyklen zeigt.

5.3.3 Siebtrommelversuche

Zur Klassifizierung der Veränderlichkeit ist der Siebtrommelversuch geeignet wie in den Forschungen von STIEGELER et al. (2006) sowie MÖLLER und HEYER (2014). Durch diese quantitative Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit ist eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher veränderlich fester Gesteine möglich.

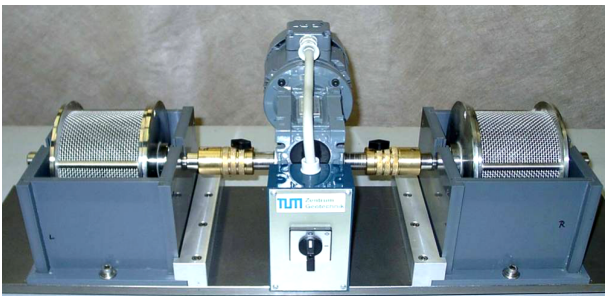


Bild 5.2: Siebtrommelversuch - Prüfeinrichtung

Die Versuchsdurchführung ist in der TP BF-StB, Teil C 20 (bzw. Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3. der DGGT, siehe auch HERZEL, 2002) geregelt. Das zu untersuchende Probenmaterial besteht aus zehn repräsentativen Einzelstücken mit mehr oder weniger runder Form und einer Trockenmasse von 40 g bis 60 g. Es wird zunächst getrocknet und anschließend durch Wassereinwirkung sowie Rotation in einer Siebtrommel, deren Mantelflä-

che aus einem Maschensieb mit 2 mm Öffnungsweite besteht, mechanisch beansprucht. Die Drehung der Siebtrommel erfolgt im Wasserbad für zehn Minuten mit insgesamt ca. 200 Umdrehungen. Bild 5.2 zeigt die Prüfeinrichtung, die für den Siebtrommelversuch verwendet wurde.

Bei entsprechender Empfindlichkeit tritt ein Masseverlust in Form von Siebdurchgang auf, anhand dessen nach jedem Zyklus der Zerfallsbeständigkeitsindex I_{di} als Verhältnis zwischen dem noch in der Trommel verbliebenen Restmaterial zur Ausgangsmasse bestimmt wird. Dieser Indexwert berechnet sich wie folgt:

$$I_{di} = \frac{m_{di}}{m_{d0}} \times 100$$

I_{di} Zerfallsbeständigkeitsindex nach Zyklus i [%]

m_{di} Trockenmasse, nach Zyklus i

m_{d0} Trockenmasse, Versuchsbeginn

Der Index I_d ermöglicht die Beurteilung der Zerfallsbeständigkeit der Gesteine von "sehr niedrig" bis "zerfallsresistent". Die TP BF-StB, Teil C 20 sehen das Beurteilungsschema nach GAMBLE (1971) in Tab. 5.2 vor. In der Regel wird das Probematerial sechs Versuchszyklen ausgesetzt. Zur Beurteilung der Zerfallsbeständigkeit wird der Zerfallsbeständigkeitsindex I_{d2} nach dem zweiten Zyklus herangezogen. Bei niedrig bis sehr niedrig zerfallsbeständigem Gestein kann auch I_{d1} , bei zerfallsresistentem Material auch I_{d6} verwendet werden. Der Versuch kann im Allgemeinen auch abgebrochen werden, wenn ein Masseverlust von mehr als 70 % auftritt.

Zerfallsbeständigkeitsindex I_d [%]	Zerfallsbeständigkeit
> 98	zerfallsresistent
95 – 98	sehr hoch
85 – 95	hoch
60 – 85	mittel
30 – 60	niedrig
< 30	sehr niedrig

Tab. 5.2: Siebtrommelversuch - Beurteilung der Zerfallsbeständigkeit nach GAMBLE (1971) [HERZEL, 2002]

Analog zu den TBW ist bei veränderlich festen Gesteinen mit verfestigender Neigung die Trocknungstemperatur von 105°C auf 50°C bis 60°C zu reduzieren.

Bei vereinzelt Gesteinen wie z. B. Mergelstein, bei dem sowohl schwächere Tonmineralbindungen und deutlich stärkere Zementationsbindungen vorherrschen, kann die Wassereinwirkung von zehn Minuten nicht ausreichend sein, um die spezifische Verwitterungsneigung aufzuzeigen. In diesen Fällen sind die TBW von besonderer Bedeutung, um die Zerfallsneigung zu erfassen.

5.3.4 Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche nach NICKMANN

Ein alternativer Versuch zur Quantifizierung der Veränderlichkeit sind Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche nach NICKMANN, bei der drei Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel mit einer schonenden Handnasssiebung nach jeder Wasserlagerung kombiniert werden. Zudem wird jeweils das größte Reststück nach jedem Zyklus erfasst. Wie beim Siebtrommelversuch der Zerfallsbeständigkeitsindex ergibt sich hier der Veränderlichkeitsindex zur Beschreibung des verwitterungsbedingten Zerfalls.

Im ersten Zyklus werden die Proben über einen Zeitraum von 24 Stunden vollständig in Wasser gelagert und sowohl die Sofortreaktion als auch der Zustand nach dem Ende der Wasserlagerung dokumentiert. Um quantitative Aussagen über den Zerfall treffen zu können, wird nach der Wasserlagerung mittels einer schonenden Handsiebung die Korngrößenverteilung der entstandenen Aggregate und Körner ermittelt. Die Siebfraktionen werden im Trockenschrank bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Zudem wird die Masse des größten verbleibenden Stückes wie folgt ermittelt:

$$R_{WLi} = \frac{m_{WLi}}{m_{d0}} \times 100$$

R_{WLi} Restanteil des größten Reststückes [%]

m_{WLi} Trockenmasse des größten Reststückes nach Zyklus i [g]

m_{d0} Trockenmasse, Versuchsbeginn

Nach dem Wiegen der einzelnen Fraktionen werden diese wieder zusammengesüttet und zwei weiteren Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen. Somit lässt sich der sukzessive Zerfall anhand der Summenkurve ablesen, aber auch durch die relative Masse des größten verbleibenden Stückes, die gegen die Anzahl der Zyklen aufgetragen wird (siehe Bild 5.3), beschreiben.

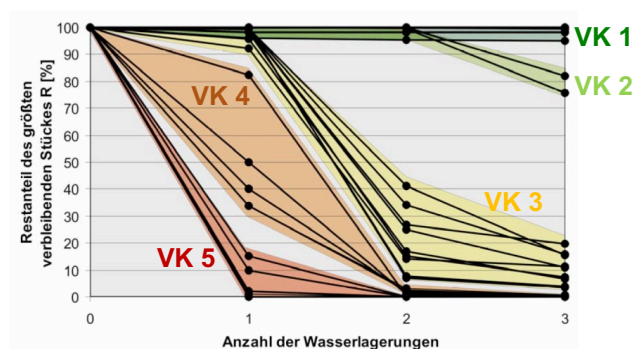


Bild 5.3: Restanteil des größten verbleibenden Stückes gegenüber der Anzahl der Wasserlagerungen nach NICKMANN (2009)

Zur Abgrenzung zwischen einem veränderlich festen und dauerhaften Gestein reicht die Durchführung des Trocknungs-Befeuchtungs-Versuches nicht immer aus. Aus diesem Grund wird nach NICKMANN bei Gesteinen, die nach drei Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln keine Reaktion zeigten, zusätzlich ein Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat nach DIN EN 12370 durchgeführt. Übersteht das Gestein diesen Versuch ohne nennenswerten Massenverlust (< 10 %), kann es als dauerhaft fest eingestuft werden (VK 0).

Zur Quantifizierung der Veränderlichkeit wird nach NICKMANN der Veränderlichkeitsindex I_V wie folgt berechnet:

$$I_V = R_{WL1} + R_{WL3} + R_{K10}$$

I_V Veränderlichkeitsindex [-]

R_{WL1} Massenanteil des größten verbleibenden Stückes nach 1. Wasserlagerung [%]

R_{WL3} Massenanteil des größten verbleibenden Stückes nach 3. Wasserlagerung [%]

R_{K10} Massenanteil des größten verbleibenden Stückes nach 10-zyklischem Kristallisationstest [%]

Ist bei der Probe kein Kristallisationsversuch nötig, so ist die Masse R_{K10} gleich Null. Anhand des Zerfallsverlaufs und des Veränderlichkeitsindex I_v wird die Probe in eine der Veränderlichkeitsklassen VK nach NICKMANN (2009) eingeteilt (siehe Tab. 5.3).

Zusammenfassend ist die Vorgehensweise nach NICKMANN (2009) im Flussdiagramm in Bild 5.4 dargestellt.

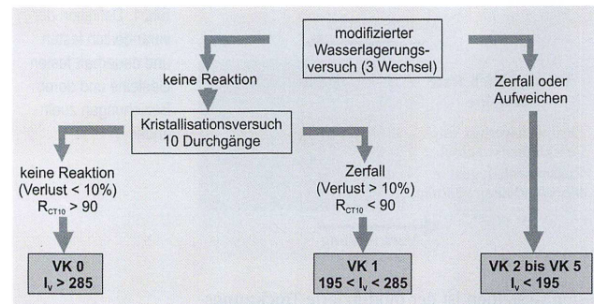


Bild 5.4: Flussdiagramm zur Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine nach NICKMANN (2009)

VK	Veränderlichkeitsindex I_v	Bezeichnung	Beschreibung
0	285 - 300	nicht veränderlich (dauerhaft fest)	Bis zum 3. Wechsel im Wasserlagerungsversuch keine Veränderungen (ausgenommen geringer Verlust durch gelockerte Aggregate $\leq 2,5\%$), keine Veränderung im Kristallisationsversuch (Verlust $\leq 10\%$)
1	190 - 285	gering veränderlich	Bis zum 3. Wechsel im Wasserlagerungsversuch keine Veränderungen (ausgenommen geringer Verlust durch gelockerte Aggregate $\leq 5\%$), Zerfall im Kristallisationsversuch (Verlust $\geq 10\%$)
2	145 - 190	langsam veränderlich	Bei einfacher Wasserlagerung keine Reaktion, bis zum 3. Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel Rissbildung und /oder beginnender Zerfall bis zu 50% der Ausgangsmasse
3	92,5 - 145	mäßig schnell veränderlich	Bei erstmaliger Wasserlagerung Rissbildung bzw. Abbrechen von kleineren Kluftkörpern oder Aggregaten (bis max. 10%), Probestück bleibt aber erhalten. Bis zum 3. Wechsel Zerfall in Aggregate $> 2,5\%$ der Ausgangsmasse
4	25 - 92,5	schnell und stark veränderlich	Bei erstmaliger Wasserlagerung deutliche Desintegration (10-75%), bis zum 3. Wechsel Zerfall in Aggregate $> 2,5\%$ der Ausgangsmasse
5	< 25	unmittelbar und sehr stark veränderlich	Unmittelbarer Zerfall bei einmaliger Wasserlagerung in Aggregate $< 25\%$, bis zum 3. Wechsel in Teilchen $\leq 1\%$ der Ausgangsmasse

Tab. 5.3: Einteilung der Veränderlichkeitsklassen (VK) nach NICKMANN (2009)

5.4 Versuche zur Verdichtbarkeit

Um für die Quelluntersuchungen Einbauzustände zu definieren, wurden Proctorversuche nach DIN 18127 durchgeführt. Es sollten jeweils zwei Einbauzustände (Proctoroptimum und Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 97\%$ auf der trockenen Seite des Proctoroptimums) untersucht werden.

Da veränderlich feste Gesteine in ihrer Zusammensetzung sehr heterogen sein können und zudem auf die versuchsbedingte Wasserzugabe und demnach auf die jeweilige Art der Probenvorbereitung reagieren können, ist die Bestimmung einer einheitlichen Proctorkurve nicht in jedem Fall möglich. Analog zu

den Untersuchungen von MÖLLER und HEYER (2014) können sich Bereiche erzielbarer Dichten ergeben, dem so genannten Proctorband. Dies ist bei der Auswertung der Verdichtungseigenschaften veränderlich fester Gesteine zu berücksichtigen.

Um den Einfluss des Verwitterungszustandes auf das bodenmechanische Verhalten zu berücksichtigen, sollen dabei drei Verwitterungszustände betrachtet werden. Eine Übersicht ist in Tab. 5.4 dargestellt.

Verwitterungszustand 1 definiert den unverwitterten Zustand bzw. den Zustand bei Probenentnahme. Um eine Austrocknung und damit eine Veränderung

der Eigenschaften zu verhindern, wurden die Böden und Gesteine nach der Probenentnahme sowie Aufbereitung und Homogenisierung in geschlossenen Eimern aufbewahrt.

Verwitterungszustand	Anzahl der TBW / Bedeutung
VZ 1	0 TBW, Ausgangszustand
VZ 2	1 TBW, hier nicht vorgesehen
VZ 3	mehrere TBW für 50 % Zerfall
VZ 4	mehrere TBW für 90 % Zerfall

Tab. 5.4: Übersicht der Verwitterungszustände

Verwitterungszustand 2 nach einem Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel wurde im Gegensatz zur Forschung von MÖLLER und HEYER (2014) hier nicht vorgesehen.

Für den Verwitterungszustand 3 wurden die Böden vor Durchführung der Versuche einem bzw. mehreren Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen. Die Anzahl der Zyklen richtet sich nach der Wasserempfindlichkeit bzw. Veränderlichkeit des Gesteins. Bisherige Erkenntnisse zeigen, dass insbesondere in den ersten Trocken-Befeuchtungs-Zyklen die größten Veränderungen auftreten und unter Laborbedingungen nach wenigen Zyklen der Zerfall vielfach weitgehend abgeschlossen ist und einer Grenzkurve entgegenstrebt (siehe Bild 5.5 und Bild 5.6). In Abhängigkeit von den Gesteinseigenschaften und den Ergebnissen der klassifizierenden Versuche wurde die Anzahl der Wechsel so festgelegt werden, dass ca. die Hälfte des zu erwartenden Zerfalls eingetreten ist. Damit wird berücksichtigt, dass die Materialien in der Baupraxis vor Einbau in ein Erdbauwerk häufig temporär zwischengelagert werden und dabei eine Verwitterung

erfahren können. Für die Festlegung eines Zerfalls von ca. 50 % bezogen auf eine angenäherte Grenzkurve ist es erforderlich den Zerfallsverlauf des Bodens bis zu dieser Grenzkurve zu ermitteln. Anhand einer repräsentativen Probenmenge werden dabei Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, mit schonenden Nasssiebungen kombiniert. Diese Vorgehensweise wurde auch im Forschungsvorhaben nach MÖLLER und HEYER (2014) verwendet. Dabei ist zu beachten, dass die Auflösung in den ersten 10 bis 15 Zyklen genauer sein muss, da hier die meisten Reaktionen auftreten. Wie aus Bild 5.6 zu erkennen ist, wird eine angenäherte Grenzkurve erreicht, wenn innerhalb von fünf aufeinander folgenden Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln ein Zerfall von weniger als 1 M.-% bezogen auf den Siebdurchgang 2 mm auftritt, d.h. dass der Anteil < 2 mm um weniger als 1 M.-% zunimmt. Nach Abschluss der Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel werden die Proben aufbereitet und es wird ihnen entsprechend dem anzustrebenden Wassergehalt wieder Wasser zugegeben. Anschließend erfolgt die Durchführung der Verdichtungsversuche.

Neben dem meist unverwitterten Ausgangszustand (Verwitterungszustand 1) wurde ein fast vollständig verwitterter Zustand durch den Verwitterungszustand 4 abgebildet. Dazu sollten die Böden mehreren Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen werden, bis mindestens 90 % des maximal zu erwartenden Zerfalls eingetreten ist (siehe Bild 5.5 und Bild 5.6). Die Ermittlung dieses Zustandes basierend auf einer angenäherten Grenzkurve sowie die anschließende Vorbereitung und Durchführung der Verdichtungsversuche erfolgt analog wie beim Verwitterungszustand 3 beschrieben.

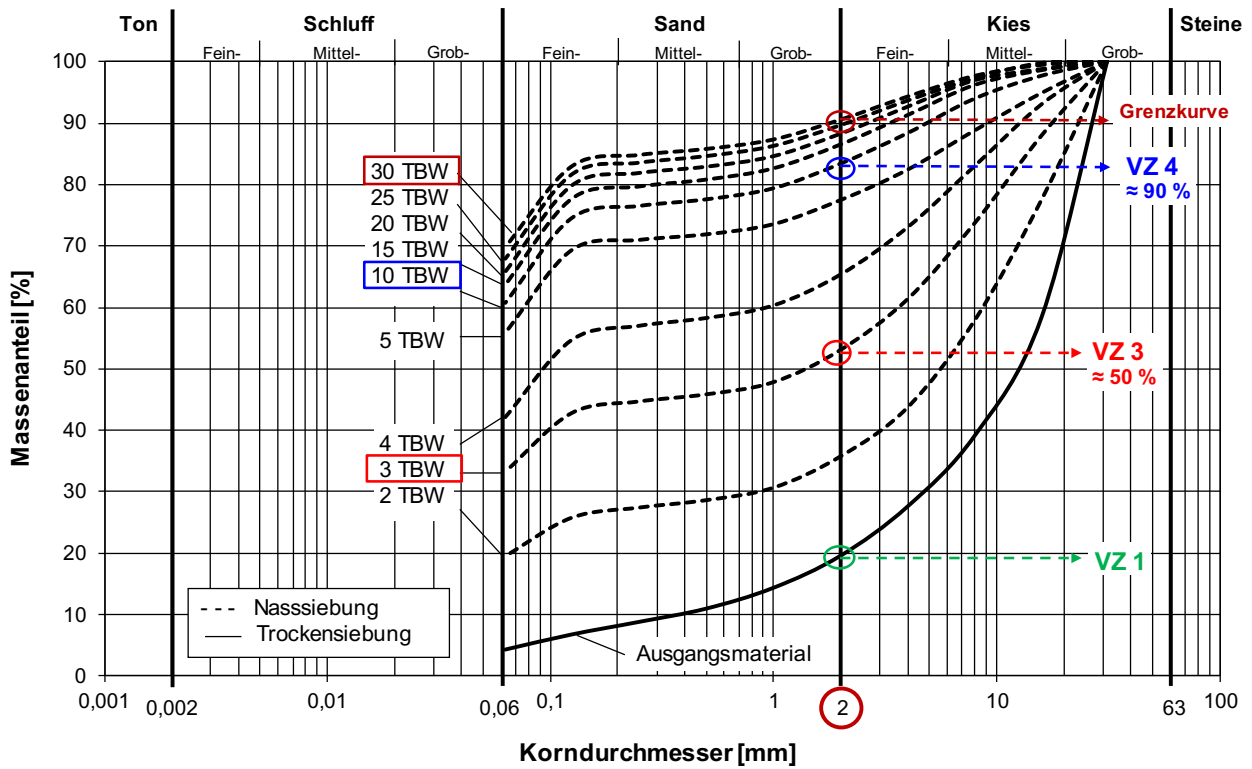


Bild 5.5: Zerfallsverlauf des Opalinustonsteins anhand von Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln kombiniert mit Nasssiebungen nach MÖLLER und HEYER (2014)

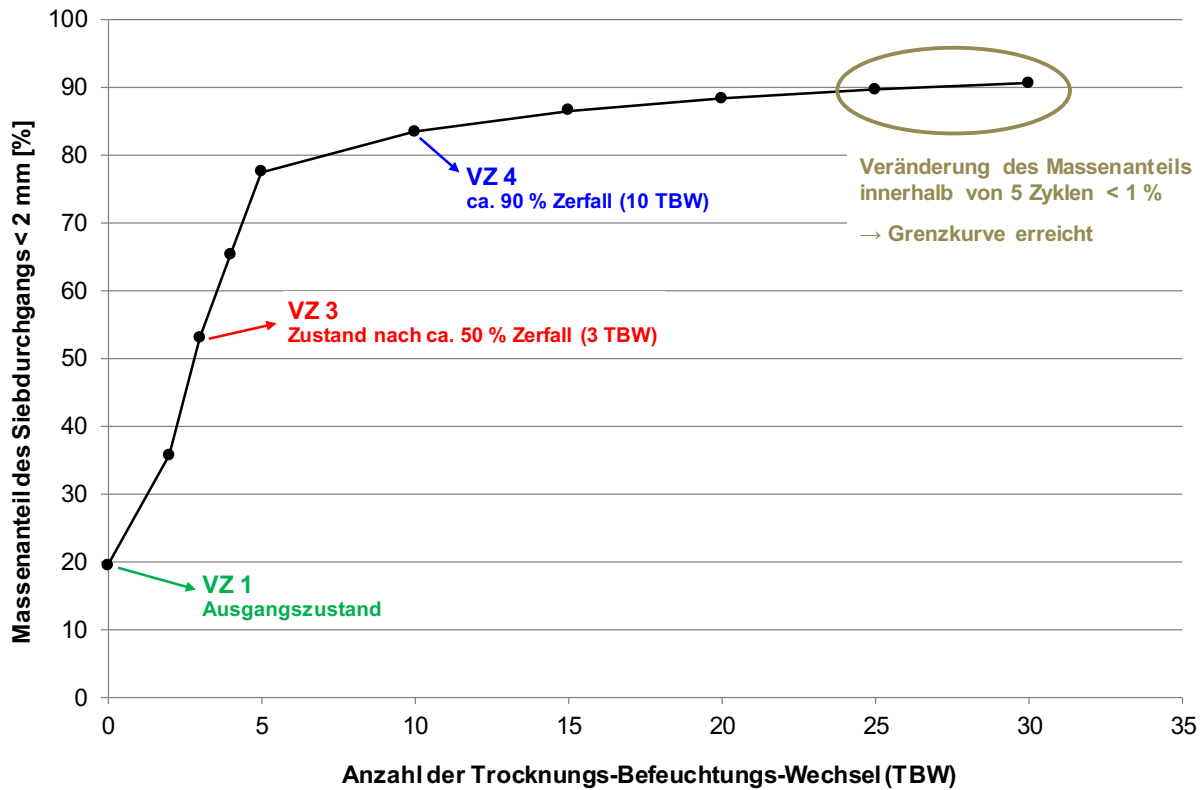


Bild 5.6: Massenanteil des Siebdurchgangs < 2 mm in Abhängigkeit der Anzahl der Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel für Opalinustonstein nach MÖLLER und HEYER (2014)

5.5 Quellversuche

5.5.1 Allgemeines

Zur Ermittlung der Beziehung zwischen Quelldruck und Quelldehnung bei veränderlich festen Gesteinen in Abhängigkeit vom Verwitterungszustand und dem Einbauzustand wurden kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche in Ödometern durchgeführt.

Je nach Verwitterungszustand und damit verbundener vorliegender Korngröße wurden entweder Quellversuche in Standard-Ödometern ($d = 10 \text{ cm}$, $h = 2 \text{ cm}$) oder großen Ödometern ($d = 30 \text{ cm}$, $h = 6 \text{ cm}$) durchgeführt. Bei den veränderlich festen Gesteinen mit einem Größtkorn von 32 mm , das in der Regel VZ 1 und VZ 3 betrifft, waren Quellversuche in Großödometer erforderlich. Der Versuchsaufbau sowie der Ein- und Ausbau der Proben in Großödometer erfolgte analog zu den Untersuchungen nach MÖLLER und HEYER (2014). Der Vorteil der kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuche im Vergleich zum jeweils separat durchzuführenden Quelldruck- und Quellhebungsversuch war insbesondere das Herstellen von nur einer Versuchsprobe, an der sowohl der Quelldruck als auch die Quelldehnungen gemessen werden konnten. Dadurch war die Ermittlung einer zuverlässigen Beziehung zwischen beiden Kenngrößen möglich.

Für den Verwitterungszustand 4 wurden die Quelldruck- und Quellhebungsversuche jeweils separat an zwei Probekörpern in den Standard-Ödometern aus den folgenden Gründen durchgeführt. Es hatte sich gezeigt, dass durch den verwitterungsbedingten hohen Feinkornanteil und der damit verbundenen geringen Durchlässigkeit der Proben deren Sättigung und damit die Quelldruckentwicklung sehr langsam ablief. Auch nach mehreren Wochen war kein Wasser am oberen Rand der 6 cm hohen Probe zu sehen, sodass die Standard-Ödometer mit nur 2 cm Probenhöhe eingesetzt wurden. Leider war jedoch die Durchführung des kombinierten Versuches an den Ödometern mit Durchmesser von 10 cm nicht möglich, da die Regelungstechnik der softwaregesteuerten Pressengeräte auf die kleineren Kräfte der Standard-Ödometer nicht ausgerichtet waren. Somit wurden mechanische Belastungsbänke eingesetzt. Eine direkte Beziehung zwischen

Quelldruck und Quelldehnung wie bei den kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuchen konnte daher für diese Versuche nicht eindeutig ermittelt werden, da beide Kenngrößen an zwei statt an einer Probe ermittelt wurden. Um beide Verfahren vergleichen zu können und die Ergebnisse zu validieren, wurden am VZ 4 des tertiären Tons und Feuerletten-Zersatzes beide Versuchsvarianten durchgeführt.

5.5.2 Versuchsdurchführung

Beim Quelldruckversuch wurde die Probe in das Kompressionsgerät eingebaut und bei verhinderter axialer Dehnung gesättigt. Als Ergebnis erhält man den zu messenden Quelldruck bei behinderter axialer Dehnung.

Beim Quellhebungsversuch wird die Probe nach Einbau in das Kompressionsgerät mit einer definierten Druckspannung von 5 kN/m^2 belastet und anschließend unter diesem Druck gesättigt. Als Ergebnis erhält man die axiale Dehnung (Quelldehnung) unter vorgegebenem Druck.

Die Versuchsdurchführung für die kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuche setzte sich aus einer weg- und einer lastgesteuerten Versuchsphase zusammen (Bild 5.7). Zunächst wurde der Quelldruck infolge von Wasserzugabe bei behinderter axialer Dehnung gemessen (weggesteuerte Versuchsdurchführung). Anschließend wurde die Probe stufenweise entlastet, wobei die Quelldehnungen unter dem jeweiligen Druck ermittelt wurden (lastgesteuerte Versuchsdurchführung). Dies funktionierte nur in den softwaregesteuerten Großödometern (siehe auch Kapitel 5.5.1). Die Versuchsdauer hing stark vom Material ab. Darüber hinaus hatte sich gezeigt, dass mehr als die vier geplanten Wochen benötigt wurde, um sowohl die Quelldruckentwicklung als auch ein Abklingen der Quelldehnungen abzuwarten.

Die Versuchsdurchführung unterschied sich zum bekannten Ansatz nach HUDER und AMBERG (1970) insofern, dass die Proben nicht bis zur Vorlastspannung belastet und die sich daraus ergebenden Quelldrücke und Quelldehnungen ermittelt wurden. Die Ergebnisse der Versuche sollten mögliche

Quellreaktionen analog zu verdichteten veränderlich festen Gesteinen, die im Erdbauwerk eingebaut und verdichtet werden, widerspiegeln. Das Quellen hängt jedoch vom Einbauzustand ab, weshalb auf eine hohe Vorlastspannung verzichtet wurde.

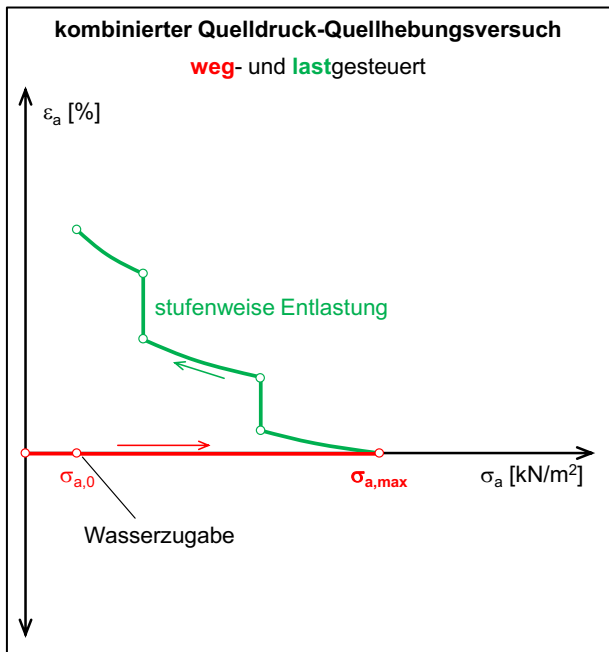


Bild 5.7: Skizzenhafter Versuchsablauf des kombinierten Queldruck-Quellhebungsversuches

Die Druckspannungen für die zu ermittelnden Quelldehnungen wurden in Abhängigkeit des maximalen Queldruckes bei behinderter axialer Dehnung gewählt. Es wurden in der Regel Entlastungsstufen ausgehend vom maximalen Queldruck gewählt, wobei stufenweise auf 1/2, 1/4 und 1/8 des maximalen Queldruckes entlastet wurde.

Nach der Durchführung der Quellversuche wurde abschließend im Labor untersucht, inwiefern Verwitterungsvorgänge im verdichteten Zustand zu Quelldehnungen führen können. Dafür wurden zwei Proben mit vergleichbaren Einbaubedingungen im Großödometer unter konstanter Auflastspannung sechs Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen, wobei die Trocknung mittels Druckluft und die Befeuchtung durch Wasserzugabe über die Basis der Probe erfolgte. Die beiden Versuche dauerten jeweils knapp über drei Monate.

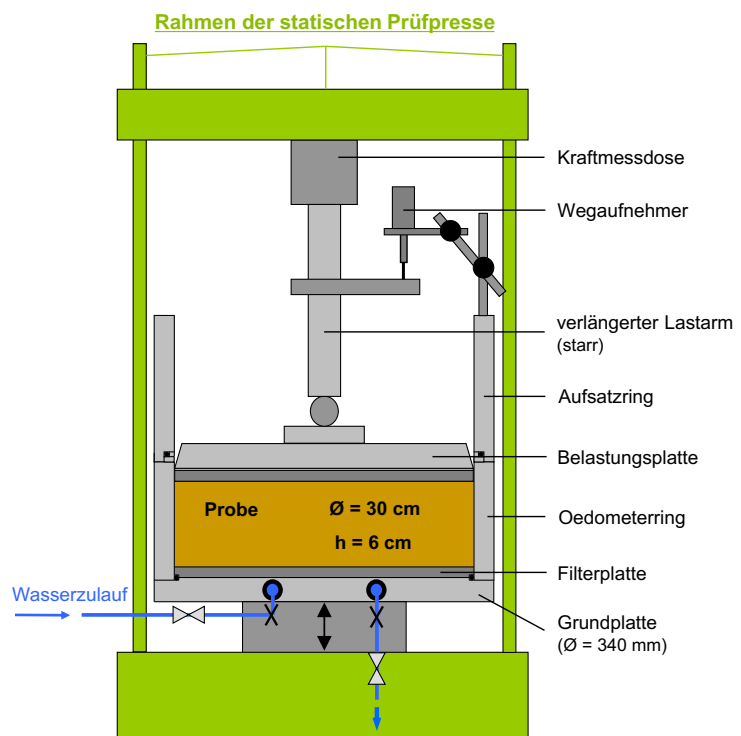
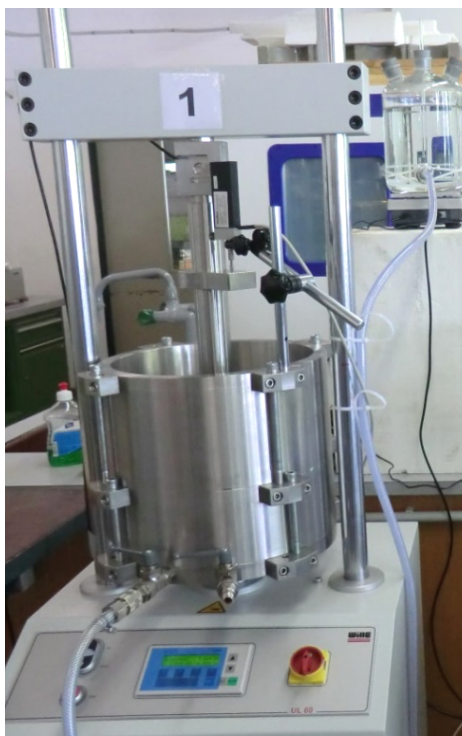


Bild 5.8: Großödometer während eines Kompressionsversuches (links) sowie als Schema (rechts)

5.5.3 Versuchsauswertung

Anlehnend an das eindimensionale Quellgesetz nach GROB (1972), wie im Kapitel 3.2.5 beschrieben, wurde für die untersuchten Böden anhand der kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuche zunächst eine Beziehung zwischen dem Quelldruck und der Quelldehnung entwickelt (Bild 5.9). Die Steigung der Quellgeraden wird durch den Quellparameter $K_{z,q}$ wie folgt beschrieben.

$$K_{z,q} = \frac{\Delta \varepsilon_z}{\Delta \log \sigma_z}$$

Die Auswertung des Quellparameters $K_{z,q}$ je mittlerer Spannung $\sigma_{z,m,i}$ erfolgte abschnittsweise zwischen zwei Entlastungsstufen. Zum Vergleich der Versuche für die Quelldehnung $\Delta \varepsilon_{z,q}$ (Bild 5.9) aus dem Quellhebungsversuch wird ein gemittelter Quellparameter berechnet.

Die mit geringeren Spannungen zunehmenden Quelldehnungen sollten sich durch einen linearen Anstieg der Quellgeraden im logarithmischen Maßstab zeigen. Unterhalb einer Mindestspannung nimmt die Steigung der Quellgeraden ab (siehe auch Kapitel 3.2.5).

Die Darstellung der Quellgeraden, aus der die Ermittlung des Quellparameters $K_{z,q}$ resultiert, erfolgte auch für die Quellhebungsversuche im VZ 4. Hierbei ist zu beachten, dass kein direkter Zusammenhang zum maximalen Quelldruck, der an einer separaten Probe ermittelt wurde, besteht. Ein relativer Vergleich zwischen den Einbauzuständen, dem Verwitterungszustand und letztlich zwischen den einzelnen Böden und Gesteinen ist dennoch halbquantitativ möglich. Bei der Auswertung der Quellversuche im VZ 4 ist auch zu berücksichtigen, dass zwei Probekörper hergestellt werden mussten. Trotz gleicher Einbaubedingungen ist es aber insbesondere bei den stark heterogenen veränderlich festen Gesteinen sehr schwer möglich identische Einbaubedingungen herzustellen wie bereits die Untersuchungen nach MÖLLER und HEYER (2014) gezeigt hatten.

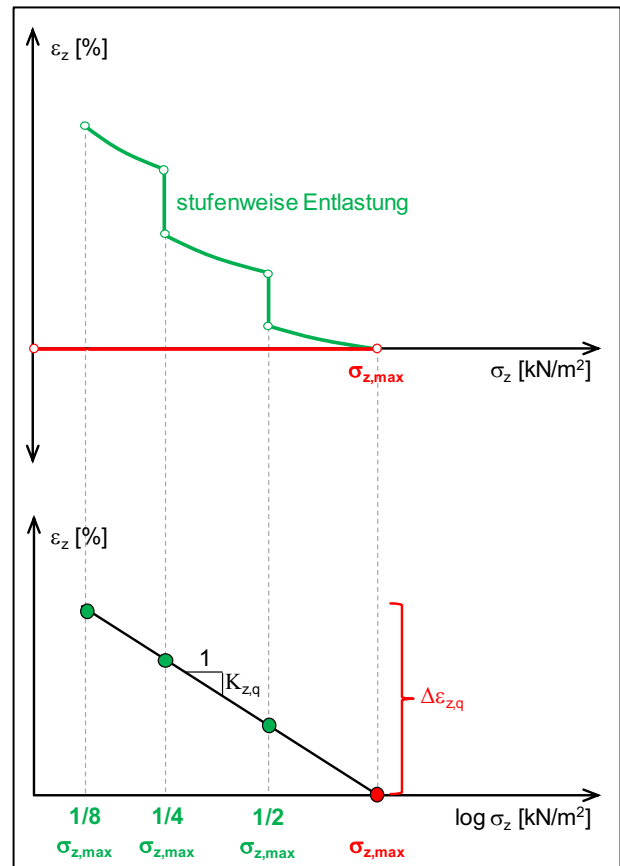


Bild 5.9: Skizzenhafte Auswertung zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Quelldruck und Quelldehnung aus dem kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuch

6 Ergebnisse der klassifizierenden Versuche

6.1 Allgemeines

Die Laborergebnisse der bodenmechanischen Klassifikation sowie die Ergebnisse der Verwitterungsversuche zur Beschreibung der Veränderlichkeit werden in den nachfolgenden Kapiteln für die fünf Versuchsböden vorgestellt. Die Vorgehensweise der Laborversuche sowie Besonderheiten bei der Auswertung der Versuche wurden im Kapitel 5 beschrieben.

Sofern erforderlich sind ergänzend und ausschnittsweise auch die Ergebnisse der klassifizierenden Versuche vom tertiären Ton und Tonmergelstein dargestellt. Die vollständigen und ausführlichen Ergebnisse sind im Bericht nach MÖLLER und HEYER (2014) enthalten.

In Anlehnung an die Verwitterungszustände VZ 1 bis VZ 3 nach MÖLLER und HEYER (2014) wurde, wie bereits in Kapitel 5.4 erläutert, die Bezeichnung für die Verwitterungszustände wie folgt angepasst:

- VZ 1 = Ausgangszustand
- VZ 2 = 1 TBW
- VZ 3 = Anzahl der TBW, so dass ca. 50 % Zerfall stattgefunden hat
- VZ 4 = Anzahl der TBW, so dass ca. 90 % Zerfall stattgefunden hat

Für die Quellversuche wurden die folgenden Böden und Verwitterungszustände untersucht:

- Opalinustonstein: VZ 1, 3, 4
- Tonmergelstein: VZ 1, 3, 4
- Feuerletten-Zersatz: VZ 1, 4
- Tertiärer Ton: VZ 1, 4
- Bentonit: frisch, Pulver

Da nicht wie geplant für jeden Boden drei Verwitterungszustände möglich und auch sinnvoll waren, wurde die Anzahl der zu untersuchenden Böden von vier auf sechs erhöht. Die gewählte Anzahl der TBW für die Böden im Verwitterungszustand VZ 3 und VZ 4 sind in Tab. 6.1 aufgelistet.

VZ	Opalinustonstein	Tonmergelstein	Feuerletten-Zersatz	roter Mergel	tertiärer Ton	Bentonit
3	1 TBW	2 TBW	-	-	-	-
4	6 TBW	5 TBW	2 TBW	2 TBW	1 TBW	-

Tab. 6.1: Anzahl der Trocken-Befeuchtungs-Wechsel TBW für VZ 3 und VZ 4 der untersuchten Böden

6.2 Bodenmechanische Klassifizierung

Nachfolgend sind in Bild 6.1 bis Bild 6.5 die Korngrößenverteilungen der fünf Böden sowie in Bild 6.6 und Bild 6.7 der beiden Böden aus MÖLLER und HEYER (2014) dargestellt. Wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, hat die Art der Versuchsdurchführung Einfluss auf die Korngrößenverteilung und damit auch auf die Benennung der Böden nach DIN EN ISO 14688-1 bzw. DIN 18196. Deutlich wird dies in den nachfolgenden Bildern sowie in Tab. 6.2. Bis auf den Bentonit zeigen alle anderen Böden (Opalinustonstein, dunkelroter Mergel, Emischer Mergel, Feuerletten-Zersatz, Tonmergelstein, tertiärer Ton) mehr oder weniger große Unterschiede im Kurvenverlauf, je nachdem ob eine Trockensiebung oder Sedimentationsanalyse durchgeführt wurde. Während bei der Trockensiebung i. d. R. der Feinanteil unterschätzt wird, treten bei der Wasserzugabe bei der Sedimentationsanalyse erste Materialveränderungen auf.

Die Ergebnisse der weiteren Versuche zum bodenmechanischen Verhalten sind zusammenfassend

für alle Böden in Tab. 6.2 dargestellt. Darin enthalten sind neben den bereits erwähnten Beurteilungen nach DIN EN ISO 14688-1 sowie DIN 18196 die ermittelten Kennwerte aus den Versuchen zur Bestimmung des Wassergehaltes, der Korndichte, der Konsistenzgrenzen, des Glühverlustes, des Kalkgehaltes und des Wasseraufnahmevermögens aufgelistet. Besonders auffällig ist der Bentonit mit seiner ausgesprochen hohen Fließgrenze sowie sehr hohem Wasseraufnahmevermögen, das sich besonders nach einer Austrocknung bemerkbar macht. Im Ausgangszustand hat das Material einen sehr hohen Wassergehalt.

Aus den Konsistenzgrenzen und der Korngrößenverteilung wurde auch die Aktivitätszahl nach DIN EN ISO 17892-12 ermittelt. Sie kann ein Hinweis auf die kolloidalen Eigenschaften eines Tons sein und ist aber in erster Linie abhängig von der Art und Menge der Tonmineralien. So zeigt sich der dunkelrote Mergel nach dem Bentonit scheinbar als zweitaktivster Vertreter. Da jedoch sein Feinkornanteil $< 0,06$ mm auch nach 20 Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unter 35 % bleibt (siehe Kapitel 6.4) gibt die Aktivitätszahl allein keinen Hinweis auf die Quellfähigkeit eines Bodens.

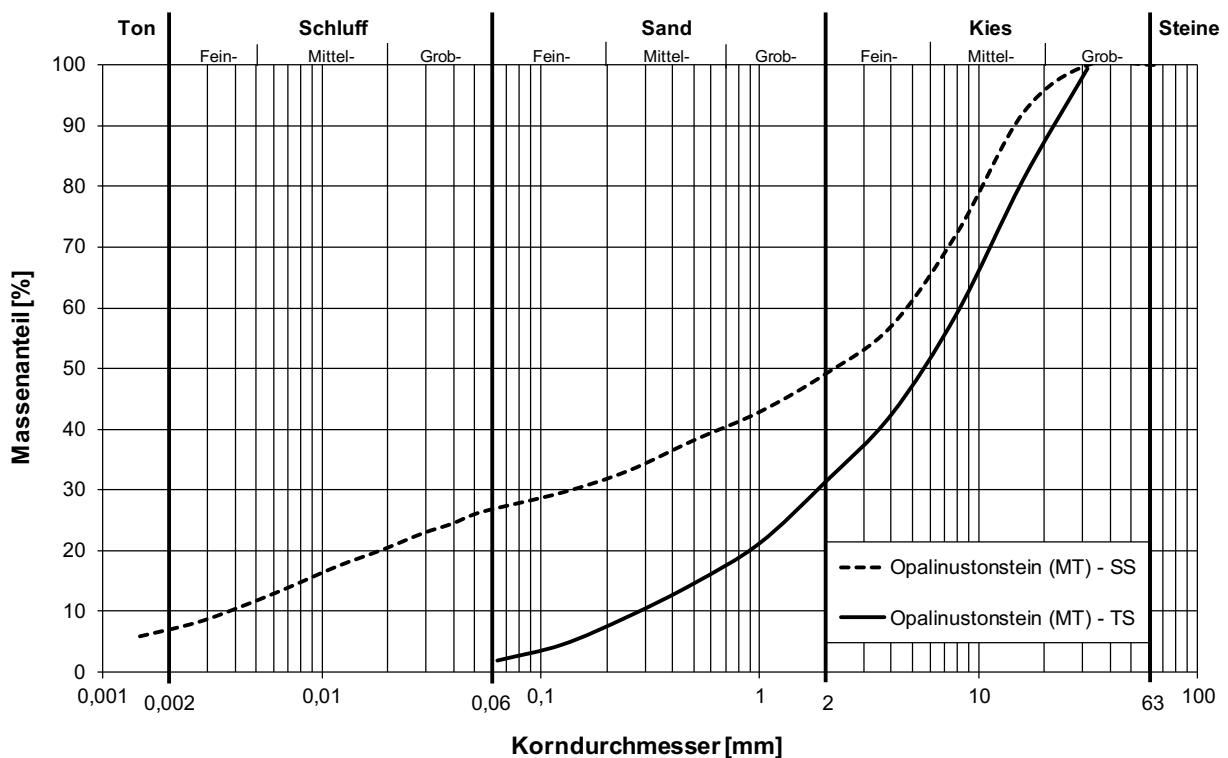


Bild 6.1: Korngrößenverteilungen Opalinustonstein (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie GT* bei Sedimentation SS)

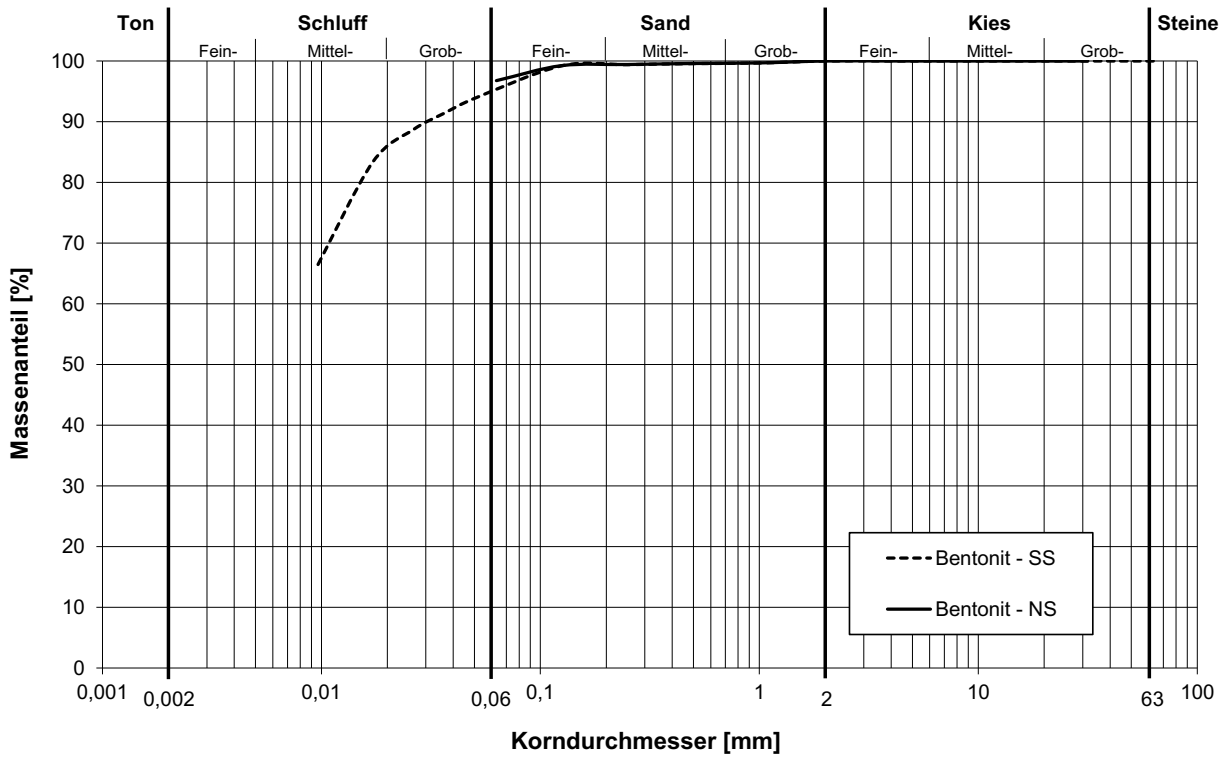


Bild 6.2: Korngrößenverteilungen Bentonit (Bodengruppe nach DIN 18196: TA bei Nasssiebung NS sowie bei Sedimentation SS)

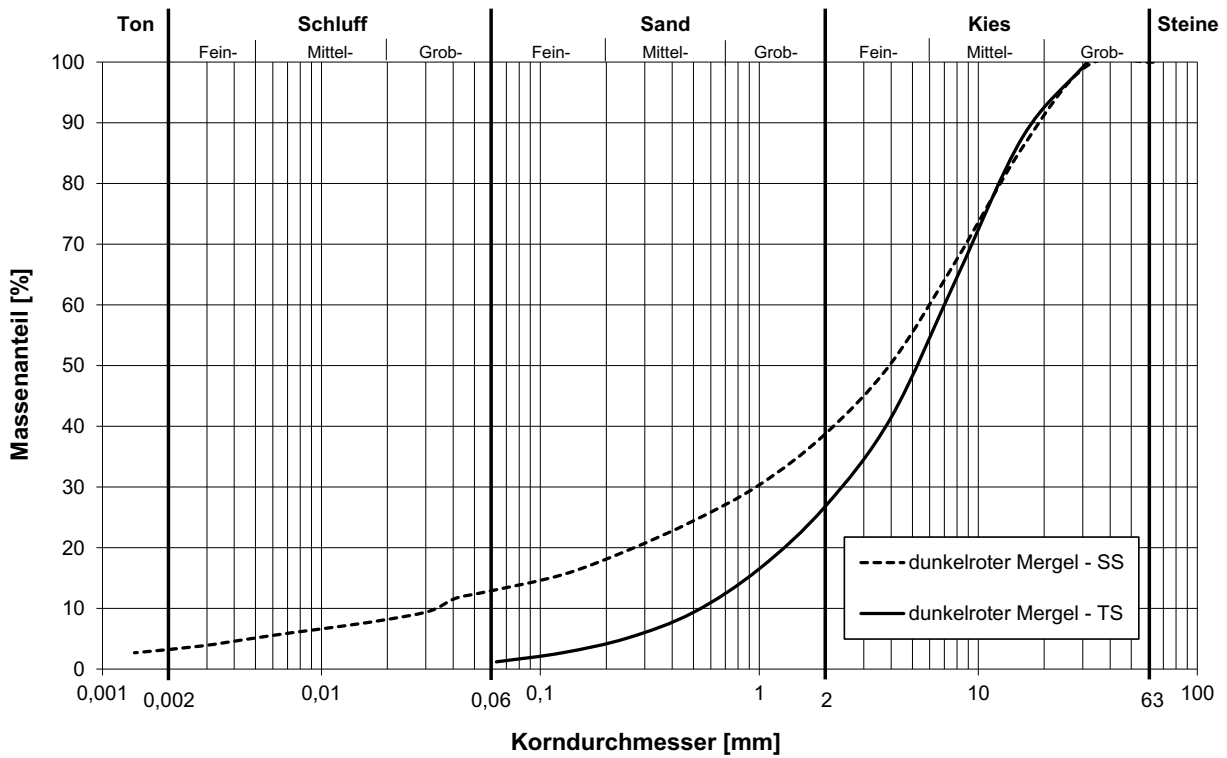


Bild 6.3: Korngrößenverteilungen dunkelroter Mergel (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie GT bei Sedimentation SS)

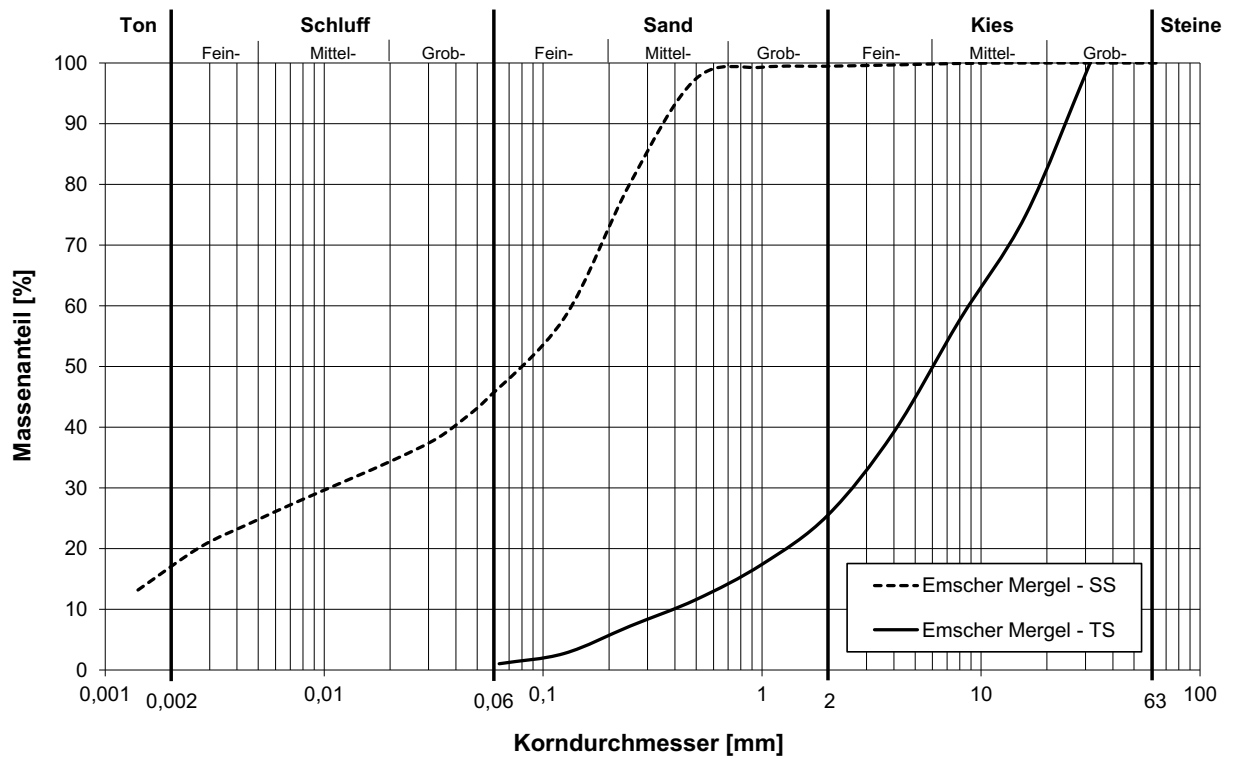


Bild 6.4: Korngrößenverteilungen Emscher Mergel (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie ST bei Sedimentation SS)

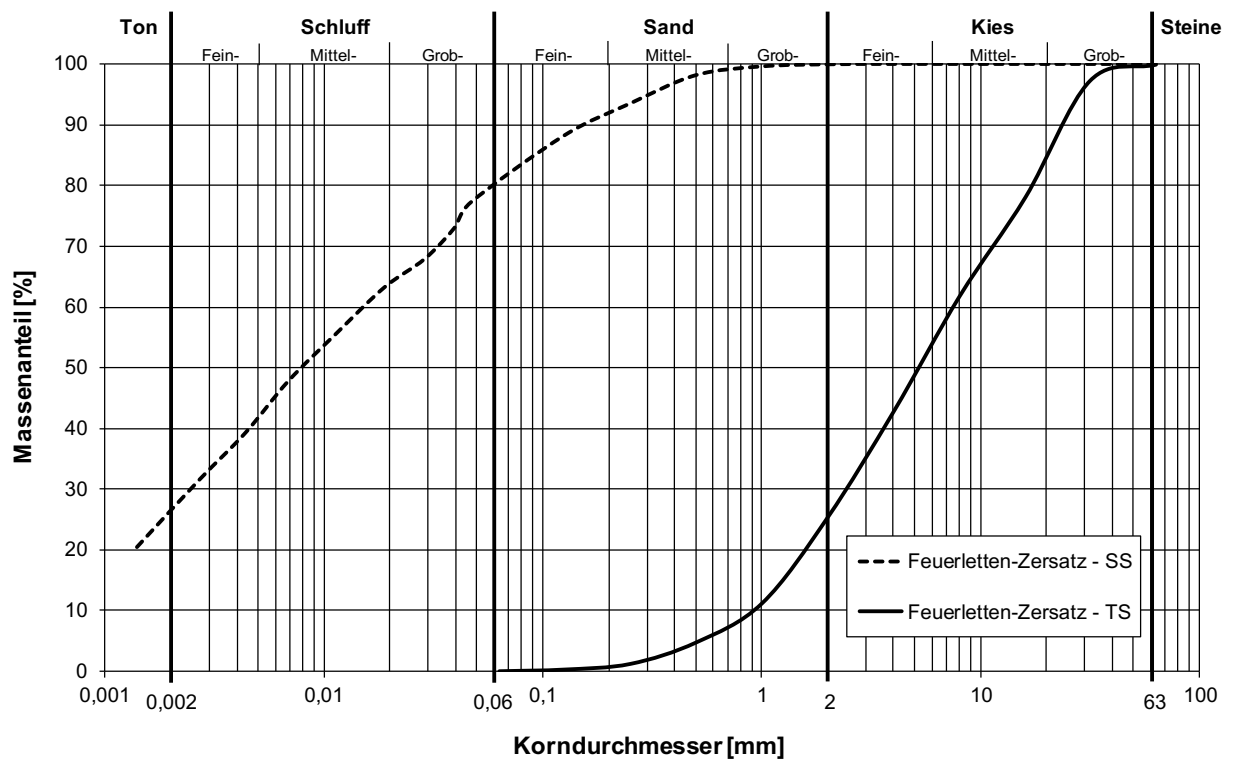


Bild 6.5: Korngrößenverteilungen Feuerletten-Zersatz (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie TM bei Sedimentation SS)

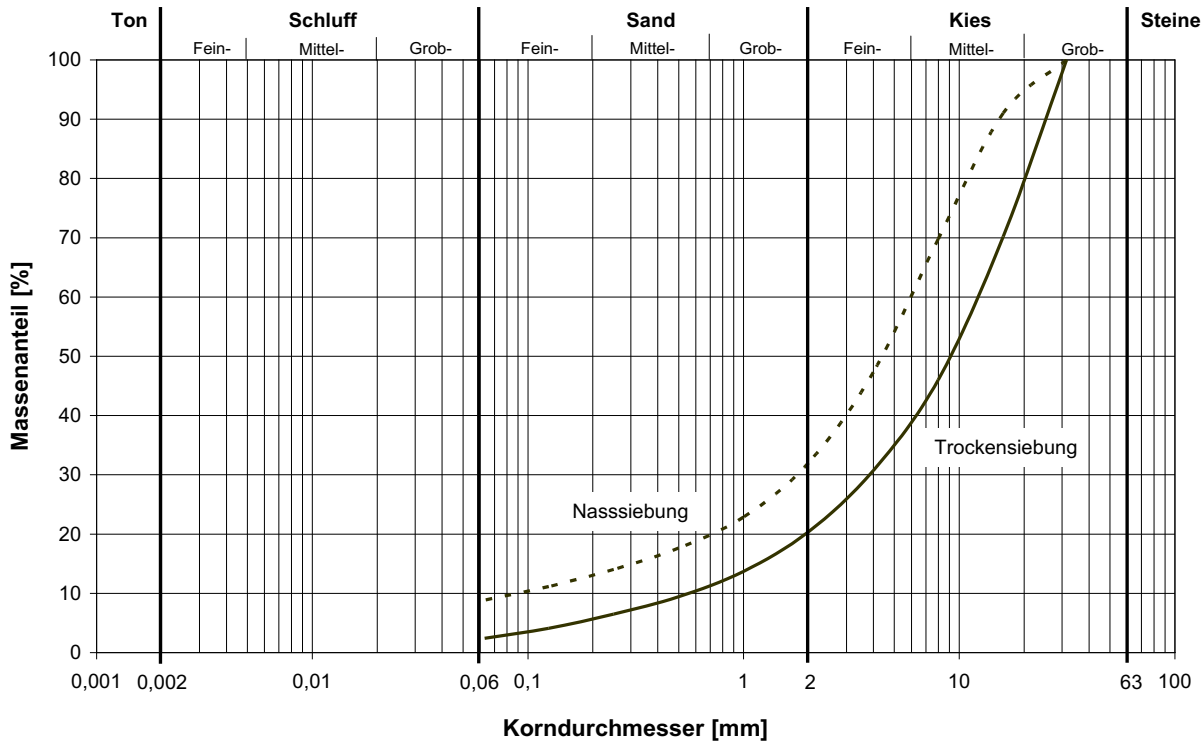


Bild 6.6: Korngrößenverteilungen Tonmergelstein (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung sowie GT bei Nasssiebung)

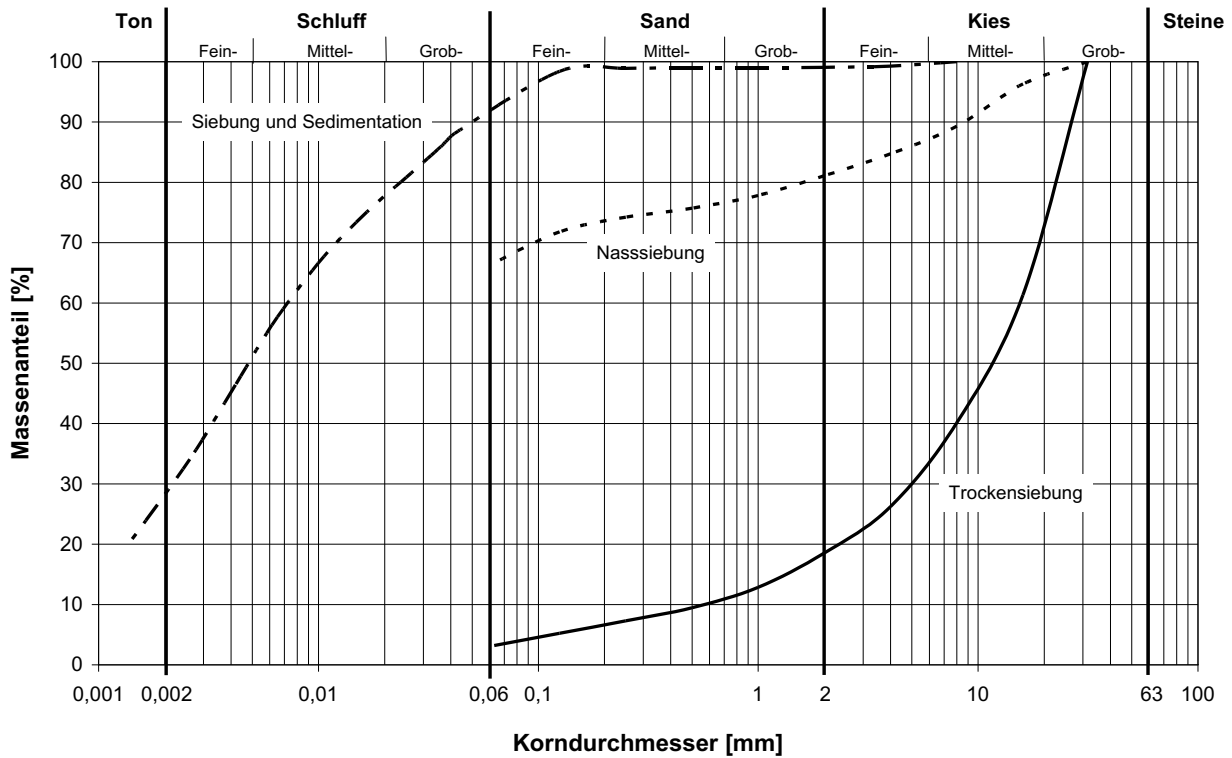


Bild 6.7: Korngrößenverteilungen tertiärer Ton (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung sowie TM bei Nasssiebung bzw. Sedimentation)

Versuchswerte		Opalinus- tonstein	Bentonit	dunkel- roter Mergel	Emscher Mergel	Feuer- letten- Zersatz	Tertiärer Ton	Tonmergel- stein
Bodenart DIN EN ISO 14688-1	TS *	saGr	-	saGr	saGr	-	si'sa'Gr	si'sa'Gr
	NS / SS *	clsaGr	Cl	cl'saGr	clSa	saCl	fsa'Cl	sis*a'Gr
Bodengruppe DIN 18196	TS *	GW	-	GW	GW	GW	GW	GW
	NS / SS *	GT*	TA	GT	ST	TM	TM	GT
Wassergehalt w	[%]	6,5	59,6	16,3	18,6	26,9	12,6	8,4
Korndichte ρ_s	[g/cm ³]	2,696	2,569	2,740	2,720	2,696	2,720	2,730
Plastizität des Feinkorns								
Fließgrenze w_L	[%]	44,1	125,2	40,4	38,6	48,5	46,8	37,5
Ausrollgrenze w_P	[%]	19,5	54,2	20,0	17,7	23,1	19,8	20,6
Plastizitätszahl I_P	[%]	24,6	71,0	20,3	20,9	25,4	27,0	16,9
Konsistenzzahl I_C	[-]	1,48	0,92	1,12	0,94	0,81	1,24	1,87
Aktivitätszahl I_A		1,32	3,53	1,45	1,16	0,92	0,94	-
Bodengruppe Fein- korn, DIN 18196		TM	TA	TM	TM	TM	TM	TM
Kalkgehalt V_{Ca}	[%]	20,5	0,7	5,2	16,5	0,0	13,0	8,0
Glühverlust V_{gl}	[%]	6,2	4,7	3,8	2,5	2,9	3,7	4,5
Wasseraufnahme- vermögen w_a (1h-Wert)	[%]	75,8	247,1	64,6	70,3	80,7	57,2	62,7
Wasseraufnahme- vermögen w_a (6h-Wert)	[%]	81,3	279,2	69,7	72,5	86,0	59,1	69,0
* TS = Trockensiebung; NS = Nasssiebung; SS = Siebung und Sedimentation								

Tab. 6.2: Übersicht der Kennwerte

Die Ergebnisse der Mineralanalysen sind nachfolgend in Tab. 6.3 für die Gesamtgesteinsanalyse und in Tab. 6.4 für die Tonmineralanalyse der Fraktion < 2 μm dargestellt. Da bei der Analyse der Gesamtfraktion mit Hilfe der Pulverdiffraktometrie zahlreiche andere Minerale vorkommen, die starke Reflexe im Vergleich zu den Schichtsilikaten abgeben können, kann die Art und Menge der einzelnen Tonmineralien abgeschwächt werden. Bei der Tonmineralanalyse wird die Tonfraktion derart angereichert, dass die Tonminerale besser hervortreten können. Diese Analyse ist daher hinsichtlich vorhandener Tonminerale genauer.

Hinweise auf quellfähige Eigenschaften geben zum einen Smektit-Tonminerale als auch Illit/Smektit-Wechselagerungen. Bei Betrachtung der genaueren Tonmineralanalyse sind quellfähige Smektit-Tonminerale beispielsweise zu 100 % im Bentonit vorhanden sowie zu 80 % im Emscher Mergel. Allerdings ist zu beachten, dass der Bentonit zu fast 100 % aus Feinanteilen besteht, während der Emscher Mergel nach einer Sedimentationsanalyse zu ca. 45 % aus Feinkornanteilen besteht. Analog verhält es sich mit dem dunkelroten Mergel, denn von den weniger als 15 % Feinkornanteil (siehe Bild 6.3) bestehen nur 20 % aus dem quellfähigen Smektit.

Daher kann der dunkelrote Mergel als Vertreter eines nicht tonquellfähigen Bodens angenommen werden. Osmotischen Quellen kann dennoch möglich sein, weswegen dieser Boden zusätzlich ausgewählt wurde.

Als potentielle quellfähige Böden wurden für die Quelluntersuchungen zudem der tertiäre Ton mit 29 % Smektit (Tab. 6.4) sowie Opalinustonstein und Feuerletten-Zersatz, die als einzige Vertreter von Illit/Smektit-Wechselagerungen hervortreten, ausgewählt.

	Opalinustonstein	Bentonit	dunkelroter Mergel	Emscher Mergel	Feuerletten-Zersatz	Tertiärer Ton	Tonmergestein
Quarz	13	5	12	50	49	28	12
Feldspat	5	-	10	-	16	4	14
Kalzit	17	-	5	18	Spuren	11	-
Dolomit	1	-	6	-	-	5	10
Illit	29	11	46	30	34	34	24
Illit/Smektit	7	-	-	-	-	-	4
Smektit	-	84	6	-	-	14	2
Chlorit	8	-	10	-	-	4	4
Kaolinit	17	-	3	-	-	-	3
Gips	1	-	-	-	-	-	25
Bassanit	2	-	-	-	-	-	2
Pyrit	1	-	-	1	-	-	-
Hornblende	1	-	-	-	-	-	-
Hämatit	-	-	2	-	1	-	-
Siderit	-	-	-	1	-	-	-

Tab. 6.3: Übersicht der Mineralanalyse an der Gesamtprobe (Gew.-%)

	Opalinustonstein	Bentonit	dunkelroter Mergel	Emscher Mergel	Feuerletten-Zersatz	Tertiärer Ton	Tonmergestein
Illit	19	-	73	18	52	39	52
Illit/Smektit	63	-	-	-	48	-	-
Smektit	-	100	20	80	-	29	7
Kaolinit	12	-	7	2	-	10	6
Chlorit	6	-	-	-	-	21	35

Tab. 6.4: Übersicht der Tonmineralanalyse, Fraktion < 2 µm (Gew.-%)

6.3 Erkennen und Klassifizieren der Veränderlichkeit

6.3.1 Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel

Die Ergebnisse der durchgeführten Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel (TBW) für vier der fünf neuen Böden sind nachfolgend dargestellt. Der Feuerletten-Zersatz war, wie bereits in Kapitel 4.6 beschrieben, so stark zerfallen, dass keine Bruchstücke entnommen werden konnten. Die Untersuchungen am tertiären Ton und Tonmergelstein sind im Bericht nach MÖLLER und HEYER (2014) enthalten

Um den verfestigenden Einfluss bei hohen Temperaturen zu erfassen, wurden sowohl Versuche bei 105°C als auch bei 50°C durchgeführt. Je nach verfügbarer Anzahl an Bruchstücken wurden jeweils zwei bis drei Vergleichsversuche durchgeführt. Die Bilder der TBW sind in den Anlagen B.A sowie exemplarisch in Tab. 6.6 dargestellt. Die Beurteilung des Zerfalls nach dem Jar-Slake-Test nach SANTI (2006) erfolgte nach zwei TBW. Für die vier Böden ist diese Beurteilung in Tab. 6.5 zusammengefasst.

Bodenart	Zerfallstyp nach SANTI (Beurteilung nach 2 TBW)
Opalinustonstein	2 – Bröckchenzerfall (teilweise 3 – Abblätterung)
Bentonit	1 – Auflösung
dunkelroter Mergel	1 – Auflösung, 2 – Bröckchenzerfall, 6 – keine Veränderung
Emscher Mergel	4 – Brockenbildung


Tab. 6.5: Beurteilung des Zerfalls nach SANTI (2006)

Eindeutige Zerfalleigenschaften nach zwei TBW zeigten der Opalinustonstein (Bild 6.8) und der Bentonit (Bild 6.9). Beim Opalinustonstein hatte überwiegend Bröckchenzerfall (Zerfallstyp 2) stattgefunden. Da teilweise noch die Kontur des Bruchstückes erkennbar war, kann der Zerfall auch im Übergang

zum Zerfallstyp 3 (Abblätterung) beschrieben werden. Insgesamt war bei allen Versuchen des Opalinustonstein aber ein schneller Zerfall erkennbar. Der Bentonit als quellfähiger Ton war wie erwartet nach zwei TBW in seine feinkörnigen Bestandteile aufgeweicht. Bei diesen beiden Proben fiel im Vergleich zu ihrem Zerfall die Reaktion auf die erste Wasserzugabe vergleichsweise sehr gering aus. Es bildeten sich hier zum einen nur kleine bis schwach erkennbare Risse. Zum anderen kam es zu einem leichten Ablösen oberflächlich anhaftender Anteile im Sand- und Feinkornbereich.

Als Vertreter veränderlich fester Gesteine sollten auch der dunkelrote Mergel und Emscher Mergel gelten, wobei die Reaktionen an den Bruchstücken keine eindeutigen Reaktionen für derartige Gesteine widerspiegeln. Der dunkelrote Mergel zeigte sehr unterschiedliche Reaktionen von schneller Auflösung bis hin zu keiner Veränderung (Bild 6.10). Beim Emscher Mergel (Bild 6.11) fand teilweise eine Brockenbildung statt. Unter der Betrachtung, dass teilweise lediglich oberflächlich lose anhaftende Anteile gelöst wurden, könnte man tendenziell auch den Zerfallstyp 6 in Betracht ziehen. Dies resultiert auch daraus, dass die Reaktionen bei den Bruchstücken des Emscher Mergels im Vergleich zu einem Opalinustonstein als eindeutigen Vertreter veränderlich fester Gesteine kaum vorhanden sind.

Besondere oder eindeutige Unterschiede zwischen den Trocknungstemperaturen 50°C und 105°C wurden beim Opalinustonstein, Bentonit und dunkelroten Mergel nicht festgestellt. Die Unterschiede v.a. im ersten Zyklus sind hier auf die Heterogenität der Probenstücke zurück zu führen, denn bereits ab dem zweiten Zyklus näherten sich die Versuche einem ähnlichen Zerfall an. Dagegen zeigte sich beim Emscher Mergel die Tendenz, dass höhere Temperaturen ggf. eine verfestigende Wirkung haben, und daher der Zerfall langsamer abläuft. Da jedoch keine weiteren Bruchstücke zur Verfügung standen, konnte dies nicht eindeutig belegt werden.

		
Opalinustonstein, 105°-02	nach 1.W	nach 2.T
		
Bentonit, 50°-03	nach 1.W	nach 2.T
		
Dunkelroter Mergel, 50°-01	nach 1.W	nach 2.T
		
Dunkelroter Mergel, 105°-01	nach 1.W	nach 2.T
		
Emscher Mergel, 105°-01	nach 1.W	nach 2.T

Tab. 6.6: beispielhafte Bilder TBW

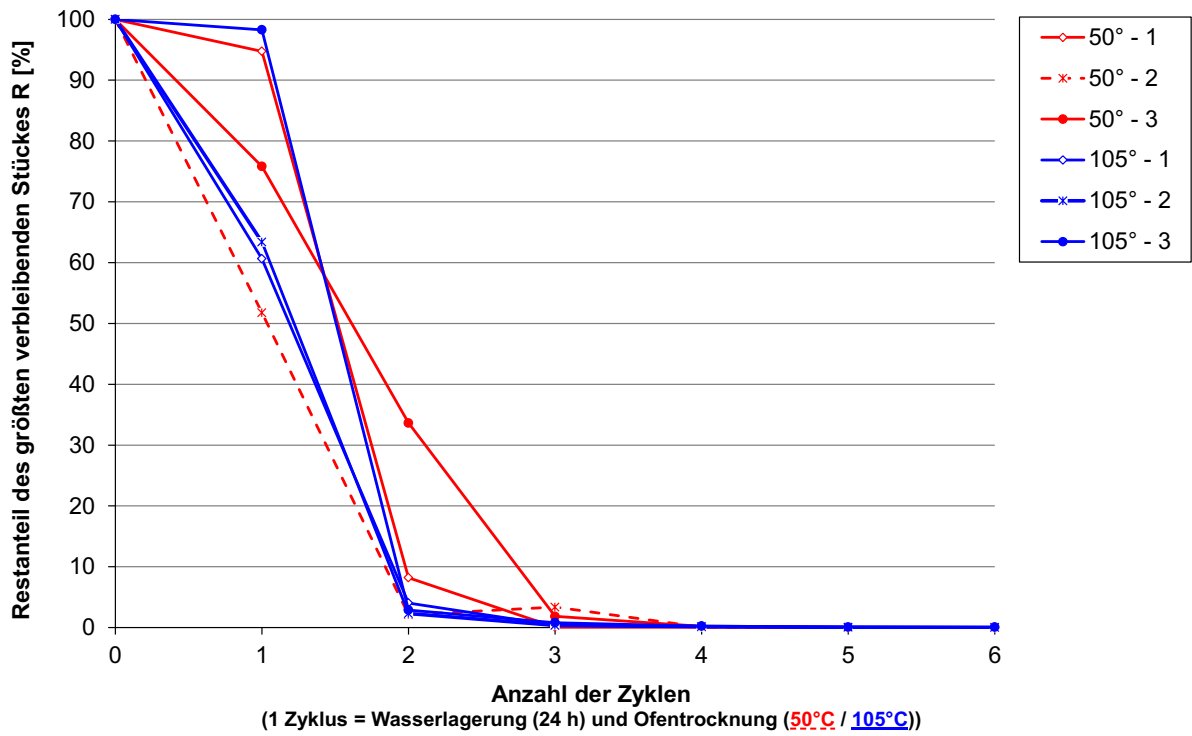


Bild 6.8: Vergleich TBW Opalinustonstein anhand des größten Reststückes

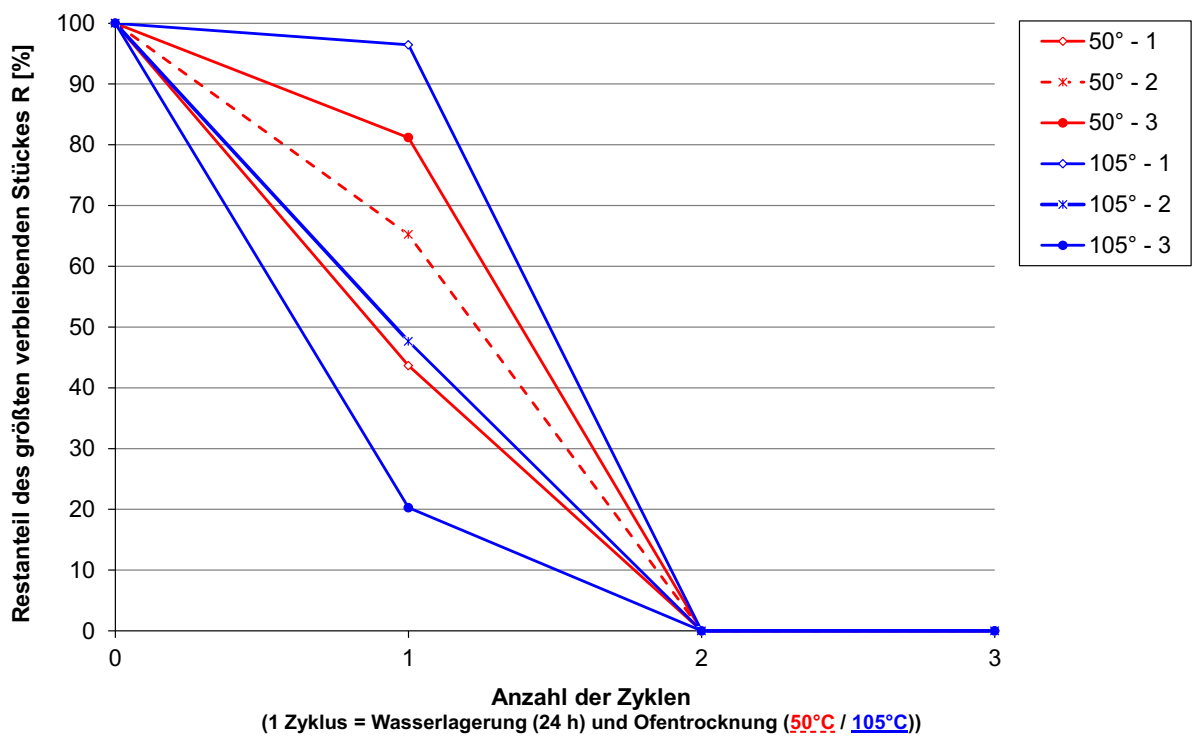


Bild 6.9: Vergleich TBW Bentonit anhand des größten Reststückes

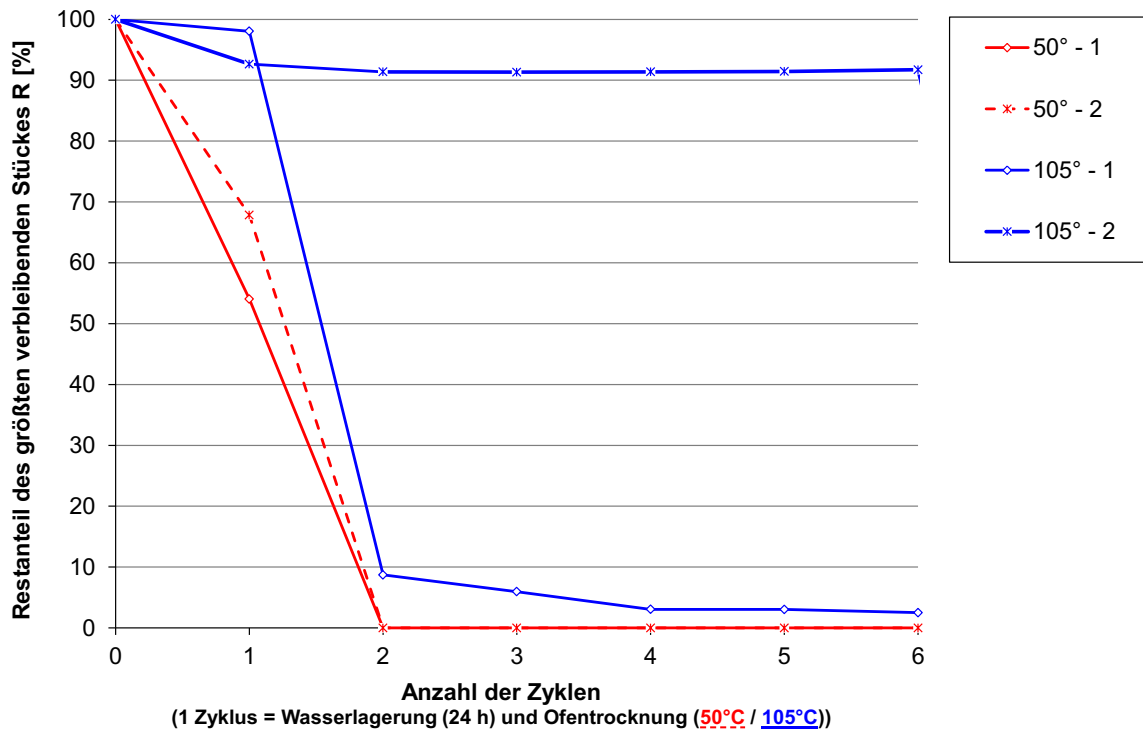


Bild 6.10: Vergleich TBW dunkelroter Mergel anhand des größten Reststückes

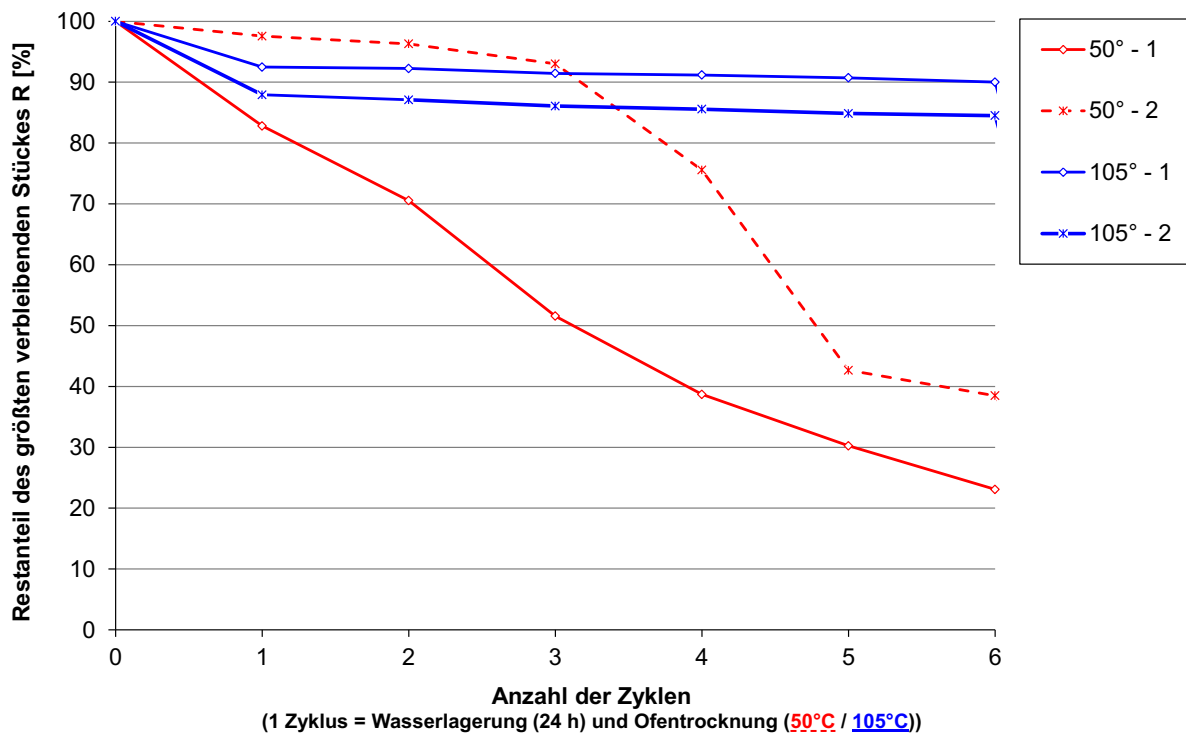


Bild 6.11: Vergleich TBW Emscher Mergel anhand des größten Reststückes

6.3.2 Siebtrommelversuche

Die Ergebnisse der Siebtrommelversuche für die drei neuen Böden Opalinustonstein (Bild 6.13), dunkelroter Mergel (Bild 6.14) und Emscher Mergel (Bild 6.15) sind zusammengefasst in Bild 6.12 dargestellt. Hier sind auch die Ergebnisse vom tertiären Ton und Tonmergelstein ohne Gips (V3, V4) aus dem Bericht von MÖLLER und HEYER (2014) dargestellt. Die Beurteilung der Veränderlichkeit erfolgte für den Zerfallsbeständigkeitsindex I_{d2} nach dem zweiten Zyklus (siehe Tab. 6.7).

Bodenart	I_{d2}	Bezeichnung
Opalinustonstein – V1	45,7	niedrig
Opalinustonstein – V2	37,1	niedrig
dunkelroter Mergel - V1	25,1	sehr niedrig
dunkelroter Mergel – V2	17,1	sehr niedrig
Emscher Mergel - V1	71,3	mittel
Emscher Mergel – V2	73,4	mittel
Tonmergelstein – V3	48,6	niedrig
Tonmergelstein – V4	44,7	niedrig
Tertiärer Ton	7,2	sehr niedrig

Tab. 6.7: Zerfallsbeständigkeitsindex I_{d2}

Da in den TBW keine besonderen Unterschiede zwischen den Trocknungstemperaturen von 50°C und 105°C festgestellt wurde, wurde die Trocknung bei 105°C ausgeführt.

Der schnelle Zerfall des Opalinustonstein, der bereits bei den TBW festgestellt wurde, zeigte sich auch bei den Siebtrommelversuchen. Ebenso lässt sich anhand der Ergebnisse erkennen, dass der dunkelrote Mergel und Emscher Mergel keine eindeutigen klassischen Vertreter veränderlich fester Gesteine sind. Der dunkelrote Mergel ist bereits nach dem ersten Zyklus zum großen Teil zerfallen bzw. eher durch die Reaktionen der Wassereinwirkung aufgeweicht, dass sich auch bei den TBW erkennen lässt. Kiesgroße Bruchstücke reagieren im weiteren Verlauf nur noch auf den mechanischen Abrieb infolge Rotation der Siebtrommel und zerfallen aber nicht in Sinne eines veränderlich festen Gesteins. Diese Nicht-Veränderlichkeit zeigt sich auch bei den TBW anhand der verwitterungsresistenten Bruchstücke. Ein Zerfall, der tendenziell eher durch mechanischen Abrieb sowie Aufweichen oberflächlich lose anhaftender Anteile bewirkt wird als durch eine veränderliche Eigenschaft, zeigt sich auch unter Berücksichtigung der TBW bei den Siebtrommelversuchen am Emscher Mergel.

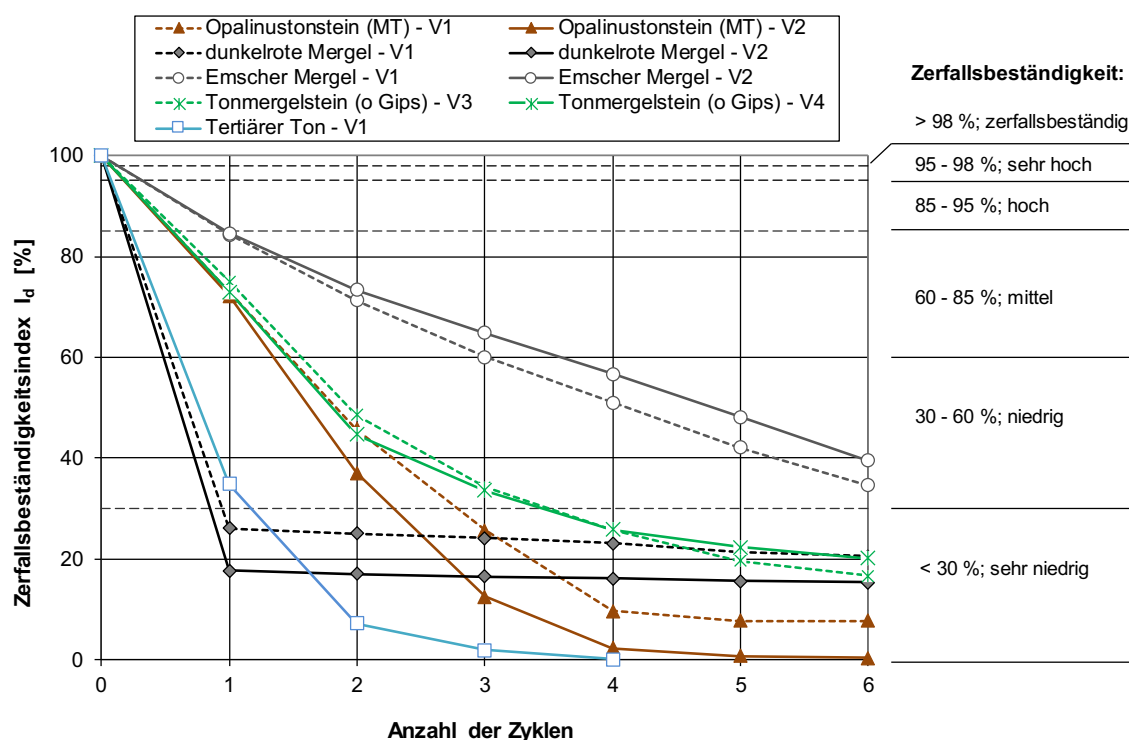


Bild 6.12: Zusammenfassung Ergebnisse Siebtrommelversuche (Opalinustonstein, dunkelrote Mergel, Emscher Mergel)

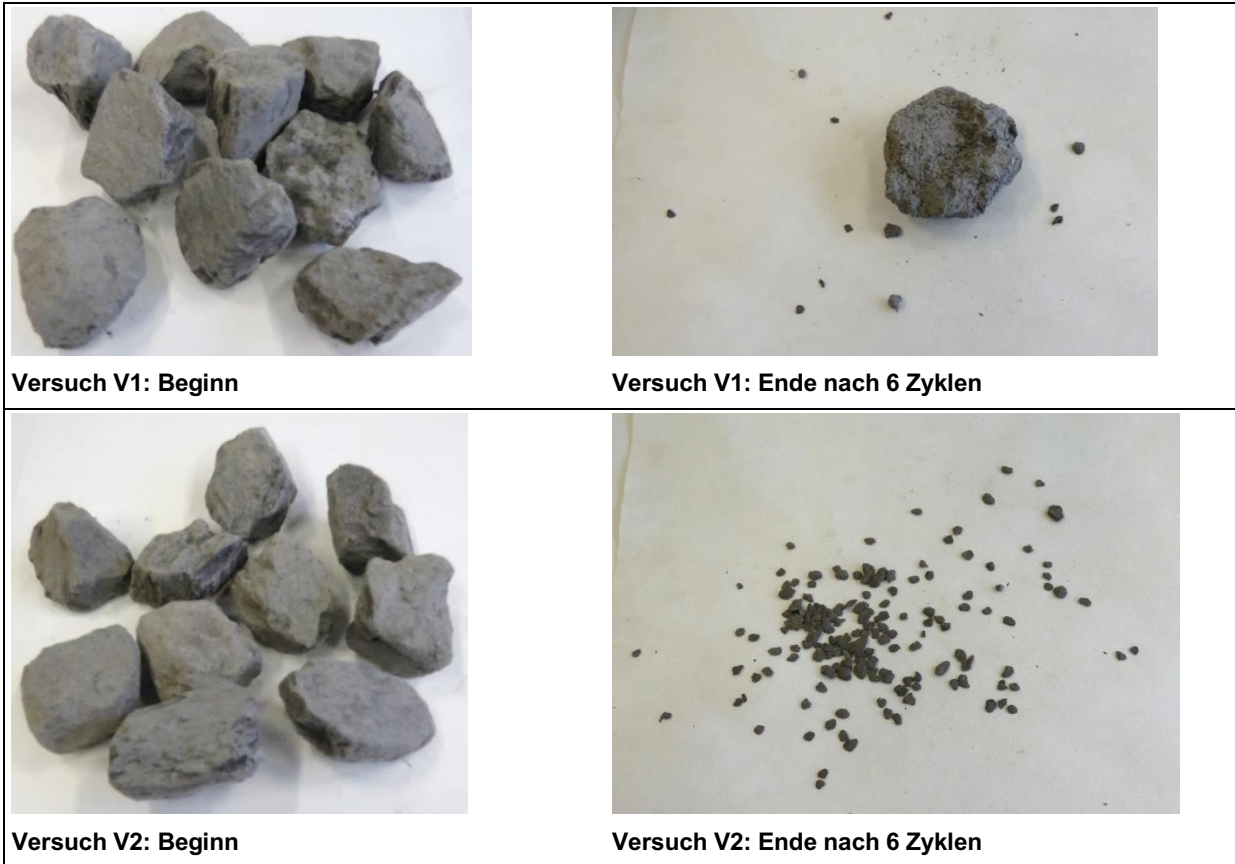


Bild 6.13: Opalinustonstein, Bilder Siebtrommelversuche V1 und V2

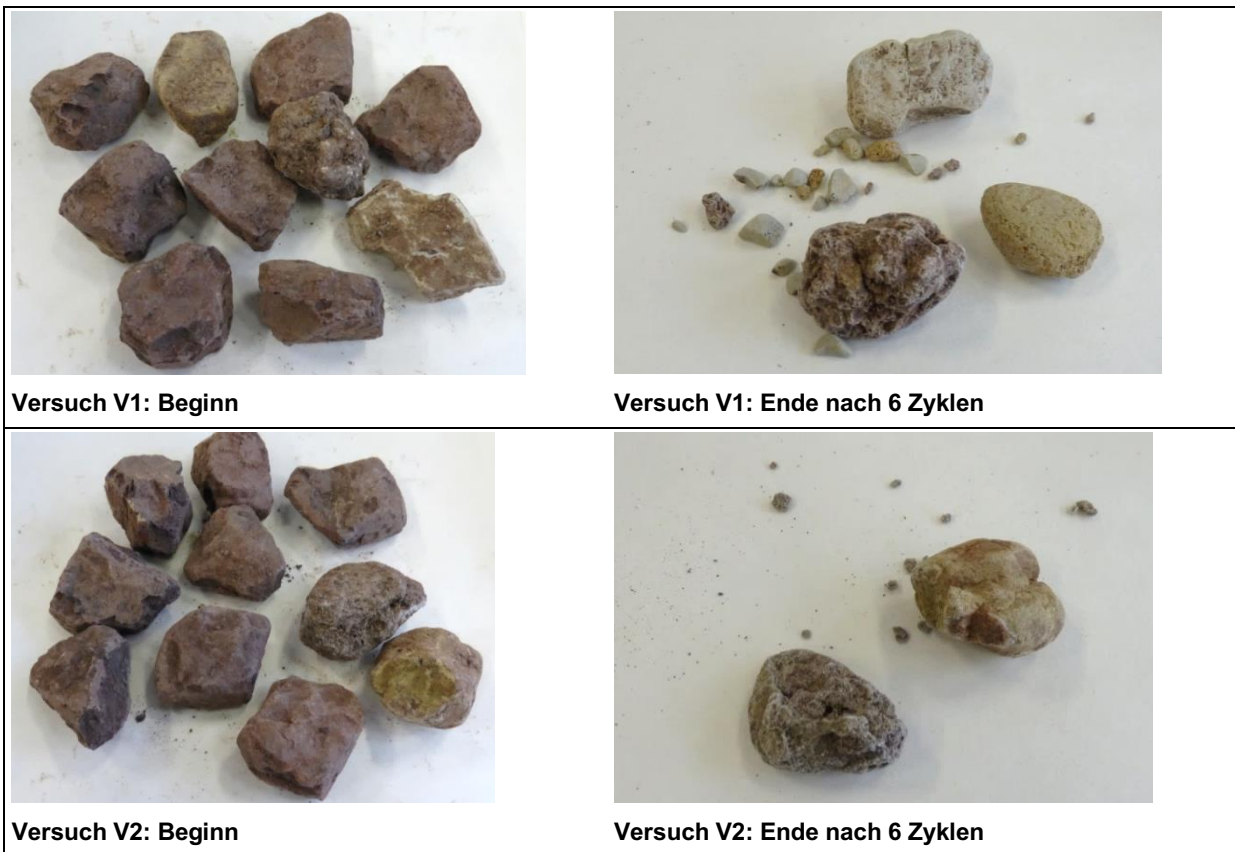


Bild 6.14: dunkelroter Mergel, Bilder Siebtrommelversuche V1 und V2

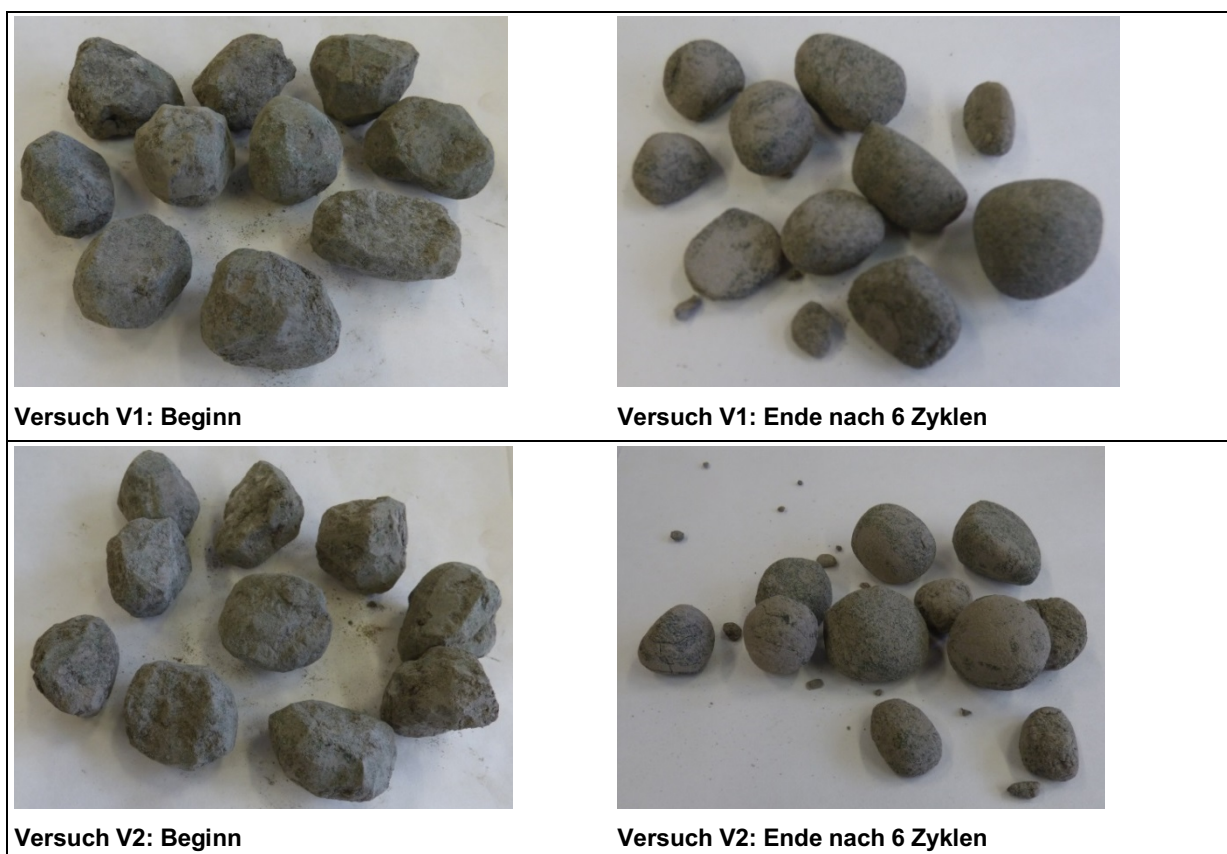


Bild 6.15: Emscher Mergel, Bilder Siebtrommelversuche V1 und V2

6.3.3 Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche nach NICKMANN

Die Ergebnisse der Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche TBV nach NICKMANN (2009) sind nachfolgend bzw. ausführlich in Anlage B.B dargestellt. Die Auswertung nach dem Veränderlichkeitsindex I_v und der Veränderlichkeitsklasse VK nach NICKMANN (2009) ist in Tab. 6.8 aufgelistet. Die Auswertung anhand des größten Reststückes ist in Bild 6.16 dargestellt.

Die schnelle Zerfallsneigung des Opalinustonstein lässt sich auch hier bestätigen. Eine zuverlässige Beurteilung für den dunkelroten Mergel sowie Emscher Mergel ist aufgrund eines Versuches nicht möglich. Die für diese Versuchsmethode erforderliche Größe der Bruchstücke wurde nur für jeweils

ein Bruchstück erreicht, da beide Gesteinsarten bereits stark zu einem Boden zersetzt waren. Darüber hinaus wurde die Heterogenität beim dunkelroten Mergel bereits bei den TBW festgestellt.

Bodenart	I_v	VK	Bezeichnung „veränderlich“
Opalinustonstein-V1	4,5	5	unmittelbar, sehr stark
Opalinustonstein-V2	5,6		
dunkelroter Mergel	107,9	3	mäßig schnell
Emscher Mergel	59,0	4	schnell, stark

Tab. 6.8: Veränderlichkeitsindex I_v und Veränderlichkeitsklasse VK nach NICKMANN (2009)

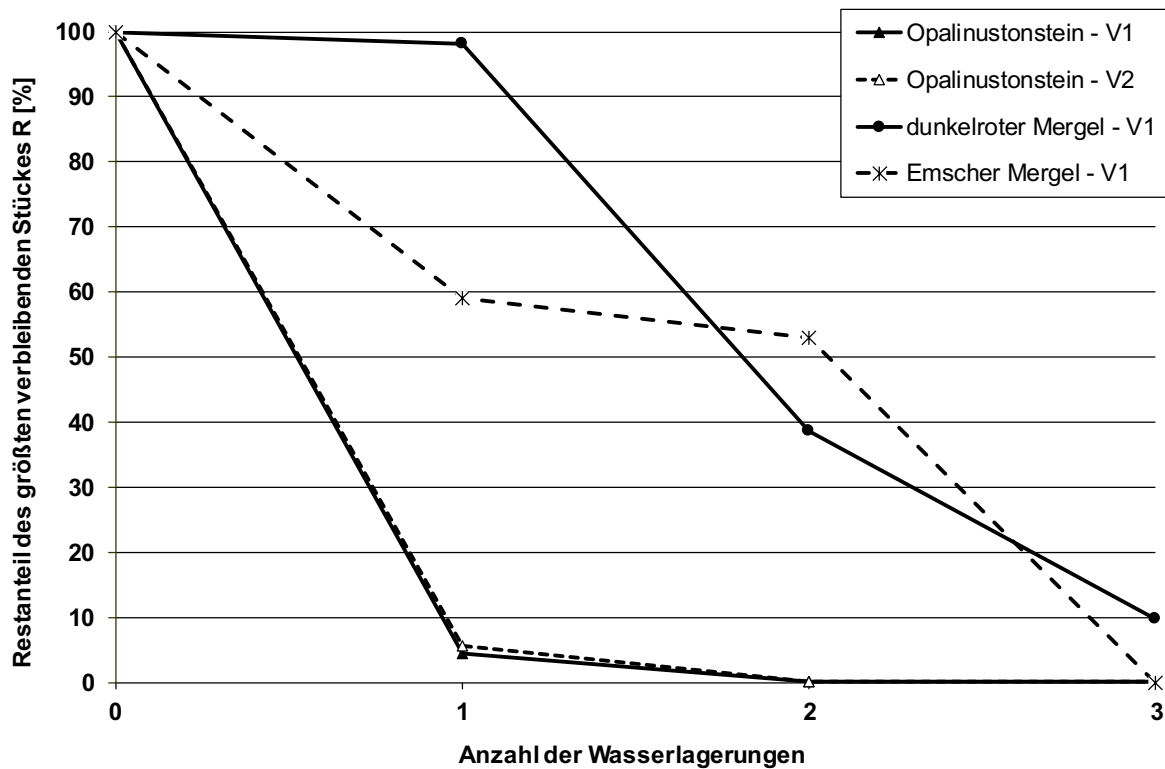


Bild 6.16: Auswertung TBV nach NICKMANN anhand des größten Reststückes

6.4 Versuche zur Verdichtbarkeit

Für die Quelluntersuchungen an den sechs Böden wurden zunächst Proctorversuche durchgeführt, um die beiden Einbaustände (Proctoroptimum und Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 97\%$ auf der trockenen Seite des Proctoroptimums) festzulegen. Zudem sollten die Quellversuche für unterschiedliche Verwitterungszustände VZ durchgeführt werden, weshalb eine künstliche Verwitterung der Versuchsmaterialien im Labor erforderlich war. Zur Festlegung der Verwitterungszustände wurde der Zerfallsverlauf gemäß Kapitel 5.4 durchgeführt. Für jeden der ermittelten Verwitterungszustände wurden anschließend Proctorversuche nach DIN 18127 mit einfacher Proctorenergie mit einem Größtkorn von 31,5 mm durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung wurde i. d. R. bei allen Materialien Wasser zum Einstellen des Wassergehaltes zugegeben. Erst nach ausreichender Homogenisierungszeit von 24 h wurde mit dem Verdichtungsversuch begonnen.

Die Ergebnisse der mit Nasssiebungen kombinierten Verwitterungsversuche zur Ermittlung des Zerfallsverlaufs sowie Verwitterungszustände sind nachfolgend in Bild 6.17 bis Bild 6.21 dargestellt.

Für die Quelluntersuchungen wurden die sechs Böden Opalinustonstein, Tonmergelstein, dunkelroter Mergel, tertiärer Ton, Feuerletten-Zersatz und Bentonit ausgewählt. Die Ergebnisse der mit Nasssiebungen kombinierten Verwitterungsversuche zur Ermittlung des Zerfallsverlaufs sowie der Verwitterungszustände VZ 3 und VZ 4 sind für die Böden in Bild 6.17 bis Bild 6.21 dargestellt. Da der Bentonit als reiner Ton nach einer Trocknung und anschließender Wasserzugabe sofort vollständig aufweicht und quillt, ist die Ermittlung des Zerfallsverlaufs hier nicht weiter erforderlich.

Die Proctorkurven je Verwitterungszustand sind anschließend in Bild 6.22 bis Bild 6.26 dargestellt. Dabei sind die Untersuchungsbereiche für die neuen Böden (Opalinustonstein, dunkelroter Mergel, Feuerletten-Zersatz) in den Diagrammen mit fortlaufenden römischen Ziffern angegeben. Die Nummerierung beim tertiären Ton und Tonmergelstein wurde

an den Bericht von MÖLLER und HEYER (2014) angepasst und entsprechend fortgeführt. Die vorgegebenen Sollwerte der Einbauzustände (Proctroptimum und Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 97\%$ auf der trockenen Seite des Proctroptimums) bzw. im Folgenden als Untersuchungsbereiche UB genannt, sind in Tab. 6.9 bis Tab. 6.13 aufgelistet. Dabei ist anzumerken, dass sich die einzelnen Verdichtungsgrade auf die Proctordichte der jeweiligen Proctorkurve beziehen.

Beim tertiären Ton entspricht der Verwitterungszustand VZ 4 nach 1 TBW dem VZ 2 aus dem Bericht von MÖLLER und HEYER (2014). Beim Feuerletten-Zersatz sowie dem dunkelroten Mergel sind bereits nach 2 TBW ca. 90 % zerfallen, so dass der Verwitterungszustand nach 1 TBW als nicht sinnvoll

angesehen wurde. Beim Tonmergelstein ist vergleichend die Proctorkurve für VZ 2 nach 1 TBW dargestellt, auch wenn hier im Rahmen der Untersuchungen nach MÖLLER und HEYER (2014) nur Kompressionsversuche und keine Quellversuche durchgeführt wurden.

Die Ermittlung einer Proctorkurve für den Bentonit ist aufgrund seiner brockenartigen Ausgangsstruktur nicht zielführend, so dass für die Quellversuche zum einen ein frischer Bentonit mit den Zielvorgaben einer Proctordichte von ca. $1,0 \text{ g/cm}^3$ und einem Proctorwassergehalt zwischen Ausrollgrenze und Ausgangswassergehalt von ca. 54 % bis 56 % verwendet wurde. Zum anderen wurde vergleichend ein bei 50°C vollständig getrockneter und pulverisierter Bentonit mit einer Ziel-Proctordichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ untersucht.

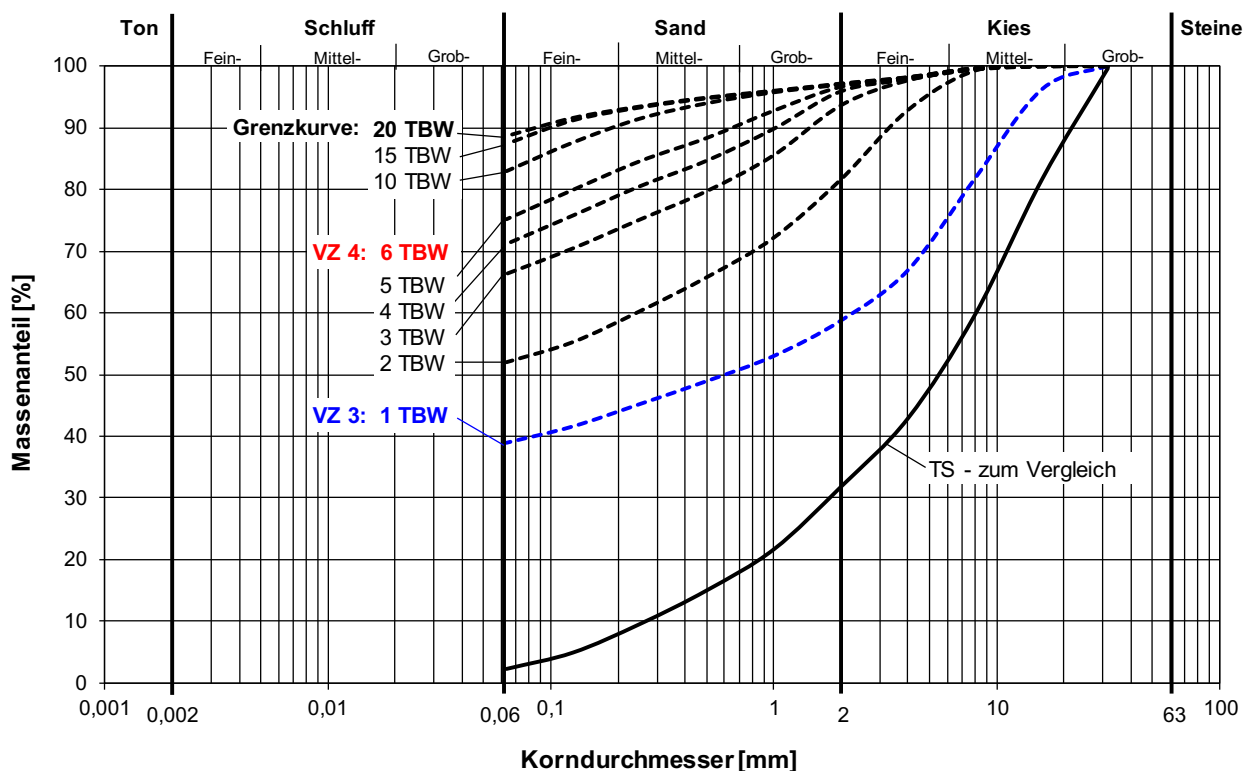


Bild 6.17: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung der Verwitterungszustände VZ 3 und VZ 4, Opalinustonstein

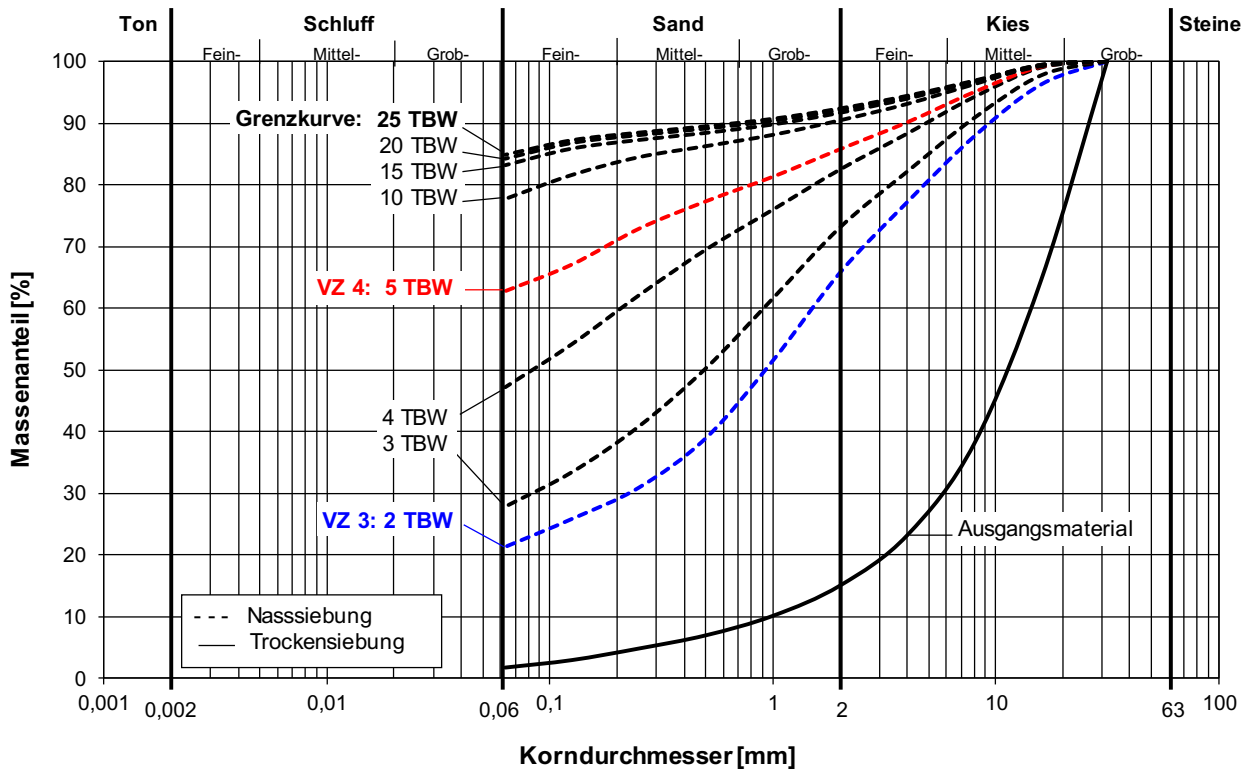


Bild 6.18: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung der Verwitterungszustände VZ 3 und VZ 4, Tonmergelstein

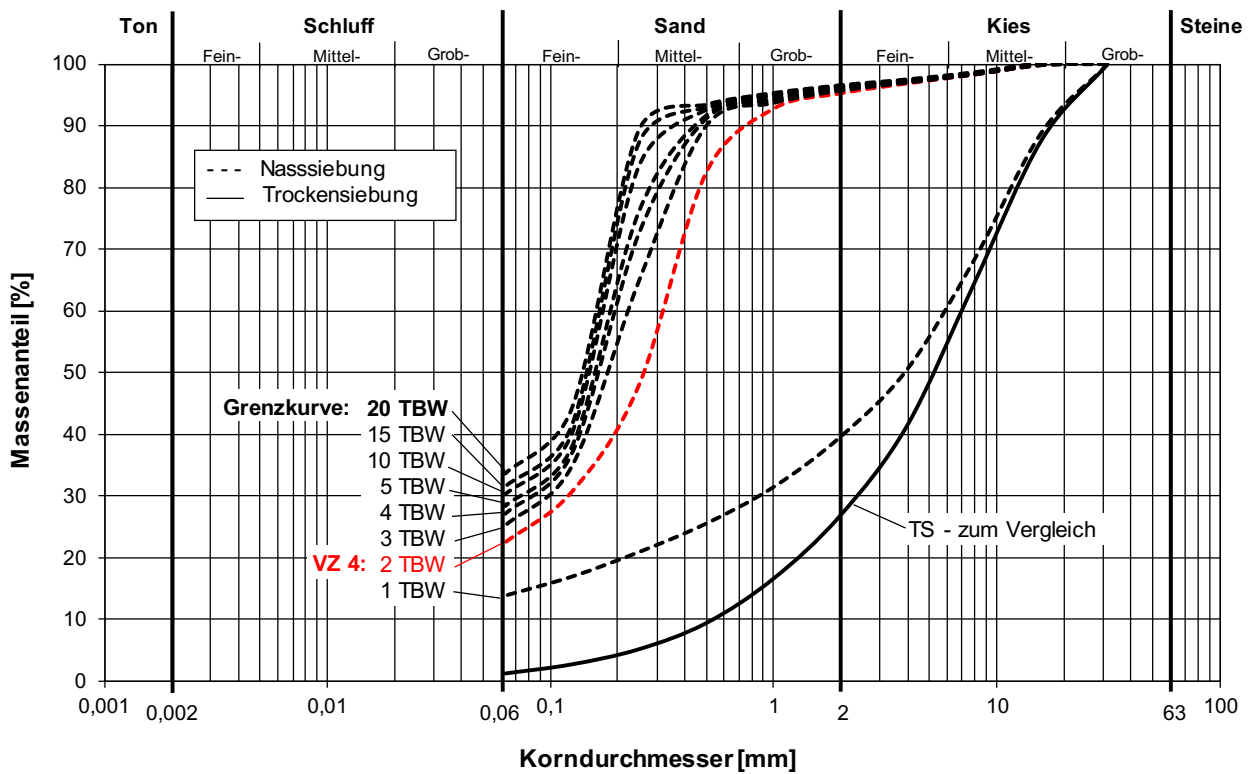


Bild 6.19: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung des Verwitterungszustandes VZ 4, dunkelroter Mergel

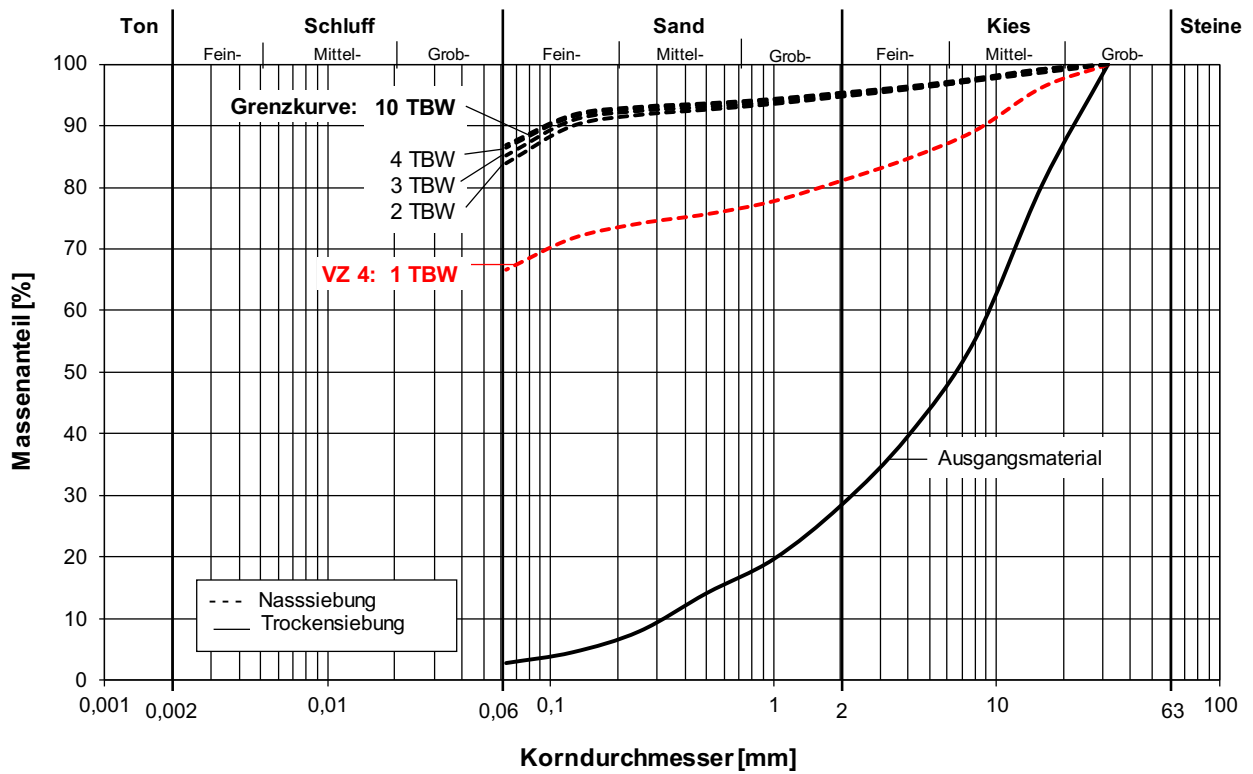


Bild 6.20: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung des Verwitterungszustandes VZ 4, tertiärer Ton

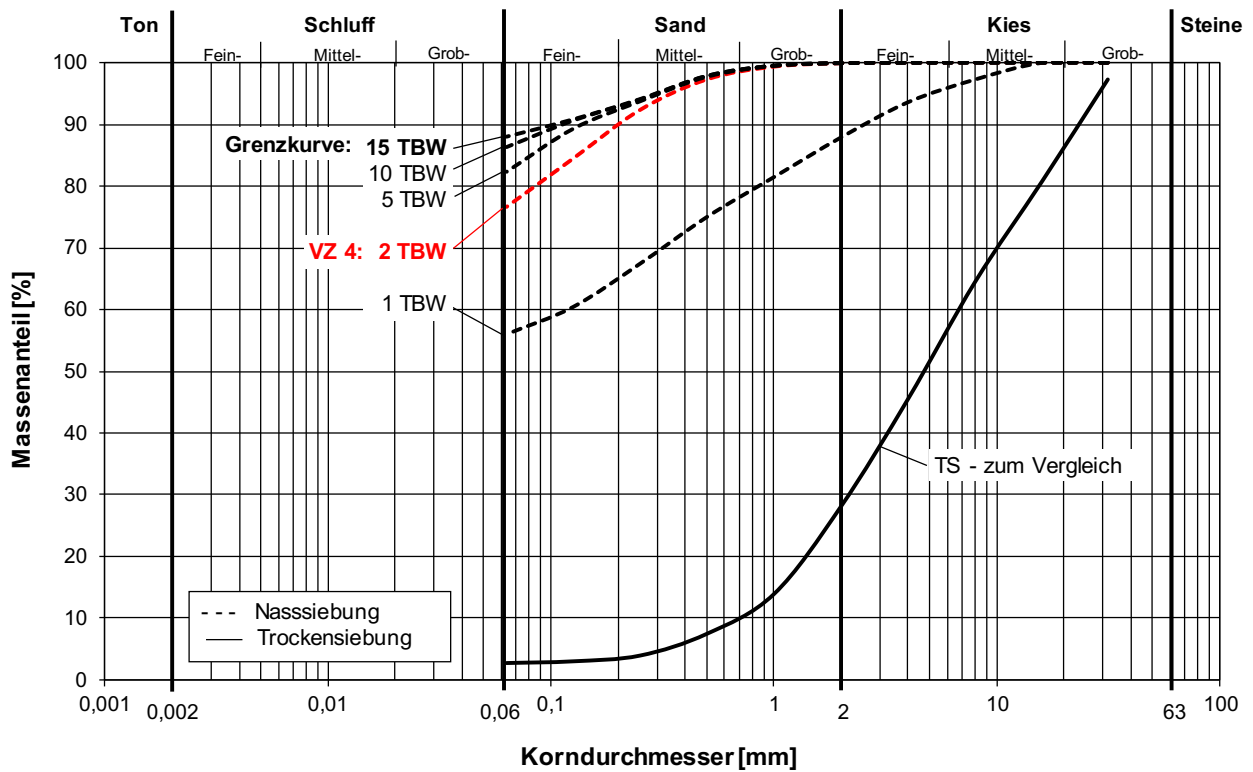


Bild 6.21: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung des Verwitterungszustandes VZ 4, Feuerleiten-Zersatz

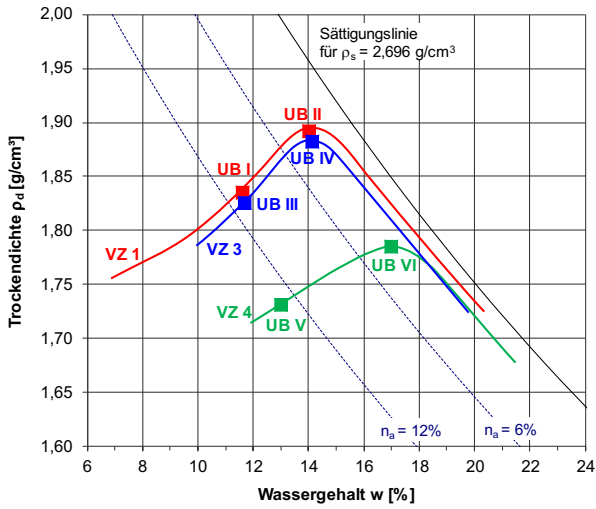


Bild 6.22: Proctorkurven Opalinustonstein (VZ 1, VZ 3, VZ 4)

Untersuchungsbereich	Verdichtungsgrad	Verwitterungszustand	Sollwerte	
			w	ρd
[Nr.]	[%]	[-]	[%]	[g/cm³]
I	97	VZ 1	11,6	1,835
II	100	VZ 1	14,0	1,892
III	97	VZ 3	11,7	1,826
IV	100	VZ 3	14,1	1,882
V	97	VZ 4	13,0	1,731
VI	100	VZ 4	17,0	1,785

Tab. 6.9: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den Opalinustonstein

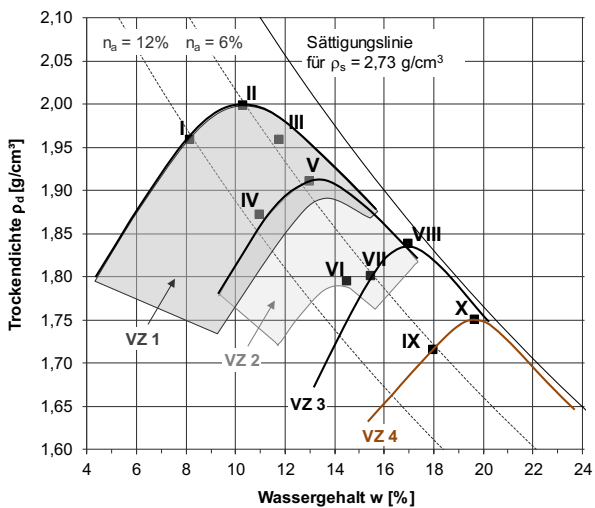


Bild 6.23: Proctorkurven Tonmergelstein (VZ 1, VZ 3, VZ 4)

Untersuchungsbereich	Verdichtungsgrad	Verwitterungszustand	Sollwerte	
			w	ρd
[Nr.]	[%]	[-]	[%]	[g/cm³]
I	98	VZ 1	8,2	1,958
II	100	VZ 1	10,3	1,998
VII	98	VZ 3	15,5	1,801
VII	100	VZ 3	17,0	1,838
IX	98	VZ 4	18,0	1,715
X	100	VZ 4	19,7	1,750

Tab. 6.10: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den Tonmergelstein

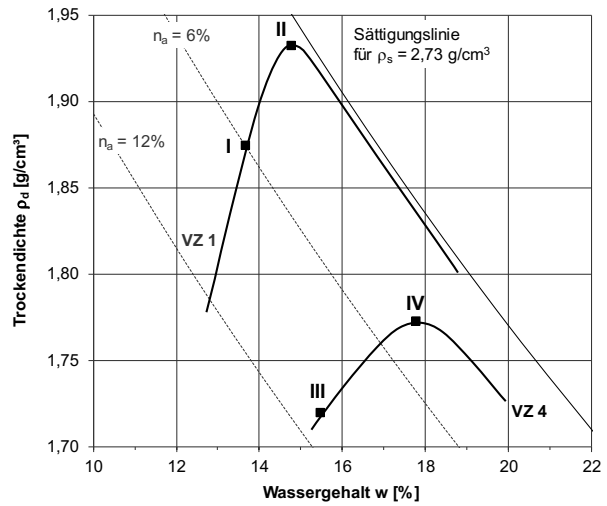


Bild 6.24: Proctorkurve dunkelroter Mergel (VZ 1, VZ 4)

Untersuchungsbereich	Verdichtungsgrad	Verwitterungszustand	Sollwerte	
			w	ρd
[Nr.]	[%]	[-]	[%]	[g/cm³]
I	97	VZ 1	13,7	1,874
II	100	VZ 1	14,8	1,932
III	97	VZ 4	15,5	1,719
IV	100	VZ 4	17,8	1,772

Tab. 6.11: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den dunkelroten Mergel

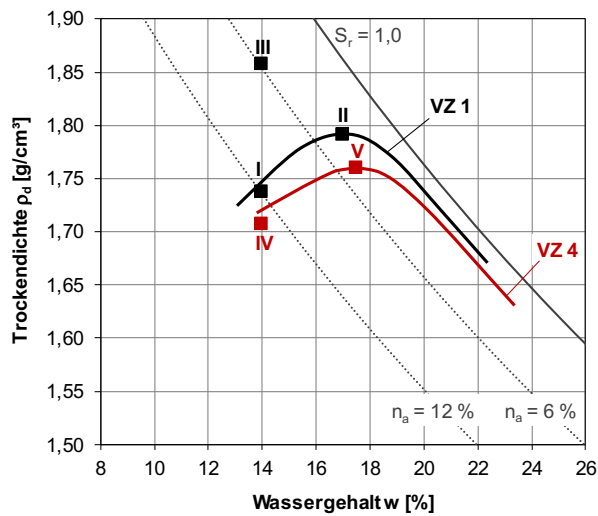


Bild 6.25: Proctorkurve tertiärer Ton (VZ 1, VZ 4)

Untersuchungsbereich	Verdichtungsgrad	Verwitterungszustand	Sollwerte	
			w	ρ _d
[Nr.]	[%]	[-]	[%]	[g/cm ³]
I	97	VZ 1	14,0	1,737
II	100	VZ 1	17,0	1,791
IV	97	VZ 4	14,0	1,707
V	100	VZ 4	17,5	1,760

Tab. 6.12: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den tertiären Ton

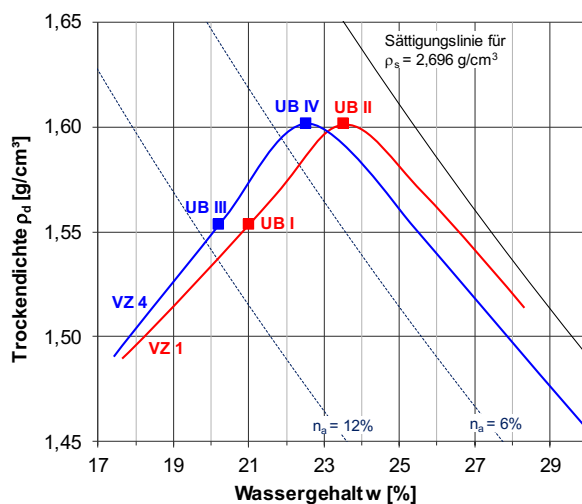


Bild 6.26: Proctorkurve Feuerletten-Zersatz (VZ 1, VZ 4)

Untersuchungsbereich	Verdichtungsgrad	Verwitterungszustand	Sollwerte	
			w	ρ _d
[Nr.]	[%]	[-]	[%]	[g/cm ³]
I	97	VZ 1	21,0	1,554
II	100	VZ 1	23,5	1,602
III	97	VZ 4	20,2	1,554
IV	100	VZ 4	22,5	1,602

Tab. 6.13: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den Feuerletten-Zersatz

Die Ergebnisse der Proctorkurven der einzelnen Verwitterungszustände je Boden sind zusammengefasst in Bild 6.27 dargestellt, wobei je Proctorkurve die beiden Einbauszustände UB I auf der trockenen Seite und UB II im Proctroptimum im Diagramm eingezeichnet sind. Die Abkürzung der Probenbezeichnungen ist in Tab. 6.14 aufgelistet.

Es ist deutlich in Bild 6.27 zu erkennen, dass mit zunehmendem Verwitterungszustand die Proctordichte abnimmt während der Proctorwassergehalt zunimmt. Das Material wird demnach mit zunehmendem Verwitterungszustand feinkörniger. Die in dieser Versuchsreihe obere Grenze eines grobkörnigeren Materials wird durch den Tonmergelstein im VZ 1 bestimmt. Das feinkörnigste Material ist hier der Feuerletten-Zersatz.

Probenbezeichnung	Abkürzung
Opalinustonstein	O-St
Tonmergelstein	TmS
Dunkelroter Mergel	drM
Tertiärer Ton	tT
Feuerletten-Zersatz	Feu

Tab. 6.14: Übersicht Abkürzung der Probenbezeichnung

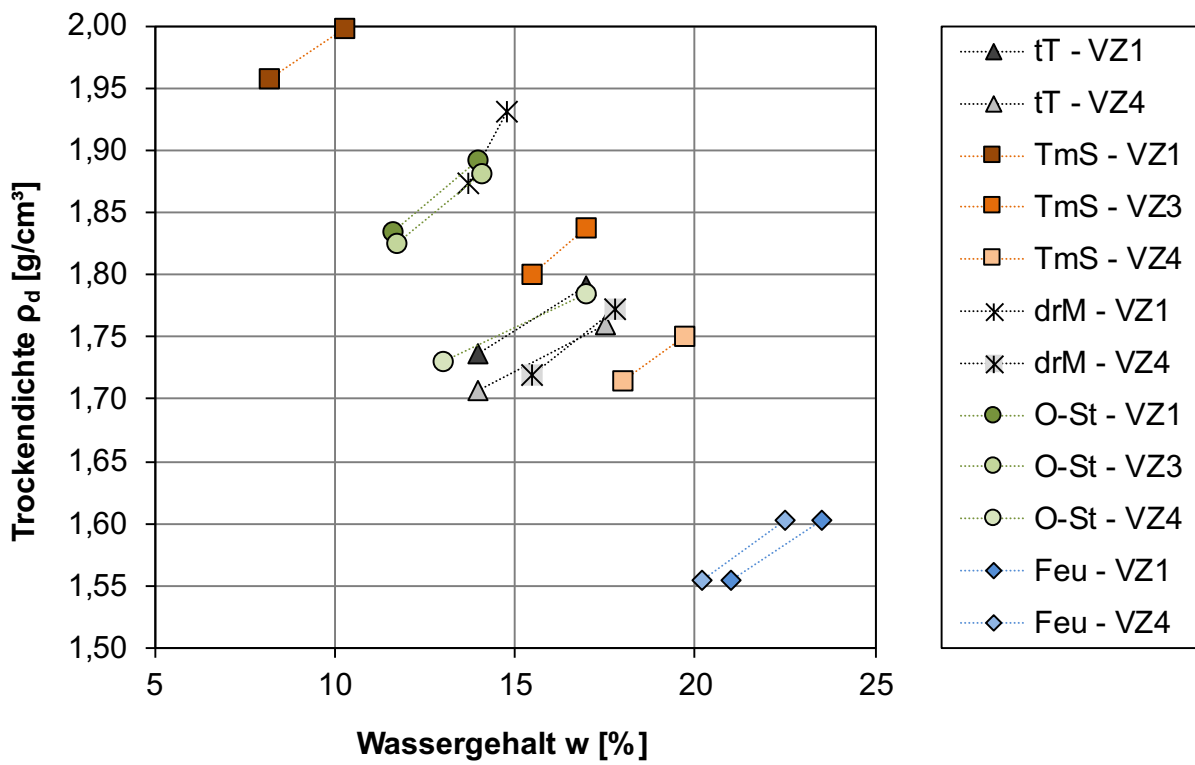


Bild 6.27: Einbaubedingungen gesamt

7 Ergebnisse der Quellversuche

7.1 Allgemeines zur Durchführung und Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Quelluntersuchungen der sechs Böden vorgestellt. Je nach Verwitterungszustand (VZ) und damit verbundener vorliegender Korngröße wurden für die Proben im VZ 1 und VZ 3 kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche in Großödometern ($d = 30$ cm) und für Proben im VZ 4 aufgrund des geringen Größtkorns bzw. demzufolge hohen Feinkornanteils Quellhebungsversuche in Standard-Ödometern ($d = 10$ cm) mit separater Quelldruckentwicklung an Proben mit $d = 7$ cm durchgeführt.

Der Versuchsablauf der kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuche erfolgte an einem Probekörper, da während des Versuchsablaufes von weg- auf lastgesteuert umgestellt werden konnte. Somit konnte sich zunächst ein maximaler Quelldruck im weggesteuerten Versuch einstellen, wobei der Weg konstant gehalten und die Kraft gemessen wurden. Die Wasserzugabe erfolgte zu Beginn. Nach Abschluss der Quelldruckentwicklung erfolgte anschließend der lastgesteuerte Quellhebungsversuch mit Messung des Weges.

Für die erste Entlastungsstufe wurde immer die des maximalen Quelldruckes gewählt. Da in der Regel dann nahezu keine Setzungen aufgetreten sind, wurde die Laststufe nach ca. 1 h bis 2 h beendet. Daher ist diese relativ kurze Laststufe schwer im Kurvenverlauf zu erkennen. Die weiteren Entlastungsstufen ergaben sich anhand des maximalen Quelldrucks, wobei i. d. R. stufenweise auf $1/2$, $1/4$ und ggf. noch auf $1/8$ des maximalen Quelldruckes entlastet wurde.

Die Dauer zur Ermittlung des maximalen Quelldruckes war sehr unterschiedlich. Sofern am oberen Rand der Belastungsplatte Wasser ausgetreten war und keine nennenswerte Zunahme der Spannung mehr zu sehen war, wurde der Versuch beendet, da keine weiteren nennenswerten Wassergehaltsänderungen zu erwarten waren. Wenn zudem im nachfolgenden Quellhebungsversuch unter dieser Last keine Setzungen mehr aufgetreten waren, konnte ebenfalls von einer nahezu vollständigen

Sättigung unter dem entsprechenden Quelldruck ausgegangen werden.

Die Dauer der Quelldruck- sowie Quellhebungsversuche variierte stark abhängig von der Quellentwicklung der Proben. Da sich bei einigen Versuchen eine Zeitdauer von über 100 Tagen ergab, wurden nachfolgende Versuche zeitlich verkürzt und ggf. um eine Laststufe reduziert.

Bei einigen Versuchen war auch nach mehreren Wochen noch kein Wasser am oberen Rand der Belastungsplatte zu sehen und die Spannungen stiegen stetig weiter an, so dass der Versuch schließlich beendet werden musste, sobald eine Zunahme der Spannungen innerhalb von 24 h weniger als ca. 1,0 % betrug. In diesen Fällen war die Sättigung der Probe noch nicht abgeschlossen.

Die Dauer der Entlastungsstufen von mindestens 48 h bis i. d. R. 96 h war in der Regel auch nicht ausreichend. Quellhebungen waren oft noch nicht gänzlich abgeschlossen. Sobald jedoch eine Zunahme der Hebungen innerhalb von 24 h um weniger als 1 % aufgetreten war, wurde der Versuch beendet.

Die Dauer der Entlastungsstufen hatte schließlich Auswirkungen auf die Bestimmung des Quellparameters $K_{z,q}$. Der Quellparameter beschreibt die Steigung der Quellgeraden. Mit zunehmender Entlastung bzw. geringer werdenden Spannungen nimmt die Steigung der Quellgeraden zu bzw. je höher die Quelldehnungen sind umso höher ist der Quellparameter. Zudem steigt mit zunehmender Entlastung die Sättigung der Probe, da durch die geringeren Spannungen mehr Wasser in den Porenraum des Bodens aufgenommen werden kann.

Im logarithmischen Maßstab zeigte sich nicht bei allen Versuchen eine annähernde lineare Abhängigkeit wie nach GROB (1972), was vermutlich auch stark von der Versuchsdauer der Quelldruck- und Quellhebungsversuche abhing. GROB (1972) berücksichtigte nur abgeschlossene Quellhebungen, die jedoch je Entlastungsstufe über Wochen andauern können.

Böden, die bis zum VZ 4, entsprechend ca. 90 % Zerfall, verwittert wurden, besaßen einen hohen Feinkornanteil, so dass sich zeigte, dass die Böden in den Großödometern mit 6 cm Probenhöhe infolge

der geringen Durchlässigkeit bereits mehrere Wochen für die Quelldruckentwicklung und damit verbundenen Sättigung benötigten. Die Ermittlung der Quellparameter im VZ 4 erfolgte daher in Standard-Ödometern mit einem Durchmesser von $d = 10 \text{ cm}$. Da die Regelung der statischen Pressen für kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche in diesem kleinen Kraftbereich immer wieder über- oder unterregelte, mussten standardisierte mechanische Belastungsbänke verwendet werden. Dazu musste an zwei möglichst identischen Proben einerseits der Quelldruck und andererseits die Quelldehnungen ermittelt werden. Da sich diese Versuchsdurchführung von den kombinierten Versuchen unterscheidet, wurden zur Validierung der lastgesteuerten Quellhebungsversuche beim tertiären Ton sowie Feuerletten-Zersatz im VZ 4 auch kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche in den Großödometern durchgeführt.

Für die Darstellung der Ergebnisse werden je Kapitel die Ergebnisse eines Bodens beschrieben und erläutert. Schrittweise werden je Kapitel erst die Einzelergebnisse vorgestellt und anschließend zusammenfassend gegenübergestellt und erläutert. Die Darstellung des Einzelergebnisses je Boden erfolgt anhand der vier folgenden Diagramme: das Quelldruck-Zeit-Diagramm im halblogarithmischen Maßstab, der zeitliche Verlauf der Quelldehnung und Spannung aus dem Quellhebungsversuch, die Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte sowie der Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte. Werteangaben zu den Ergebnissen des Quellhebungsversuches sind zudem in einer Tabelle zusammengefasst.

7.2 Opalinustonstein

7.2.1 Opalinustonstein VZ 1, UB I

Im Folgenden sind die Ergebnisse des kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuches am Opalinustonstein im VZ 1 für den Untersuchungsbereich UB I anhand von vier Diagrammen (Bild 7.1 bis Bild 7.4), wie bereits im Kapitel 7.1 beschrieben, dargestellt: Werteangaben zu den Ergebnissen des Quellhebungsversuches sind in Tab. 7.1 zusammengefasst. Die Einbaubedingungen sind im zusammenfassenden Kapitel 7.2.7 in Tab. 7.8 aufgelistet.

Im ersten Diagramm (Bild 7.1) ist die Quelldruckentwicklung über die Zeit im halblogarithmischen Maßstab erkennbar. Da der Messgeber zwischenzeitlich unbemerkt ausgefallen war, konnte nur ein Zwischenwert des Quelldrucks von $\sigma_{z,E} = 65,5 \text{ kN/m}^2$ nach ca. 11,5 h für den nachfolgenden lastgesteuerten Quellhebungsversuch angenommen werden. Dabei wurden die Quelldehnungen für die Entlastungsstufen $65,5 \text{ kN/m}^2$, $32,8 \text{ kN/m}^2$, $16,4 \text{ kN/m}^2$, $8,2 \text{ kN/m}^2$ und 5 kN/m^2 gemessen (Tab. 7.1). Dass die Quelldruckentwicklung noch nicht abgeschlossen war, zeigte sich im Quellhebungsversuch auch in den auftretenden Verformungen (0,099 %) bei der ersten Entlastungsstufe $65,5 \text{ kN/m}^2$.

Die Quellhebungen einer Entlastungsstufe waren nach 2 d noch nicht abgeschlossen. Auch eine Dauer von 4 d bei der letzten Entlastungsstufe zeigte immer noch relativ stark zunehmende Quelldehnungen. Als Kompromiss wurden für nachfolgende Versuche weniger Laststufen gewählt, um so eine längere Quellzeit zu ermöglichen. Es wurde nach 12 d eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 2,45 \%$ erreicht.

Mit zunehmender Entlastung und damit geringeren Spannungen nehmen die Quelldehnungen zu. Dies zeigte sich in einen linearen Anstieg im logarithmischen Maßstab (siehe Bild 7.3). Die Steigung dieser Quellgeraden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird durch den Quellparameter $K_{z,q}$ beschrieben, der in Bild 7.4 in Abhängigkeit der mittleren Spannung dargestellt ist. Je höher sich die Quelldehnungen einstellen, umso höher ist auch der Quellparameter bzw. umso steiler ist der Verlauf der Quellgeraden. Bei Überschreiten einer Mindestspannung von ca. 10 % des maximalen Quelldruckes geht das behinderte Quellen in ein freies Quellen über. Dies zeigt sich in einer Abnahme der Steigung der Quellgeraden sowie damit in einer Abnahme des Quellparameters. Da das Quellen zeitabhängig ist, sollte daher auch die Auswertung des Quellparameters für entsprechend möglichst gleiche Zeitpunkte gewählt werden. Der Einfluss einer längeren letzten Entlastungsstufe zeigt sich in dem deutlich höheren Quellparameter (Bild 7.4)

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t				t	σ_z		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	2,0	47,9	65,5	1,00	0,059	0,099	-	-
2	4,0	48,0	32,8	0,50	0,389	0,654	49,2	0,0185
3	6,0	48,0	16,4	0,25	0,764	1,284	24,6	0,0209
4	8,0	48,0	8,2	0,13	1,139	1,914	12,3	0,0209
5	10,0	48,0	5,0	0,08	1,387	2,331	6,6	0,0194
								$\varnothing_{48h} = 0,0199$
5	12,0	96,0	5,0	0,08	1,457	2,449	6,6	0,0249
*LS = Laststufe								$\varnothing_{Ende} = 0,0213$

Tab. 7.1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 1, UB I

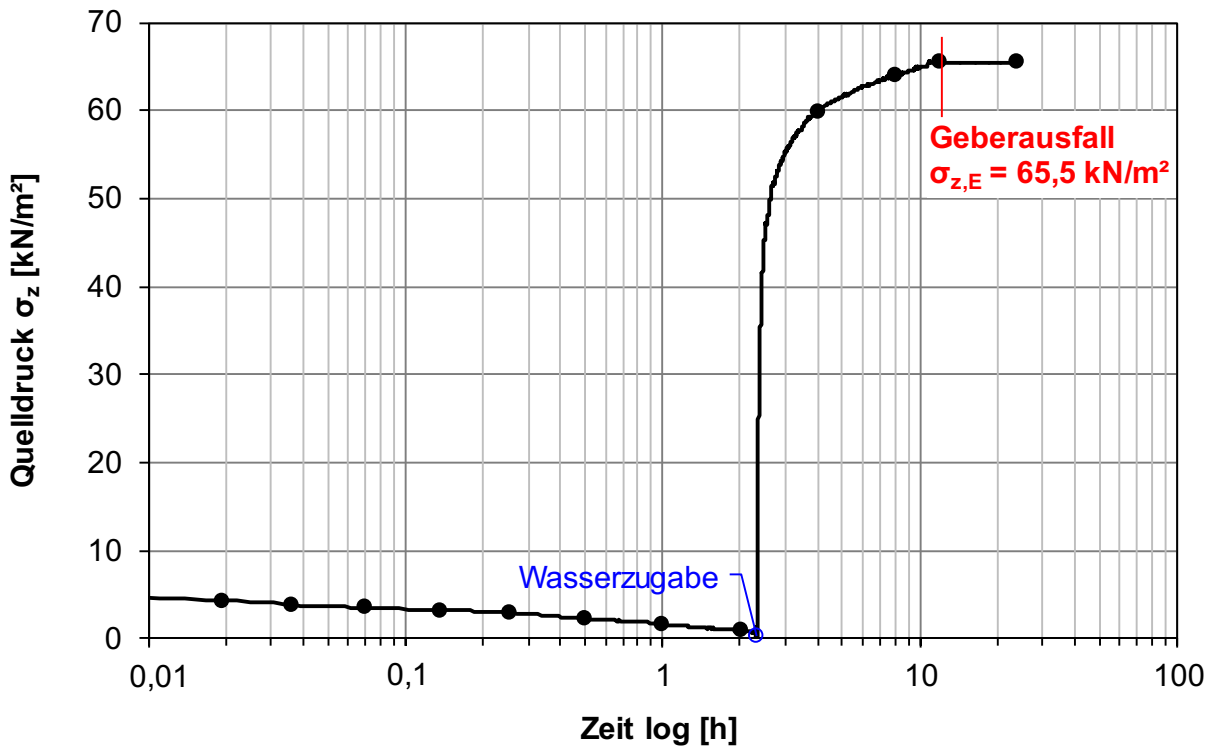


Bild 7.1: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 1, UB I

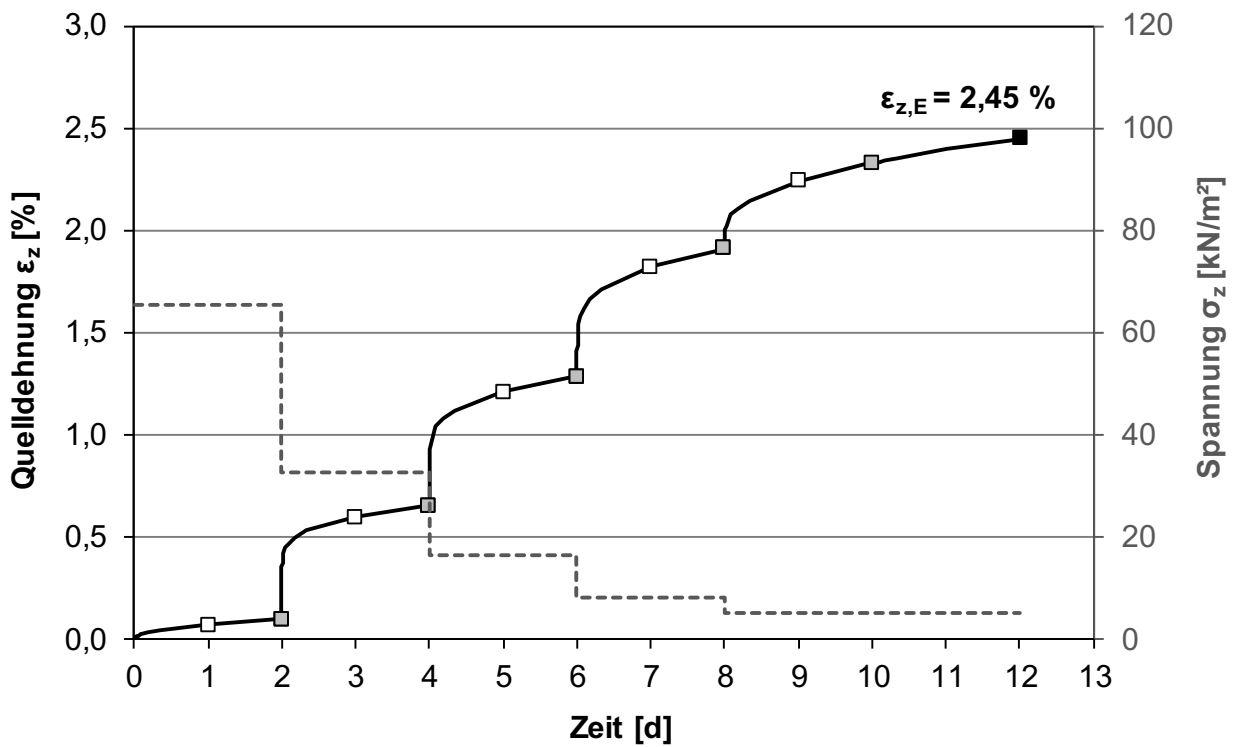


Bild 7.2: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 1, UB I

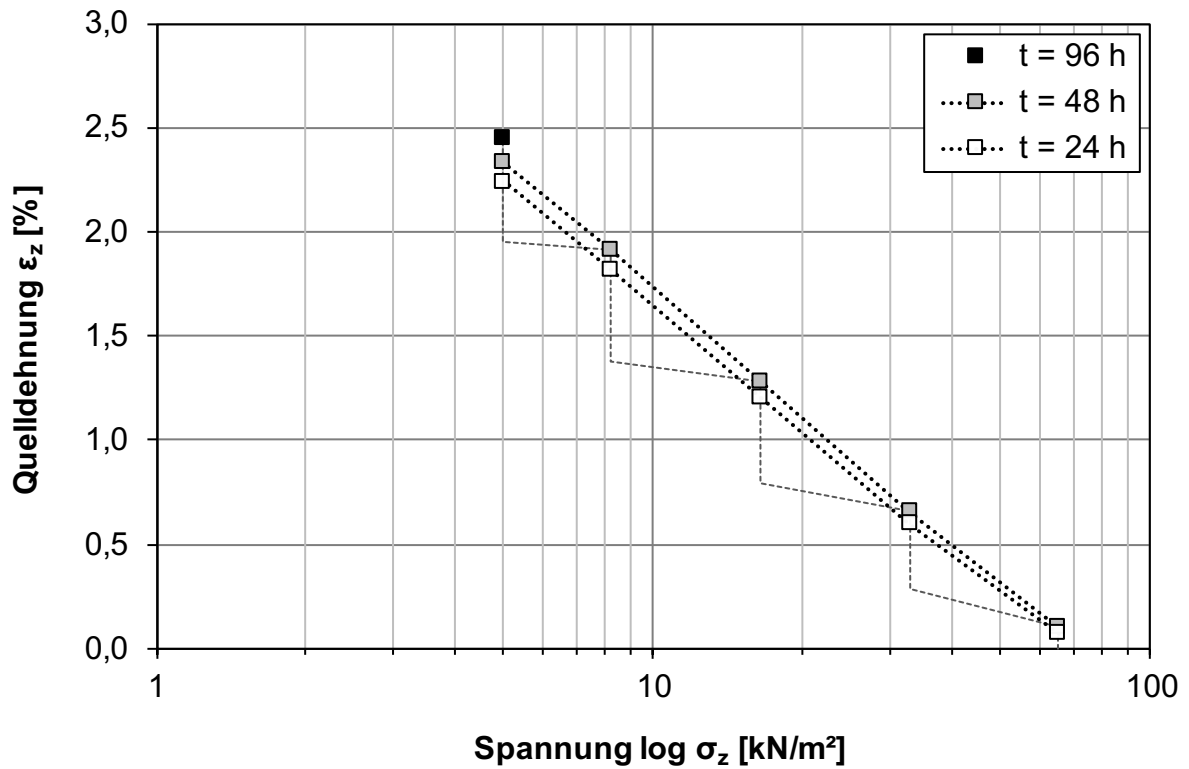


Bild 7.3: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 1, UB I

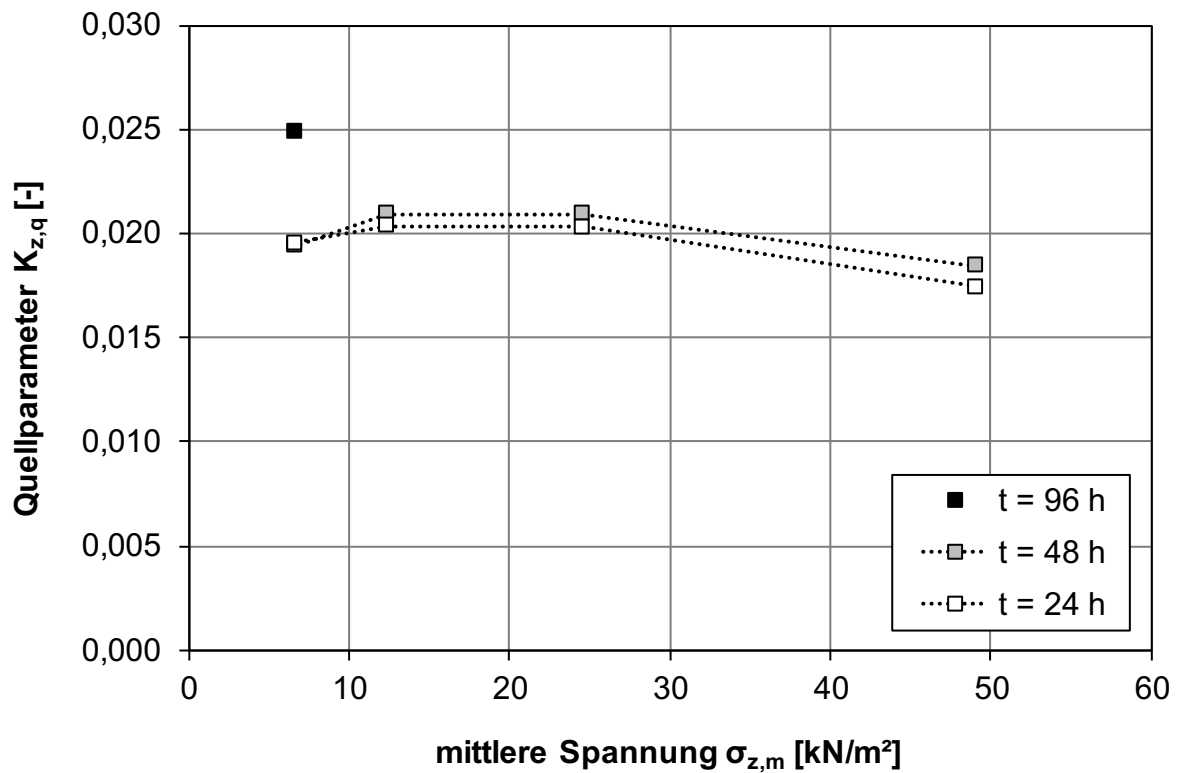


Bild 7.4: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 1, UB I

7.2.2 Opalinustonstein VZ 1, UB II

Die Ergebnisse des kombinierten Quelldruck-Quellhebungs-Versuches im VZ 1 UB II sind aufgrund eines ortsabhängigen Stromausfalles und des infolge dessen defekten PCs verloren gegangen. Aus handschriftlichen Aufzeichnungen geht nur noch zum Vergleich für die zusammenfassende Auswertung in Kapitel 7.8.3 ein maximaler Quelldruck von 45 kPa hervor. Bei den Entlastungsstufen wurden nahezu keine Hebungen ($< 0,003$ mm) gemessen.

7.2.3 Opalinustonstein VZ 3, UB III

Wegen eines Stromausfalls, bei dem die Daten von UB II (siehe vorhergehendes Kapitel) komplett verloren gingen, der Messgeber bei UB I (siehe Kapitel 7.2.1) ausfiel, gingen auch beim dritten parallel verlaufenden Versuch des Opalinustonsteins im VZ 3 für den Untersuchungsbereich UB III die Daten der Quelldruckentwicklung verloren. Allerdings wurde handschriftlich nach 7 d ein maximaler Quelldruck von ca. 148 kPa ermittelt. Die Hebungen für die Laststufe 148 kPa im anschließenden Quellhebungsversuch lagen nahezu bei 0 mm, womit auch von einer nahezu abgeschlossenen Quelldruckentwicklung ausgegangen werden konnte.

Da die Laststufen bei UB I noch zu kurz gewählt wurden, wurde hier die Anzahl der Entlastungsstufen verringert und die Zeitdauer je Laststufe erhöht. Da bei Laststufe 37,0 kN/m² innerhalb von ca. 10 h keine Änderung der Verformungen zu erkennen waren, wurde die Quellreaktionen unter dieser Spannung als abgeklungen angesehen. Die Dauer für die nachfolgenden Stufen 18,5 kN/m² und 5 kN/m² wurde deutlich erhöht, so dass der lastgesteuerte Quellhebungsversuch insgesamt ca. 51 Tage andauerte (siehe Tab. 7.2). Da aber auch bei dieser gegenüber UB I langen Dauer nicht alle Quellreaktionen abgeschlossen waren, musste aus zeitlichen Gründen für nachfolgende Versuche die Dauer der Entlastungsstufen wieder auf ein Mindestmaß, wo ein Großteil der Hebungen abgeklungen war, reduziert werden. Es wurde nach 51 d eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 3,44$ % (UB I: $\varepsilon_{z,E} = 2,45$ %, Dauer von 12 d) erreicht (Bild 7.5).

Bis zur Mindestspannung von 18,5 kN/m² nehmen die Quelldehnungen im logarithmischen Maßstab analog zu UB I linear zu (Bild 7.6). Die zunehmende Steigung der Quellgeraden spiegelt sich im zunehmenden Quellparameter mit abnehmender Spannung wieder. Unterhalb dieser Mindestspannung geht wie bereits bei UB I beschrieben das behinderte Quellen in ein freies Quellen über. Dies zeigt sich in einer Abnahme der Steigung der Quellgeraden (Bild 7.6) sowie damit in der Abnahme des Quellparameters (Bild 7.7).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,max}$	ε_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,3	7,7	148,0	1,00	0,000	0,000	-	-
2	15,0	353,4	74,0	0,50	0,305	0,510	111,0	0,0169
3	16,0	23,4	37,0	0,25	0,643	1,075	55,5	0,0188
4	38,0	528,0	18,5	0,13	1,383	2,311	27,8	0,0411
5	50,8	307,4	5,0	0,03	2,060	3,443	11,8	0,0199
*LS = Laststufe								$\varnothing = 0,0242$

Tab. 7.2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 3, UB III

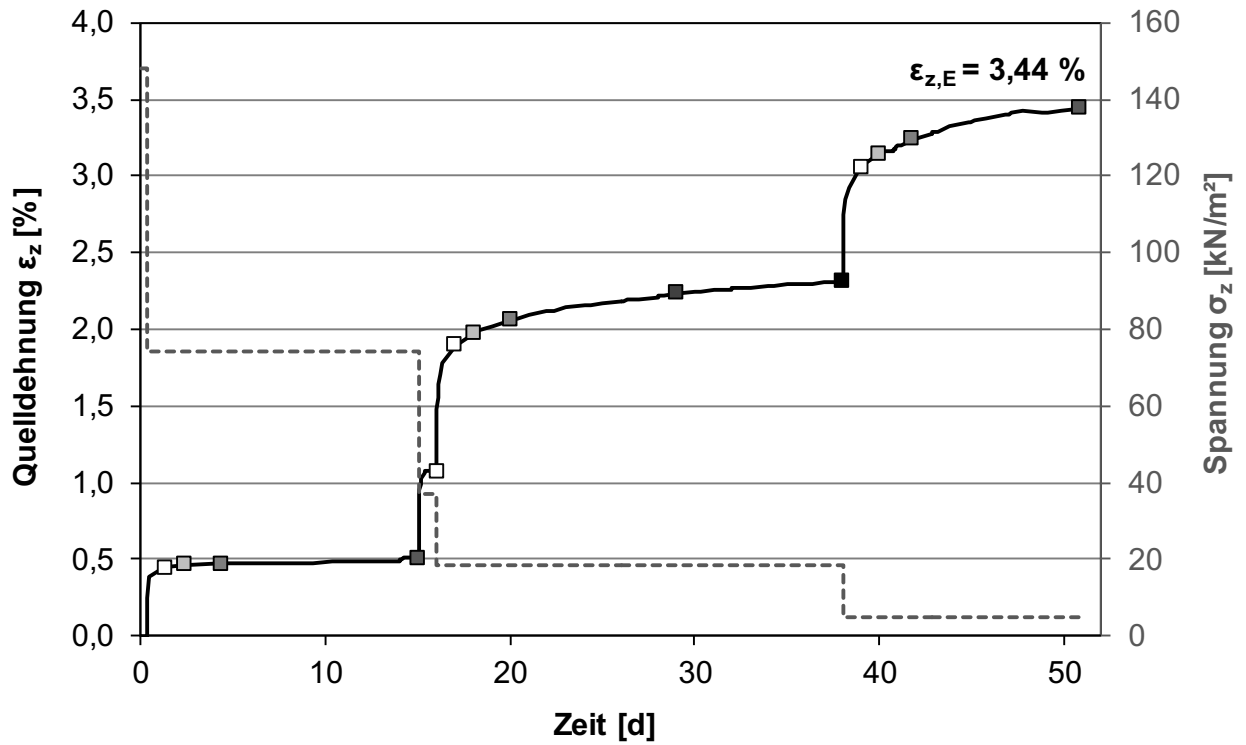


Bild 7.5: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 3, UB III

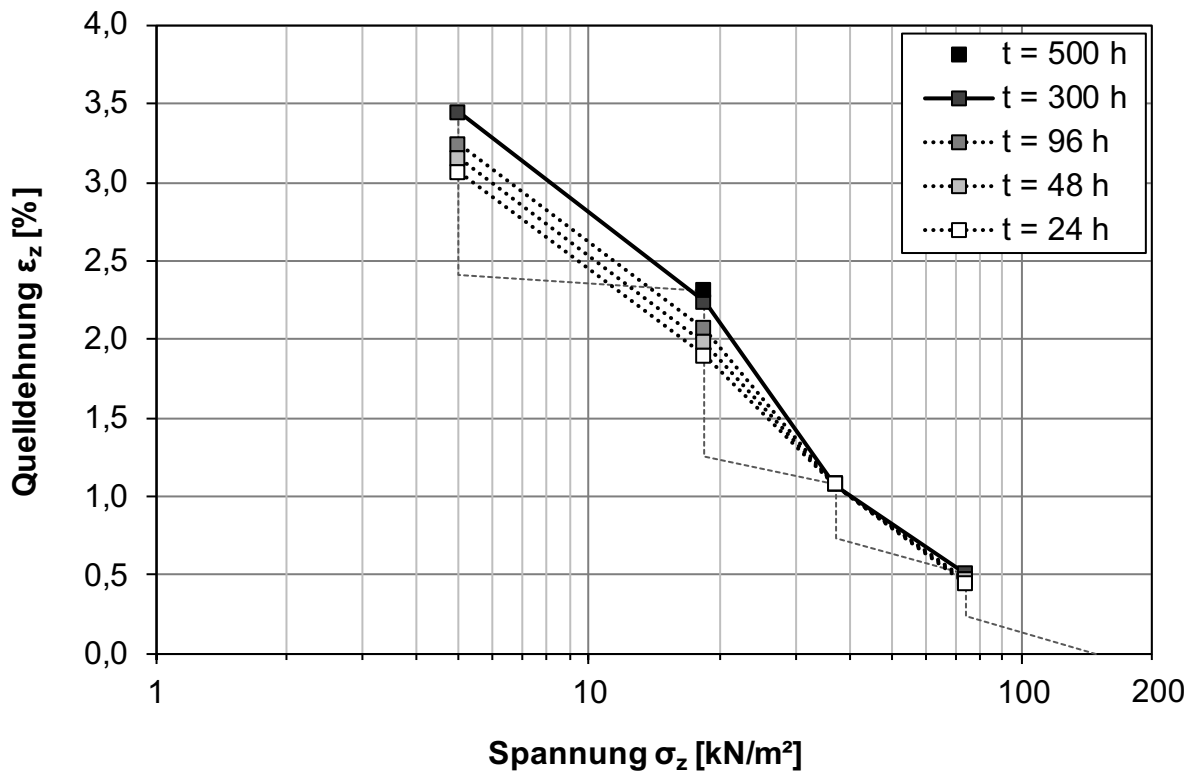


Bild 7.6: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB III

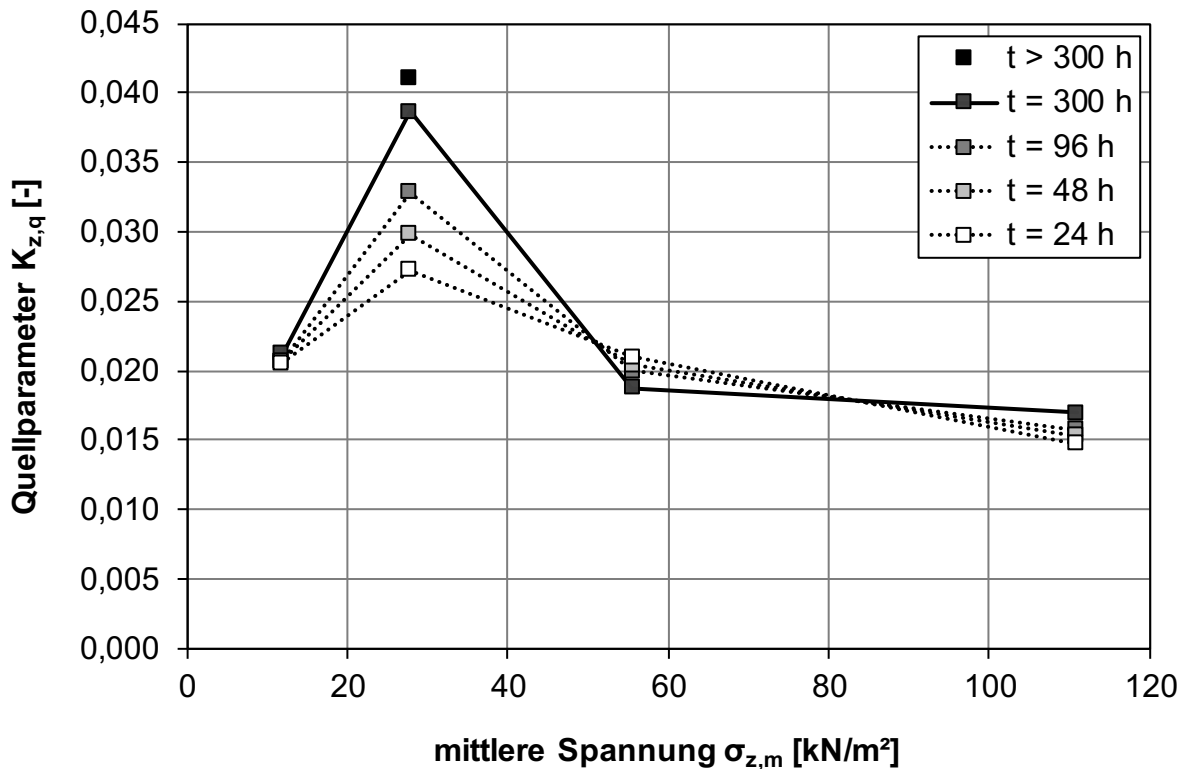


Bild 7.7: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB III

7.2.4 Opalinustonstein VZ 3, UB IV

Die Quelldruckentwicklung des Opalinustonsteins im VZ 3 für den Untersuchungsbereich UB IV ist anders als bei UB I bis UB III auch nach 1687 h bzw. 70,3 d nicht abgeschlossen (Bild 7.8). Wasser ist am oberen Rand der Belastungsplatte immer noch nicht ausgetreten. Aus zeitlichen Gründen wurde dann aber auf den Quellhebungsversuch umgestellt. Der Quelldruck liegt mit $130,2 \text{ kN/m}^2$ unterhalb des Wertes von UB III ($148,0 \text{ kN/m}^2$).

Ausgehend vom maximalen Quelldruck wurden die Quelldehnungen für die Entlastungsstufen $65,0 \text{ kN/m}^2$, $32,0 \text{ kN/m}^2$ und $16,0 \text{ kN/m}^2$ gemessen (Tab. 7.3). Es wurde nach ca. 51 d eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 0,46 \%$ (Bild 7.9), was deutlich unterhalb der Endquellung von UB III mit $\varepsilon_{z,E} = 3,44 \%$ liegt. Eine dichter eingebaute Probe wie im Proctoroptimum nimmt damit Wasser deutlich langsamer auf und die Wasserdurchlässigkeit verringert sich, so dass sowohl die Quelldruckentwicklung als auch die Quellhebungsentwicklung deutlich länger dauert. Insgesamt kann aber auch die dichtere Probe mit einem Luftporenanteil von $n_{a,0} = 1,5 \%$ weniger

Wasser aufnehmen, was sich auch am Vergleich zwischen Einbau- und Sättigungswassergehalt zeigt (siehe Tab. 7.8 in Kapitel 7.2.7). Die Probe kann von $w_0 = 16,2 \%$ zu $w_{s,0} = 17,1 \%$ nicht mehr viel Wasser aufnehmen, was sich wiederum an den sehr geringen Quellhebungen zeigt. Dass bis zum Ende des Versuches, der über 120 d andauerte, kein Wasser zu erkennen war, bestätigt die geringe Wasserdurchlässigkeit der Probe und damit auch die infolge dessen sehr lange andauernden Hebungen. Dadurch ist der Zuwachs an Quellhebungen mit der Zeit deutlich höher wenn auch betragsmäßig deutlich geringer als bei anderen Böden. Proben mit einer höheren Durchlässigkeit nehmen das Wasser schneller auf, womit die größten Reaktionen bereits nach deutlich kürzerer Zeit abgeschlossen sind.

Die Steigung der Quellgeraden ist im logarithmischen Maßstab bis zur Mindestspannung annähernd linear (Bild 7.10). Die Auswertung eines Quellparameters ist hier allerdings schwierig aufgrund der langen zweiten Entlastungsstufe (Bild 7.11). Zwischen 144 h bis 1034 h haben sich bei dieser Stufe zusätzliche Quelldehnungen von ca. $0,13 \%$

ergeben. Würde man vergleichend diese Quelldehnungen vernachlässigen, würden sich die Quellparameter nach Bild 7.12 ergeben. Allerdings ist die Auswertung nach dieser Methode auch fehlerbehaftet, da sich nicht abschätzen lässt, wie groß die

Quelldehnungen ausgefallen wären, wenn man die Laststufe 32,0 kN/m² nach 144 h gestartet hätte. Der Mittelwert von $K_{z,q} = 0,0051$ ergibt sich aber bei beiden Darstellungen.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,max}$	ϵ_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,04	1,1	130,0	1,00	0,000	0,000	-	-
2	43,2	1034,1	65,0	0,50	0,199	0,332	97,5	0,0110
3	49,2	144,0	32,0	0,25	0,251	0,418	48,5	0,0028
4	51,2	48,5	16,0	0,12	0,277	0,462	24,0	0,0014
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0051$

Tab. 7.3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

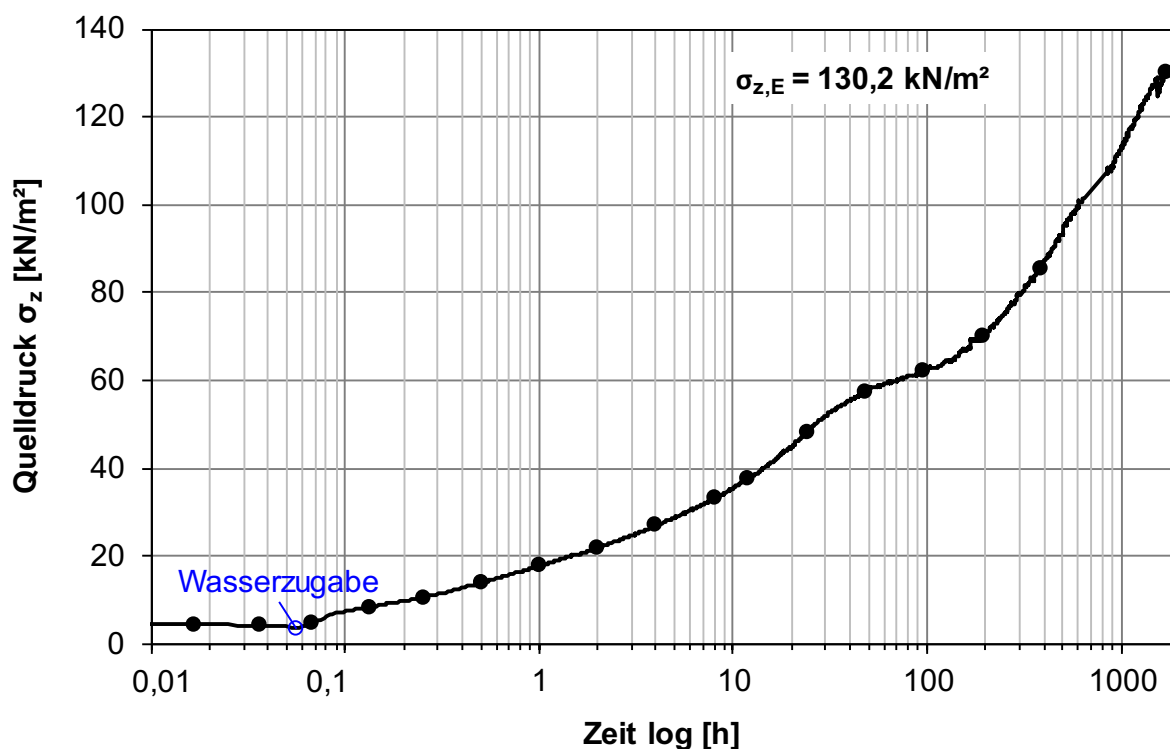


Bild 7.8: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

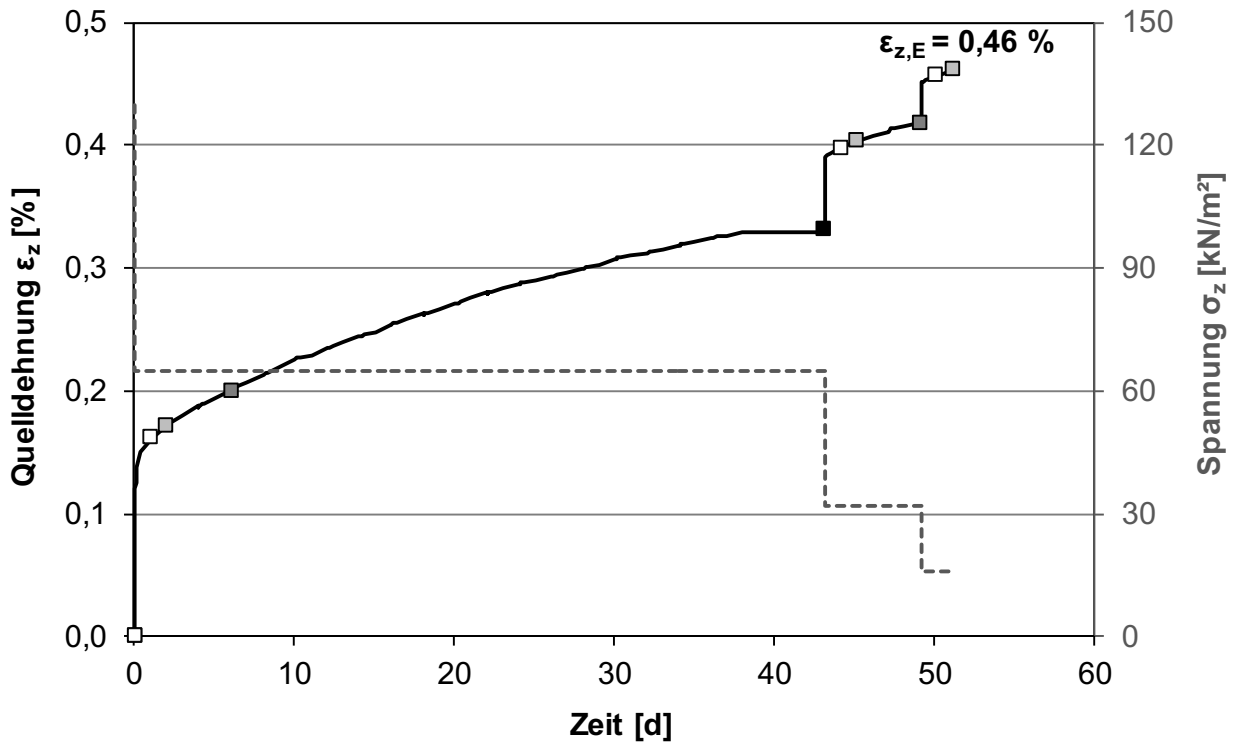


Bild 7.9: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

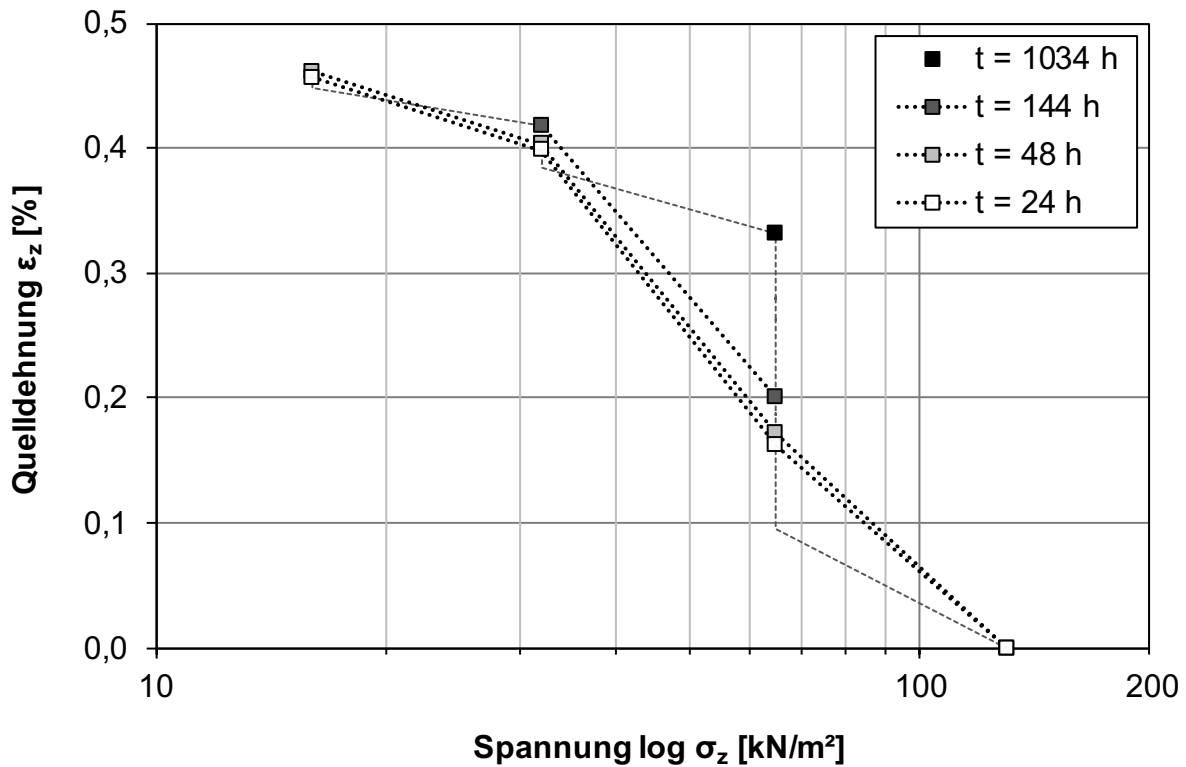


Bild 7.10: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

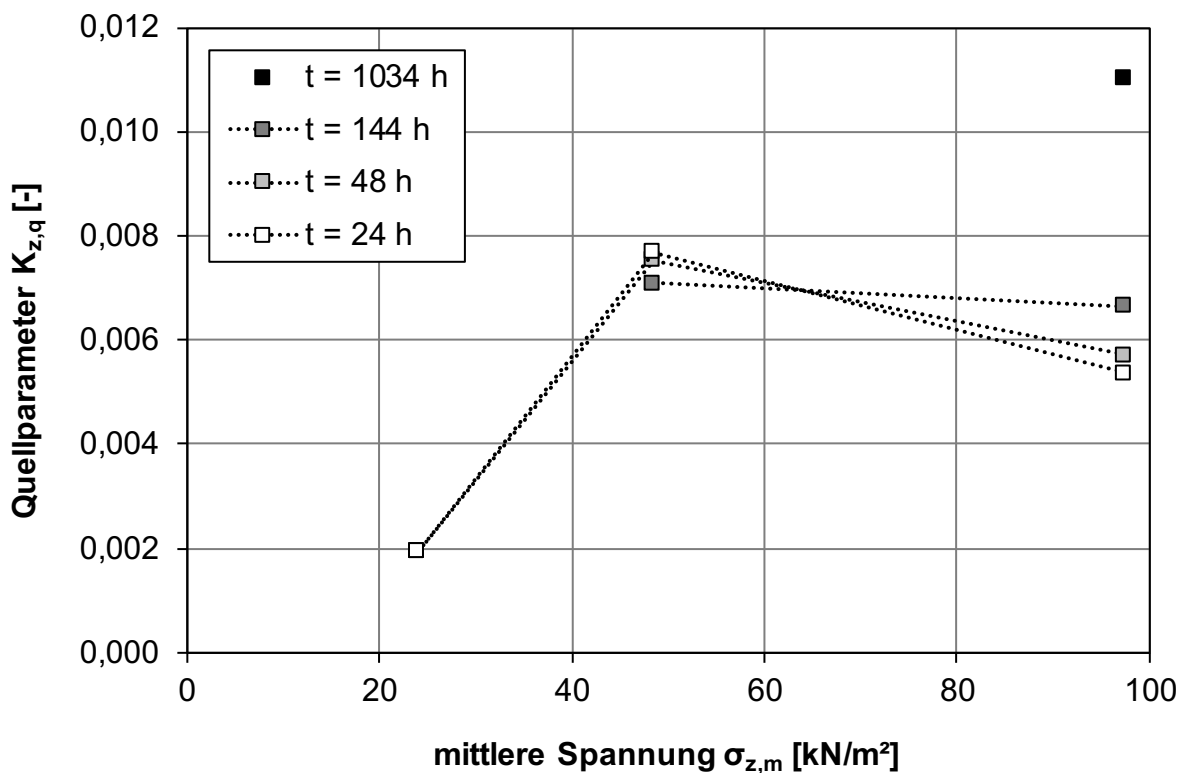


Bild 7.11: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

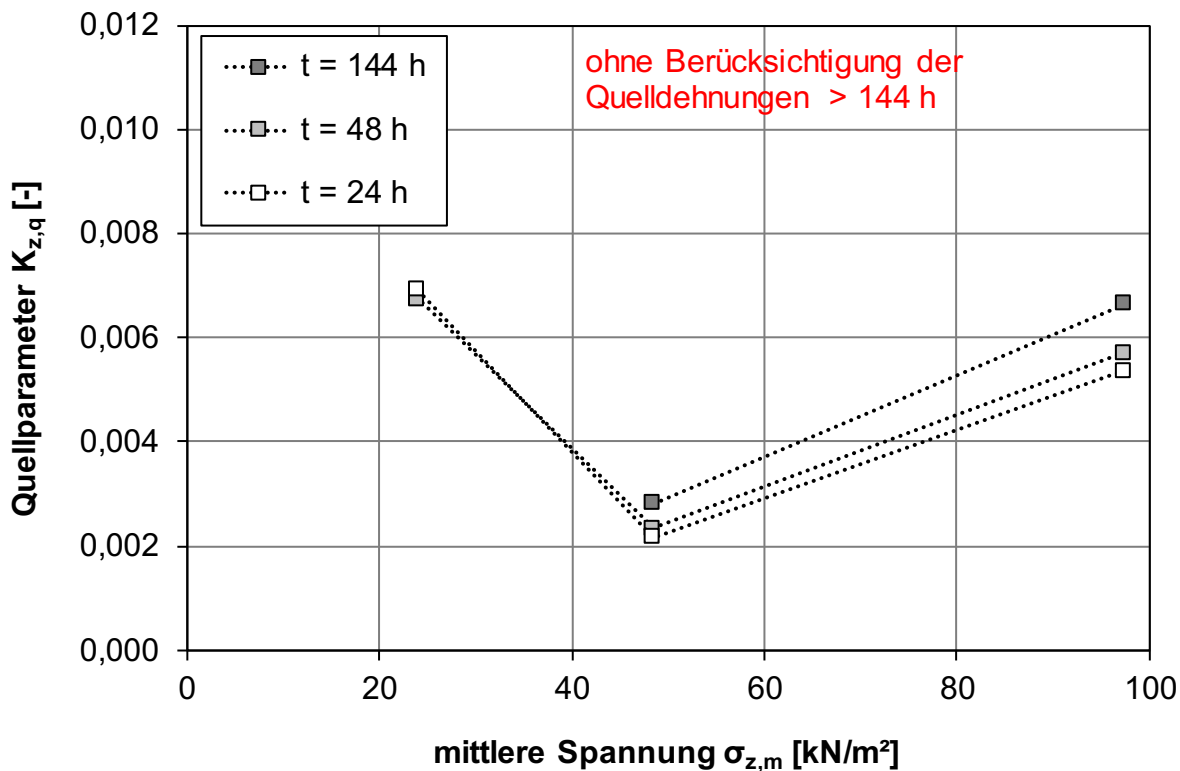


Bild 7.12: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für Zeitpunkte < 144 h, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

7.2.5 Opalinustonstein VZ 4, UB V

Im Gegenzug zu VZ 1 und VZ 3 konnten die Quellversuche der Proben im VZ 4 in kleinen Ödometern mit $d = 10$ cm durchgeführt werden. Bei den verwendeten Versuchsständen war jedoch nur eine mechanische Laststeuerung, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, möglich, so dass die Quelldruck- und Quellhebungsermittlung an separaten Probekörpern erfolgen musste. Da bei den Versuchen im Ödometer $d = 10$ cm im Versuchsstand mehr Versuche gleichzeitig möglich waren, wurden zum Vergleich je Einbauzustand zwei Quellhebungsversuche durchgeführt. Dies betrifft auch die Quelldruckversuche, wobei hier zwei unterschiedliche Kraftmessdosen (5 kN, 10 kN) verwendet wurden.

Um den Weg bei der Quelldruckentwicklung (Bild 7.13) konstant zu halten, musste händisch nachgeregelt werden. Dies war sowohl technisch als auch zeitlich, v.a. nachts, nur bedingt möglich. Demnach ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse von der Anzahl und Feinheit der Nachregelung abhängen. Theoretisch sollten Verformungen der teilgesättigten Proben vor Wasserzugabe abgeschlossen sein. Das regelmäßige Nachregeln vor Wasserzugabe (Bild 7.13) erwies sich jedoch als sehr schwierig. Daher wurde für nachfolgende Versuche in der Regel sofort Wasser zugegeben.

Für die Quellhebungsversuche kann eine Wiederholbarkeit bestätigt werden (Bild 7.14 bis Bild 7.19). Geringfügige Unterschiede ergeben sich nur aufgrund unterschiedlicher anfänglicher Sofortsetzungen. Die vergleichbaren Ergebnisse aus QH 1 und QH 2 sind in Tab. 7.4 und Tab. 7.5 aufgelistet.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	15,1	362,8	32,5	1,00	-0,834	-4,277	-	-
2	20,9	137,7	32,5	1,00	-0,126	-0,646	-	-
3	46,0	603,1	15,0	0,46	0,137	0,703	23,7	0,0402
4	54,9	214,4	7,5	0,23	0,243	1,246	11,2	0,0181
5	69,0	337,8	3,8	0,12	0,322	1,651	5,6	0,0135
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	2,297		$\emptyset = 0,0239$

Tab. 7.4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH 1

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	15,2	362,8	32,5	1,00	-1,192	-6,113	-	-
2	20,9	137,7	32,5	1,00	-0,348	-1,785	-	-
3	46,0	603,0	15,0	0,46	-0,090	-0,462	23,7	0,0394
4	54,9	214,5	7,5	0,23	0,008	0,041	11,2	0,0167
5	69,0	337,7	3,8	0,12	0,086	0,441	5,6	0,0133
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	2,226		$\emptyset = 0,0231$

Tab. 7.5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH 2

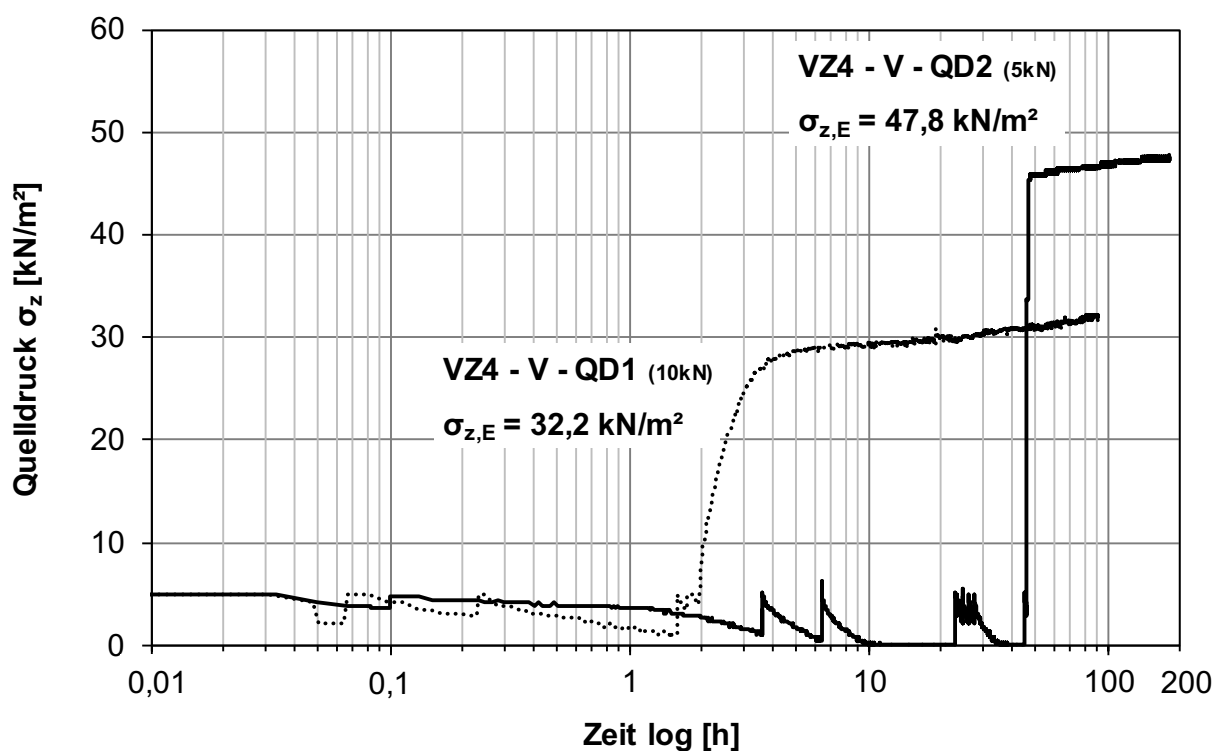


Bild 7.13: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

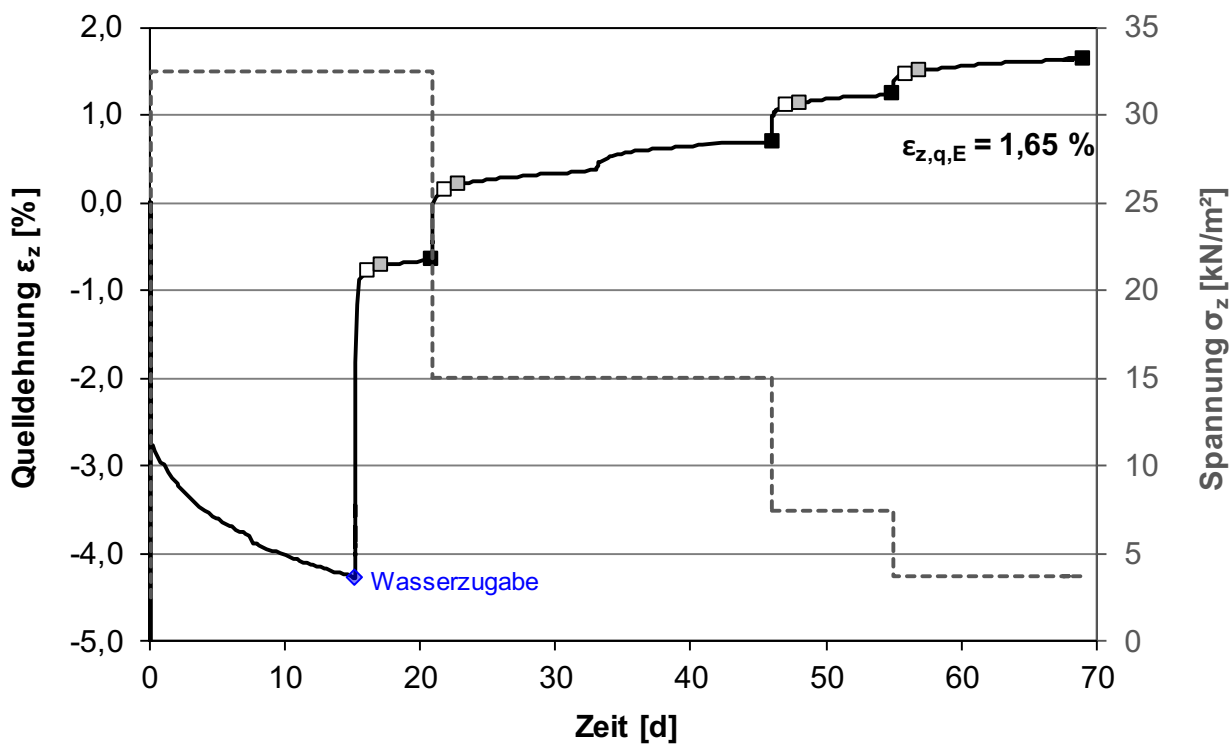


Bild 7.14: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH1

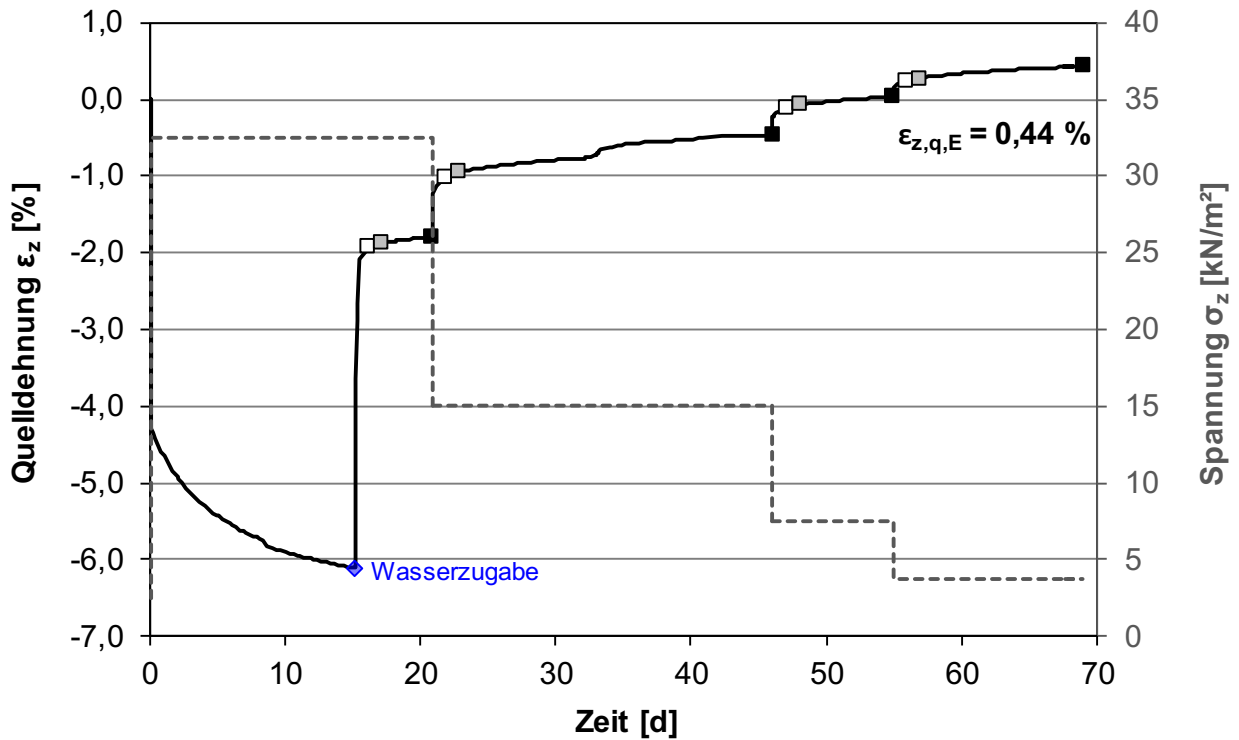


Bild 7.15: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH2

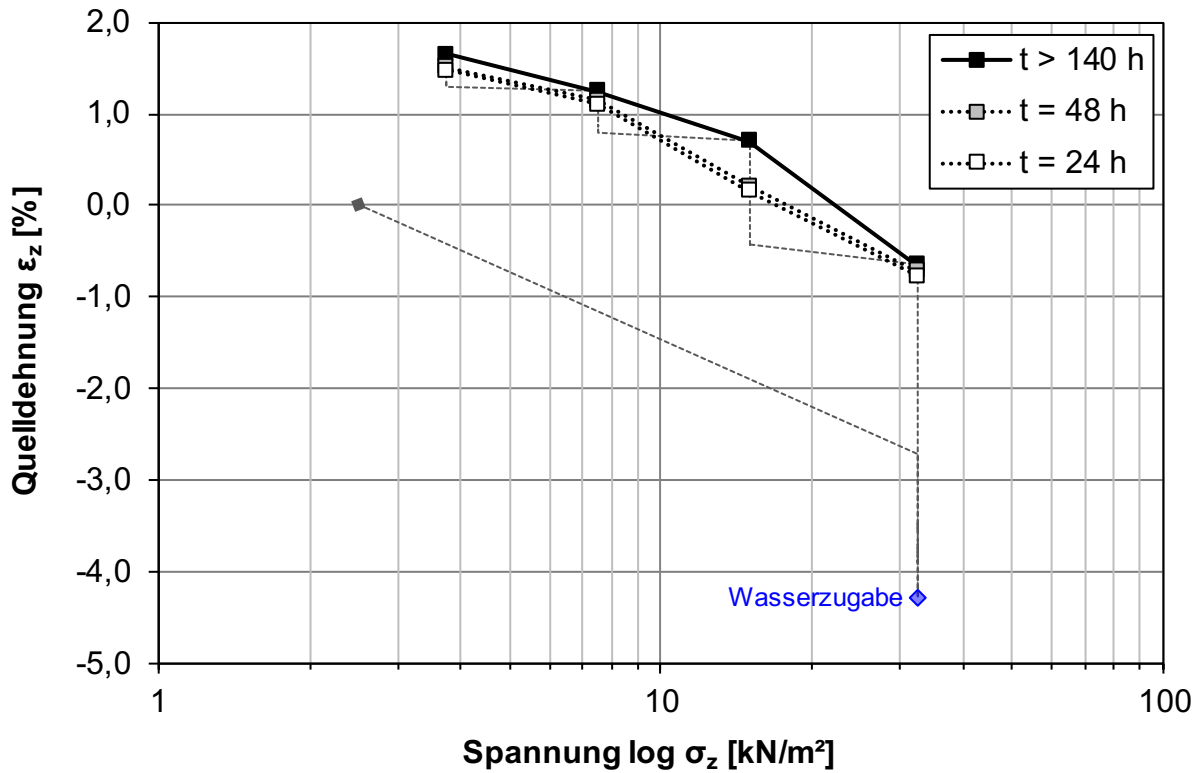


Bild 7.16: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH1

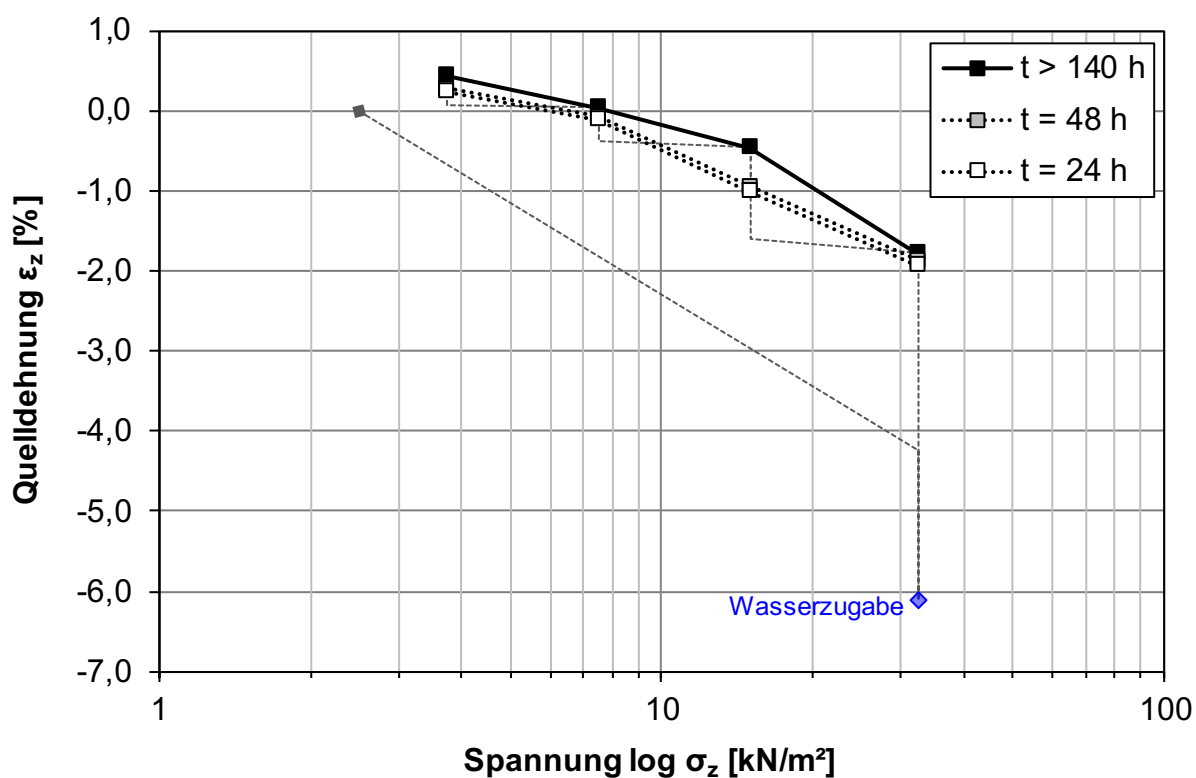


Bild 7.17: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH2

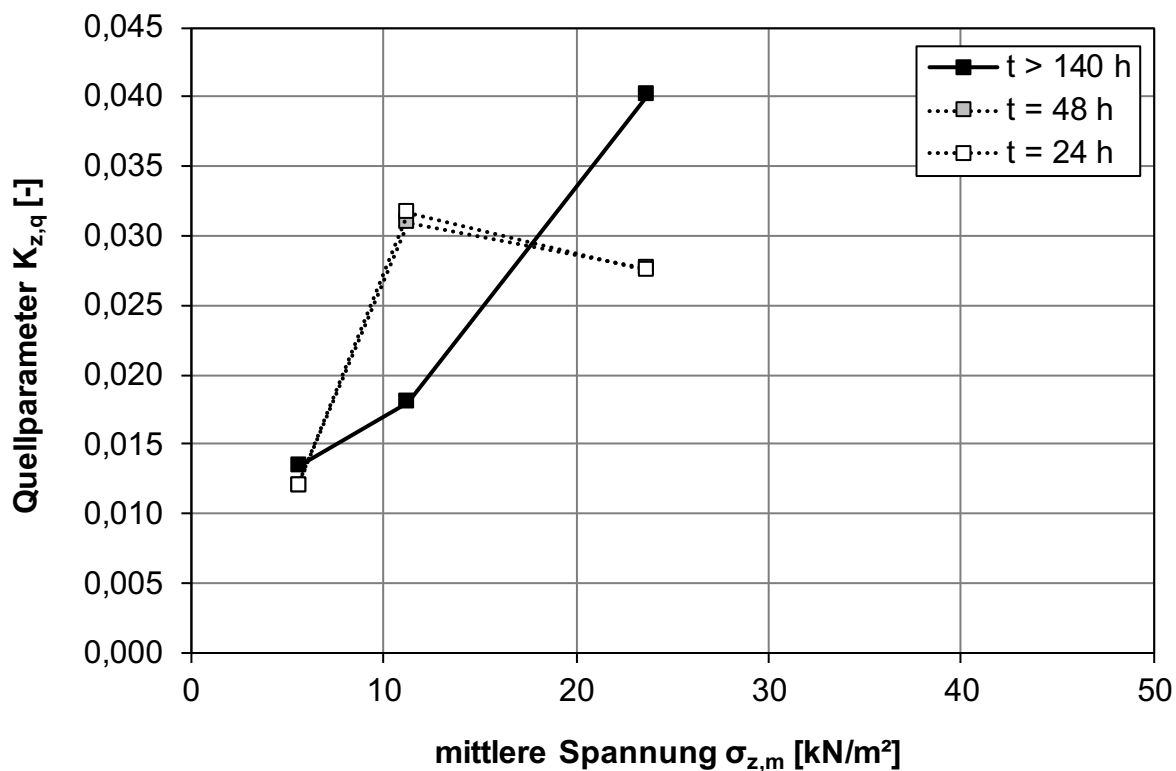


Bild 7.18: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH1

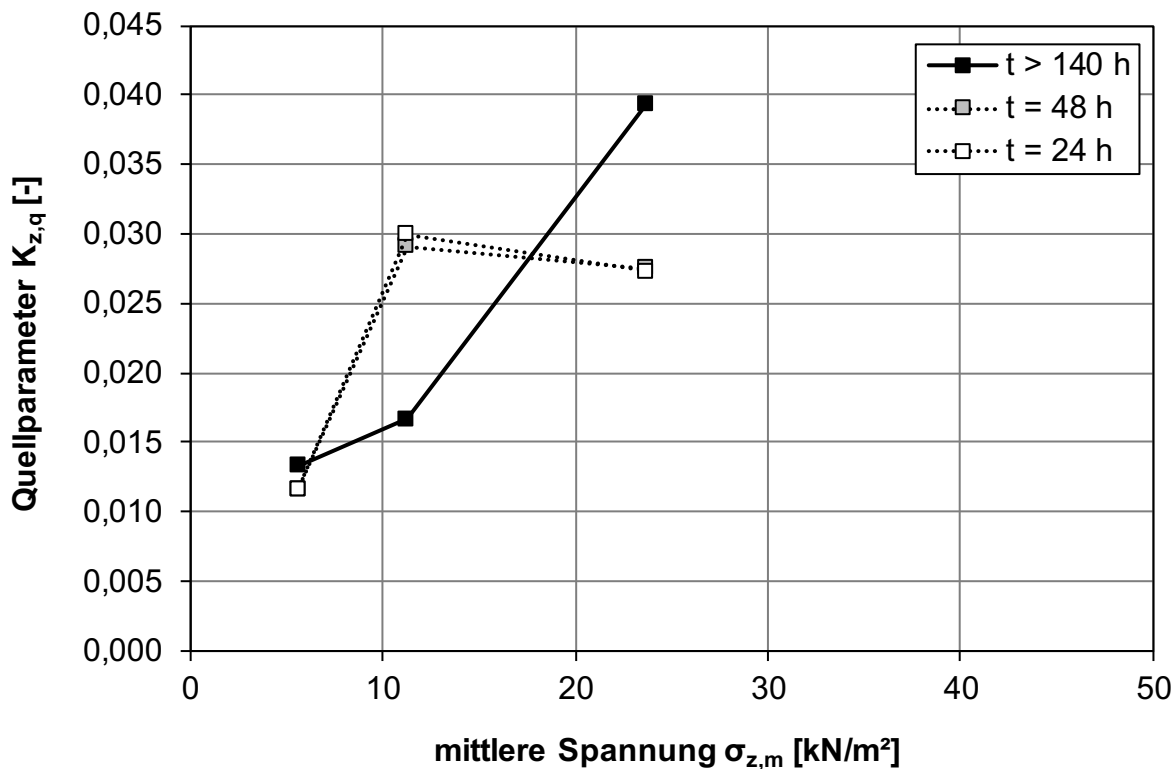


Bild 7.19: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH2

7.2.6 Opalinustonstein VZ 4, UB VI

Die Schwierigkeit der mechanischen Nachregelung bei der Quelldruckentwicklung zeigte sich auch bei den Versuchen des Opalinustonsteins VZ 4 im UB VI (Bild 7.20, Bild 7.21). Trotz relativ gleicher Einbaubedingungen für QD 1 und QD 2 (siehe Kapitel 7.2.7 in Tab. 7.8) zeigten sich unterschiedliche Quelldrücke wie in Bild 7.22 vergleichend für beide Versuche ohne Nachregelungen dargestellt.

Im Vergleich zu den Quellhebungsversuchen im UB V zeigten sich im UB VI trotz gleicher Einbaubedingungen (siehe Kapitel 7.2.7 in Tab. 7.8) größere Unterschiede bei den Endquellungen (Bild 7.23, Bild 7.24). Ursächlich könnten die unterschiedlichen anfänglichen Sofortsetzungen gewesen sein, die zu unterschiedlichen Anfangsdichten vor Wassersättigung geführt und somit auch die nachfolgende

Wasseraufnahme beeinflusst haben. Es hat sich bisher gezeigt, dass umso dichter eine Probe ist, umso weniger Wasser aufgenommen werden kann und damit auch die Dehnungen geringer ausfallen. Die höhere Anfangssetzung von QH 2 (Bild 7.24, Bild 7.26, Tab. 7.7) gegenüber QH 1 (Bild 7.23, Bild 7.25, Tab. 7.6) führte zu einer höheren Dichte. Die damit dichtere Probe im QH 2 konnte weniger Wasser aufnehmen und zeigte damit auch die geringeren Quelldehnungen. Diese geringeren Quelldehnungen für QH 2 zeigen sich auch in einem Abfall des Quellparameters in Bild 7.28 gegenüber QH 1 (Bild 7.27).

Dass die Versuche aber wiederholbar sind, zeigte sich am ähnlichen Verlauf der Dehnungskurven (Bild 7.23, Bild 7.24).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			ϵ_z			
	[d]	[h]			[mm]	[%]		
1	15,1	362,9	17,5	1,00	-0,836	-4,287	-	-
2	20,9	137,5	17,5	1,00	-0,111	-0,569	-	-
3	29,0	194,7	7,5	0,43	0,008	0,041	12,5	0,0166
4	69,0	960,6	3,7	0,21	0,217	1,113	5,6	0,0356
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	1,682		$\emptyset = 0,0261$

Tab. 7.6: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH 1

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			ϵ_z			
	[d]	[h]			[mm]	[%]		
1	16,1	386,8	17,5	1,00	-0,967	-4,959	-	-
2	21,8	137,4	17,5	1,00	-0,534	-2,738	-	-
3	30,0	194,7	7,5	0,43	-0,402	-2,062	12,5	0,0184
4	70,0	960,6	3,7	0,21	-0,301	-1,544	5,6	0,0172
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	1,195		$\emptyset = 0,0178$

Tab. 7.7: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH 2

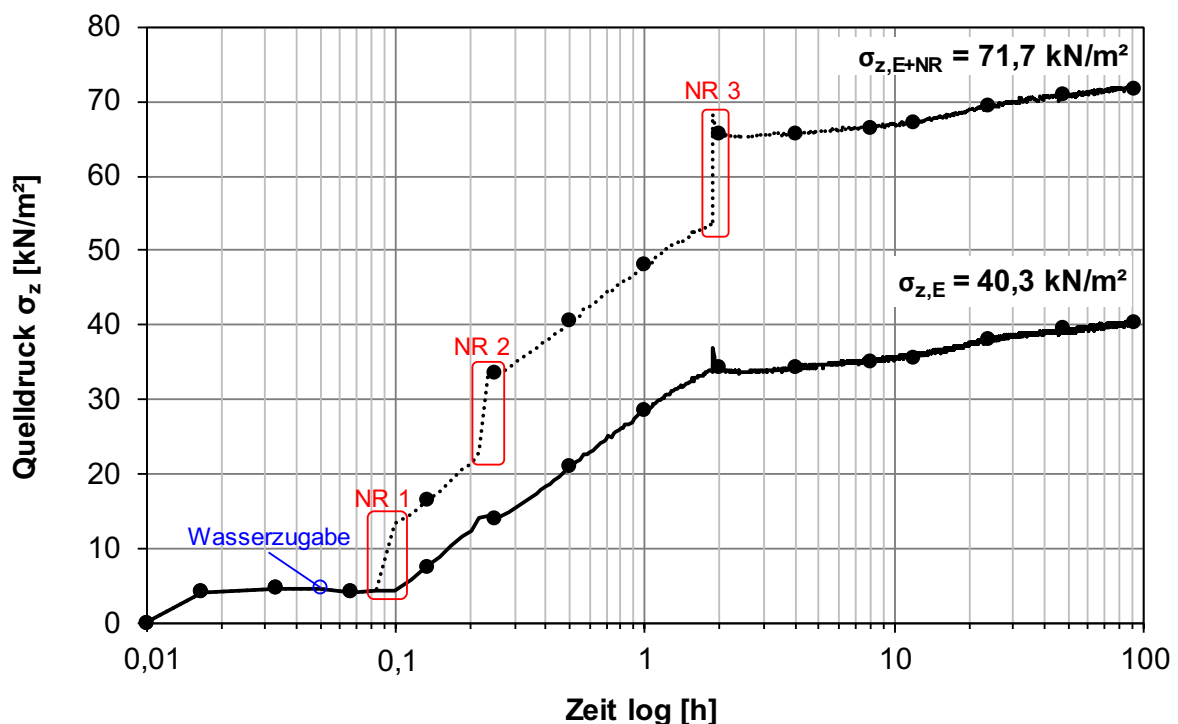


Bild 7.20: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QD 1 (10 kN)

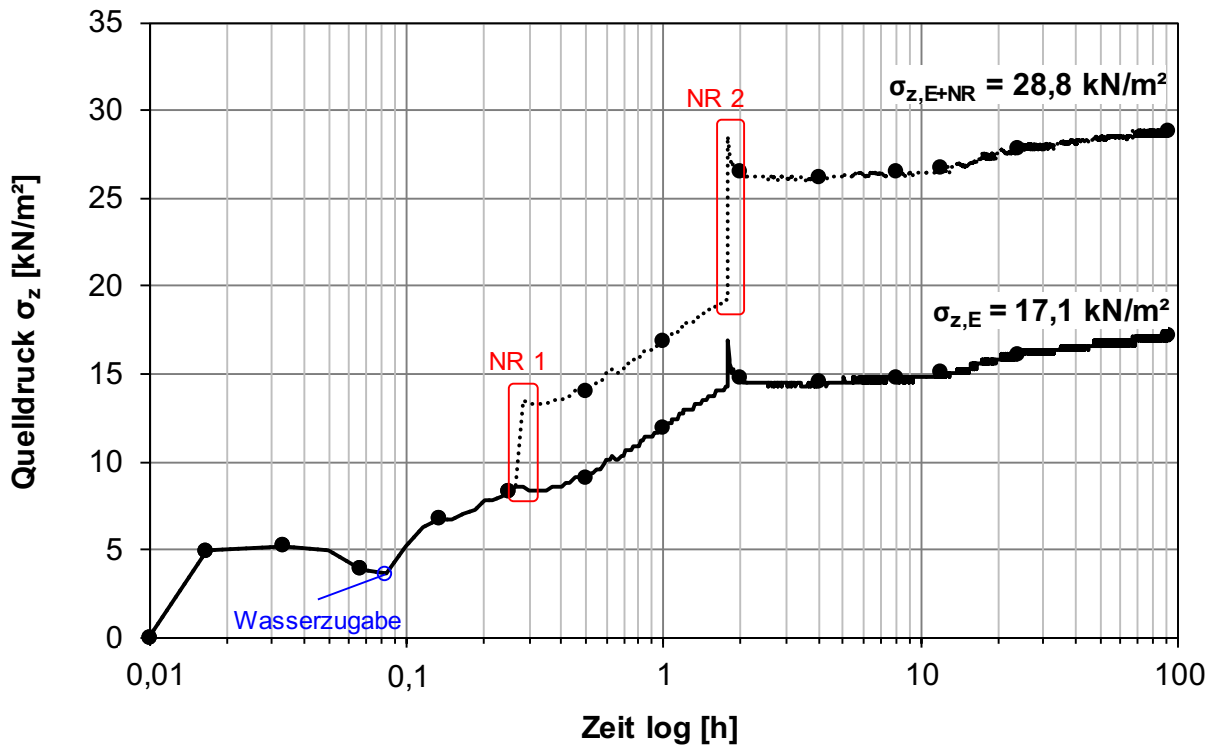


Bild 7.21: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QD 2 (5 kN)

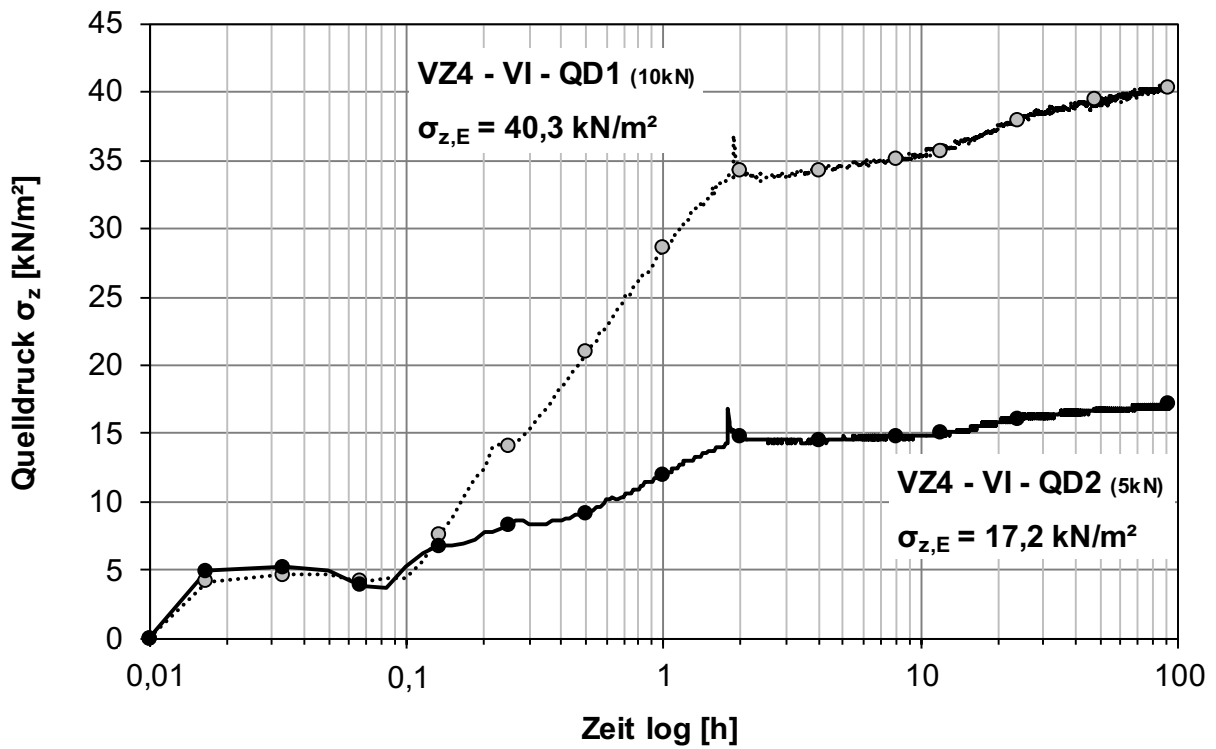


Bild 7.22: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

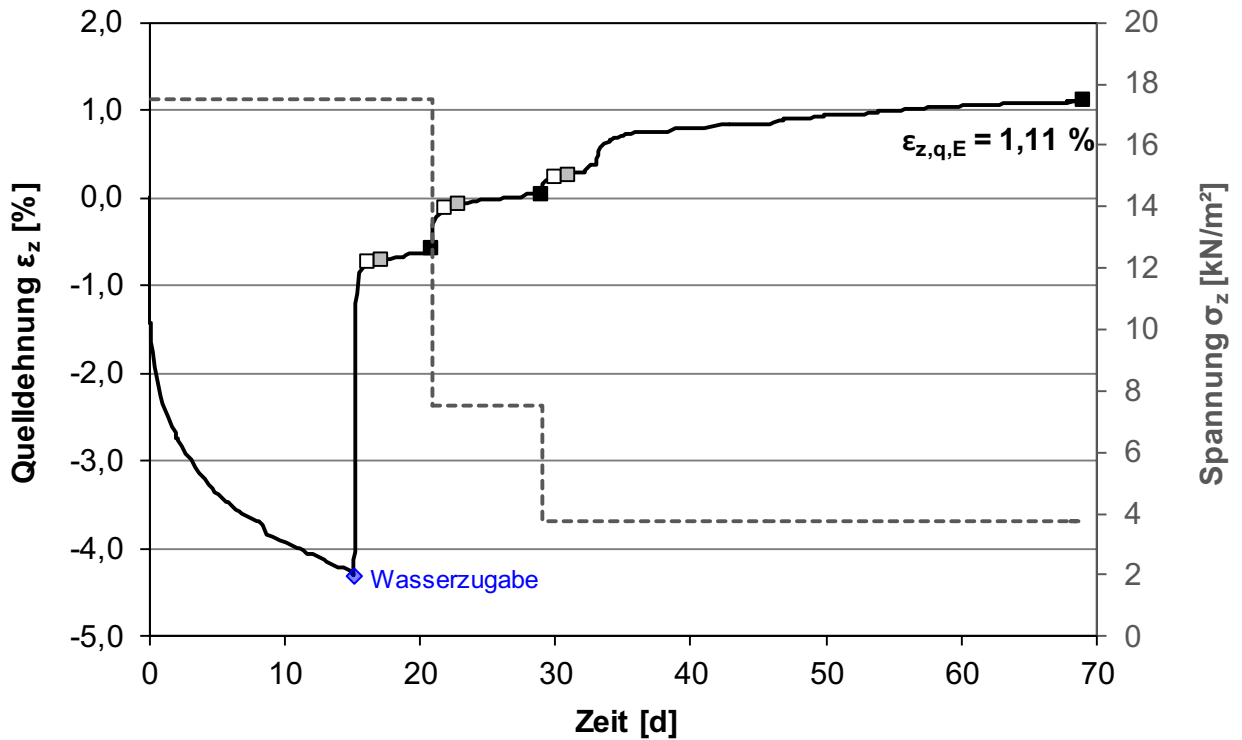


Bild 7.23: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH1

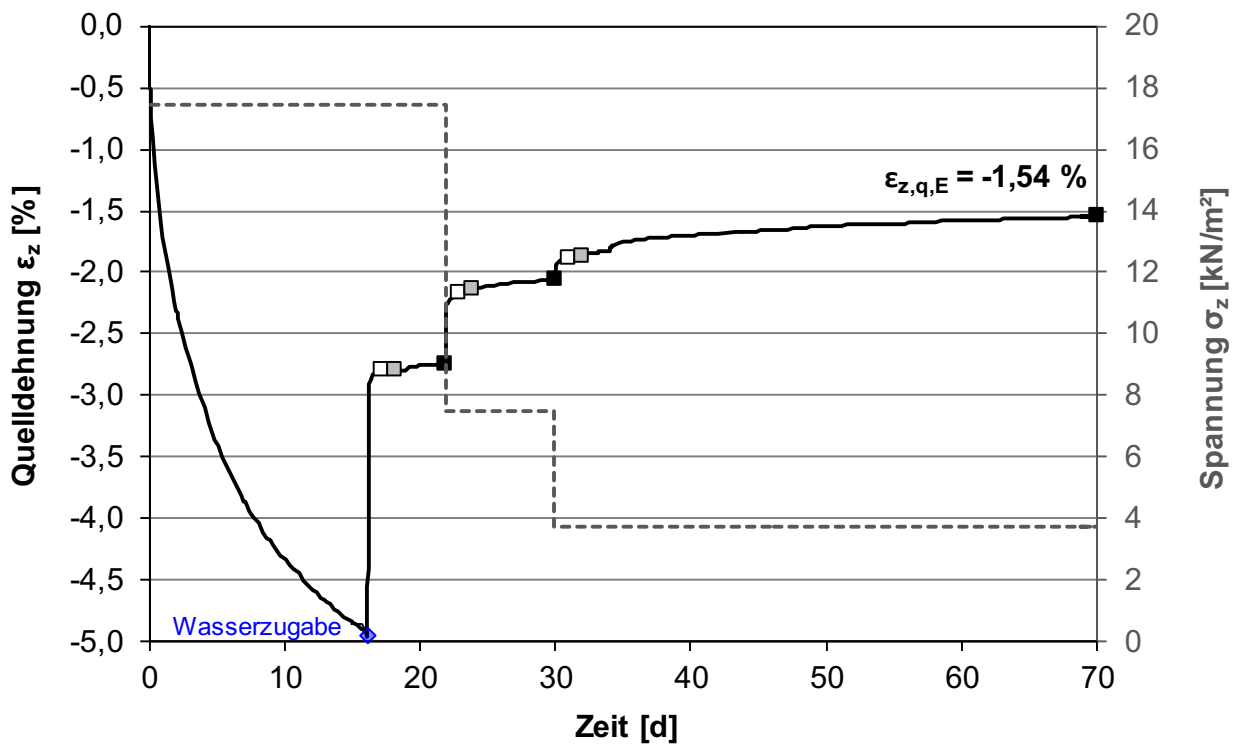


Bild 7.24: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH2

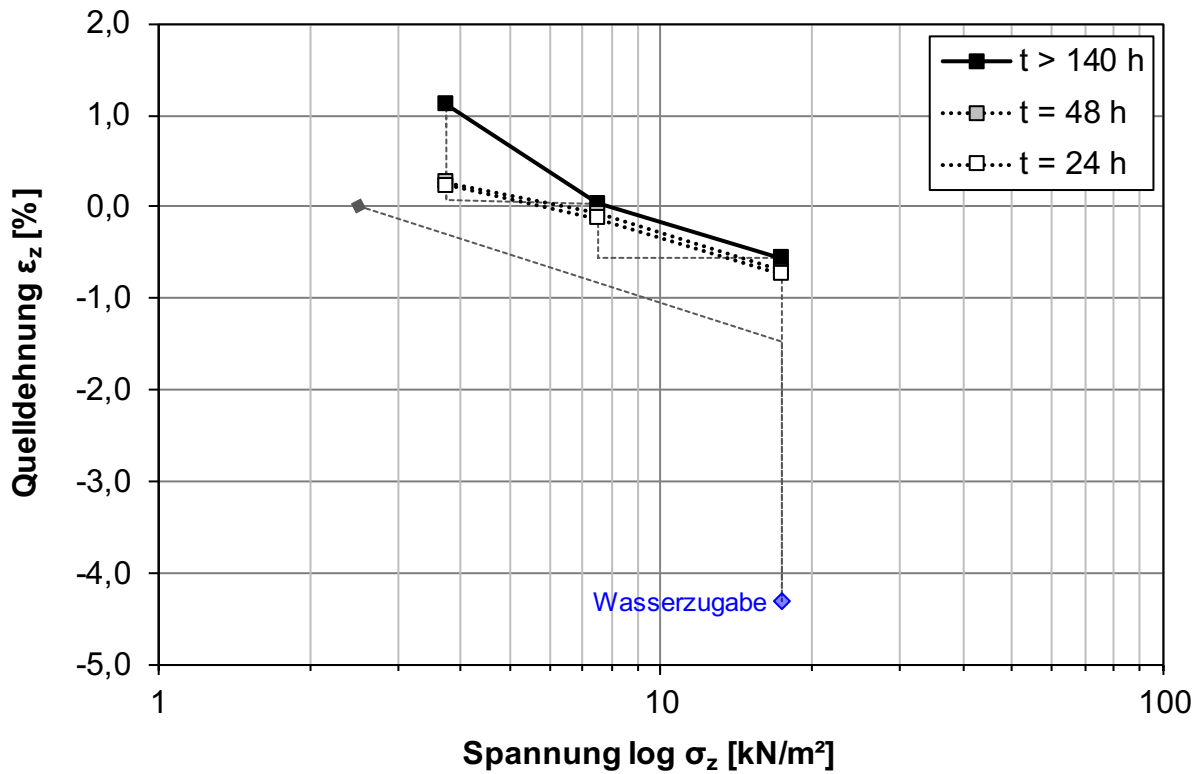


Bild 7.25: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH1

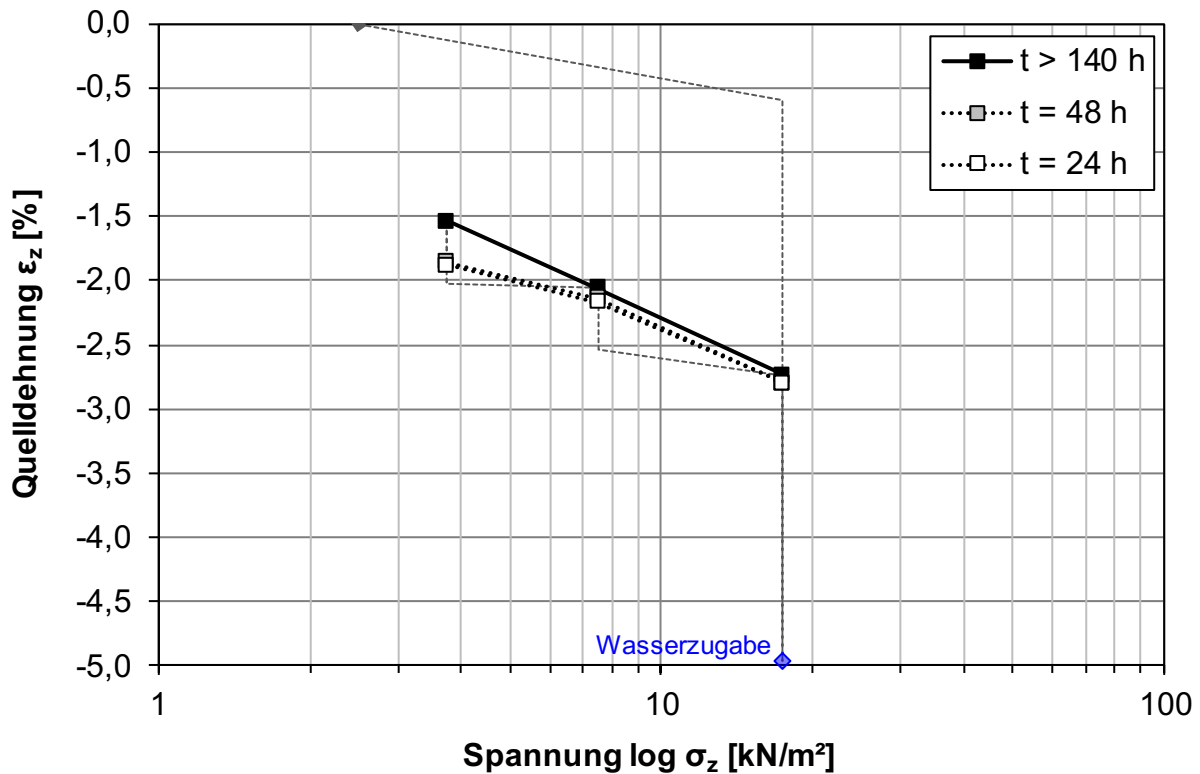


Bild 7.26: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH2

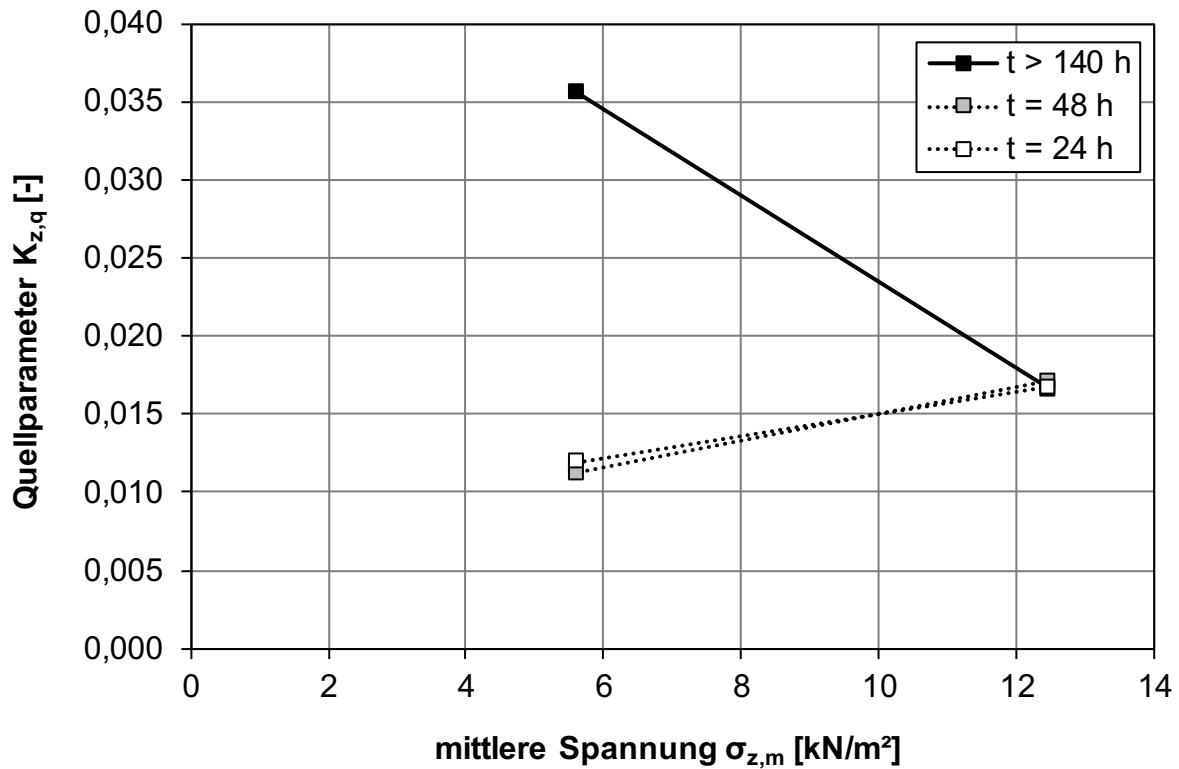


Bild 7.27: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH1

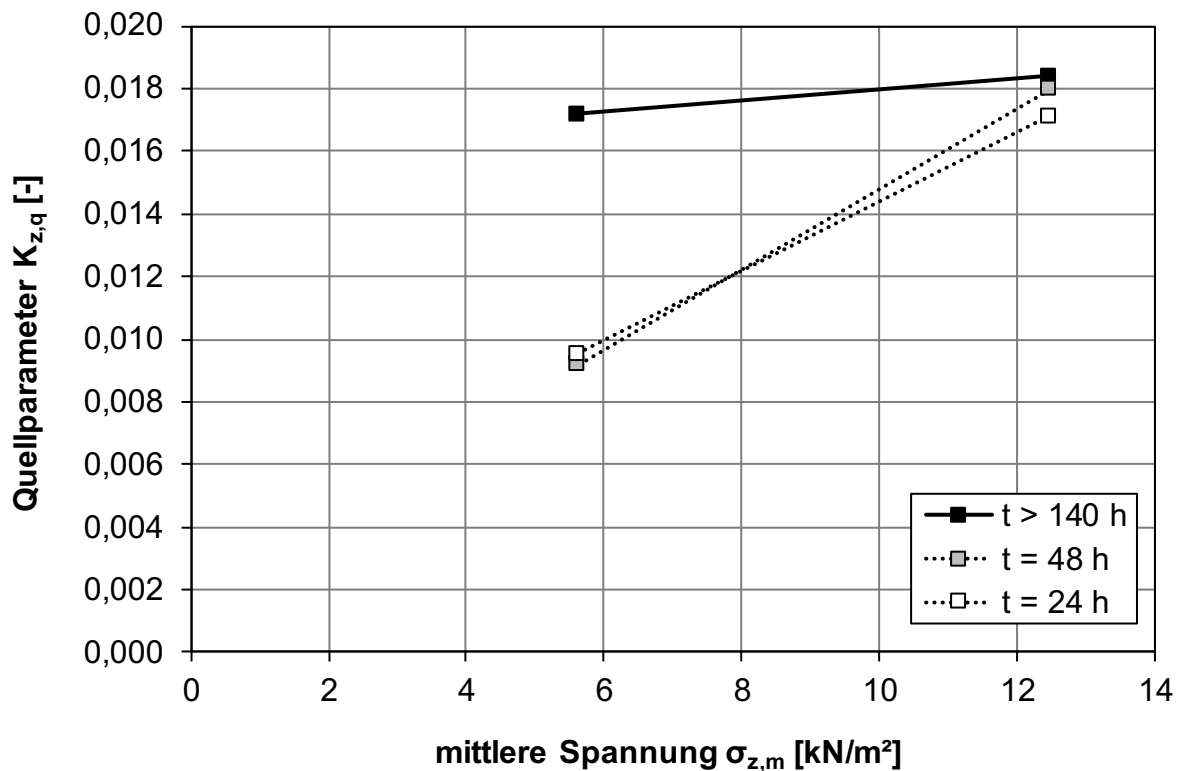


Bild 7.28: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH2

7.2.7 Zusammenfassung Opalinustonstein

Im Folgenden sind die Ergebnisse des Opalinustonsteins im VZ 1 bis VZ 4 in den folgenden Diagrammen (Bild 7.29 bis Bild 7.32) und in Tab. 7.8 zusammengefasst.

Beim Vergleich der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Versuche im VZ 1 und VZ 3 in Zellen mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Probenhöhe von 6 cm softwaregesteuert abliefen und bei den Versuchen im VZ 4 in Zellen mit einem Durchmesser von 7 cm und einer Höhe von 2 cm eine händische Regelung des konstanten Weges beim Quelldruckversuch sowie der Kraft beim Quellhebungsversuch durchgeführt wurde.

Die Quelldruckentwicklung scheint maßgeblich vom verfügbaren Porenraum sowie dem Verwitterungszustand und damit von den Materialeigenschaften abzuhängen. Proben im VZ 3 (Zerfall nach 1 TBW) zeigten eine höhere Quelldruckentwicklung als im VZ 1 (Bild 7.29). Da die Proctorkurven beider VZ dicht nebeneinanderlagen, änderten sich die Einbaudichten hier nicht wesentlich. Was sich dagegen von VZ 1 zu VZ 3 änderte, war eine Änderung der Korngrößenverteilung als Folge des Zerfalls in feinere Bruchstücke. Beim Opalinustonstein fand dieser Zerfall sehr schnell statt. Nach zwei Zyklen wurde dieser im Siebtrommelversuch bereits als niedrig zerfallsbeständig klassifiziert. Damit ändert sich mit zunehmender Verwitterung einerseits die Kornabstufung des Materials und folglich die Durchlässigkeit, die bei besserer Kornabstufung abnimmt. Andererseits hat sich durch den Zerfall der Opalinustonstein in feinere Bröckchen zerlegt, wodurch sich auch die Anzahl der zugänglichen Tonminerale erhöht hat, an denen sich Wasser an- und einlagern kann, was wiederum bei gering verfügbarem Porenraum eine höhere Quelldruckentwicklung begünstigen kann. Ob dabei das Anlagern von immer mehr Wassermolekülen möglicherweise sogar zum Aufbrechen weiterer geschwächter Mineralverbindungen führen kann, lässt sich nur vermuten.

Weiterhin resultierte aus der geringeren Durchlässigkeit im VZ 3 eine deutlich langsamere Sättigung der Probe, die auch wegen der Probenhöhe von 6 cm und den damit verbundenen längeren Kapillareweg dazu führte, dass sich der Quelldruck nur schrittweise und sehr langsam einstellt (UB IV in

Bild 7.29). Es zeigte sich also, dass je geringer die Durchlässigkeit einer Probe ist, desto länger dauert die Quelldruckentwicklung. Für die Sättigung einer Probe mit einer konstant geregelten Höhe von 6 cm können mehrere Wochen erforderlich sein. Deswegen war beispielsweise bei UB IV im VZ 3 auch nach über 70 d noch kein Wasseraustritt am oberen Rand der Belastungsplatte zu erkennen und die Quelldruckentwicklung entsprechend noch nicht abgeschlossen (Bild 7.29).

Außerdem war zu erkennen, dass die Proben im Optimum (UB II, UB IV) mit dem geringeren Anfangsluftporenanteil und der höheren Dichte die geringeren Quelldrücke entwickelten. Erwartungsgemäß treten bei höheren Dichten ein höherer Quelldruck auf. Jedoch können die Proben durch den geringeren Luftporenanteil nur sehr wenig Wasser aufnehmen, dass auch im Vergleich zum Anfangssättigungswassergehalt $w_{s,0}$ erkennbar wird. Wenn demnach nur wenig Wasser aufgenommen werden kann, finden auch geringere Quellreaktionen statt. Im Umkehrschluss zeigten die Proben mit höherem Luftporenanteil und geringerer Dichte eine höhere Wasseraufnahme in den freien Porenraum, wodurch sich mehr Wasser anlagern und sich damit auch ein höherer Quelldruck entstehen konnte.

Weiterhin zeigte sich für die Proben im Optimum (UB II, UB IV), die nur noch wenig Wasser aufnehmen konnten, dass auch die Quelldehnungen sehr gering ausfielen (Bild 7.30, Bild 7.31). Analog zu UB II fielen auch bei UB IV aus den handschriftlichen Aufzeichnungen auf, dass die Quelldehnungen sehr gering waren. Die Proben auf der trockeneren Seite (UB I, UB III) mit den höheren Luftporenanteilen zeigten weiterhin höhere Quelldehnungen. Beide Verläufe der Quellgeraden sind bis auf den unterschiedlichen maximalen Quelldruck ähnlich, wenn man das längere Abwarten der Quelldehnungen von UB III nicht berücksichtigt.

Die Quelldruckentwicklung im VZ 4 war zwar durch die mechanische Regelung fehlerbehaftet, konnte aber als relativer Vergleich zwischen den Böden zweckmäßig sein und ob überhaupt noch eine Quelldruckentwicklung stattfand. Da hier sowohl die dichteste als auch die lockerste Probe den höheren Quelldruck zeigten, scheint eine allgemeine Abhängigkeit vom Einbauzustand nur schwer definierbar. Der Einfluss der Regelung, der wiederum Einfluss

auf den Einbauzustand hat, scheint größer zu sein. Insgesamt fielen die Quelldrücke im VZ 4 im Vergleich zu VZ 3 wieder ab, wobei hier allerdings ein vergleichender Versuch im Großödometer mit 6 cm Probenhöhe fehlt. Die Gründe hierfür sind nicht eindeutig. Tendenziell zeigte sich, dass durch den Zerfall des Opalinustonsteins nach 6 TBW zu einem feinkörnigeren Boden ein geringerer Quelldruck ausbilden kann, demnach also das Quellen weniger behindert wird. Eine Zerlegung in feinere Bruchstücke geht nur, wenn die schwachen Mineralbindungen gelöst werden. Durch die Erhöhung gelöster Minerale steigt auch deren Abstand zu einander. Damit findet Quellen durch Wasseranlagerung zwar noch statt, aber der Quelldruck beim osmotischen Quellvorgang bildet sich durch den höheren Abstand zwischen einzelnen Tonmineralen nicht so stark aus. Zudem verringern sich mit zunehmender Verwitterung zwar die Trockendichte, aber die Proctorkurve wandert auch näher zur Sättigungslinie. Die feinkörnigeren Böden können damit mit geringerem Luftporenanteil eingebaut werden. Erst Proben, die deutlich dichter als im Prototoptimum eingebaut werden, können dann ggf. einen höheren Quelldruck aufbauen. Das Zusammenspiel zwischen dem Verdichtungsgrad und dem für eine mögliche Wasseraufnahme nutzbarem Porenraum sowie das vorhandene Quellpotential des Bodens

selbst bestimmen schließlich die Höhe des Quelldrucks und der Quelldehnungen.

Die Quellhebungsversuche im VZ 4 zeigten auf, dass trotz gleicher Einbaubedingungen unterschiedliche Ergebnisse auftreten können. Einflüsse, die hierbei nicht erfasst werden können, ist die Materialverteilung in der Probe zusammen mit der Sofortsetzung, die zu unterschiedlichen Dichten vor Wasserzugabe führen kann. Bereits kleinere Unterschiede in der Verteilung von gröberen und feineren Körnern im Bereich < 2 mm können zu unterschiedlichen Dichten und dadurch zu unterschiedlichen Wasseraufnahmevermögen führen. Trotz unterschiedlicher Endquellungen zeigten aber die beiden Quellgeraden im VZ 4 in UB V (Bild 7.31) jeweils ähnliche Steigungen, was sich in nahezu identischen Quellparameter (Bild 7.32) widerspiegelt. Die höheren Quellungen des QH 1 im UB VI der letzten Laststufe im Vergleich zu QH 2 zeigen sich auch im höheren Quellparameter (Bild 7.32). Bezüglich des Quellparameters variieren die Ergebnisse. Mit zunehmenden Spannungen kann er sowohl zu nehmen als auch abnehmen. Dies hängt auch stark von der Zeitdauer der Laststufen und damit vom Abklingen lassen der Quellreaktionen ab.

UB	Art	Einbaubedingungen						Quelldruck		Endquell- dehnung	Quellpara- meter
		w_0	$w_{s,0}$	$\rho_{d,0}$	$D_{Pr,0}$	$S_{r,0}$	$n_{a,0}$	$\sigma_{z,max}$	$\sigma_{z,min}$		
		[%]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[%]	[-]
I	QD-QH	12,8	17,6	1,829	96,7	72,8	8,7	65,5		2,45	0,0213
II	QD-QH	15,7	16,6	1,863	98,5	94,7	1,6	45,0		-	-
III	QD-QH	13,2	18,3	1,805	95,9	72,4	9,1	147,7		3,44	0,0242
IV	QD-QH	16,2	17,1	1,846	98,1	95,2	1,5	130,2		0,46	0,0051
V	QD1	13,0	20,7	1,731	97,0	62,7	13,3	32,2	-	-	-
V	QD2	12,8	21,6	1,704	95,5	59,2	15,0	47,8	-	-	-
VI	QD1	18,2	19,5	1,767	99,0	93,1	2,4	40,3	-	-	-
VI	QD2	18,3	19,6	1,765	98,9	93,5	2,3	17,1	-	-	-
V	QH1	13,6	21,1	1,717	96,2	64,5	12,9	-	32,5	2,30	0,0239
V	QH2	13,6	21,1	1,719	96,3	64,7	12,8	-	32,5	2,23	0,0231
VI	QH1	17,4	19,1	1,779	99,6	91,2	3,0	-	17,5	1,68	0,0261
VI	QH2	17,4	19,1	1,780	99,7	91,5	2,9	-	17,5	1,19	0,0178

Tab. 7.8: Zusammenfassung der Ergebnisse, Opalinustonstein VZ 1 bis VZ 4, UB I bis VI

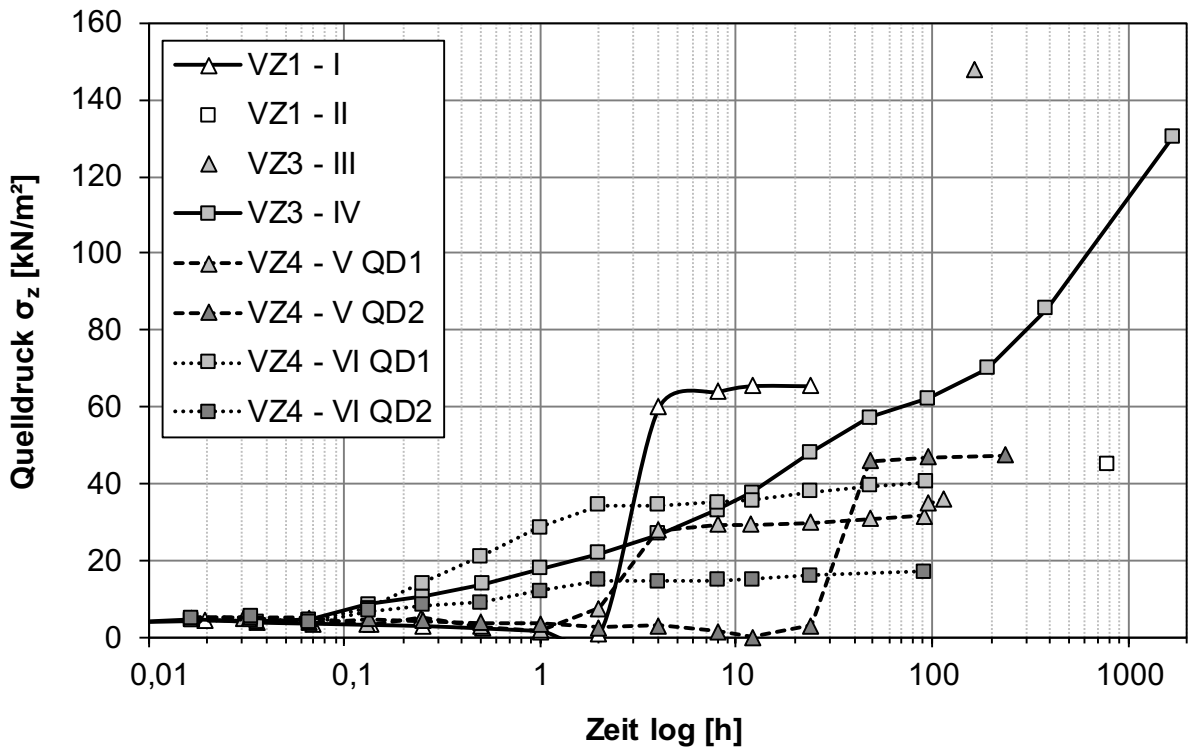


Bild 7.29: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

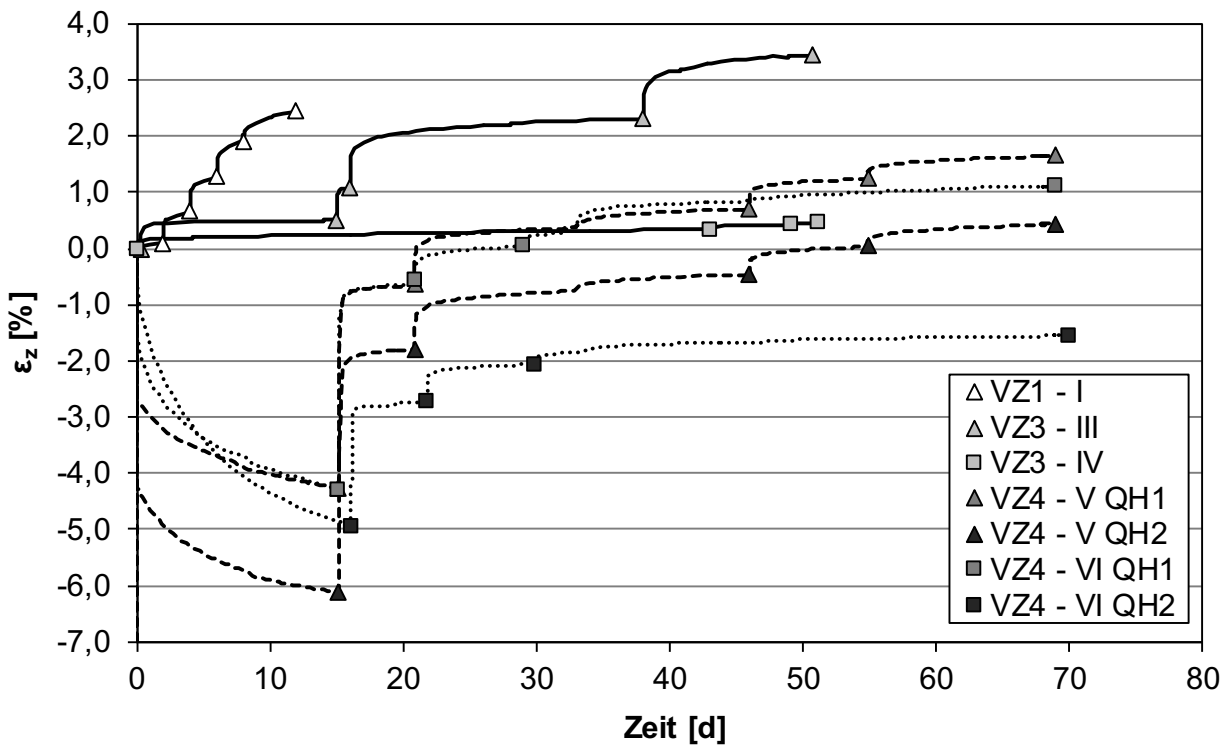


Bild 7.30: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

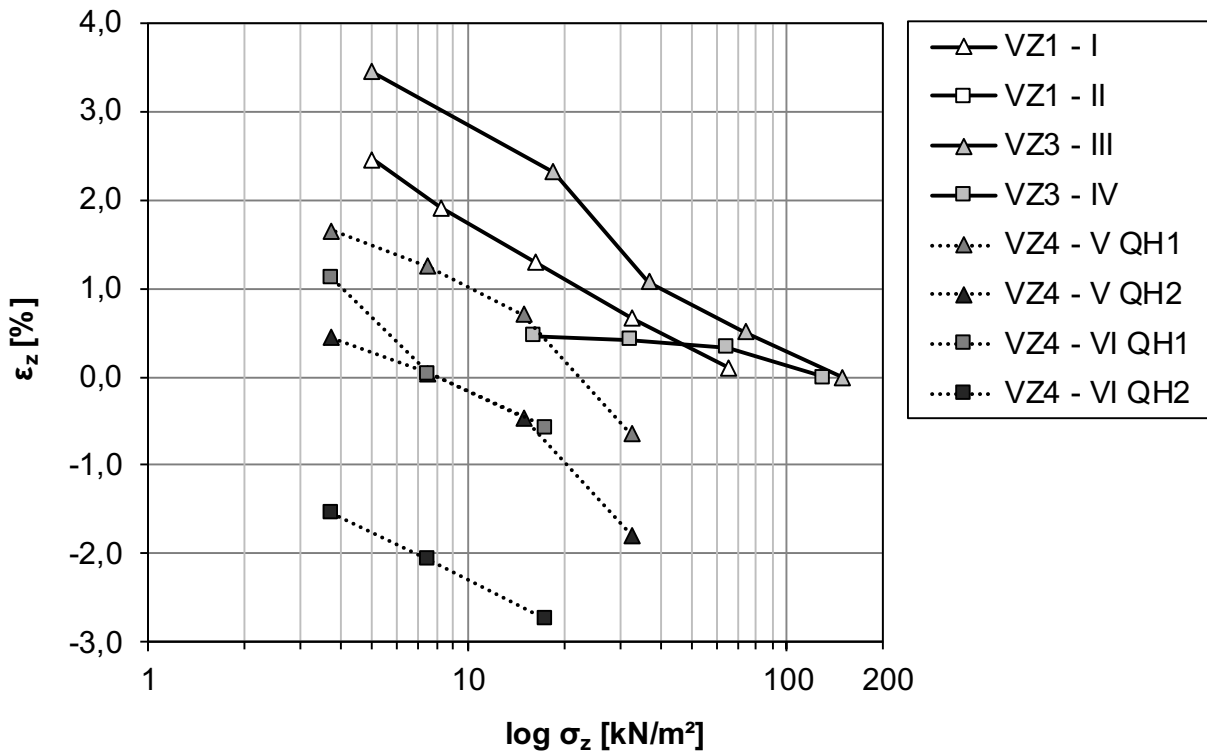


Bild 7.31: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

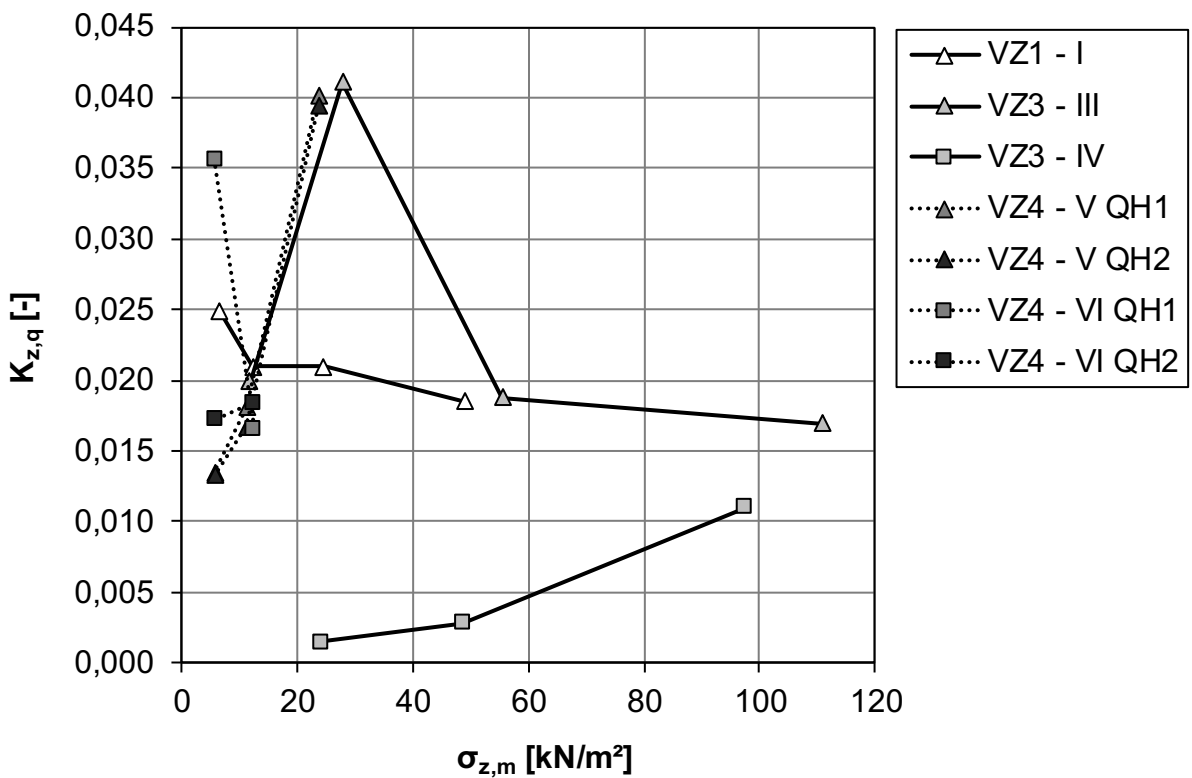


Bild 7.32: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

7.3 Tonmergelstein

7.3.1 Tonmergelstein VZ 1, UB I

Da der Tonmergelstein aus vorhergehenden Kompressionsversuchen relativ hohe Quellneigungen aufzeigte, eine niedrige Zerfallsbeständigkeit nach zwei Zyklen im Siebtrommelversuch aufzeigte sowie einen Smektit-Anteil im Feinkornanteil besaß, wurde er für die Quelluntersuchungen ausgewählt (siehe MÖLLER und HEYER, 2014).

Entgegen der vermuteten Quellfähigkeit zeigte sich im kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuch im VZ 1, dass sich sowohl ein nur geringer Quelldruck von 30 kN/m² ausbildete (Bild 7.33) sowie auch nachfolgende Quelldehnungen (Bild 7.34) im Vergleich zum im VZ 1 deutlich grobkörnigerem Opalinustonstein (Kapitel 7.2) sehr gering waren. Bereits nach ca. 2 h wurden annähernd der Quelldruck erreicht und kaum eine weitere Steigung der Kraft gemessen.

Ursächlich für den sehr niedrigen Quelldruck kann auch der hohe Anfangsluftporenanteil von $n_{a,0} = 16,5\%$ gewesen sein (siehe Tab. 7.15 in Kapitel 7.3.7). Durch diesen hohen Porenraum kann einerseits mehr Wasser aufgenommen werden, aber andererseits können sich einstellende Quelldrücke ungehindert einstellen. Sowohl bei der Ermittlung einer einheitlichen Proctorkurve als auch den Kompressionsversuchen nach MÖLLER und HEYER (2014) hatte sich gezeigt, dass besonders die Einbauwerte im VZ 1 aufgrund der heterogenen

Materialzusammensetzung des Tonmergelsteins oft nur schwer erreicht werden konnten. Eine Quellung von Tonmineralen über die Zeit schien unter diesem Quelldruck nicht weiter statt zu finden. Jedoch bei den Quelldehnungen, die insgesamt betragsmäßig gering ausfielen, war aber ein stetiges Anwachsen der Quelldehnungen zu verzeichnen (Bild 7.34, Bild 7.35). Auch nach 9 bis 10 Tagen war ein Abklingen der Dehnungen nicht zu erkennen. Da die Spannungen der Laststufen aber insgesamt relativ gering sind (siehe auch Tab. 7.9), geht v.a. auf der letzten Laststufe bei 10 kN/m² das Quellen in ein freies Quellen über, das sich am Abfall des Quellparameters zeigt (Bild 7.36). Die geringen Quelldehnungen zeigen sich auch in geringen Werten des Quellparameters.

Für die Verwendung von Ödometern mit Durchmesser von 30 cm sind größere statische Pressen erforderlich, die wiederum bei kleinen Kräften je nach Regelungstechnik in ihrer Anwendung begrenzt sein können. Dass Regelungsfehler im kleinen Kraftbereich auftreten können, zeigte sich hier bei der Quelldruckentwicklung von UB I (Bild 7.33), aber auch bei anderen Versuche wie z.B. dem dunkelroten Mergel (Bild 7.64 in Kapitel 7.4.1). Damit waren die verwendeten Geräte technisch auch nicht auf die Ödometer mit $d = 10$ cm für die Versuche im VZ 4 ausgelegt. Hier traten dieselben Regelungsprobleme bei der Quelldruckentwicklung auf wie bei gering quellfähigen Proben mit $d = 30$ cm, so dass die Versuche im VZ 4 in Ödometern mit $d = 10$ cm in mechanisch vorhandenen Geräten durchgeführt werden mussten.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,max}$	ε_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,04	0,9	30,0	1,00	0,001	0,002	-	-
2	9,1	216,0	20,0	0,67	0,122	0,190	25,0	0,0107
3	17,9	211,8	10,0	0,33	0,295	0,459	15,0	0,0089
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0098$

Tab. 7.9: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 1, UB I

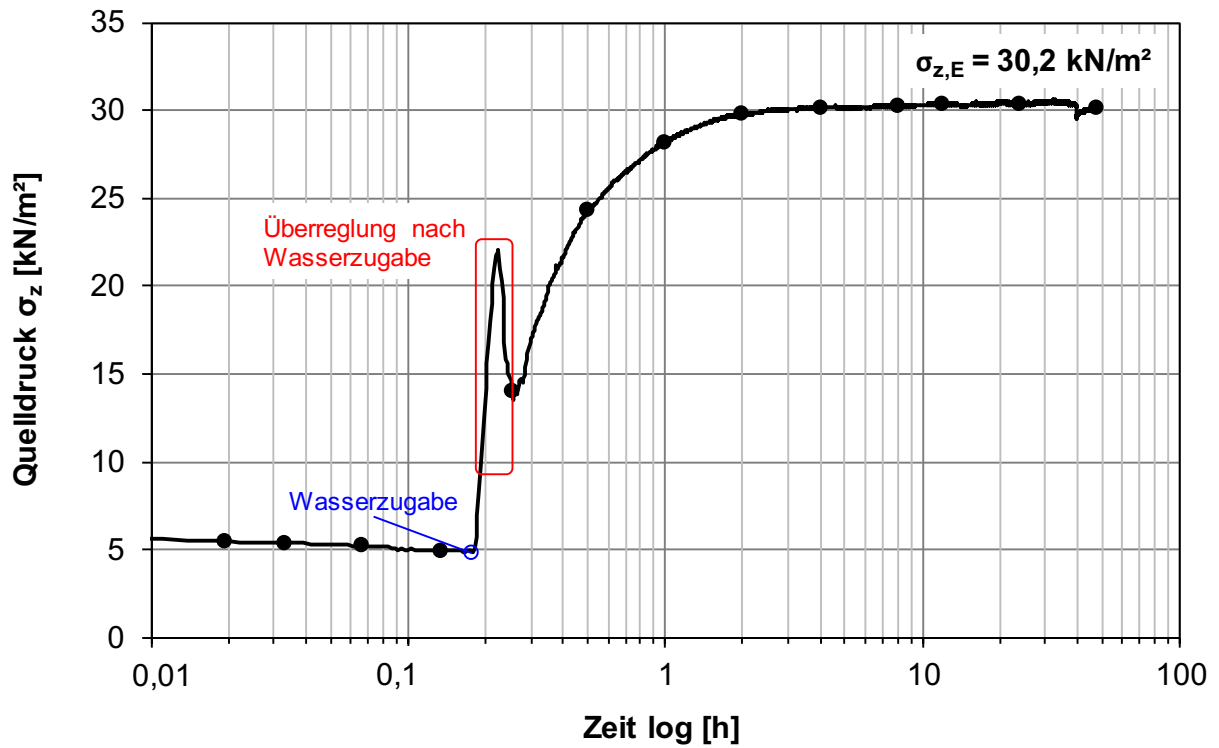


Bild 7.33: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 1, UB I

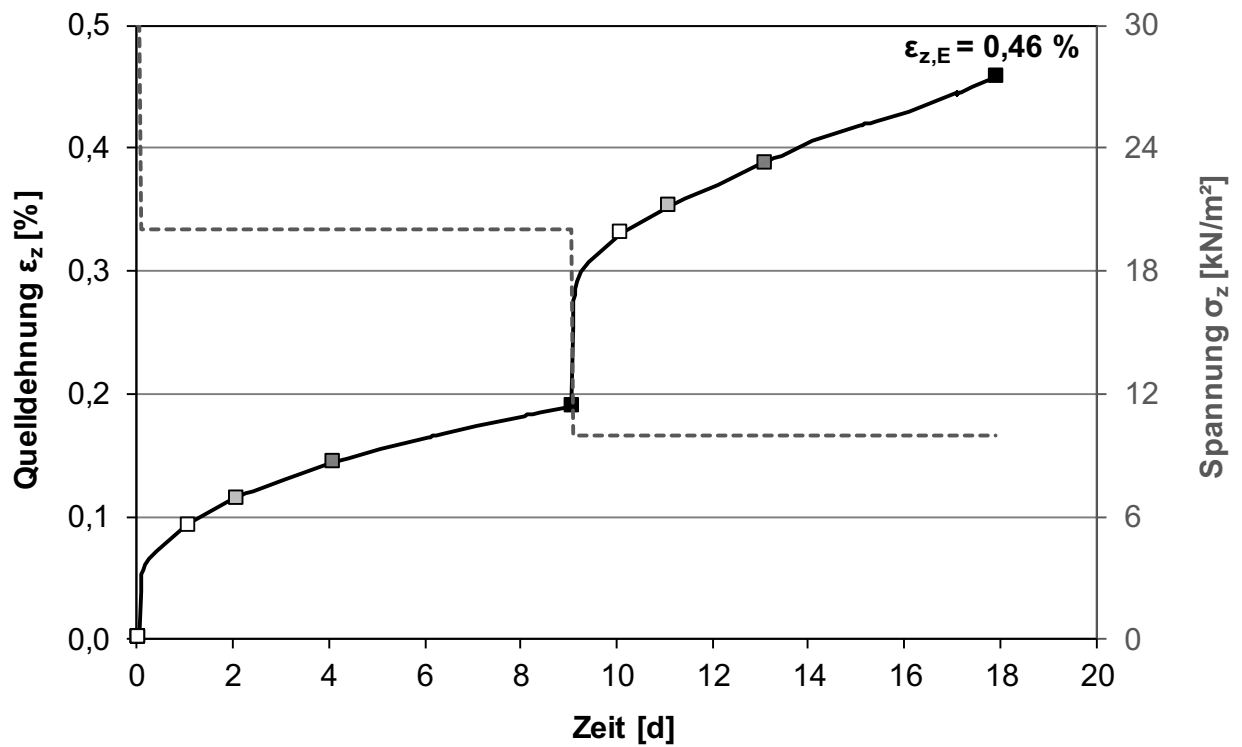


Bild 7.34: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 1, UB I

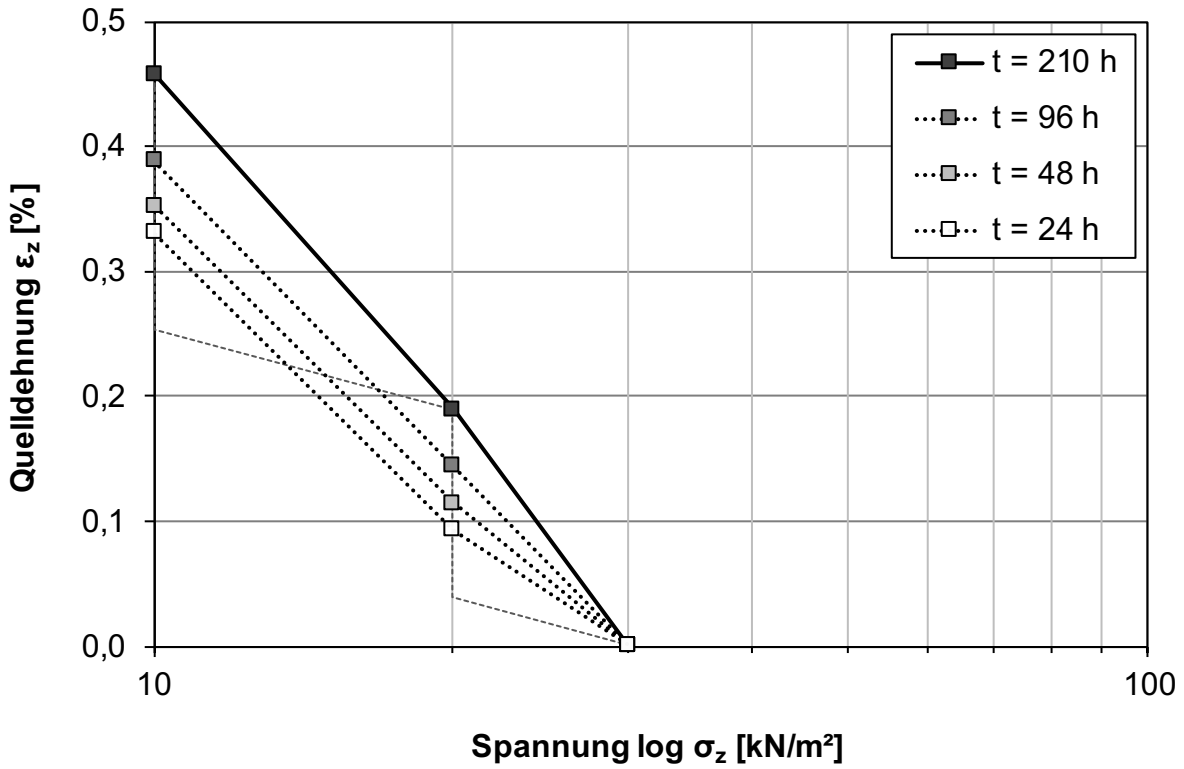


Bild 7.35: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB I

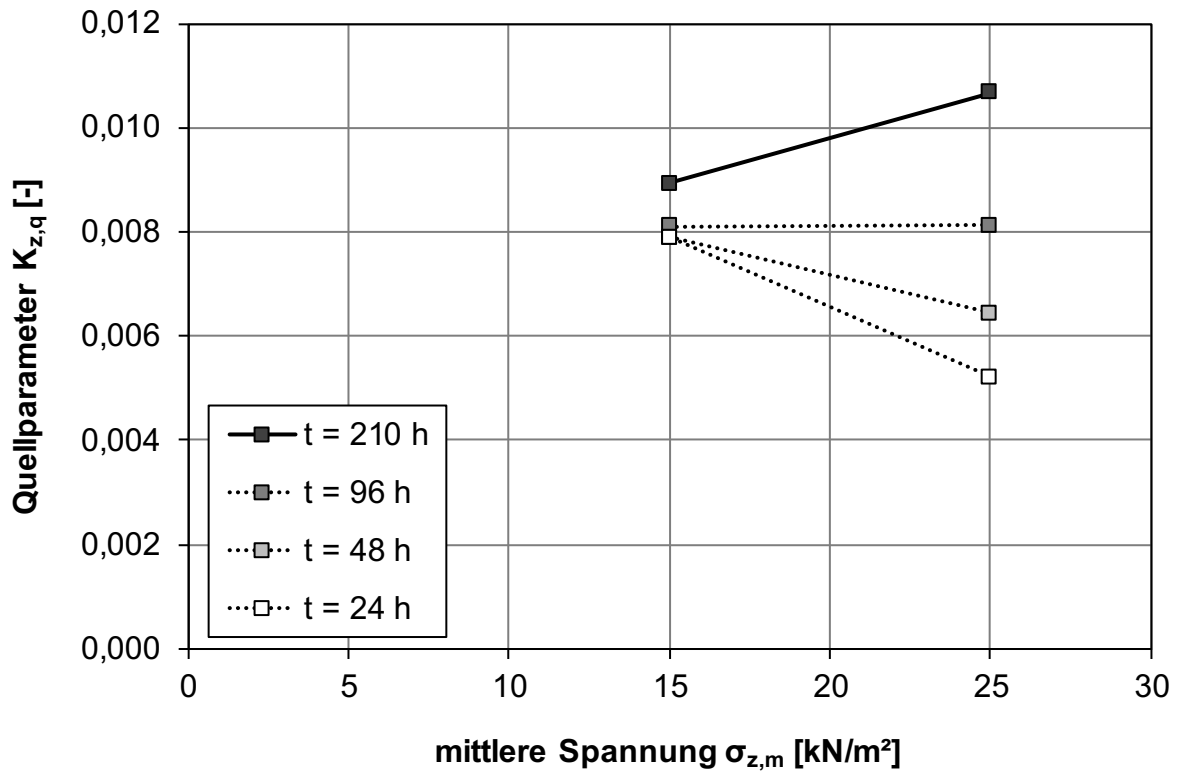


Bild 7.36: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB I

7.3.2 Tonmergelstein VZ 1, UB II

Die Zielwerte wurden auch beim UB II nicht erreicht (siehe Tab. 7.15 in Kapitel 7.3.7). Im Unterschied zu UB I war im UB II jedoch eine deutliche Quelldruckentwicklung bis zu einem Endwert von 114,5 kN/m² (UB I: 30 kN/m²) zu verzeichnen (Bild 7.37). Die Quelldehnungen (Bild 7.38, Bild 7.39) und der daraus resultierende Quellparameter (Bild 7.40) fielen ähnlich niedrig aus wie in UB I. Es wurden nach 12

Tagen weniger als 0,5 % Dehnungen erreicht. Diese waren damit deutlich geringer als beim Opalinustonstein (Kapitel 7.2).

Auch wenn die Quelldehnungen gering ausfielen (Tab. 7.10), genügte ebenso wie bei UB I die Zeit zum Abklingen der Quellmechanismen nicht aus. Auch nach sechs Tagen waren die Dehnungen noch nicht derart abgeschlossen, dass sie sich einer Grenzkurve annäherten, sondern stetig zunahmen (Bild 7.38).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,max}$	ϵ_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,01	0,1	120,0	1,00	0,000	0,000	-	-
2	6,0	144,0	60,0	0,50	0,134	0,213	90,0	0,0071
3	13,0	167,6	30,0	0,25	0,305	0,485	45,0	0,0090
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0081$

Tab. 7.10: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 1, UB II

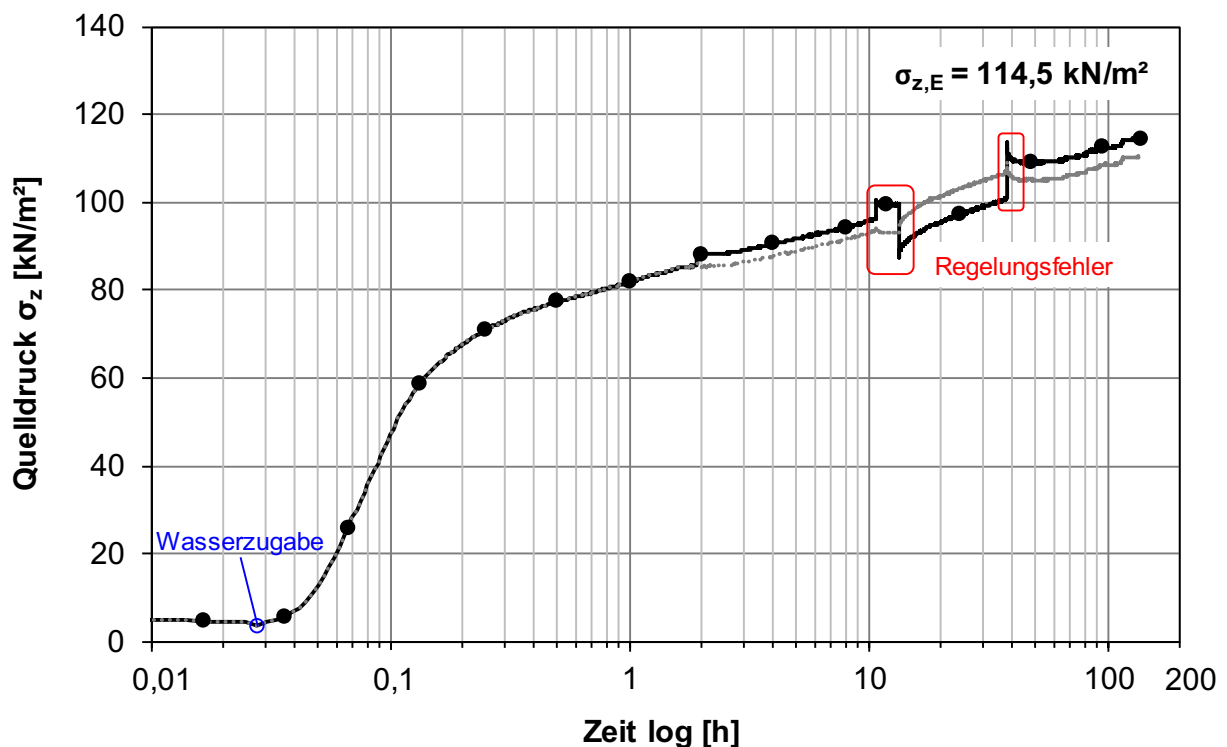


Bild 7.37: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 1, UB II

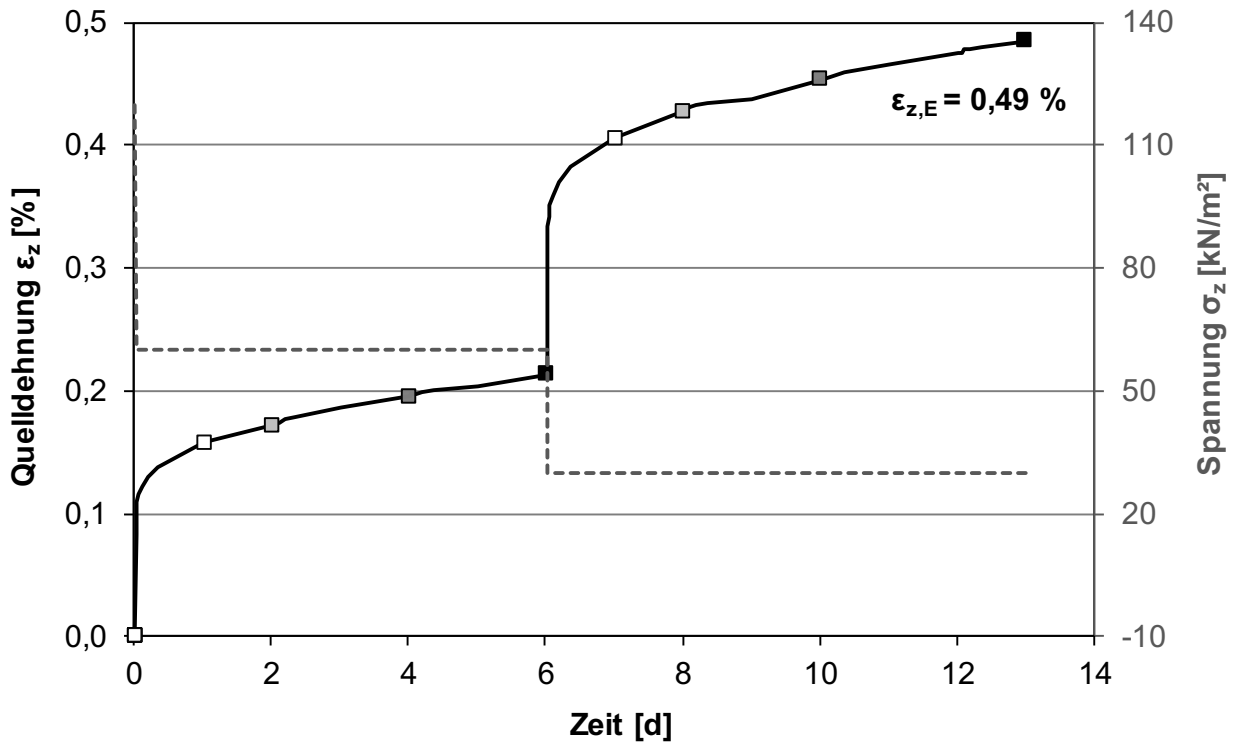


Bild 7.38: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 1, UB II

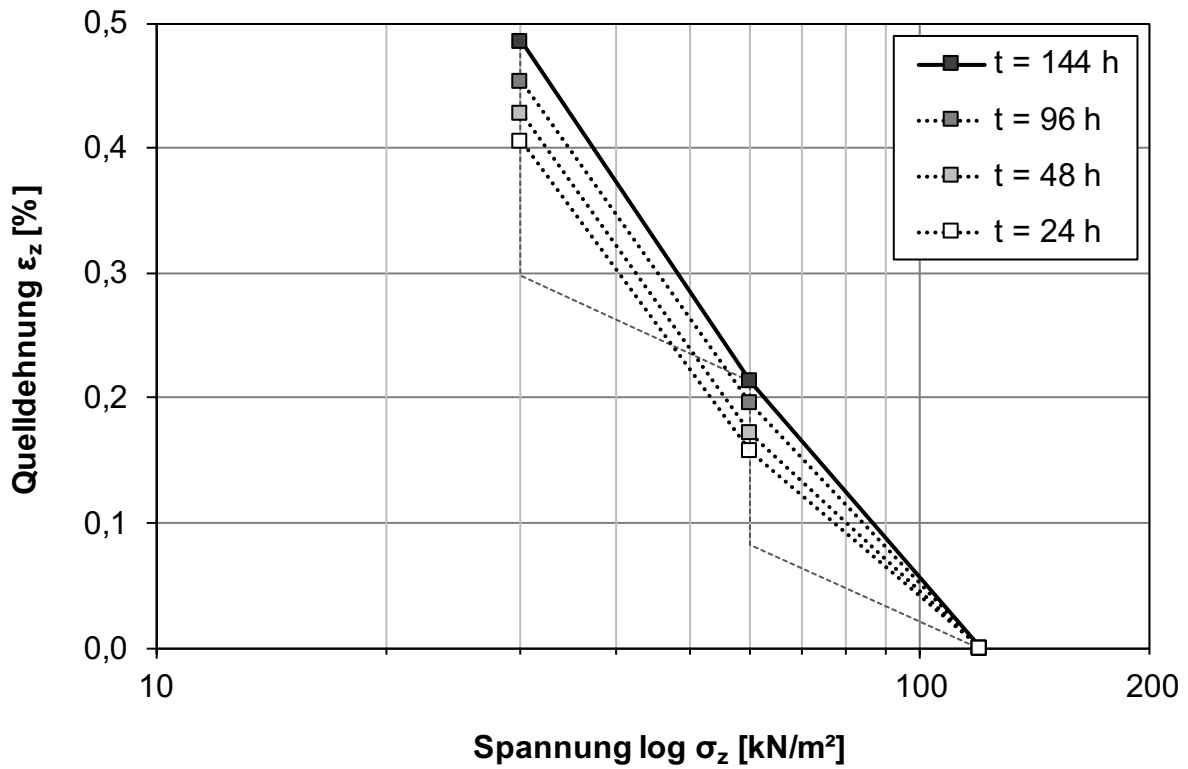


Bild 7.39: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB II

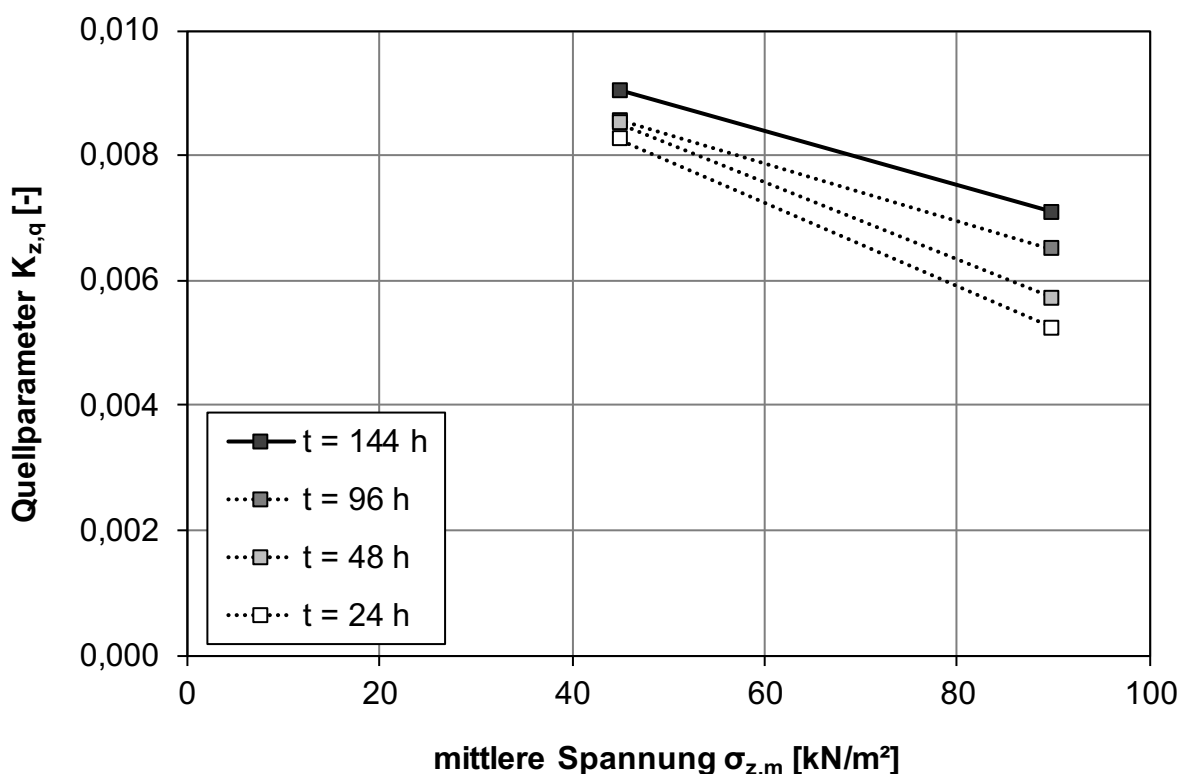


Bild 7.40: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB II

7.3.3 Tonmergelstein VZ 3, UB VII

Die Zielwerte beim verwitterten Material im VZ 3 (nach 2 TBW) konnten deutlich besseren erreicht werden als im VZ 1 (siehe Tab. 7.15 in Kapitel 7.3.7). Auf der trockenen Seite der Proctorkurve im UB VII im Vergleich zu UB I entwickelte sich ein geringfügig höherer Quelldruck (Bild 7.41). Anders als im UB I entwickelte sich der Quelldruck stetig im halblogarithmischen Maßstab. Bedingt durch den höheren Feinkornanteil infolge des Zerfalls und der

damit dichteren und geringer durchlässigeren Probe sättigte diese entsprechend langsamer auf. Die Quelldruckentwicklung dauerte analog zum Opalinustonstein im VZ 3 länger als im VZ 1.

Die Quelldehnungen im VZ 1 waren im Vergleich zum quellfähigeren Opalinustonstein (Kapitel 7.2) sehr gering, wie sowohl aus Tab. 7.11 als auch Bild 7.42 und Bild 7.43 zu entnehmen ist. Entsprechend den geringen Quelldehnungen ergab sich auch ein geringer Quellparameter (Bild 7.44).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,2	4,3	44,0	1,00	0,000	0,000	-	-
2	4,2	96,0	22,0	0,50	0,135	0,226	33,0	0,0075
3	9,9	137,6	11,0	0,25	0,316	0,530	16,5	0,0101
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0088$

Tab. 7.11: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

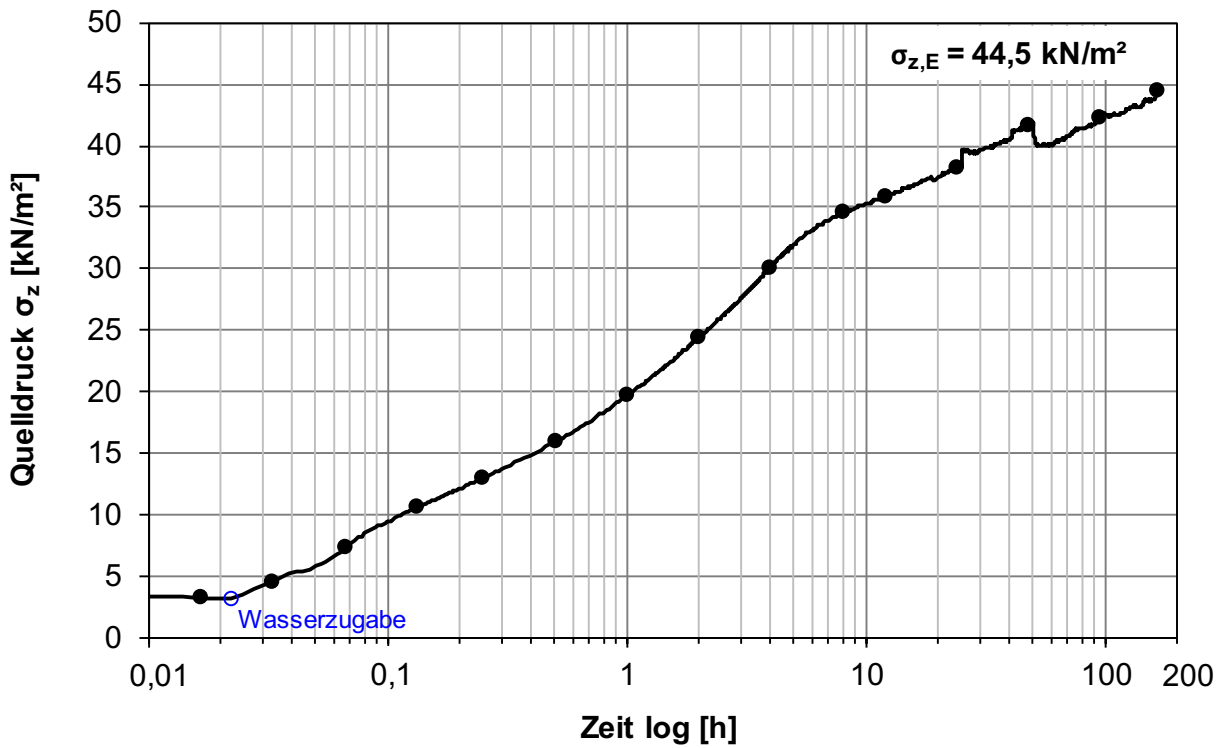


Bild 7.41: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

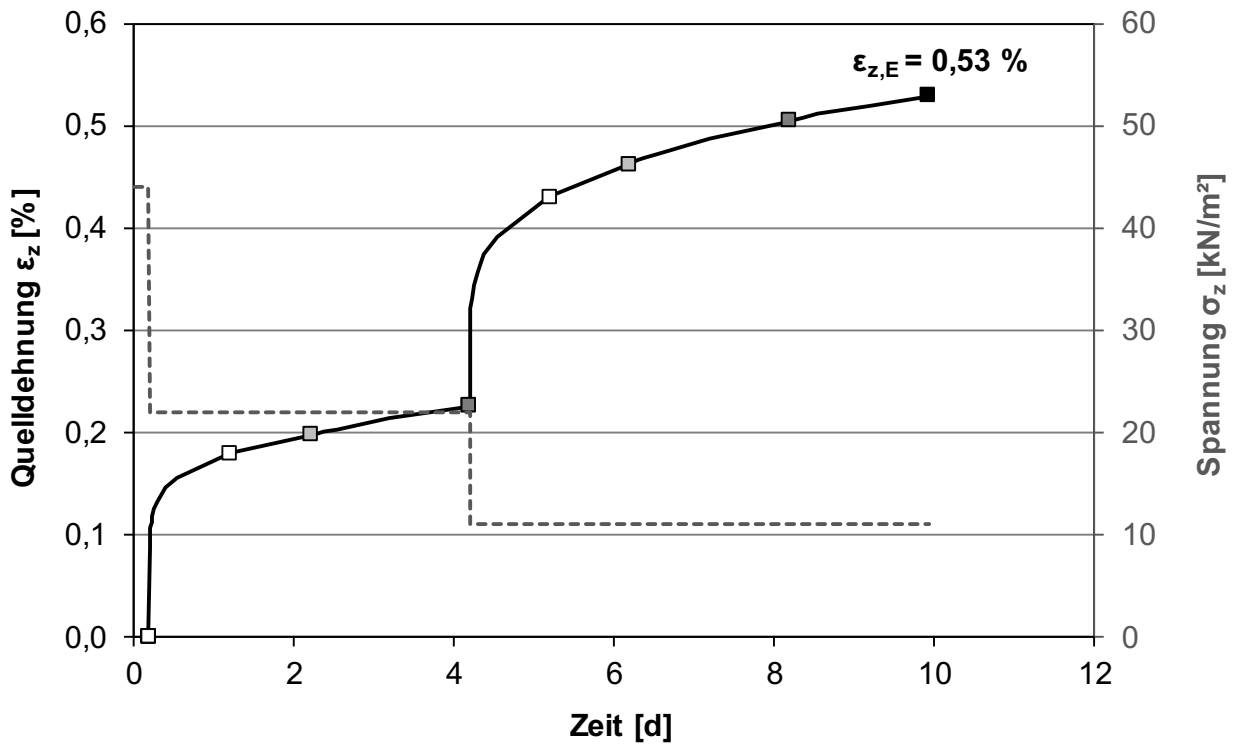


Bild 7.42: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

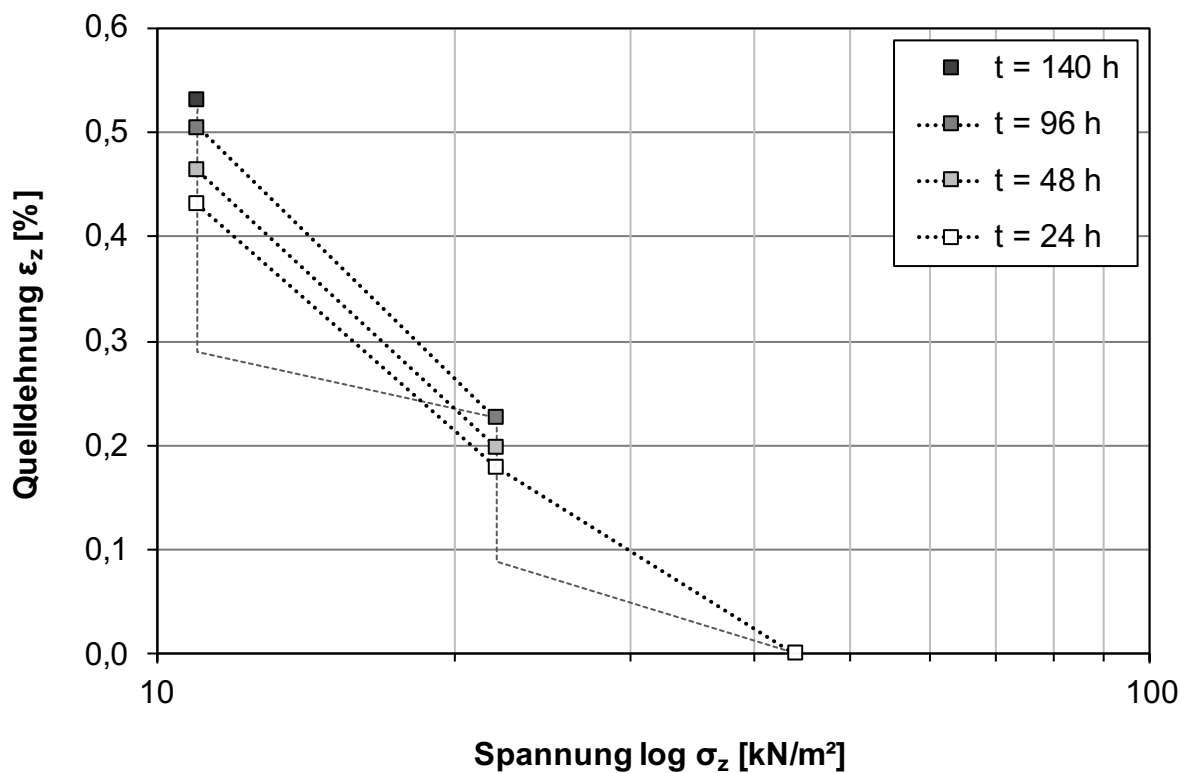


Bild 7.43: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

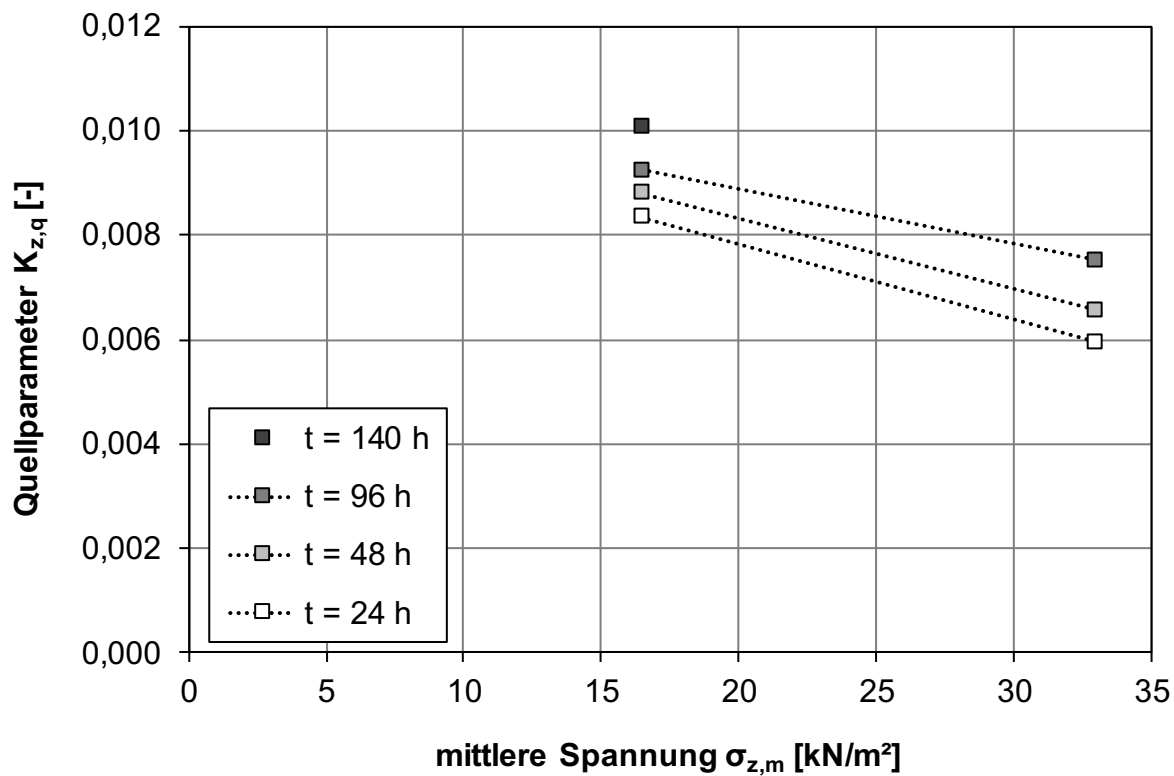


Bild 7.44: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

7.3.4 Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

Im VZ 3 im UB VIII entwickelte sich der geringste Quelldruck der softwaregesteuerten Versuche im VZ 1 und VZ 3. Die Steuerungstechnik regelte in dem geringeren Kraftbereich deutlich häufiger über oder unter (Bild 7.45). Die Quelldehnungen (Bild

7.46, Bild 7.47) und damit der Quellparameter (Bild 7.48) waren hier am geringsten. Analog zu den vorhergehenden Versuchen genügte die Zeit zum Abklingen der Quelldehnungen von über vier bis sechs Tagen nicht aus. Die Ergebnisse aus dem Quellhebungs-Versuch sind in Tab. 7.12 aufgelistet.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$	ϵ_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,0	23,6	21,6	1,00	0,000	0,000	-	-
2	5,0	96,0	14,0	0,65	0,049	0,082	17,8	0,0043
3	10,0	120,0	7,0	0,32	0,184	0,307	10,5	0,0075
*LS = Laststufe								$\varnothing = 0,0059$

Tab. 7.12: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

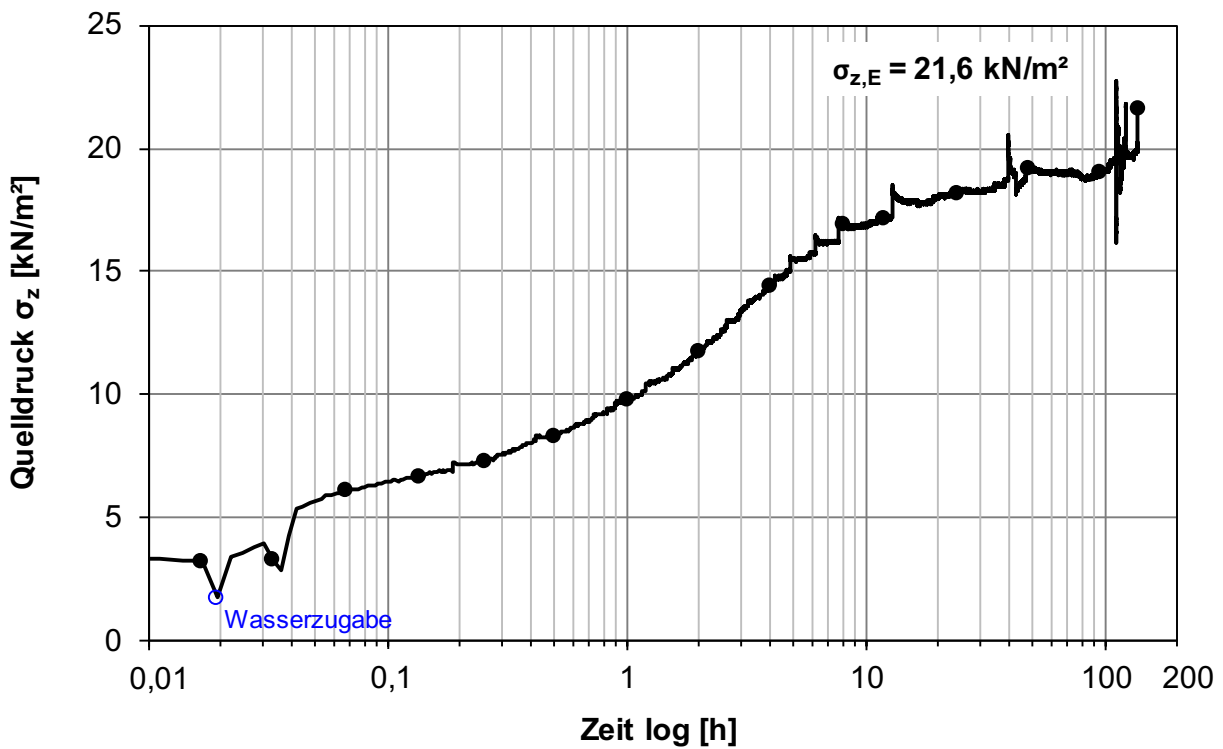


Bild 7.45: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

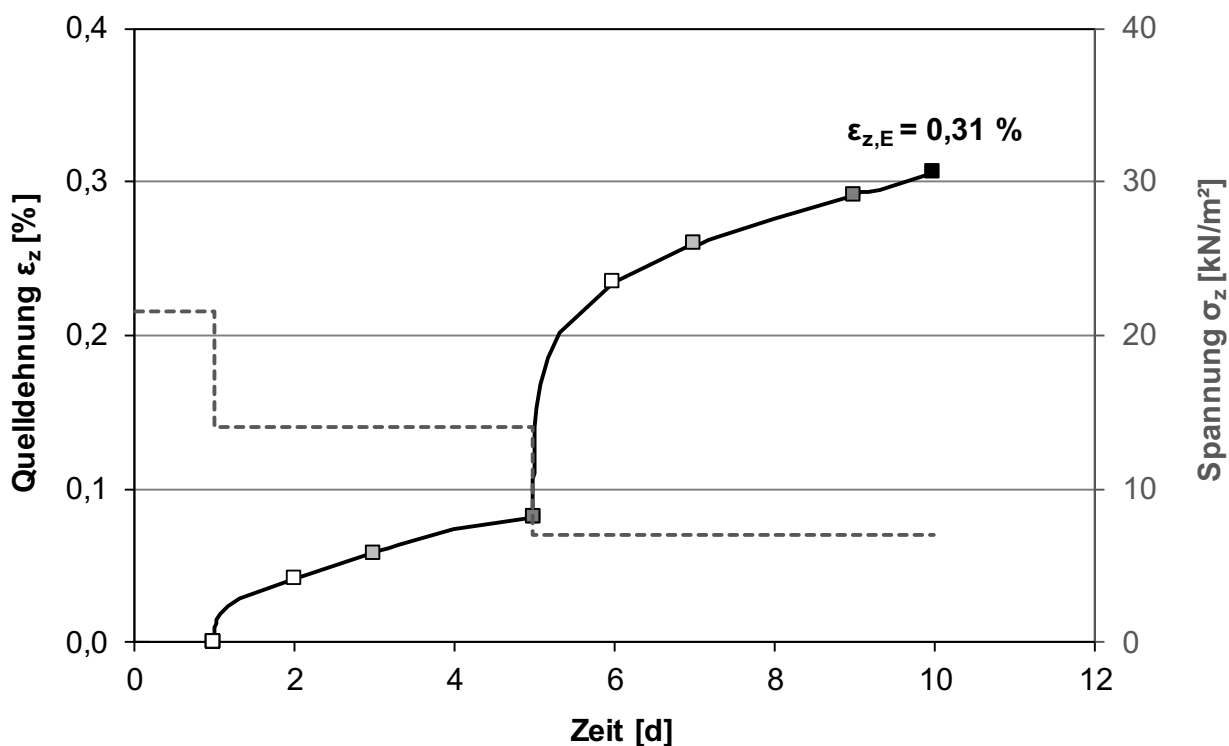


Bild 7.46: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

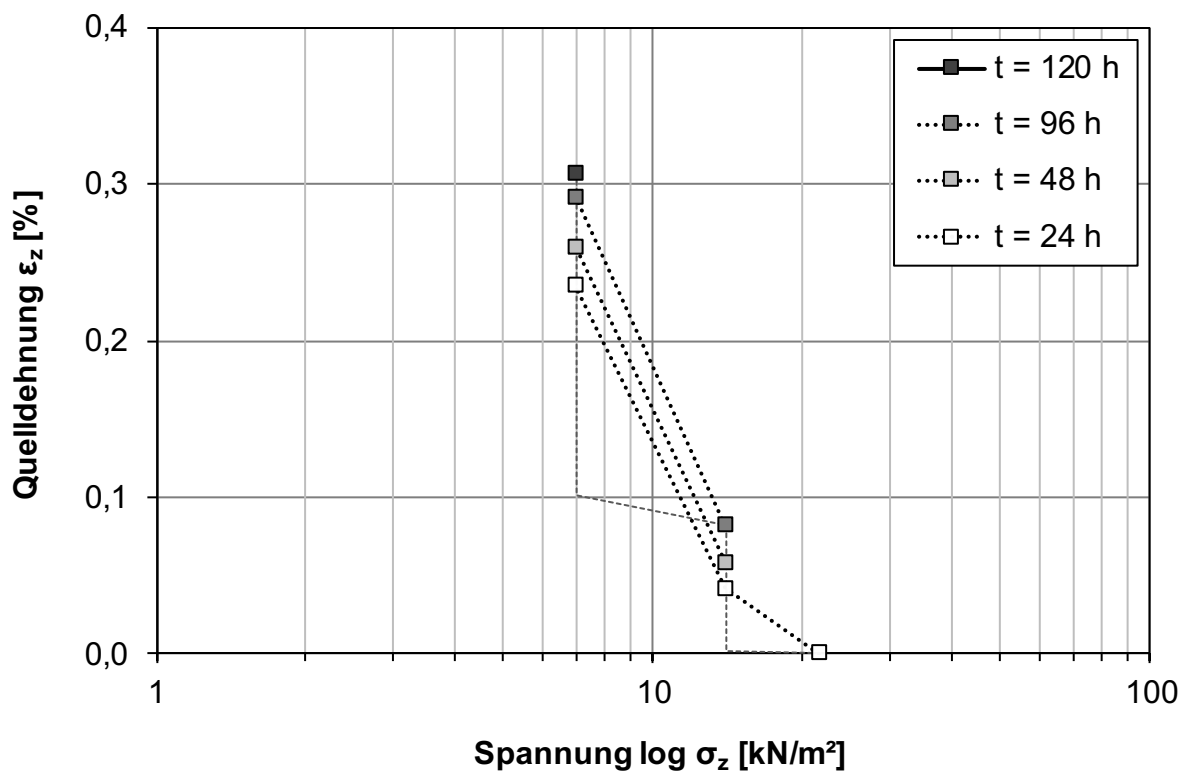


Bild 7.47: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

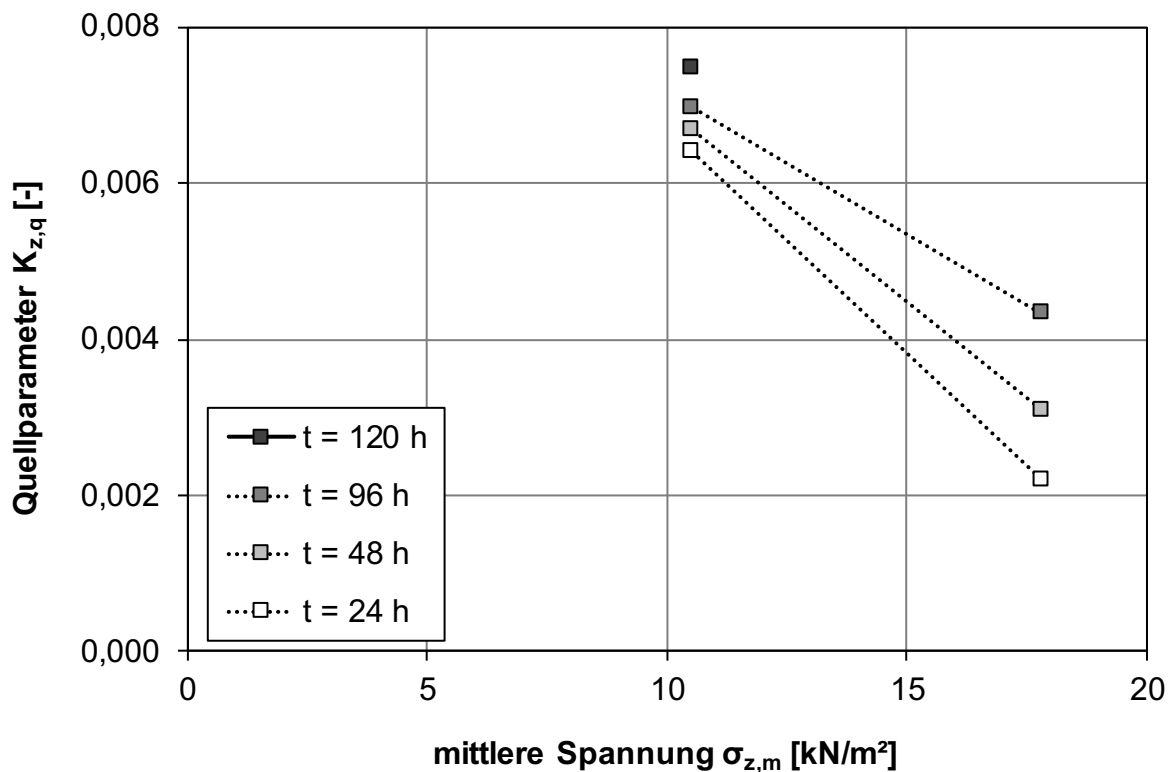


Bild 7.48: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

7.3.5 Tonmergelstein VZ 4, UB IX

Wie bereits beim Opalinustonstein erwähnt, wurden die Versuche der Proben im VZ 4 in kleinen Ödometern mit $d = 10$ cm durchgeführt werden. Bei den verwendeten Versuchsständen war jedoch nur eine mechanische Laststeuerung, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, möglich, so dass die Quelldruck- und Quellhebungsermittlung an separaten Probekörpern erfolgen musste.

Im Allgemeinen zeigte sich im VZ 4 im Gegensatz zu VZ 3 ein geringerer maximaler Quelldruck. Analog zum Opalinustonstein im VZ 4 musste der Weg händisch konstant nachgeregelt werden. Dies war

sowohl technisch als auch zeitlich nur bedingt möglich. Daher wurden immer mindestens zwei Versuche parallel durchgeführt (Bild 7.51). Die Ergebnisse hängen daher von der Anzahl und Feinheit der Nachregelung ab. Bei UB IX erwies sich die händische Nachregelung bei QD 2 als schwierig (Bild 7.50). Warum bei QD 1 (Bild 7.49) sogar der Quelldruck nach ca. 1 h wieder abnahm, kann theoretisch nur an einer Überregelung der Vorbelastung von 5 kN/m gelegen haben. Weitere Nachregelungen nach dem Versuchsstart wurden bei QD 1 nicht durchgeführt.

Die Quelldehnungen waren hier ebenso gering wie in den vorhergehenden Untersuchungsbereichen (siehe Bild 7.52, Bild 7.53 und Tab. 7.13).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,7	41,9	17,5	1,00	-0,241	-1,236	-	-
2	4,7	72,0	17,5	1,00	-0,123	-0,631	-	-
3	6,7	48,1	8,7	0,50	-0,076	-0,390	13,1	0,0080
4	18,9	291,5	3,7	0,21	-0,006	-0,031	6,2	0,0098
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	0,600		$\emptyset = 0,0089$

Tab. 7.13: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

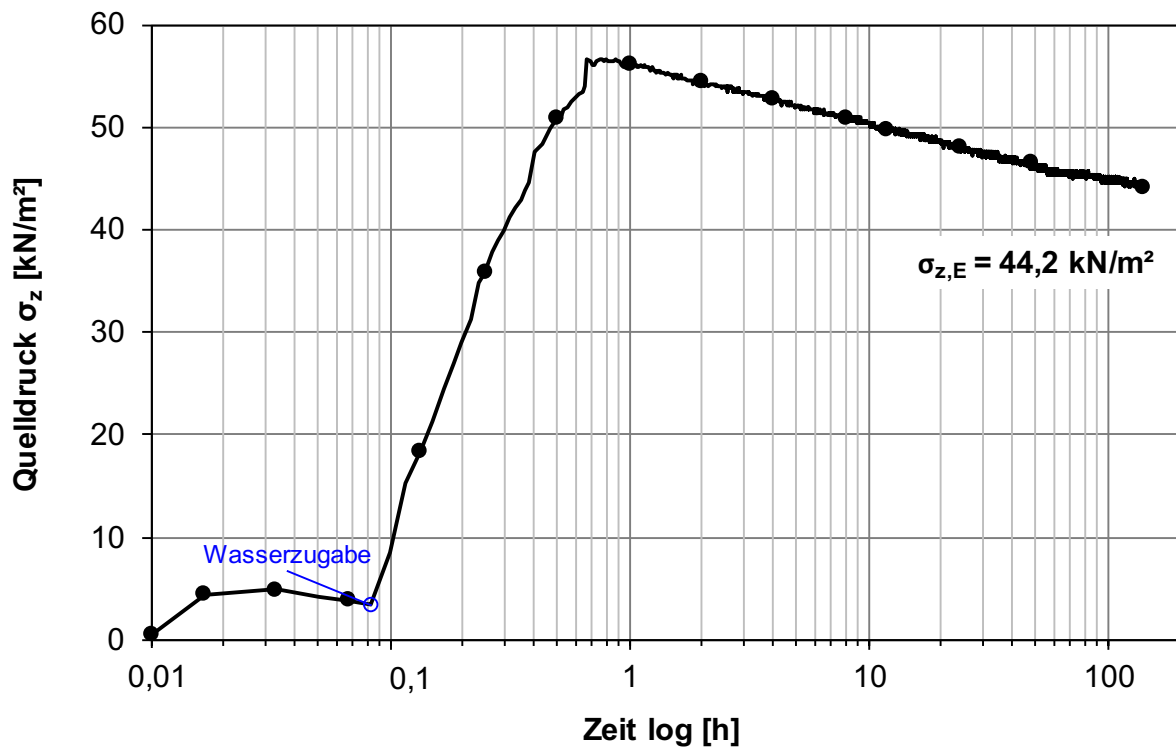


Bild 7.49: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 1 (10 kN)

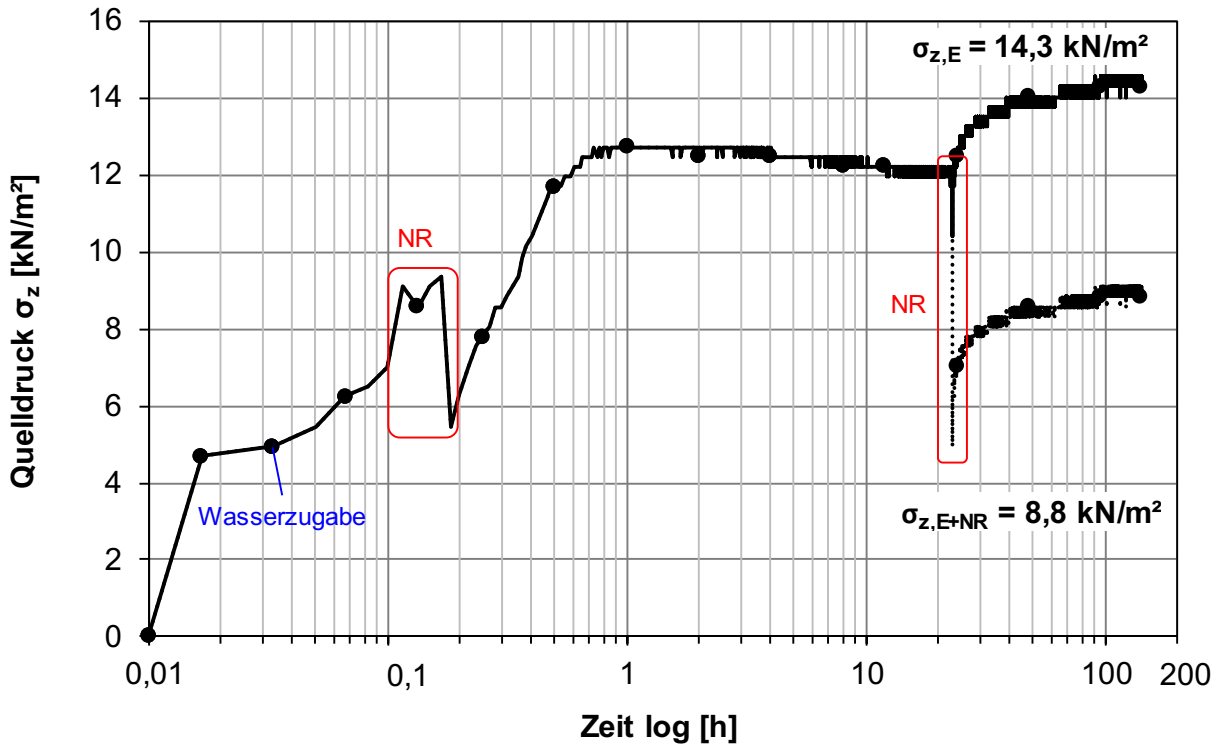


Bild 7.50: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 2 (5 kN)

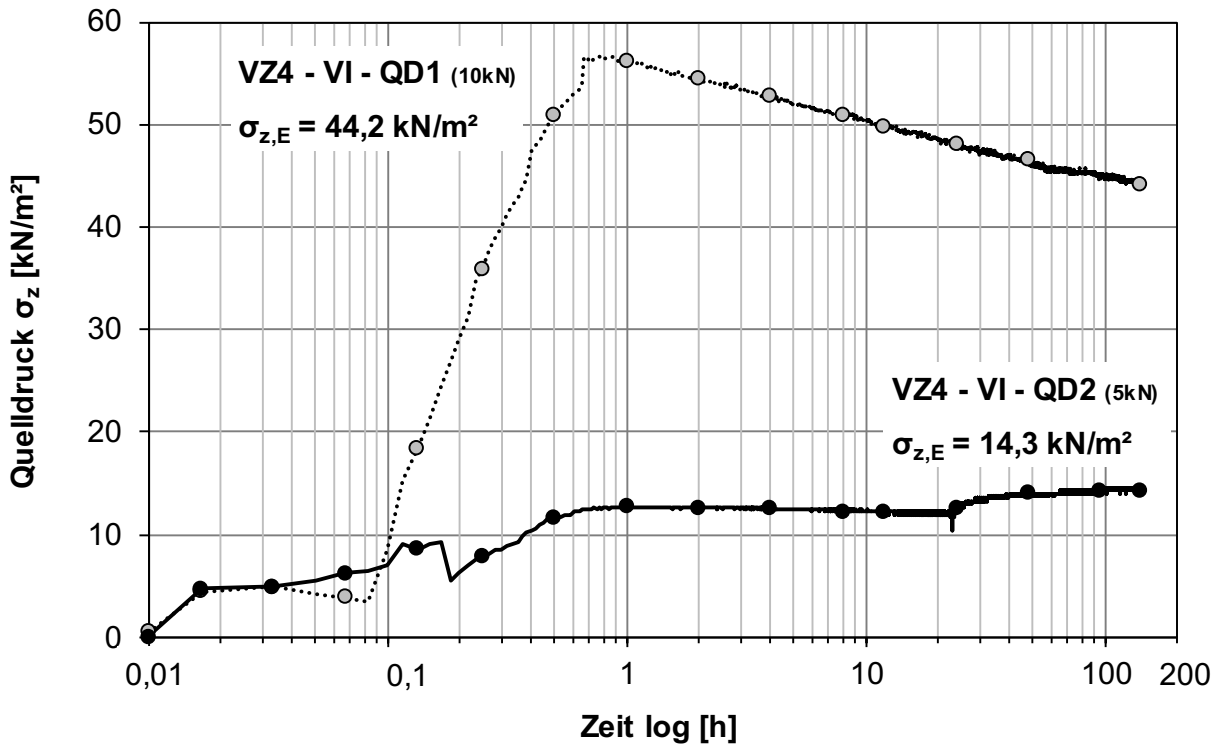


Bild 7.51: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

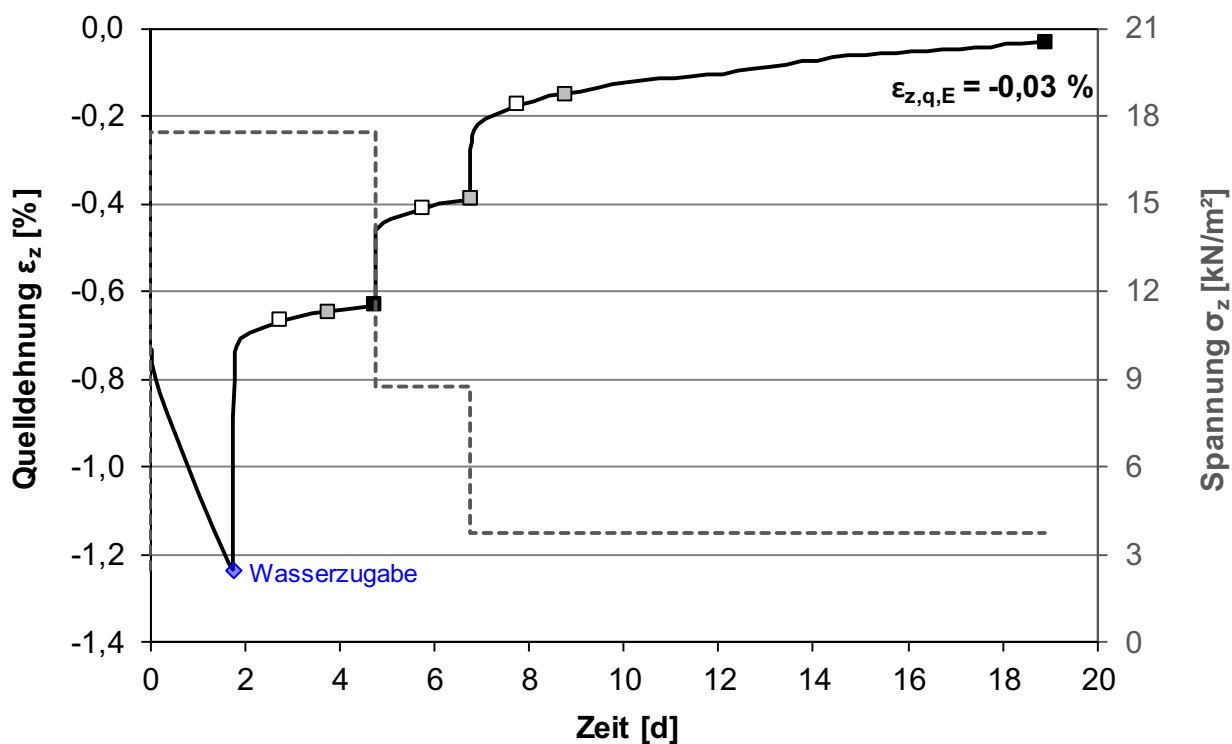


Bild 7.52: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

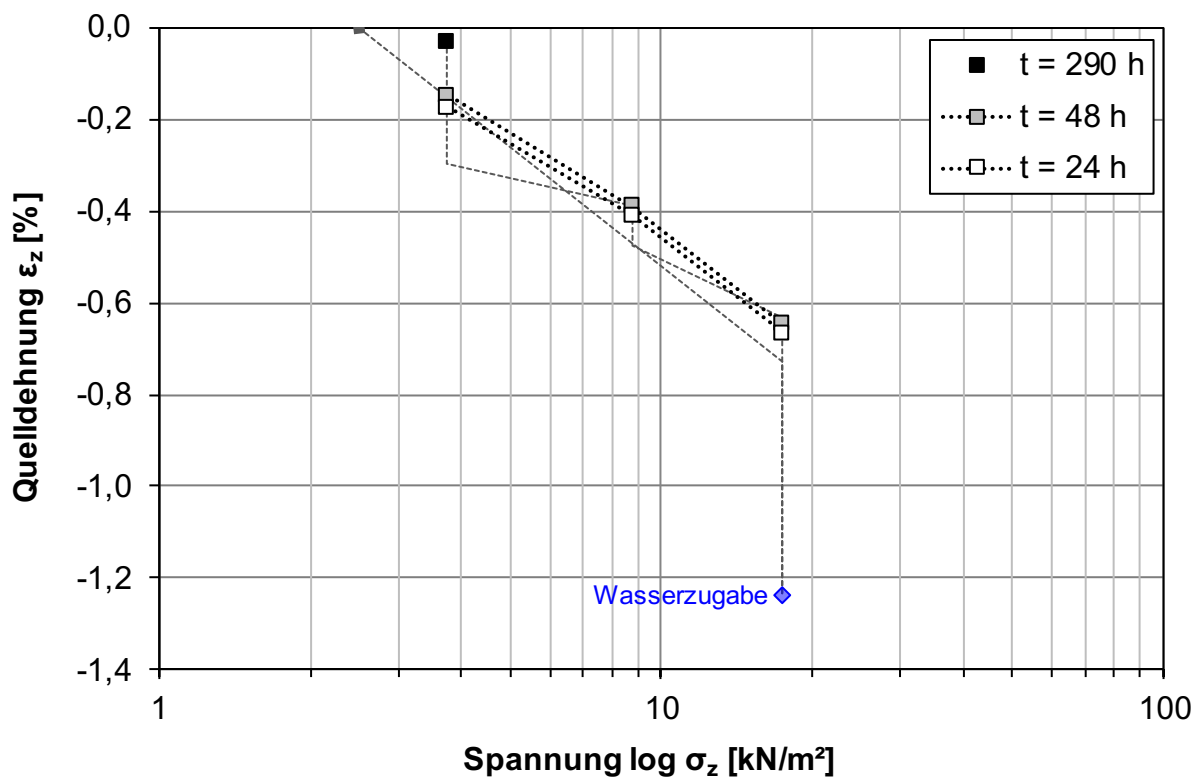


Bild 7.53: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

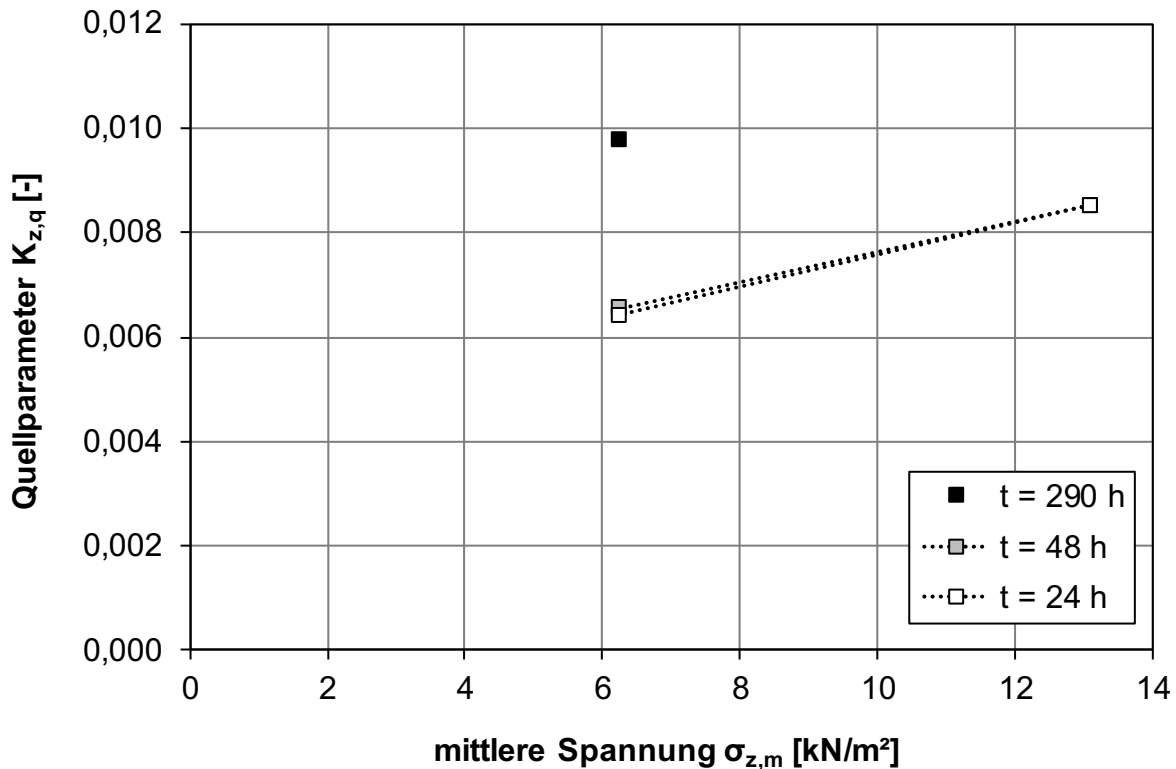


Bild 7.54: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

7.3.6 Tonmergelstein VZ 4, UB X

Die Ergebnisse im UB X sind nachfolgend in Tab. 7.14 aufgelistet sowie in Bild 7.55 bis Bild 7.59 dargestellt. Ähnlich wie im VZ 3 stellte sich im Optimum, also bei UB X ein noch geringerer Quelldruck ein. In diesem Fall war dieser bei QD 1 so gering,

dass eine Nachregelung nicht möglich war (Bild 7.55). Auch bei QD 2 kam es eher noch zu einer Überregelung (Bild 7.56).

Im Allgemeinen zeigte sich, dass die Quelldrücke mit zunehmenden VZ sowie zunehmendem UB tendenziell abnehmen

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$	ϵ_z	$\sigma_{z,m}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,7	42,0	17,5	1,00	-0,124	-0,636	-	-
2	4,7	72,0	17,5	1,00	-0,059	-0,303	-	-
3	6,7	48,0	8,7	0,50	-0,019	-0,097	13,1	0,0068
4	18,7	286,2	3,7	0,21	0,040	0,205	6,2	0,0082
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	0,508		$\varnothing = 0,0075$

Tab. 7.14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 4, UB X

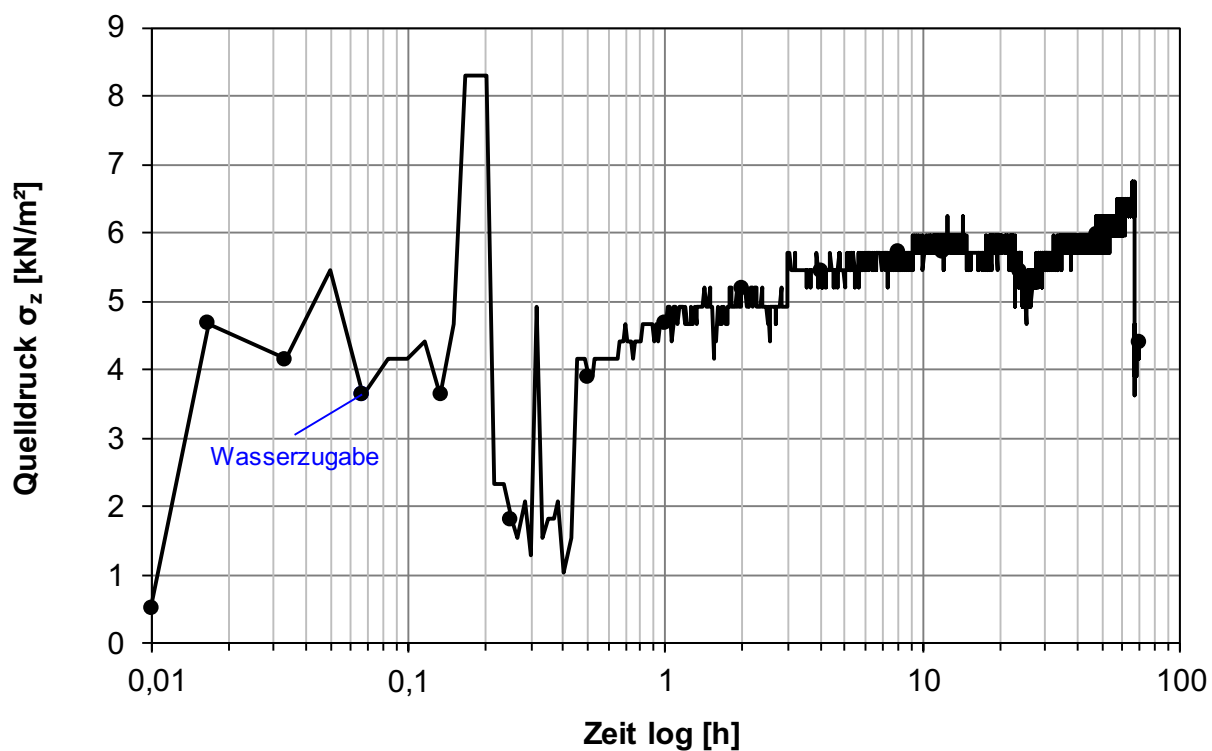


Bild 7.55: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 1 (10 kN)

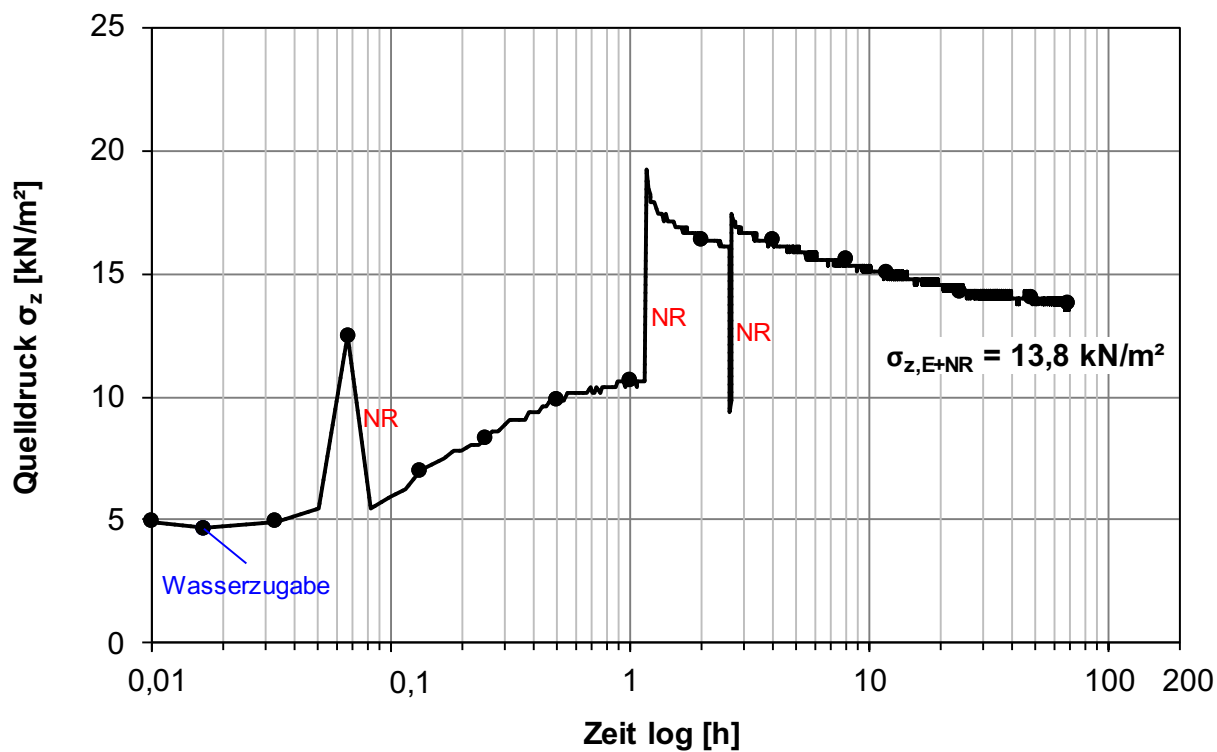


Bild 7.56: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 2 (5 kN)

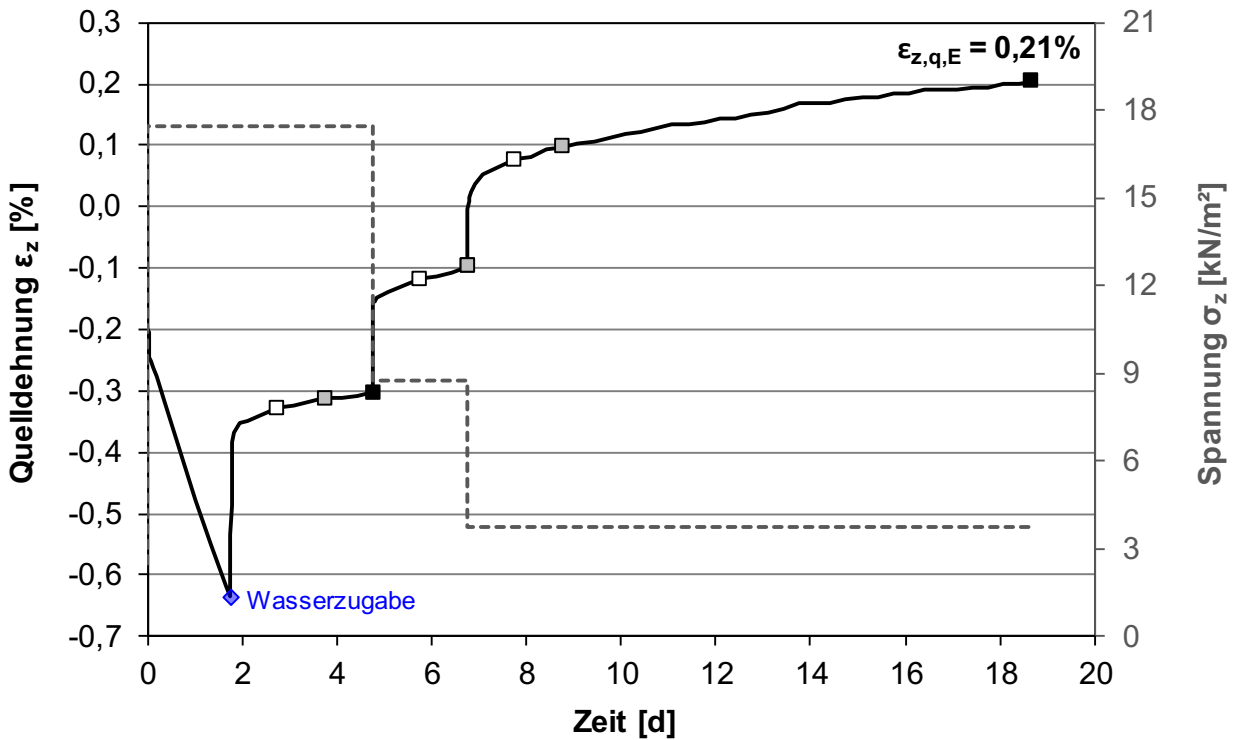


Bild 7.57: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 4, UB X

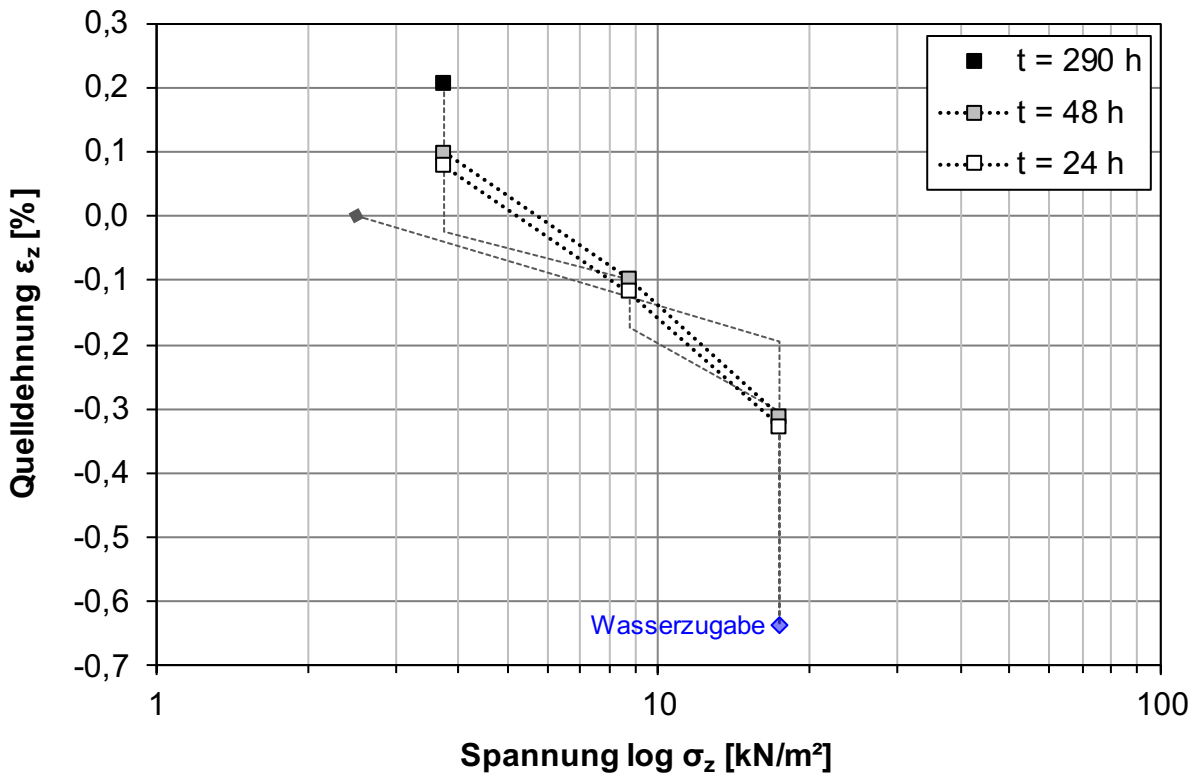


Bild 7.58: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB X

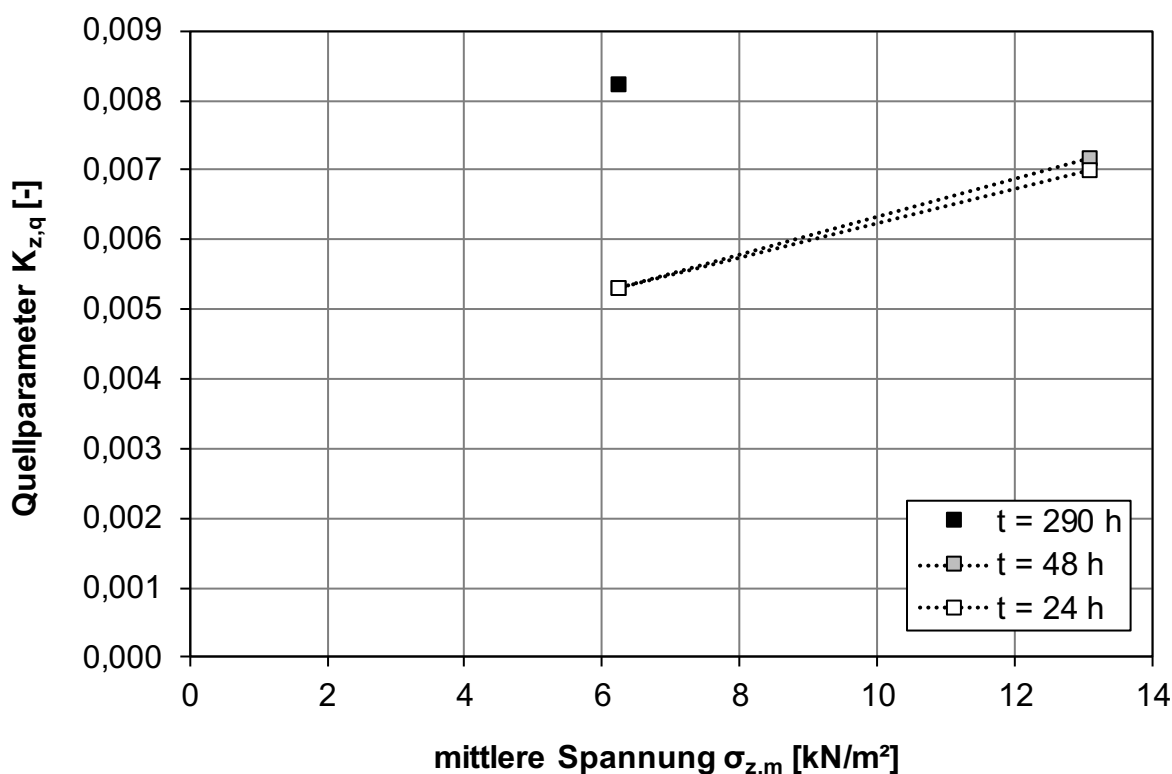


Bild 7.59: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB X

7.3.7 Zusammenfassung Tonmergelstein

Entgegen den Erwartungen aufgrund der niedrigen Zerfallsbeständigkeit bzw. starken und schnellen Zerfallsneigung sowie des vorhandenen Smektit-Anteils zeigte der Tonmergelstein wenig Quelleigenschaften. Quelldrücke bildeten sich entweder relativ schnell und niedrig aus, dass vermutlich nur auf das Ausfüllen des Porenraums zurückzuführen ist. Aber auch die Quelldehnungen und damit der Quellparameter fielen vergleichsweise niedrig aus.

Die Quelldruckentwicklung scheint ähnlich wie beim Opalinustonstein maßgeblich vom verfügbaren Porenraum sowie dem Verwitterungszustand abzuhängen. Hier scheint jedoch, dass mit zunehmendem VZ die Quelldrücke eher abnehmen. Vergleicht man zunächst UB I mit $n_{a,0} = 16,5\%$ und UB II $n_{a,0} = 8,9\%$ im VZ 1 (siehe Tab. 7.15), so waren deutliche Unterschiede in der Quelldruckentwicklung zu erkennen. UB I mit dem hohen Anfangsluftporenanteil konnte deutlich mehr Wasser aufnehmen. Hierbei war der Porenanteil von 16,5 % sogar anscheinend so hoch, dass lediglich der Porenraum sehr schnell mit Wasser gefüllt, die Probe gesättigt

wurde und ggf. einsetzende Quelldrücke sich nicht merklich auswirkten, da genügend Porenraum zur ungehinderten Quellung zur Verfügung stand. Dass Quellreaktionen im Tonmergelstein stattfinden können, zeigte die hohe Quelldruckentwicklung in UB II, der mit 8,9 % einen auch noch relativ hohen Luftporenanteil im Vergleich zu den Empfehlungen für veränderlich feste Gesteine mit 6 % Anfangsluftporenanteil aufwies. Deutlich geringere Luftporenanteile wurden in UB VII mit $n_{a,0} = 5,1\%$ und UB VIII mit $n_{a,0} = 1,0\%$ im VZ 3 erreicht. Gemäß vorhergehender Erläuterungen wäre ein hoher Quelldruck zu erwarten. Allerdings scheint der gering verfügbare Porenraum zu einer geringen Wasseraufnahme und die damit verbundene verringerte Durchlässigkeit zu einer Verringerung der Aktivität der Quellmechanismen geführt haben. Diese geringere Quelldruckentwicklung bei Proben mit geringeren Anfangsluftporenanteilen war auch beim Opalinustonstein bei den Proben im Optimum (UB II, UB IV) zu beobachten. Folglich führt immer ein bestimmtes Verhältnis der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Wasseraufnahme, die durch die Dichte und den An-

fangwassergehalt bzw. den anfänglichen Luftporenanteil bestimmt werden, aber auch durch die aus dem Materialzustand (VZ) resultierende Durchlässigkeit als Resultat der Kornverteilung, zu einem Quellen.

Die Steigung und Verläufe der Dehnungen aus den kombinierten Quelldruck-Quellhebungs-Versuchen sind sehr ähnlich (Bild 7.62). Die Laststufen des UB VIII im VZ 3 verliefen vergleichsweise kürzer (Bild 7.61), dass sich in der Steigung der Quellgeraden widerspiegelt. Alle Quellhebungsversuche

zeigten geringe Quelldehnungen um ca. 0,5 % und damit ergaben sich die geringen Quellparameter (Bild 7.63).

Die Quellhebungsversuche im VZ 4 zeigten ähnliche Kurvenverläufe abhängig von den Einbaubedingungen. Die dichtere Probe UB X ($n_{a,0} = 2,6\%$) zeigte gegenüber UB IX insgesamt eine geringere Anfangssetzung und anschließender Hebung unter der maximalen Last und Wasserzugabe sowie betragsmäßig insgesamt geringere Hebungen mit 0,5 % (Bild 7.61, Bild 7.62).

UB	Art	Einbaubedingungen						Quelldruck		Endquelldehnung $\Delta\varepsilon_{z,q}$	Quellparameter $\varnothing K_{z,q}$
		w_0	$w_{s,0}$	$\rho_{d,0}$	$D_{Pr,0}$	$S_{r,0}$	$n_{a,0}$	$\sigma_{z,max}$	$\sigma_{z,min}$		
		[%]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[-]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[%]	[-]
I	QD-QH	10,1	19,3	1,788	89,5	52,2	16,5	30,2		0,46	0,0098
II	QD-QH	11,9	16,6	1,877	93,9	71,5	8,9	114,5		0,49	0,0081
VII	QD-QH	16,0	18,8	1,803	98,1	85,1	5,1	44,5		0,53	0,0088
VIII	QD-QH	17,6	18,2	1,824	99,3	97,1	1,0	21,6		0,31	0,0059
IX	QD1	14,0	20,8	1,727	98,7	67,4	11,7	44,2	-	-	-
IX	QD2	15,3	23,3	1,656	94,6	65,6	13,3	14,3	-	-	-
X	QD1	19,2	20,0	1,752	100,1	96,0	1,4	4,2	-	-	-
X	QD2	19,7	20,5	1,737	99,2	96,2	1,4	13,8	-	-	-
IX	QH	18,5	21,2	1,729	98,8	87,3	4,7	-	17,5	0,60	0,0089
X	QH	19,4	20,9	1,739	99,4	92,9	2,6	-	17,5	0,51	0,0075

Tab. 7.15: Zusammenfassung der Ergebnisse, Tonmergelstein VZ 1 bis VZ 4, UB I bis X

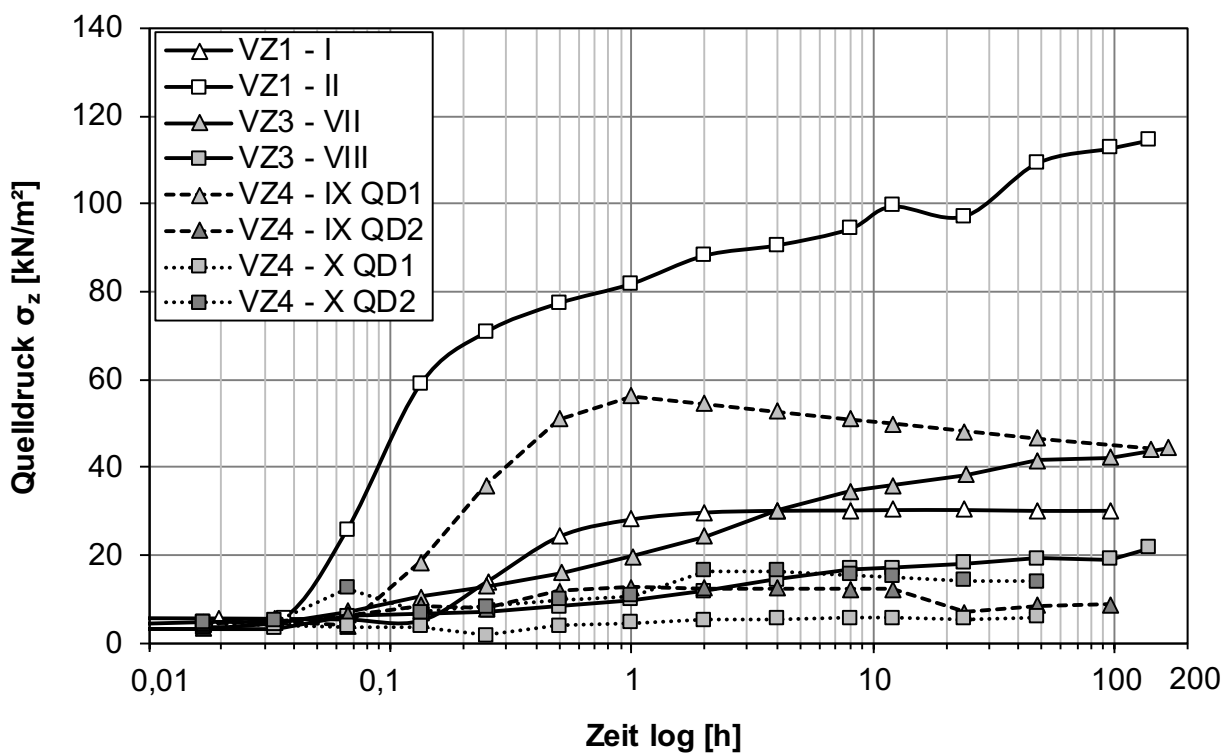


Bild 7.60: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

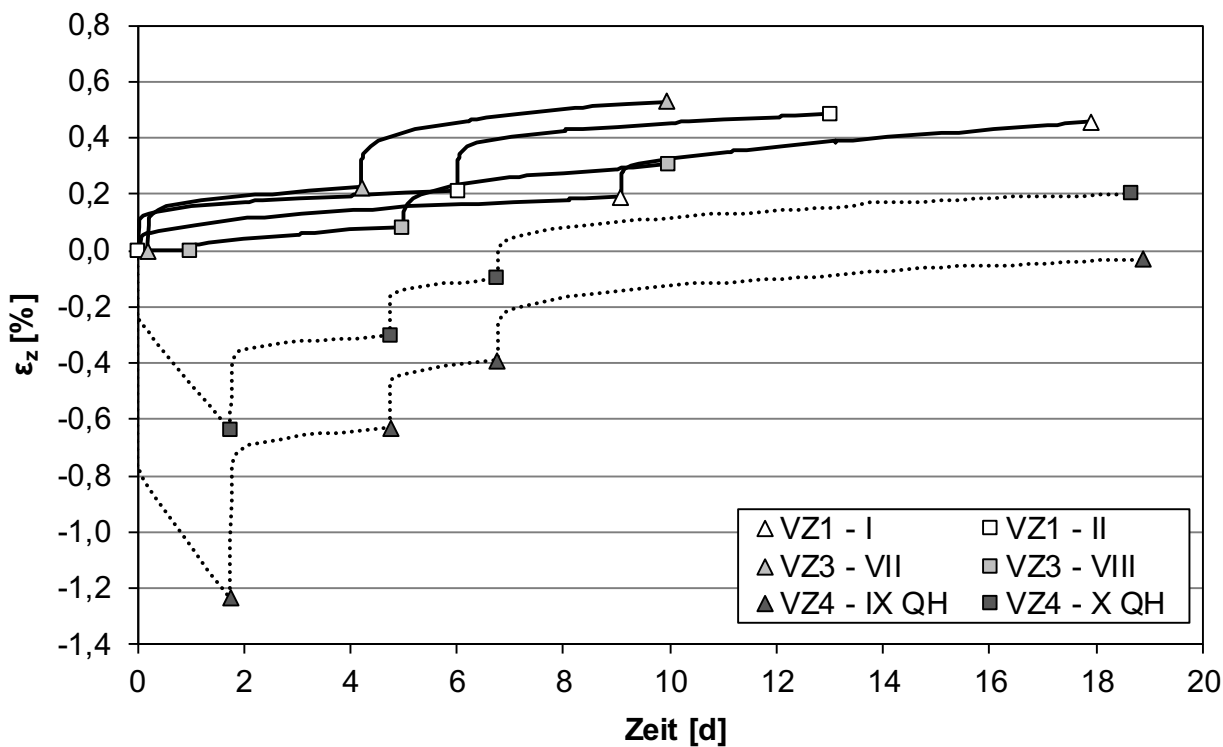


Bild 7.61: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

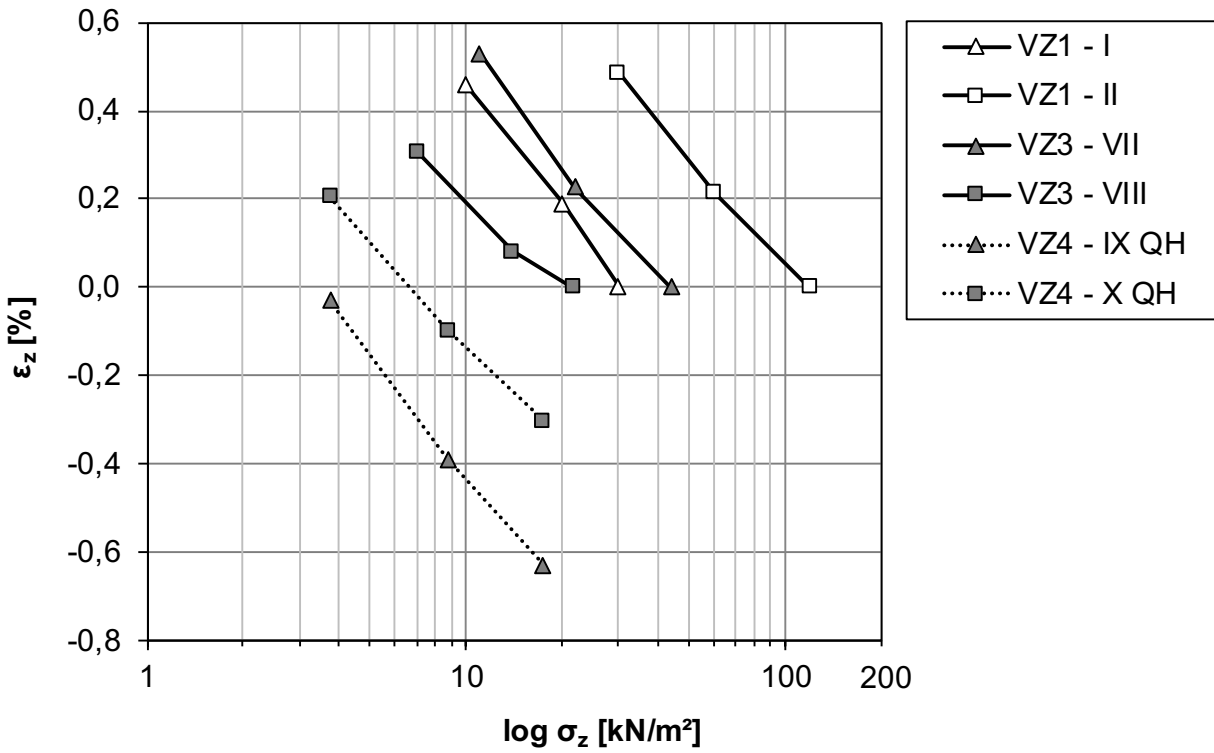


Bild 7.62: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

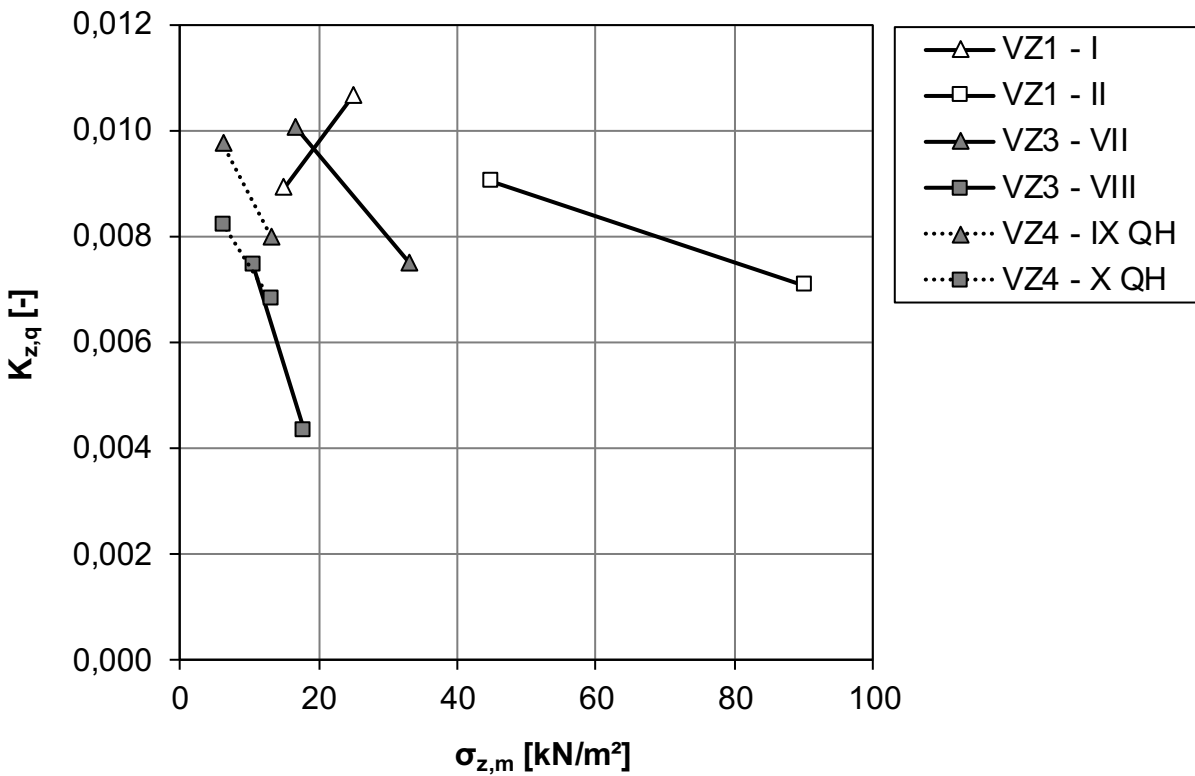


Bild 7.63: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

7.4 Dunkelroter Mergel

7.4.1 Dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

Die Ergebnisse des dunkelroten Mergels im UB I des VZ 1 sind nachfolgend in Tab. 7.16 sowie in Bild 7.64 bis Bild 7.67 dargestellt.

Der dunkelrote Mergel ist hier sowohl ein Randvertreter der veränderlich festen Gesteinen ähnlich wie ein mürber Sandstein (siehe Kapitel 6.3.2) als auch ein Vertreter für nicht tonquellfähige Gesteine. Bei der Einschätzung eines möglichen Quellpotentials auf Grundlage von Klassifikationsparametern war folgendes erkennbar. Einerseits besaß er nach dem Bentonit die zweithöchste Aktivitätszahl und könnte daher als quellfähiges Material eingeschätzt werden. Auch die Tonmineralanalyse zeigte einen quellfähigen Anteil von 20 % Smektit in der Tonfraktion auf. Bei beiden Klassifikationsparametern ist jedoch zu beachten, dass der dunkelrote Mergel im Ausgangszustand aus weniger als 15 % Feinkorn besteht (Kapitel 6.2). Auch bei der Verwitterungsanalyse aus mit Nasssiebungen kombinierten TBW

erreichte das Material nach 20 TBW nicht mehr als 35 % Feinkornanteil < 0,06 mm (Bild 6.19 in Kapitel 6.4). Damit wurde der dunkelrote Mergel nicht nur als Vertreter eines nicht tonquellfähigen Bodens für die Versuche aufgenommen, um die These zu belegen, sondern auch um mögliches osmotisches Quellen und eine Sättigung des Porenraums zu untersuchen.

Im UB I des VZ 1 entwickelte sich sehr schnell ein hoher Quelldruck von 80 kN/m², der höher lag als beim Tonmergelstein. Bereits nach 1 h waren ca. 72 kN/m² erreicht. Die anscheinend hohe Durchlässigkeit führte zu einem schnellen Ausfüllen des Porenraums. Außerdem kam es durch die schnelle Sättigung und Aufweitung des Porenraums immer wieder zu Über- und Unterregelungen des Weges (Bild 7.64).

Dass der Boden hier kein Quellpotential besitzt, zeigten auch die fast kaum auftretenden Quellhebungen in Bild 7.65 bzw. Bild 7.66. Die sehr geringen Quellhebungen zeigten sich auch im geringen Quellparameter (Bild 7.67).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t				t	σ_z		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,1	27,2	80,0	1,00	-0,012	-0,019	-	-
2	3,1	48,0	40,0	0,50	-0,016	-0,026	60,0	-0,0002
3	7,9	114,3	20,0	0,25	0,009	0,015	30,0	0,0013
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0006$

Tab. 7.16: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

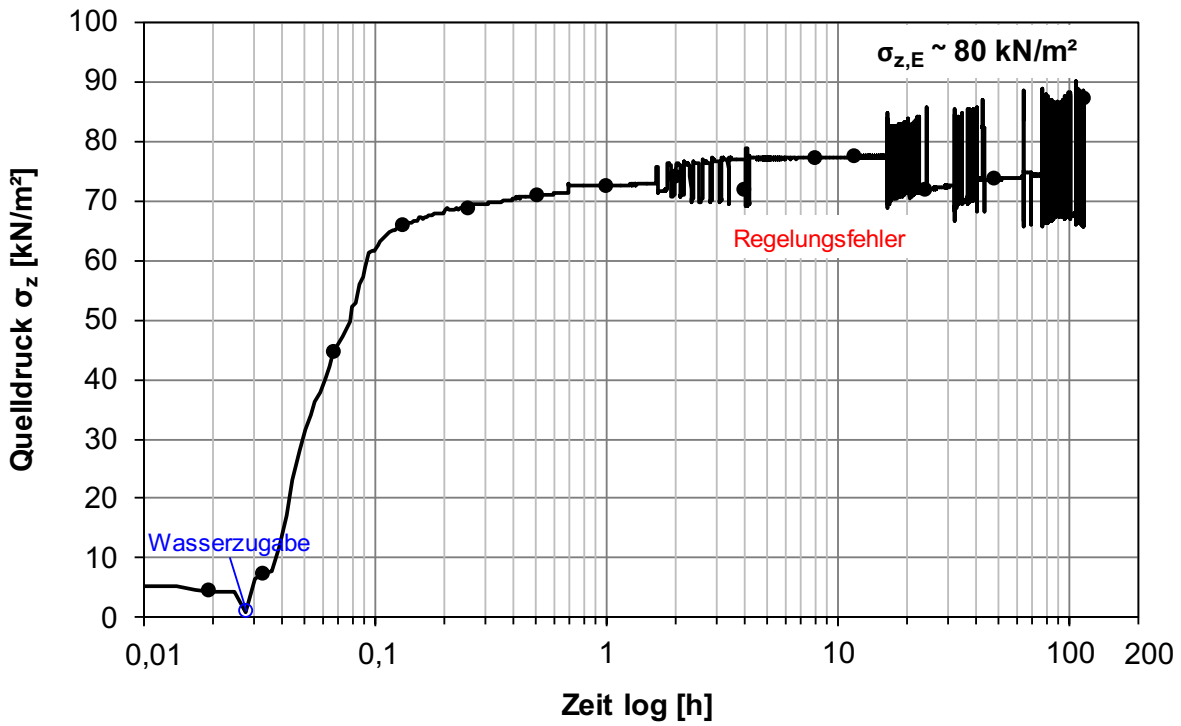


Bild 7.64: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

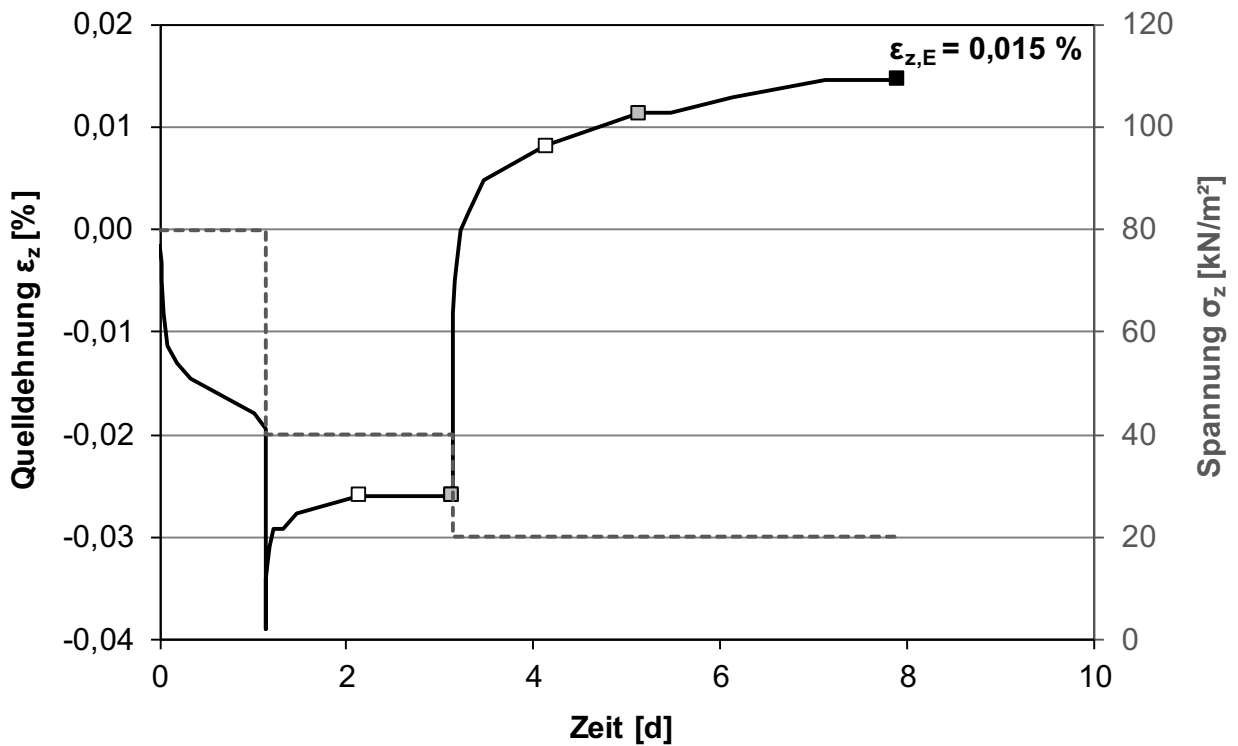


Bild 7.65: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

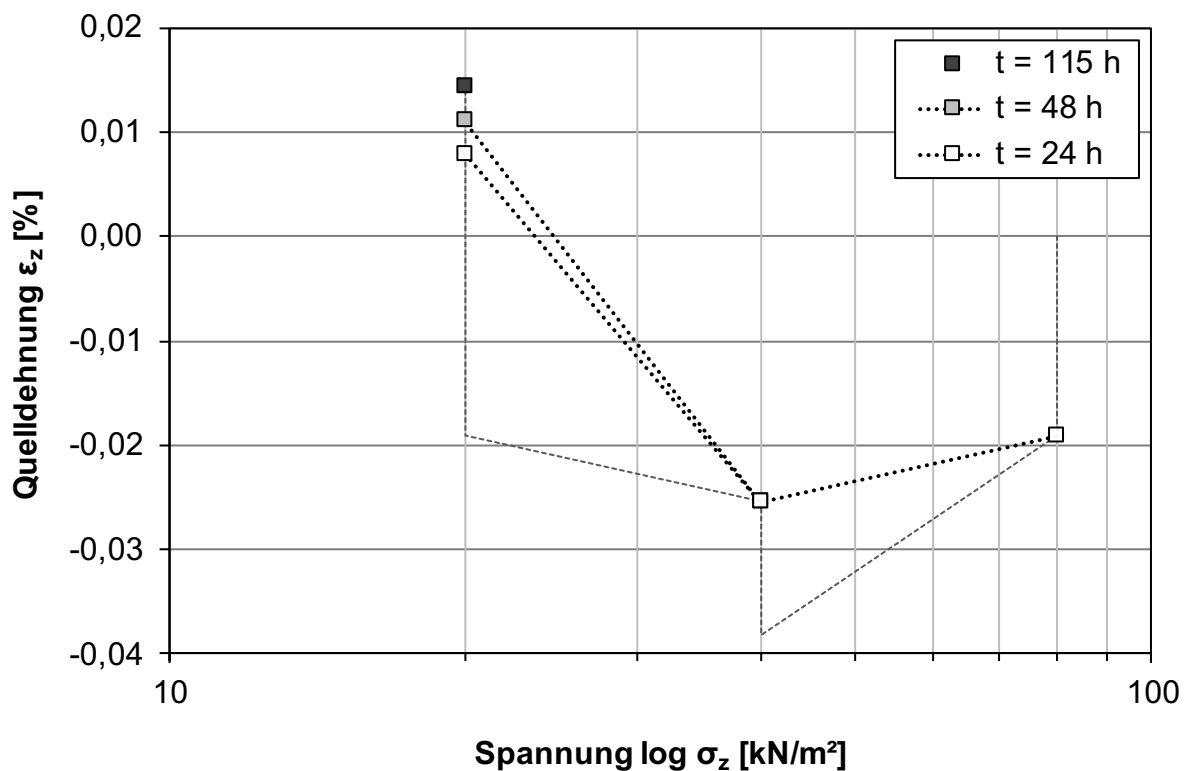


Bild 7.66: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

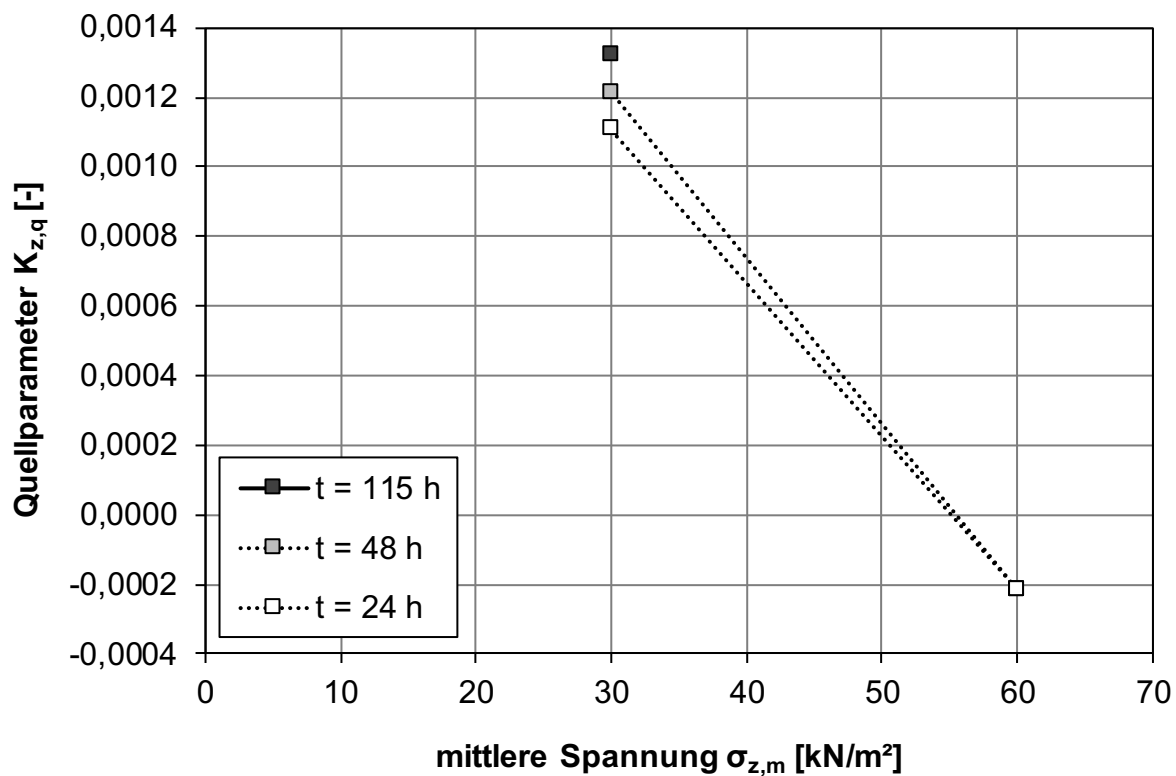


Bild 7.67: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

7.4.2 Dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

Im Gegensatz zu UB I mit einem Anfangsluftporenanteil von 9,5 % war die Probe im UB II mit nur 2,1 % dichter (siehe Tab. 7.20 in Kapitel 7.4.5) und besaß damit auch den höheren Anfangssättigungsgrad. Dass die Probe dadurch auch weniger Wasser aufnehmen konnte, zeigte sich in dem geringeren Quelldruck von ca. 42 kN/m² (UB I: 80 kN/m²). Ebenso wie UB I sättigte auch die Probe in UB II sehr schnell auf, was zu Regelungsproblemen führte (Bild 7.68), die aber bei keinem der anderen

Böden in dieser Art und Weise auftraten. Vermutlich kann der Wegänderung infolge des schnellen Durchflusses nicht ausreichend schnell entgegengesteuert werden, um eben die Probenhöhe konstant zu halten, so dass es zu diesen starken Über- und Unterregelungen kommt.

Analog zu UB I haben sich nur sehr geringe Dehnungen (Bild 7.69, Bild 7.70) und entsprechend ein geringer Quellparameter (siehe Tab. 7.17, Bild 7.71) eingestellt.

LS	Zeitdauer		vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			ε_z			
	[d]	[h]			[mm]	[%]		
1	0,8	20,2	50,0	1,00	-0,004	-0,007	-	-
2	5,0	100,0	25,0	0,50	0,024	0,040	37,5	0,0016
3	9,0	96,0	12,5	0,25	0,077	0,128	18,8	0,0029
4	13,0	94,8	6,3	0,13	0,119	0,198	9,4	0,0023
*LS = Laststufe								$\varnothing = 0,0026$

Tab. 7.17: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

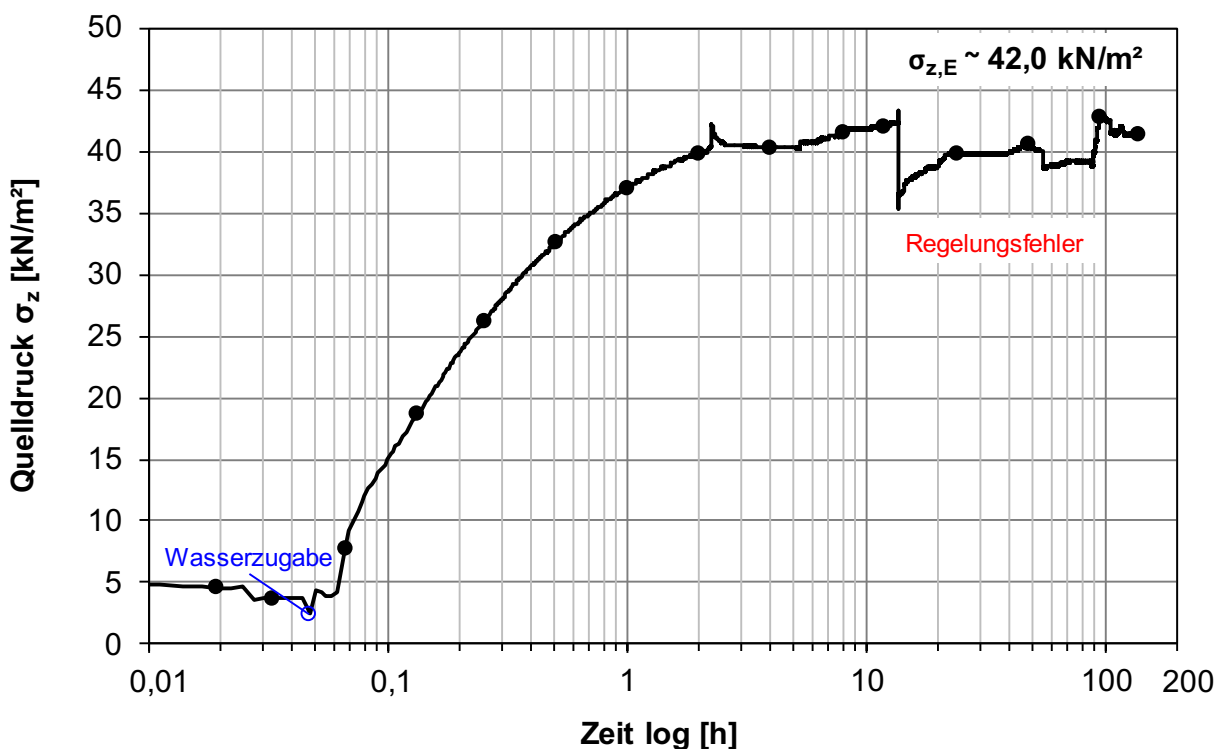


Bild 7.68: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

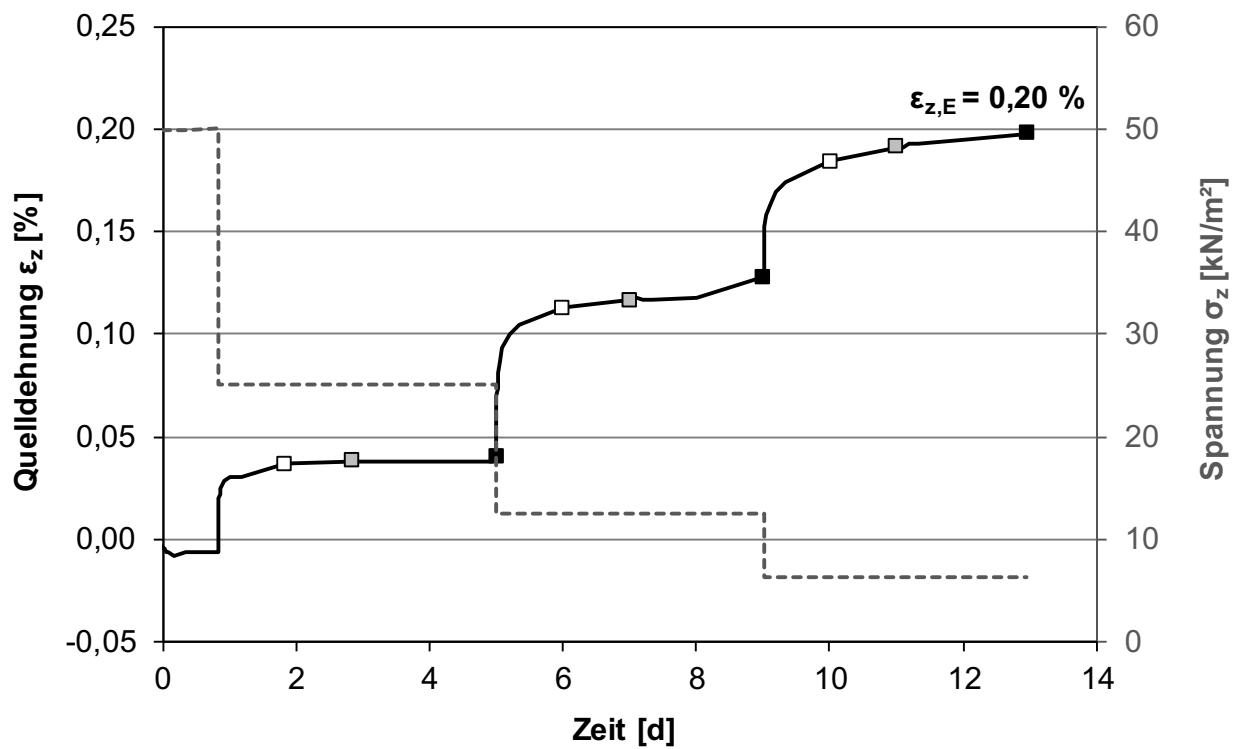


Bild 7.69: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

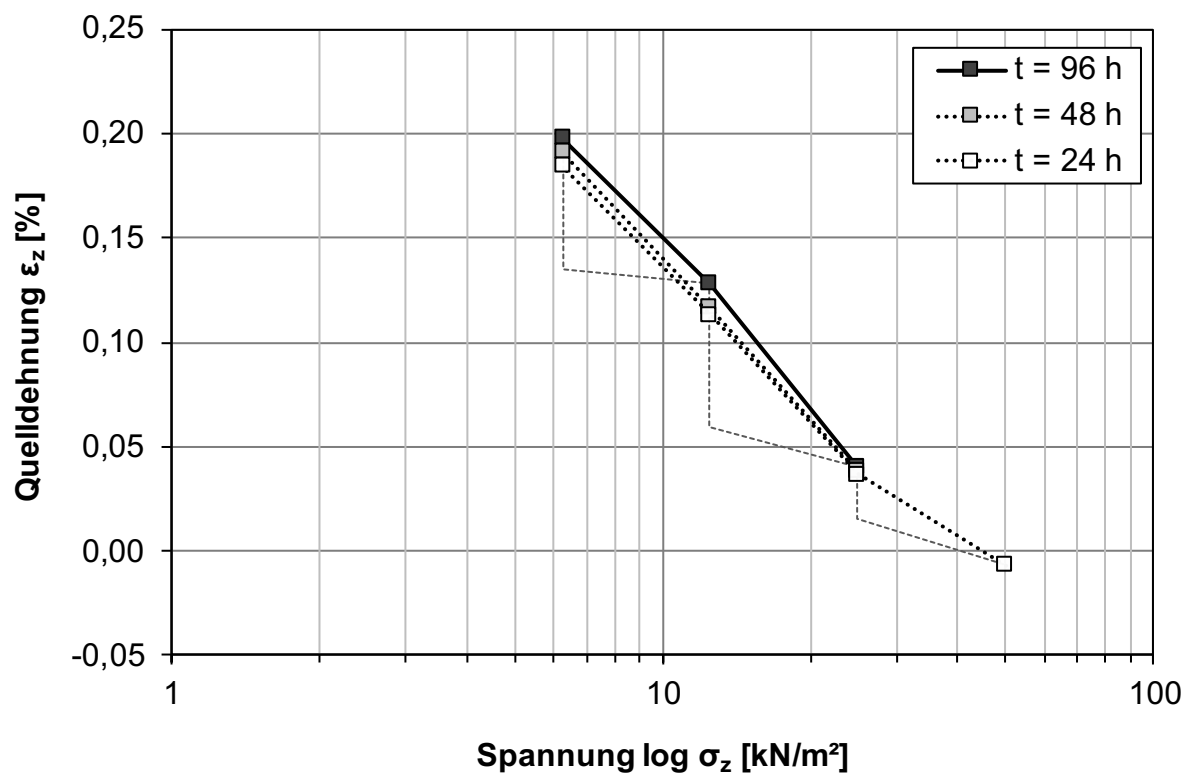


Bild 7.70: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

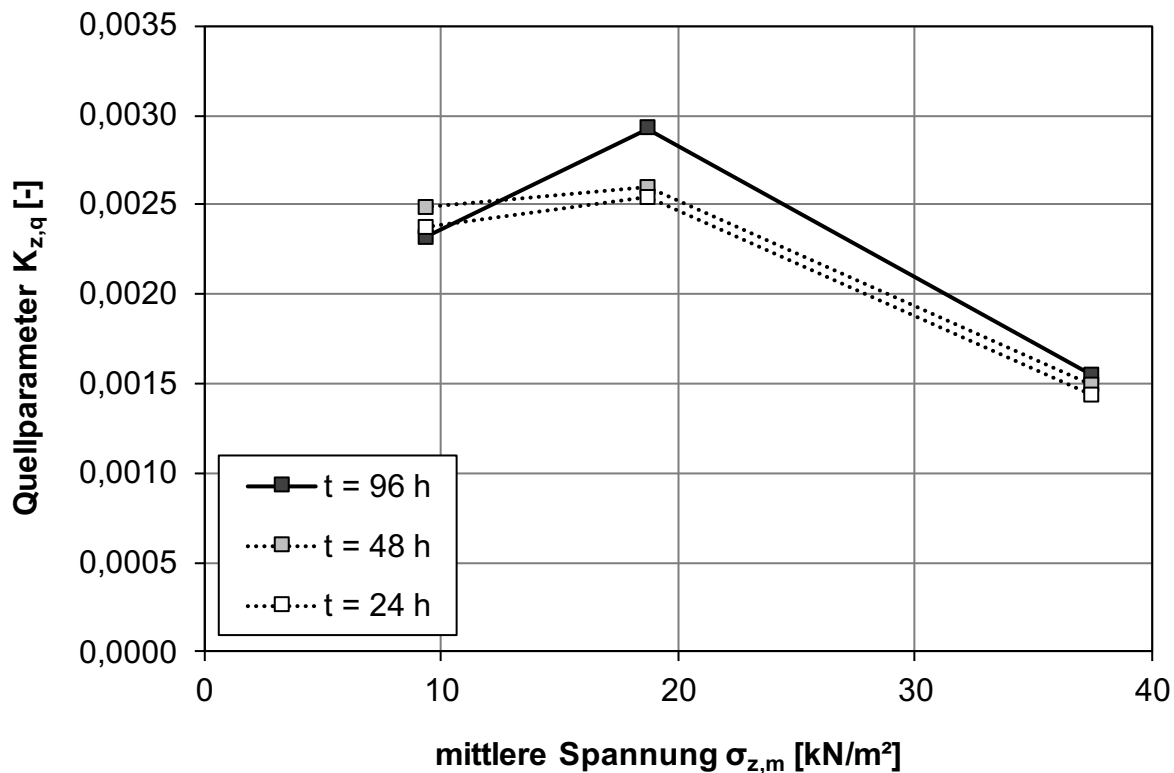


Bild 7.71: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB

7.4.3 Dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

Im Allgemeinen zeigte sich auch beim verwitterten Material im VZ 4, dass der dunkelrote Mergel kein tonquellfähiges Material ist.

Analog zum Opalinustonstein als auch Tonmergelstein zeigte sich beim VZ 4 eine Abnahme der Quelldrücke gegenüber VZ 1. Allerdings sind die unterschiedlichen Probenabmessungen und Versuchsdurchführungen dabei zu beachten. Die

Quelldrücke mit den Problemen der Nachregelungen sind für QD 1 in Bild 7.72 und QD 2 Bild 7.73 sowie vergleichend für beide Versuche in Bild 7.74 dargestellt

Die Quelldehnungen fielen ähnlich gering aus wie im UB I (Bild 7.75 bzw. Bild 7.76). Die Quelldehnungen nehmen auf der letzten Entlastungsstufe bereits ab, dass sich im Abfall des Quellparameters zeigt (Bild 7.77). Die Werte des Quellhebungsversuches sind nachfolgend in Tab. 7.18 aufgelistet.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$	ϵ_z	$\sigma_{z,m}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,8	42,1	37,5	1,00	-0,138	-0,708	-	-
2	4,8	72,0	37,5	1,00	-0,081	-0,415	-	-
3	6,8	48,0	18,7	0,50	-0,033	-0,169	28,1	0,0082
4	18,7	286,0	3,7	0,10	0,054	0,277	11,2	0,0064
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	0,692		$\bar{\sigma} = 0,0073$

Tab. 7.18: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

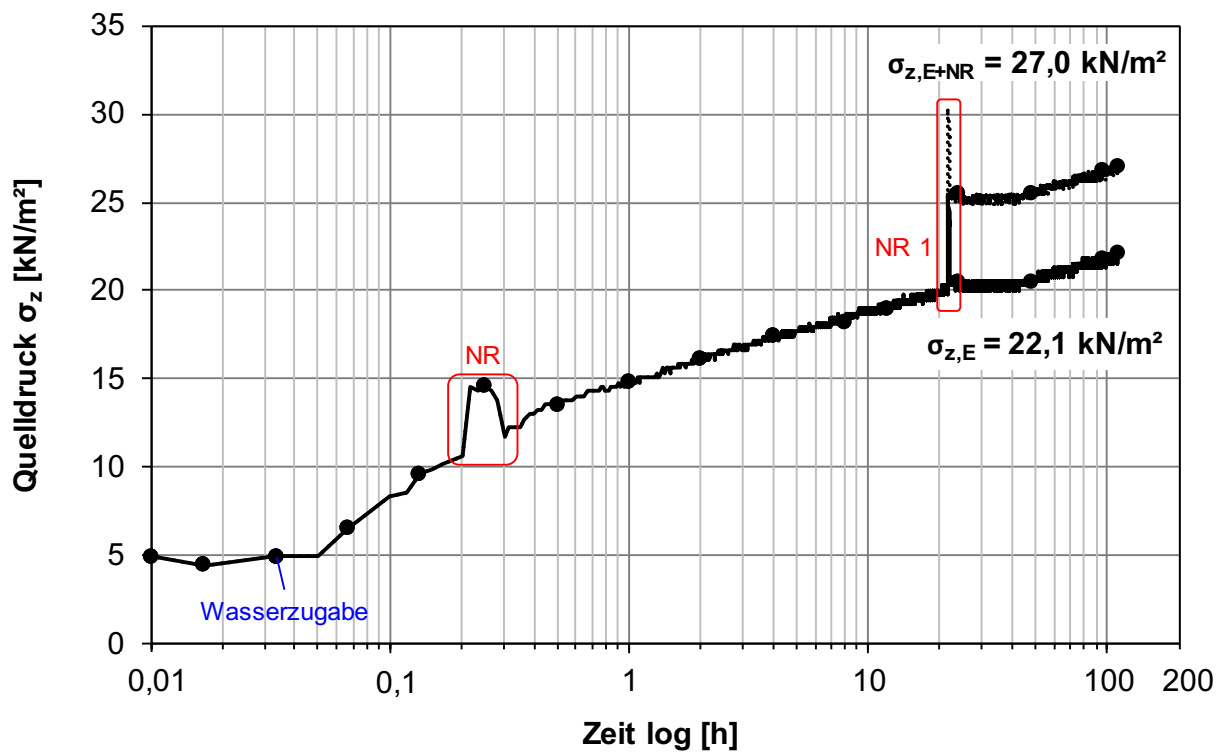


Bild 7.72: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III QD1 (10 kN)

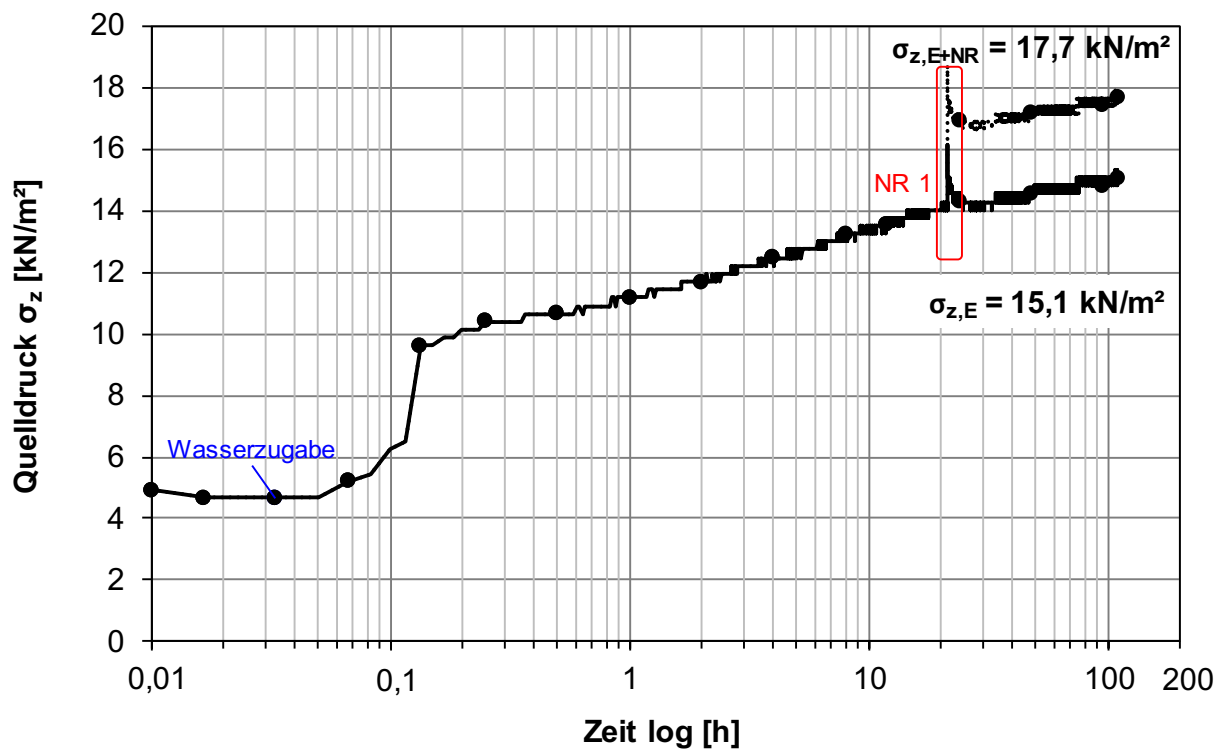


Bild 7.73: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III QD2 (5 kN)

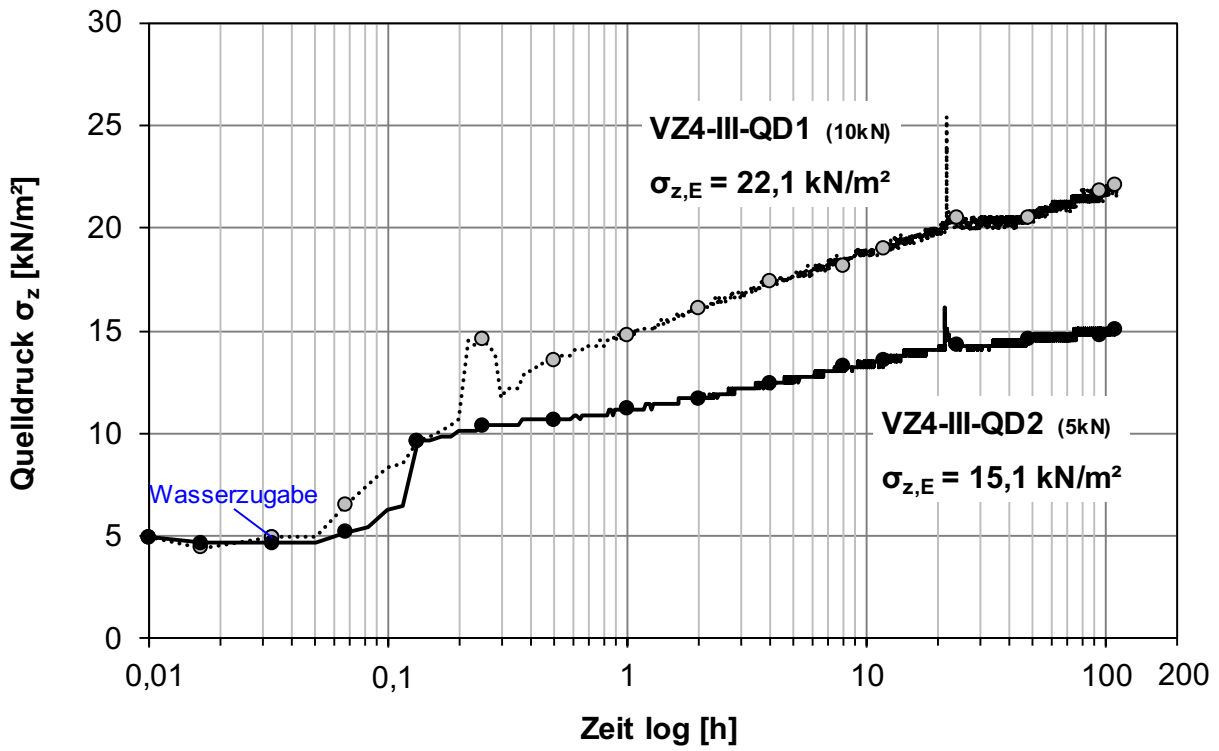


Bild 7.74: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III QD1 (10 kN) und QD2 (5 kN)

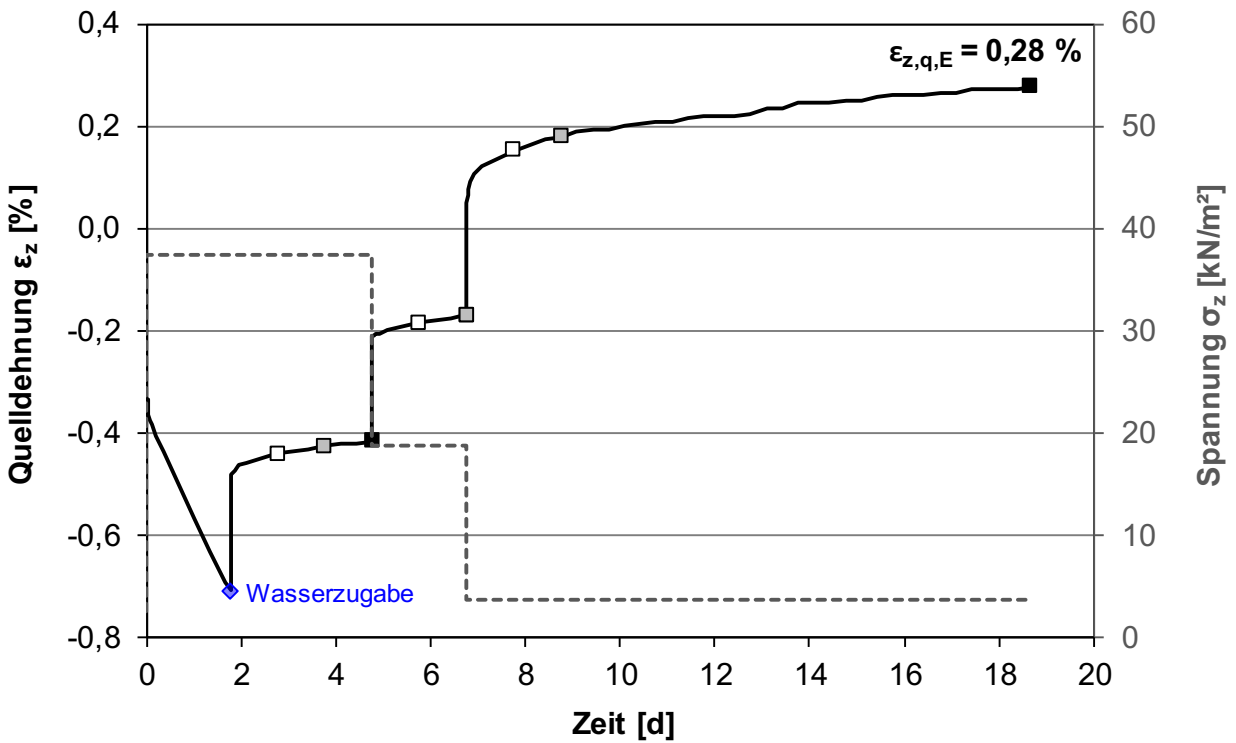


Bild 7.75: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

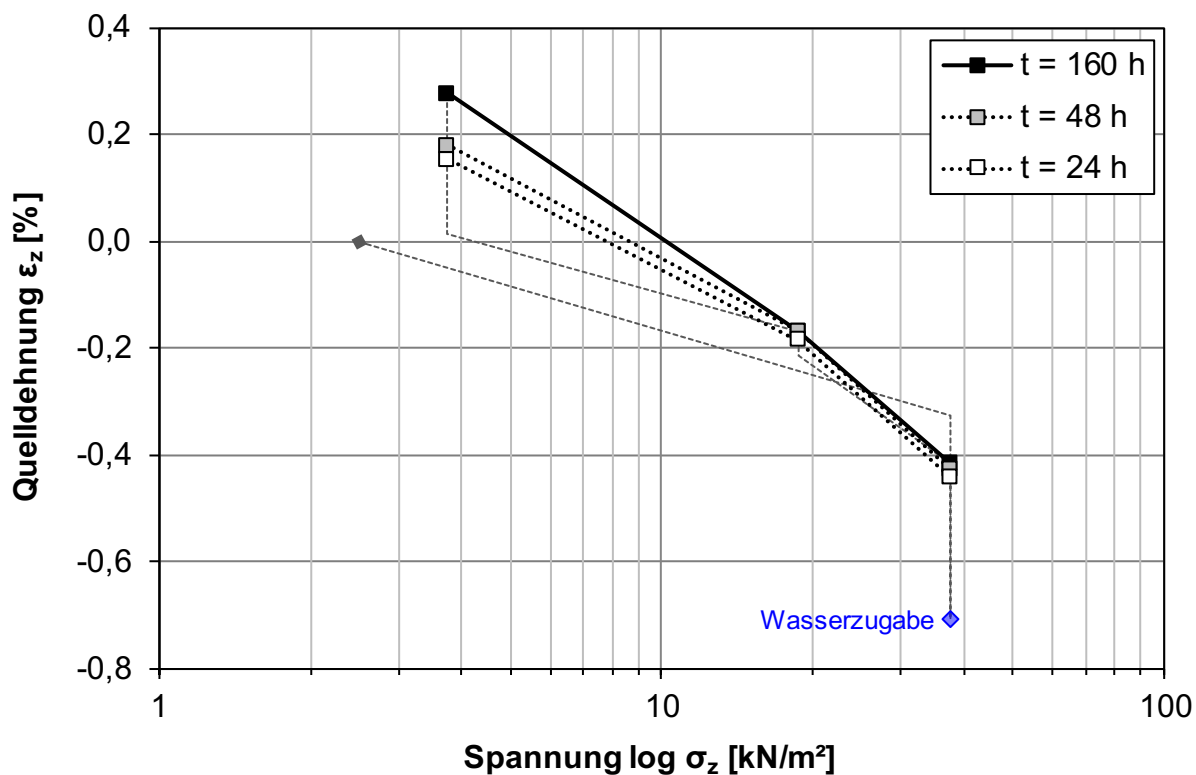


Bild 7.76: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

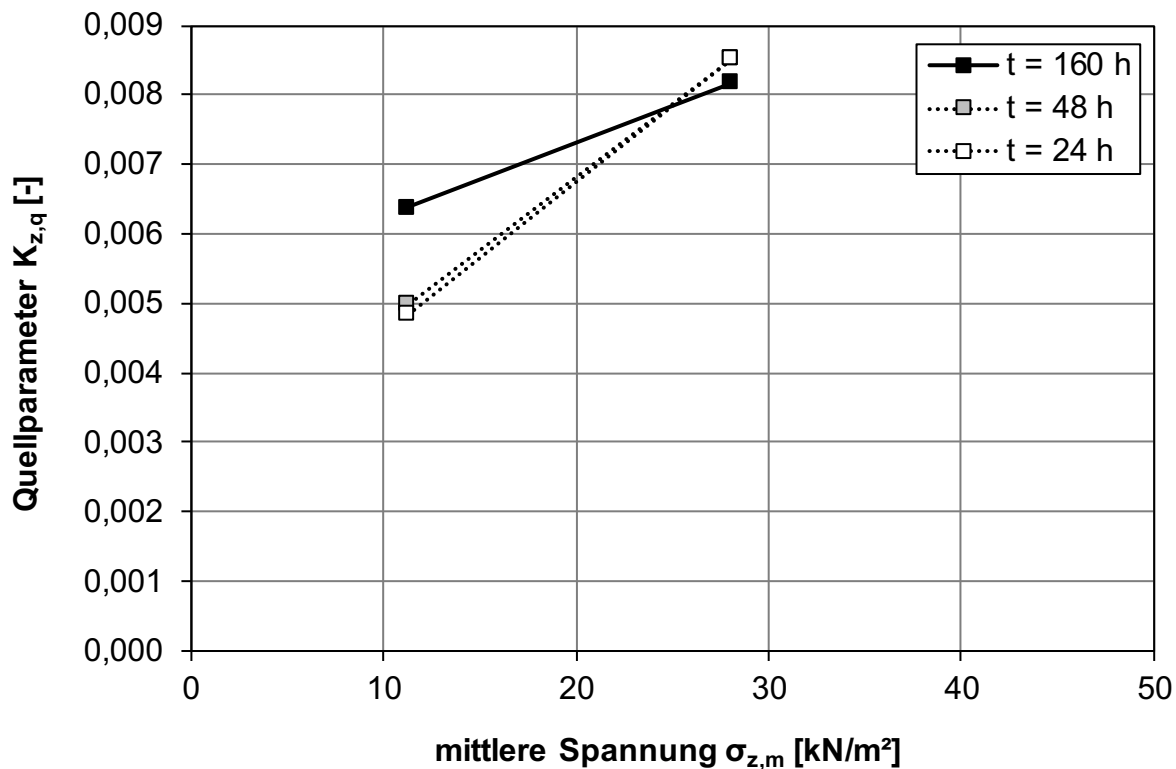


Bild 7.77: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

7.4.4 Dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

Es wurde bereits festgestellt, dass kaum nennenswerte Quellreaktionen beim dunkelroten Mergel aufgetreten sind. Im Vergleich zum Einbau auf trockener Seite im UB III fielen die Reaktionen an der dichteren Probe im UB IV sowohl im Quelldruckversuch (Bild 7.80) als Quellhebungsversuch (Bild 7.81, Bild

7.82) geringer aus. Dass gerade bei gering quellfähigen Proben die mechanische Regelung erst recht schwierig ist, zeigte sich analog zu den vorhergehenden Untersuchungen am dunkelroten Mergel auch hier bei den Versuchen QD 1 (Bild 7.78) und QD 2 (Bild 7.79). Die geringen Werte der Dehnungen aus dem Quellhebungsversuch sind sowohl aus Tab. 7.19 erkennbar als auch aus dem Abfall des Quellparameters in Abhängigkeit der mittleren Spannung, wie in Bild 7.83 dargestellt.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,8	42,1	37,5	1,00	-0,071	-0,384	-	-
2	4,8	72,0	37,5	1,00	-0,058	-0,314	-	-
3	6,8	48,0	18,7	0,50	-0,040	-0,216	28,1	0,0032
4	18,7	285,9	3,7	0,10	-0,001	-0,005	11,2	0,0030
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	0,308		$\emptyset = 0,0031$

Tab. 7.19: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

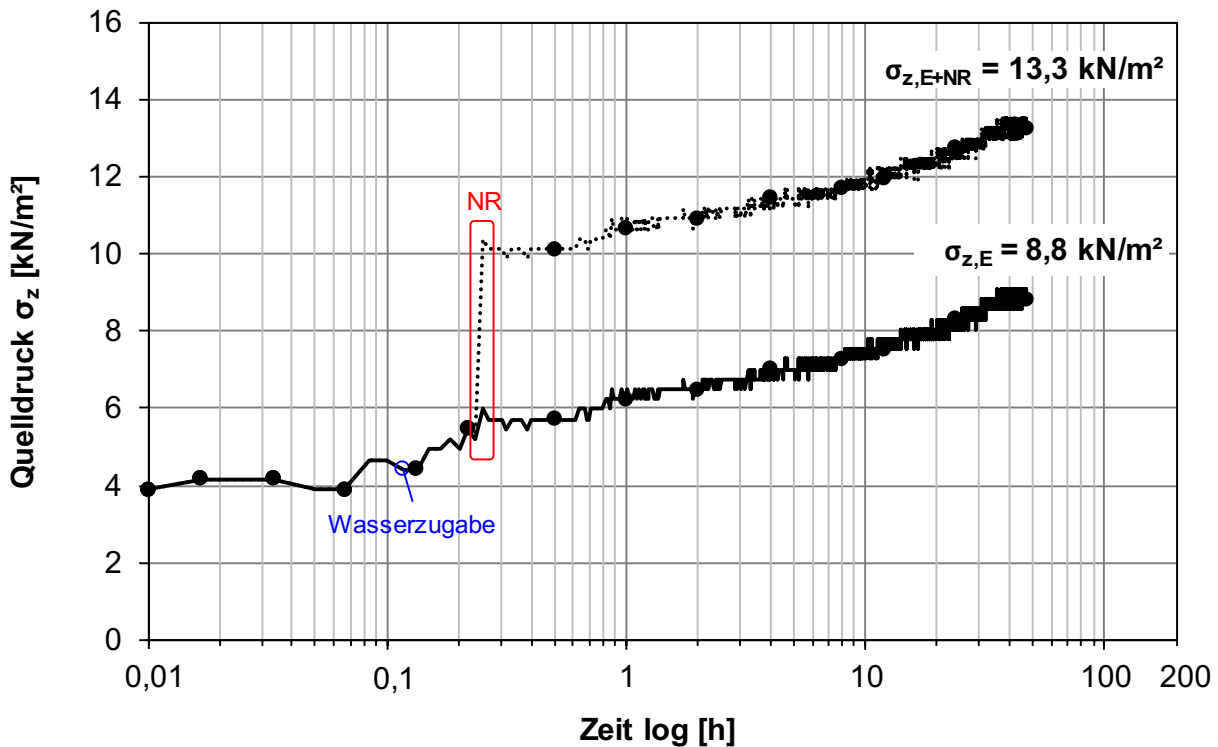


Bild 7.78: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV QD1 (10 kN)

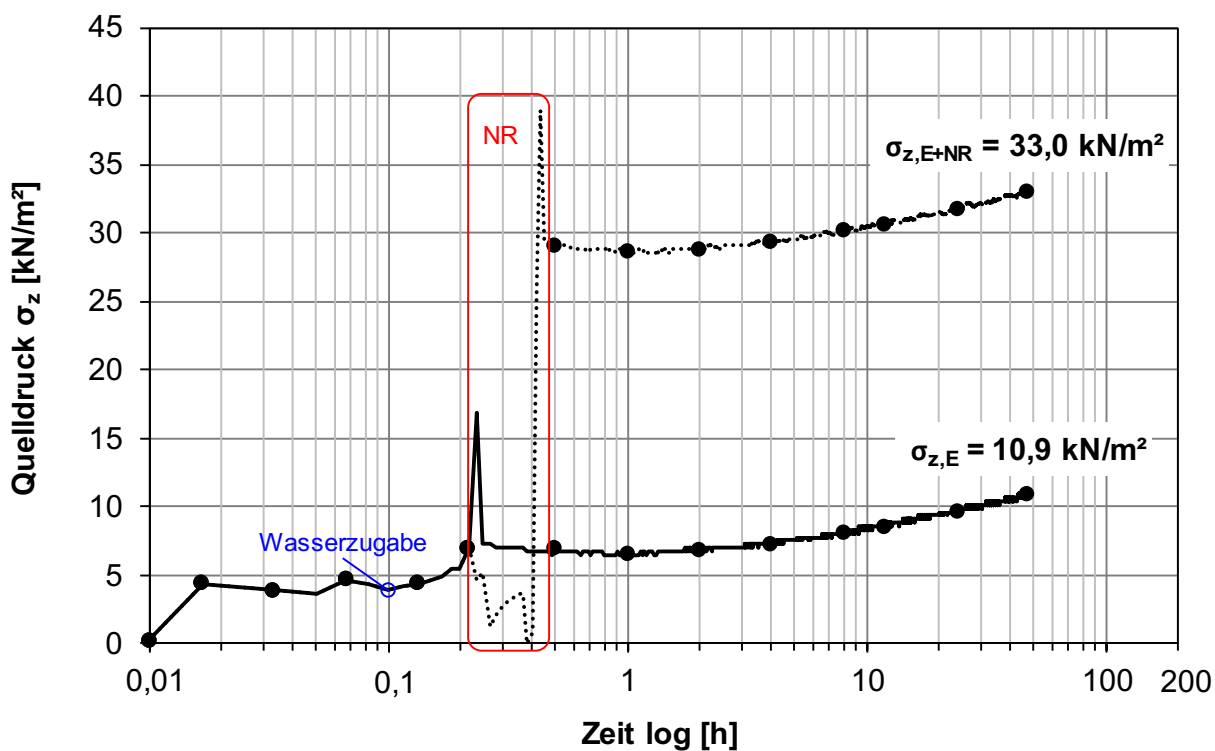


Bild 7.79: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV QD2 (5 kN)

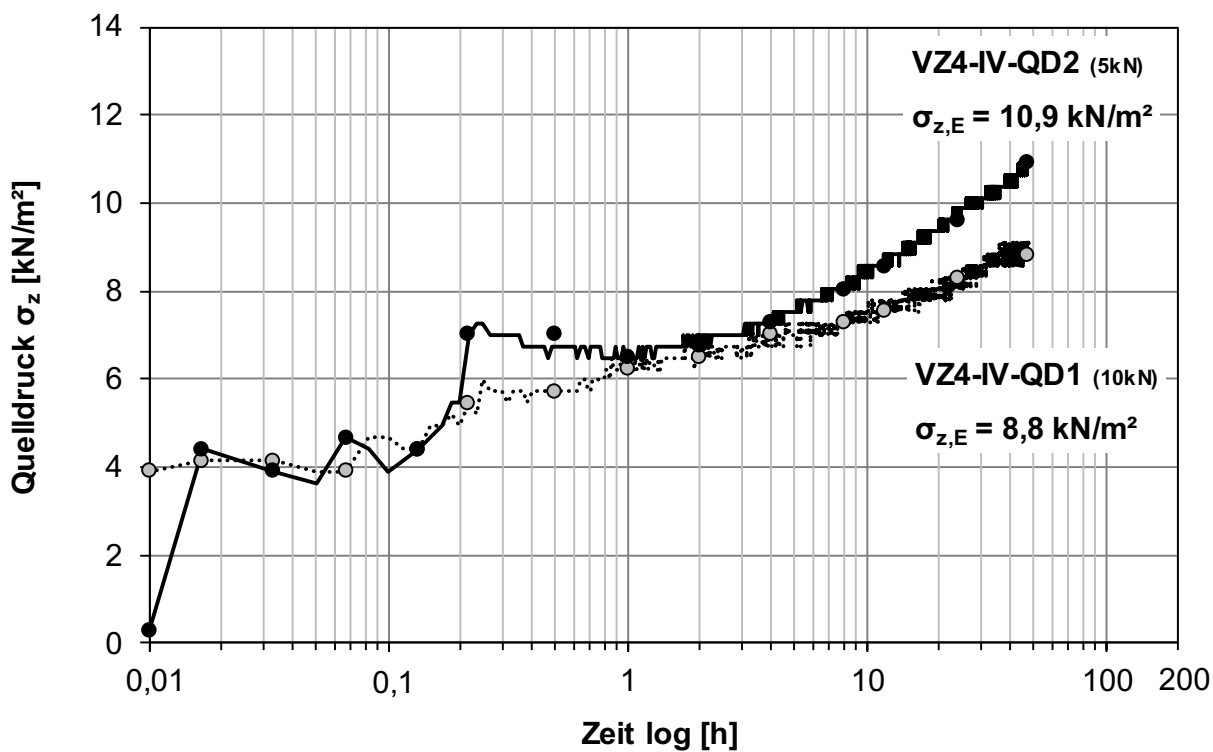


Bild 7.80: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV QD1 (10 kN) und QD2 (5 kN)

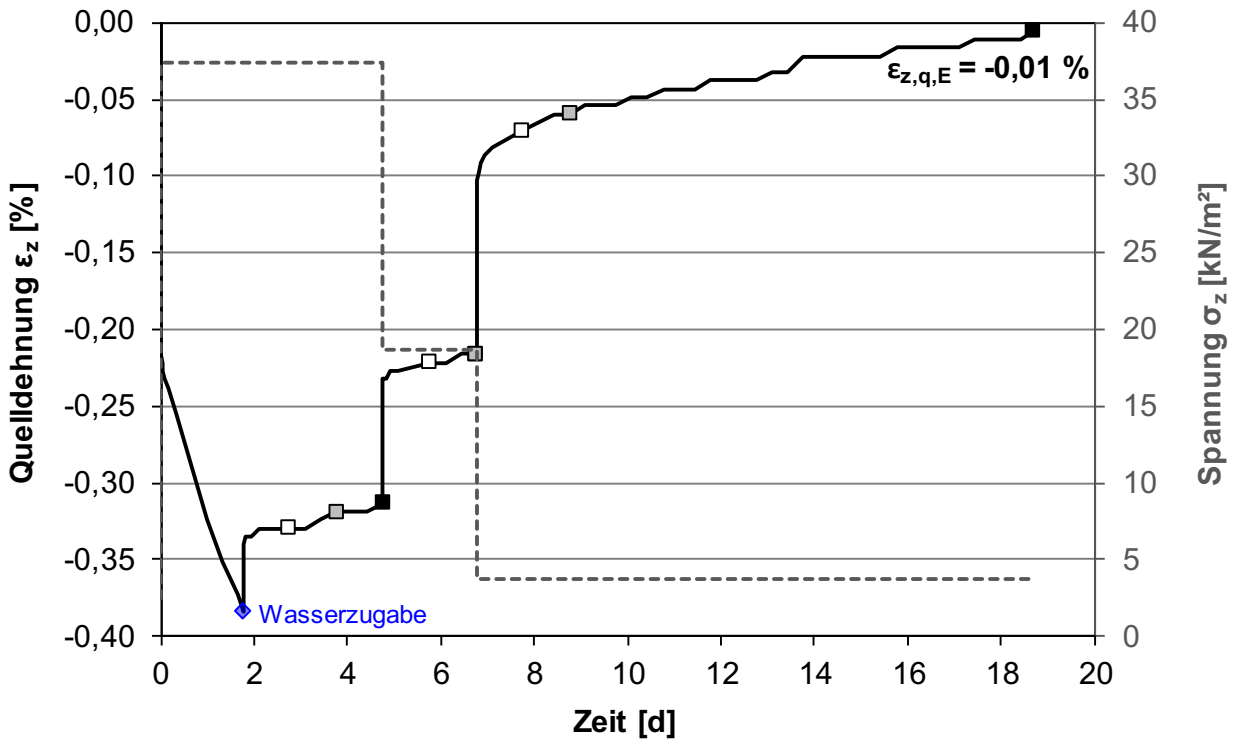


Bild 7.81: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

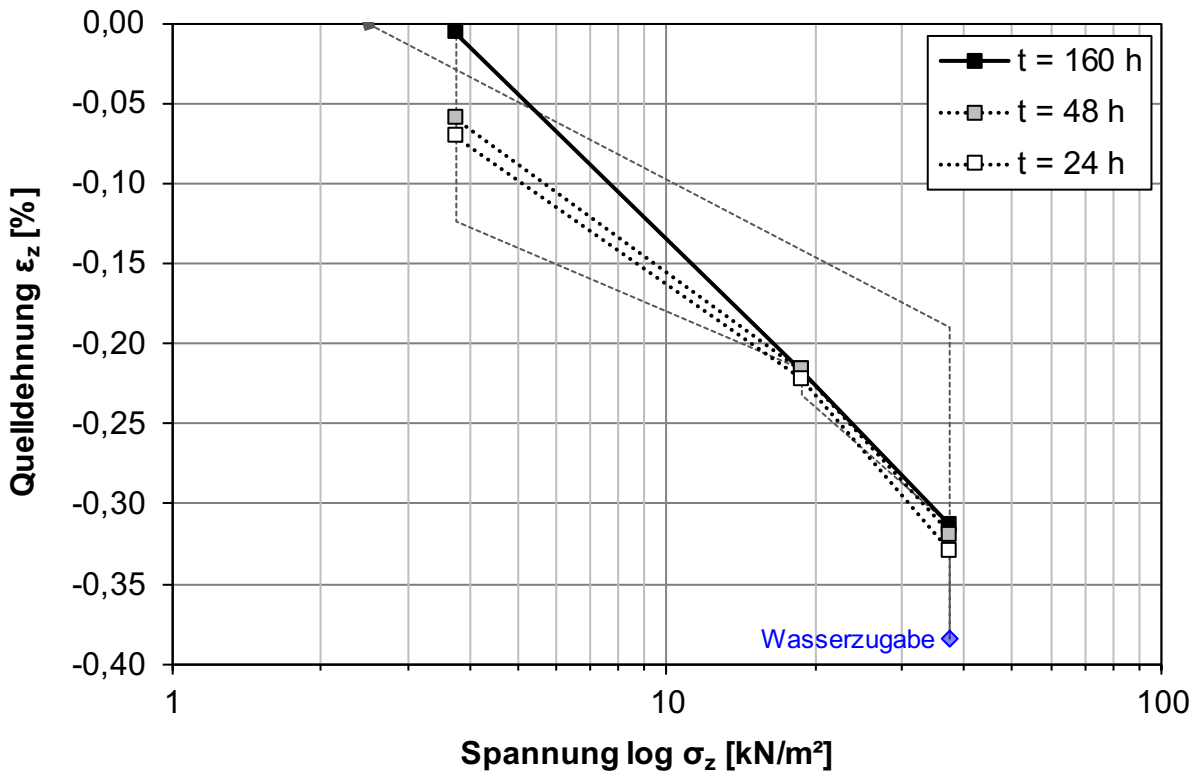


Bild 7.82: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

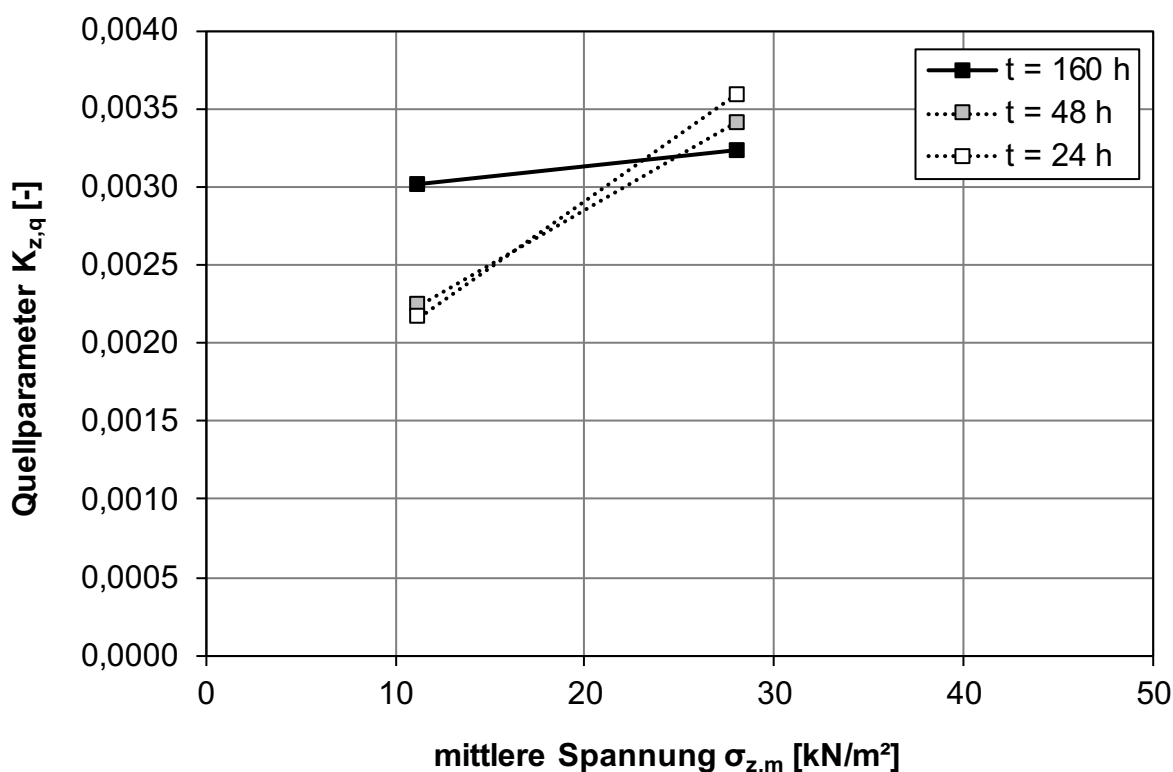


Bild 7.83: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

7.4.5 Zusammenfassung dunkelroter Mergel

Trotz des relativ hohen Smektit-Anteils von 20 % quillt der dunkelrote Mergel nicht wie die anderen Böden, da der Feinkornanteil am Gesamtkorn weniger als 15 % ist. Auch nach 20 TBW erreichte das Material nicht mehr als 35 % Feinkornanteil (Bild 6.19 in Kapitel 6.4). Damit wurde der dunkelrote Mergel nicht nur als Vertreter eines nicht tonquellfähigen Bodens für die Versuche aufgenommen, um die These der geringen Quellfähigkeit zu belegen, sondern auch um mögliches osmotisches Quellen und eine Sättigung des Porenraums zu untersuchen.

Insgesamt waren die Quelldrücke (Bild 7.80) und Quellparameter (Bild 7.83) als Folge der Quelldehnungen (Bild 7.81, Bild 7.82) verschwindend gering. Die Werte der Ergebnisse sind in Tab. 7.20 aufgelistet. Tendenziell zeigte sich aber auch hier wie bei den vorhergehenden Untersuchungen innerhalb eines VZ, dass sich bei der Einbaubedingung mit hö-

herem Luftporengehalt und geringerer Anfangssättigung ein höherer Quelldruck ausbilden kann. Der Boden ist dann durchlässiger und kann mehr Wasser aufnehmen. Allerdings entgegen den Reaktionen wie z.B. beim Opalinustonstein folgten auf den höheren Quelldruck die geringeren Quelldehnungen. Das lässt den Schluss zu, dass hier der Anteil der quellfähigen Tonminerale gering ist und auch die größere Wassermenge keine nennenswerten Quellreaktionen auslösen kann. Das bedeutet auch, dass der Quelldruck durch Wasseraufnahme in den Porenraum und damit nur zu einer Aufweitung dessen geführt hat. Eindeutiges Tonquellen zeigt der dunkelrote Mergel damit nicht.

Bei den beiden Quellhebungsversuchen im VZ 4, bei denen kein Quelldruckversuch vorangegangen ist, zeigt sich wiederum, dass die Probe mit höherem Luftporengehalt (UB III) die größeren Quelldehnungen erfahren hat. Also ähnlich wie beim Quelldruckversuch führt die Wasseraufnahme in den Porenraum eher zu einer Aufweitung des eher gemischtkörnigen Bodens.

UB	Art	Einbaubedingungen						Quelldruck		Endquell-	Quellpara-
		w_0	$w_{s,0}$	$\rho_{d,0}$	$D_{Pr,0}$	$S_{r,0}$	$n_{a,0}$	$\sigma_{z,max}$	$\sigma_{z,min}$	dehnung	meter
		[%]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[-]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[%]	[-]
I	QD-QH	12,5	17,7	1,845	95,5	70,8	9,5	80,0	90,0	0,01	0,0006
II	QD-QH	13,9	15,0	1,941	100,5	92,7	2,1	42,0	43,3	0,20	0,0026
III	QD1	15,5	23,0	1,682	94,9	67,3	12,6	22,1	-	-	-
IV	QD2	15,7	22,0	1,711	96,5	71,4	10,8	15,1	-	-	-
III	QD1	18,0	21,4	1,726	97,4	83,7	6,0	8,8	-	-	-
IV	QD2	17,0	21,6	1,722	97,2	78,7	7,9	10,9	-	-	-
III	QH	15,6	22,8	1,686	95,2	68,5	12,1	-	37,5	0,69	0,0073
IV	QH	18,0	22,0	1,709	96,4	81,6	6,9	-	37,5	0,31	0,0031

Tab. 7.20: Zusammenfassung der Ergebnisse, dunkelroter Mergel VZ 1 und VZ 4, UB I bis IV

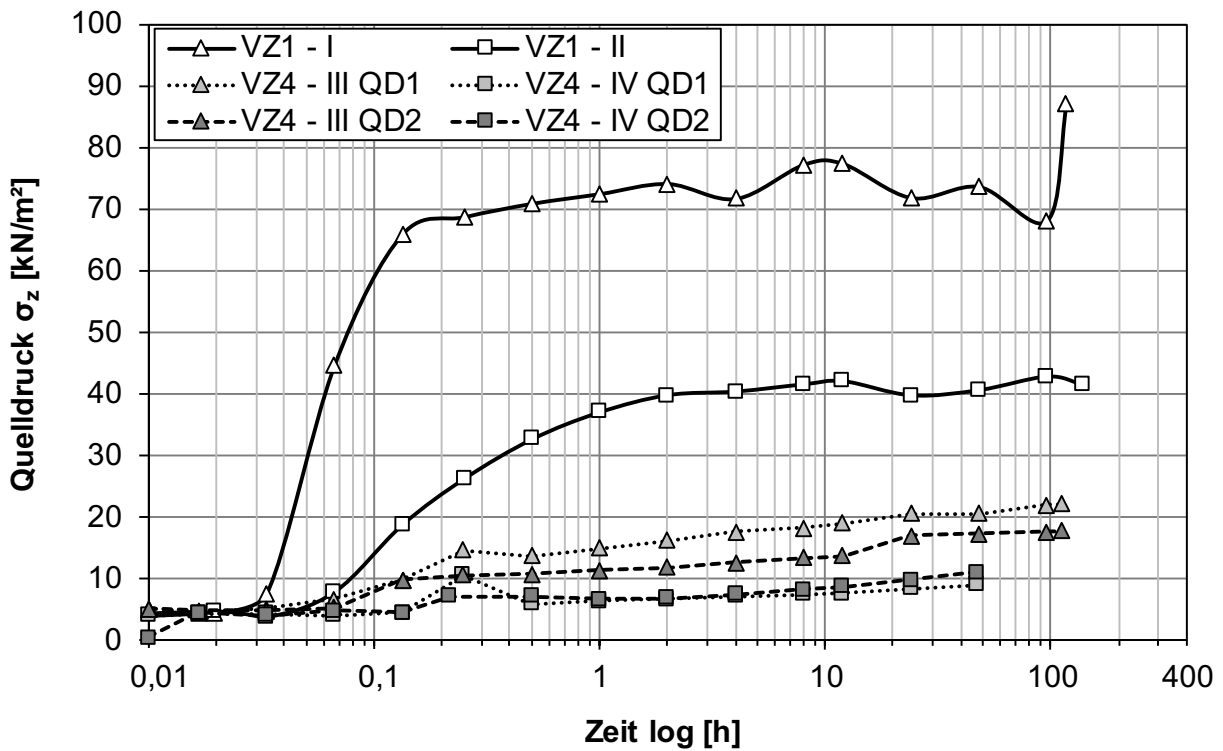


Bild 7.84: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

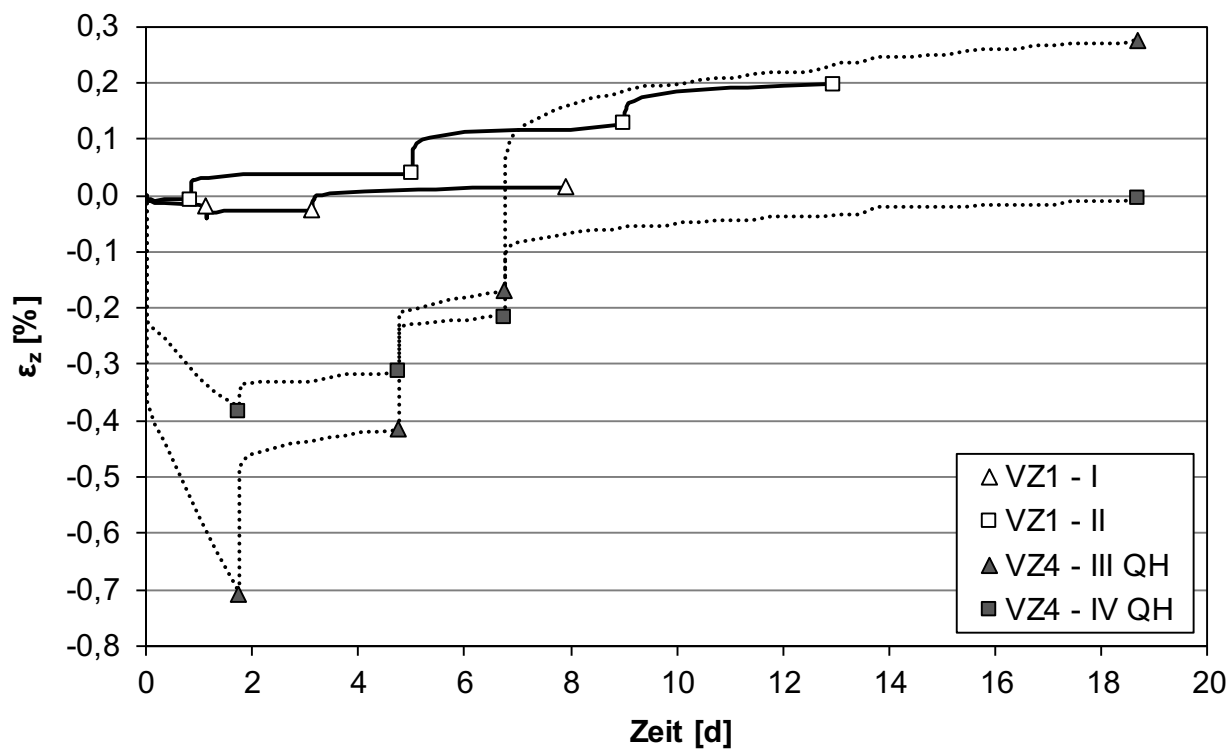


Bild 7.85: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

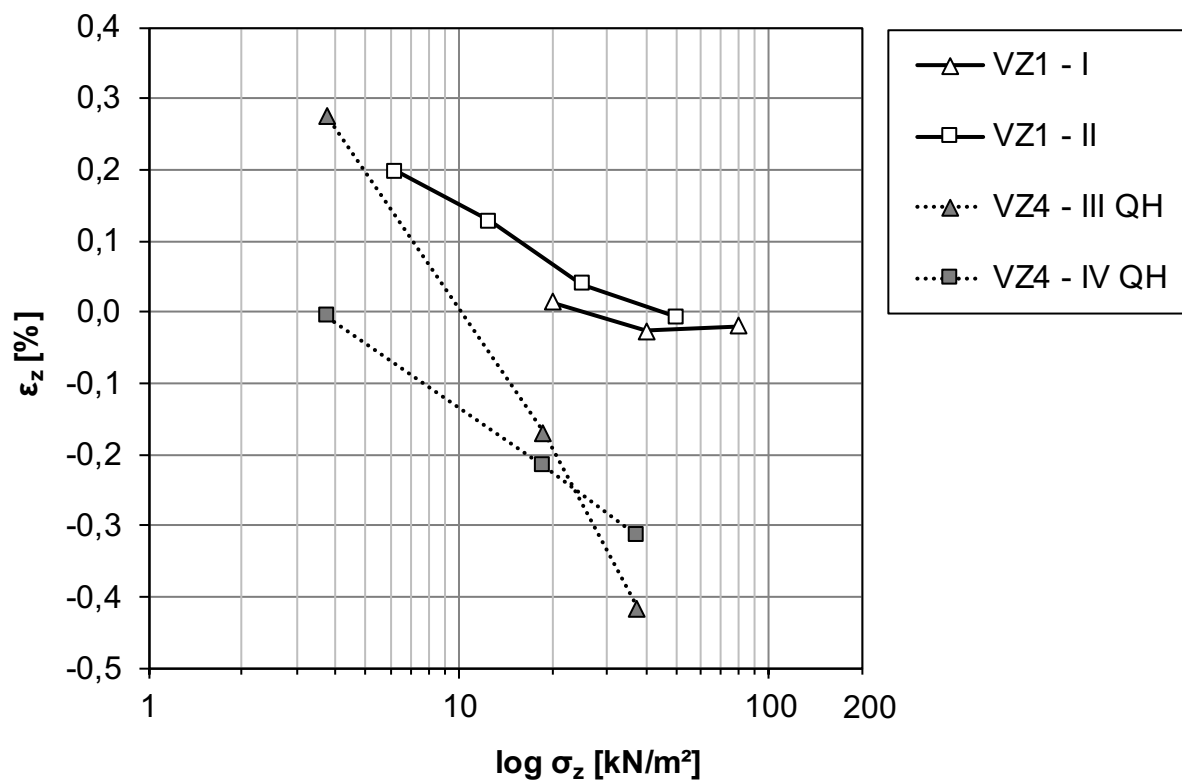


Bild 7.86: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

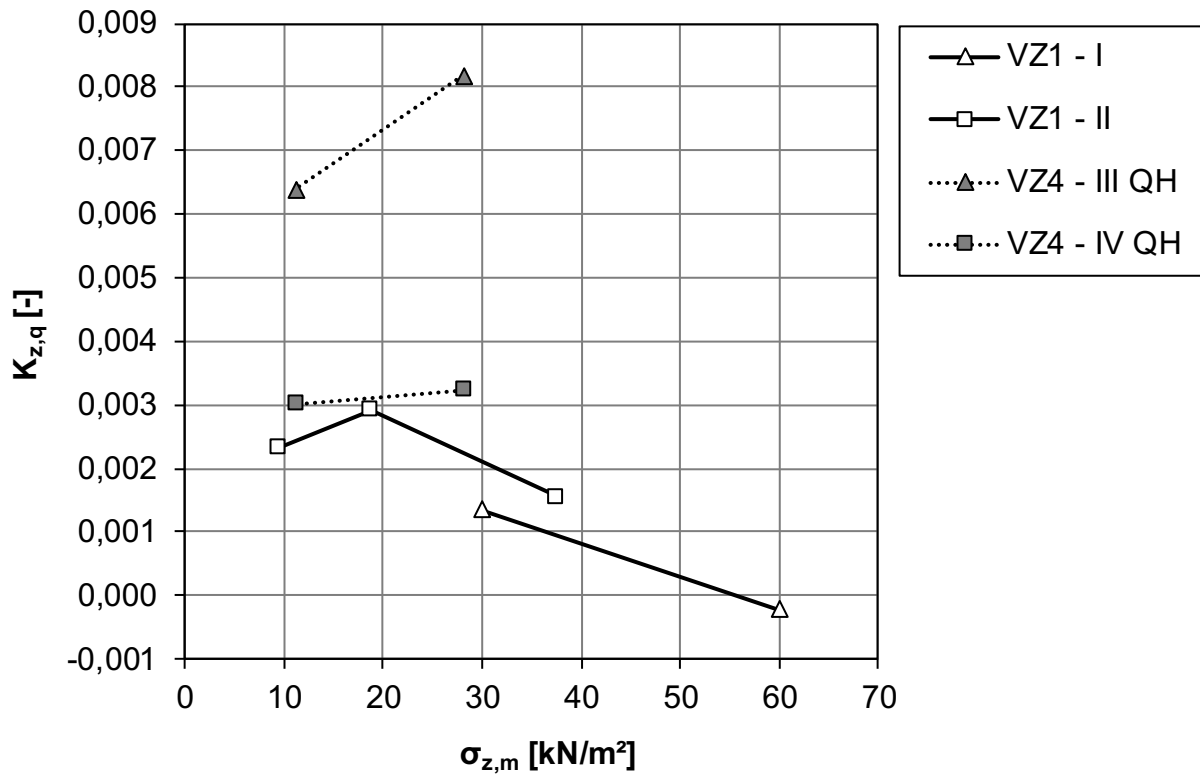


Bild 7.87: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

7.5 Tertiärer Ton

7.5.1 Tertiärer Ton VZ 1, UB I

Im Folgenden sind die Ergebnisse des tertiären Tons im VZ 1 für den Untersuchungsbereich UB I dargestellt und die Ergebnisse des Quellhebungsversuches in Tab. 7.21 zusammengefasst. Die Einbaubedingungen sind in Kapitel 7.5.7 in Tab. 7.27 aufgelistet.

Ein annähernd maximaler Quelldruck von $\sigma_{z,max} = 129,4 \text{ kN/m}^2$ ($t = 22,1 \text{ h}$) wurde im Vergleich zu vielen Versuchen relativ schnell erreicht (Bild 7.88). Da bereits nach 24 h keine weiteren Spannungsänderungen auftraten und ebenfalls Wasser am oberen Rand der Belastungsplatte ausgetreten war, konnte eine annähernd vollständige Sättigung mit einer abgeschlossenen Quelldruckentwicklung angenommen werden.

Im anschließenden lastgesteuerten Quellhebungsversuch wurde ausgehend vom maximalen Quelldruck $\sigma_{z,max} = 129,4 \text{ kN/m}^2$ jeweils die Quelldehnungen für die Entlastungsstufen 65 kN/m^2 , 32 kN/m^2 und 16 kN/m^2 gemessen (siehe auch Tab. 7.21).

Die Quellhebungen waren auch nach 4 d noch nicht ganz abgeschlossen. Allerdings lag die Zunahme der Quelldehnungen je Entlastungsstufe zwischen 48 h und 96 h bei weniger als 0,1 %. Es wurde nach 12 d eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 1,84 \%$ erreicht (Bild 7.89). Die Dauer einer Entlastungsstufe betrug 96 h. Im Vergleich zu einer Auswertung der Dehnungen nach nur 48 h hat sich ein zusätzlicher Dehnungsanteil bei Auswertung von 96 h von 0,145 % ergeben (Bild 7.90).

Mit zunehmender Entlastung und damit geringeren Spannungen nehmen die Quelldehnungen zu. Dies zeigt sich in einem exponentiellen Anstieg der Quelldehnungen im linearen Maßstab bzw. sollte sich nach GROB durch einen linearen Anstieg im logarithmischen Maßstab darstellen. Hier ist ein annähernd linearer Trend zu erkennen. Die Steigung dieser Quellgeraden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Bild 7.90) wird durch den Quellparameter $K_{z,q}$ beschrieben, der in Abhängigkeit der mittleren Spannung in Bild 7.91 dargestellt ist. Je höher sich die Quelldehnungen einstellen, umso höher ist auch der Quellparameter bzw. umso steiler ist der Verlauf der Quellgeraden.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t				σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,max}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,0	0,1	129,4	1,00	0,000	0,000	-	-
2	4,0	96,0	65,0	0,50	0,275	0,460	97,2	0,0154
3	8,0	96,0	32,0	0,25	0,631	1,055	48,5	0,0193
4	12,0	96,5	16,0	0,12	1,103	1,844	24,0	0,0262
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0203$

Tab. 7.21: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 1, UB I

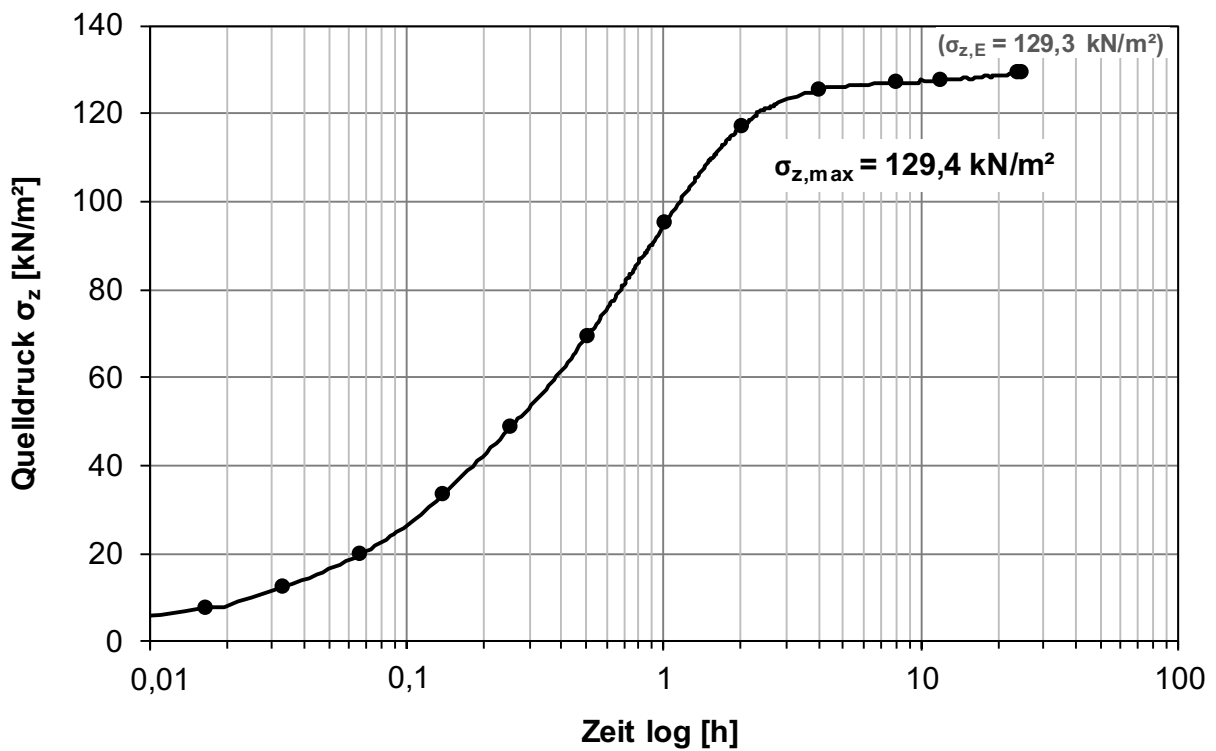


Bild 7.88: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 1, UB I

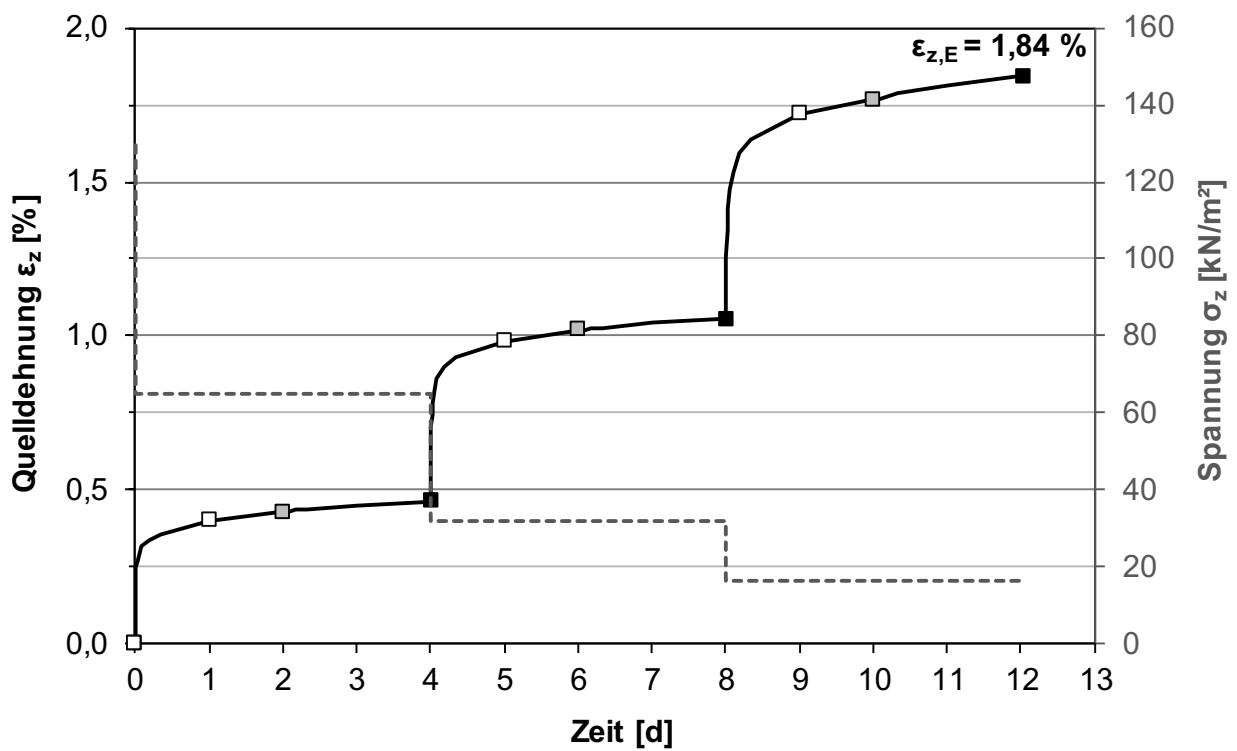


Bild 7.89: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 1, UB I

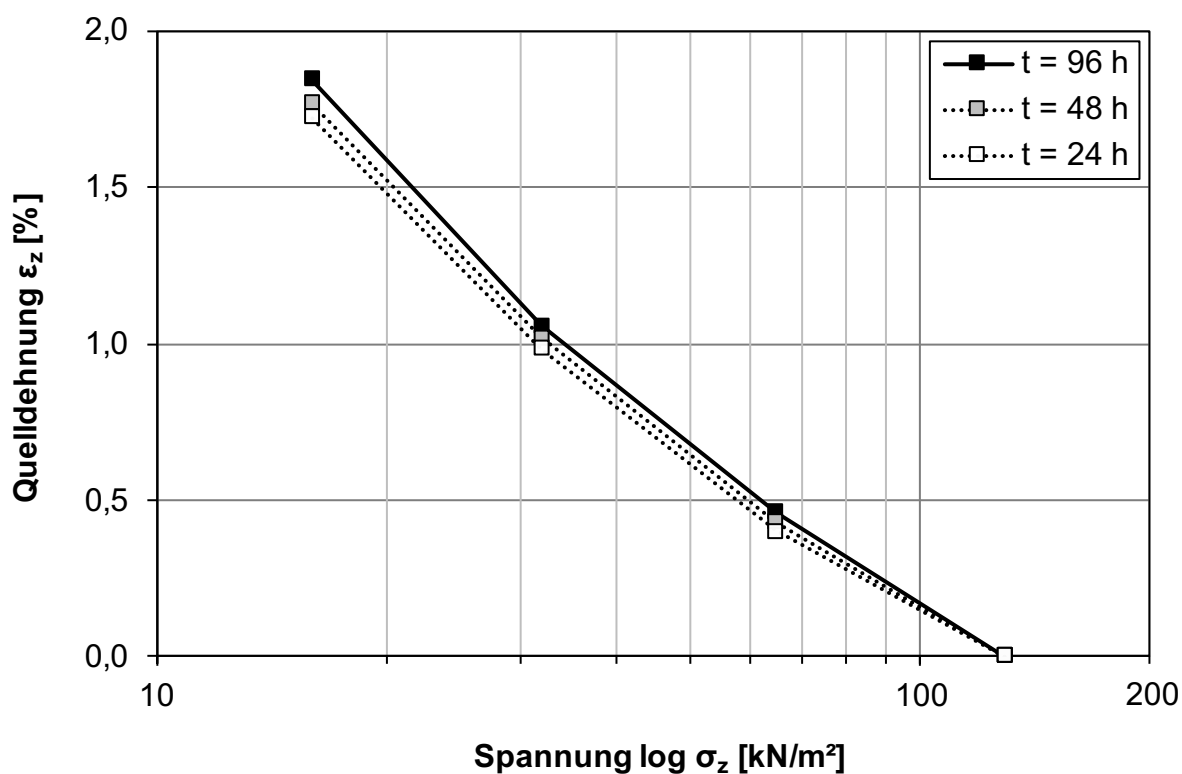


Bild 7.90: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB I

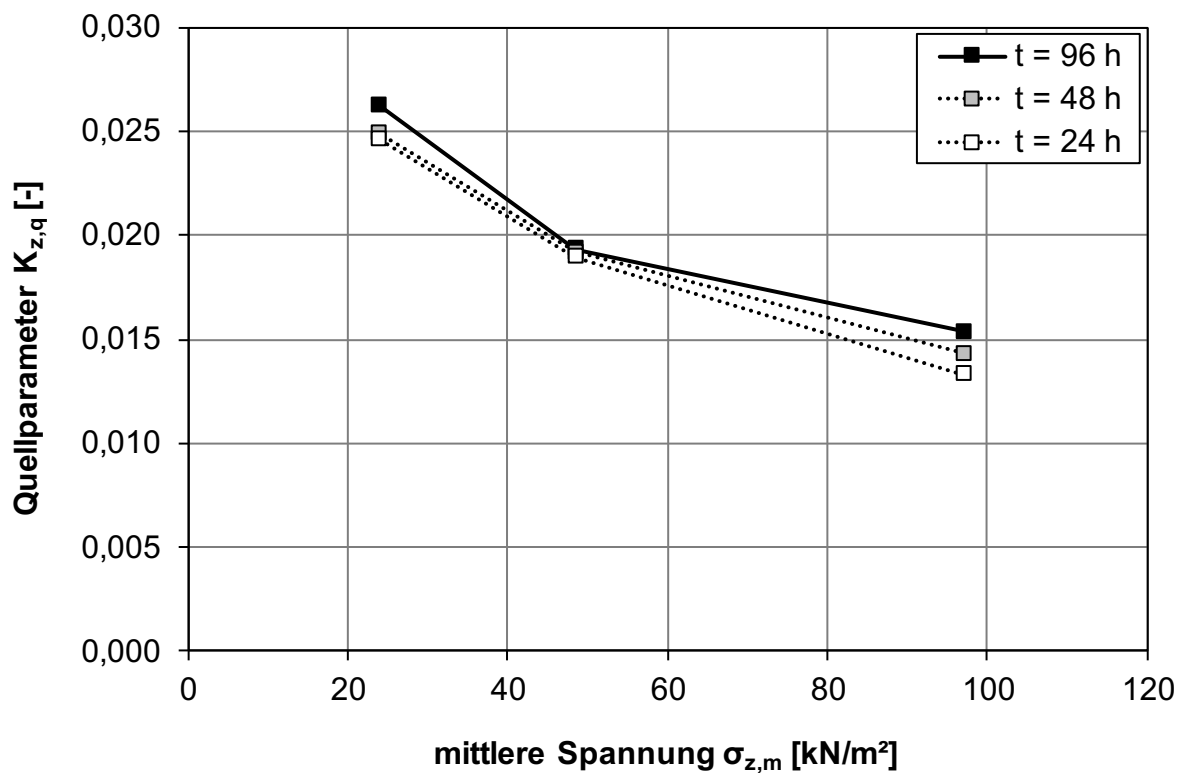


Bild 7.91: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB I

7.5.2 Tertiärer Ton VZ 1, UB II

Im Folgenden sind die Ergebnisse des tertiären Tons im VZ 1 für den Untersuchungsbereich UB II dargestellt und die Ergebnisse des Quellhebungsversuches in Tab. 7.22 zusammengefasst. Die Einbaubedingungen sind in Kapitel 7.5.7 in Tab. 7.27 aufgelistet.

Im Gegensatz zu UB I hat sich hier ein annähernd maximaler Quelldruck von $\sigma_{z,max} = 101,3 \text{ kN/m}^2$ erst nach $t = 111,6 \text{ h}$ bzw. $t = 4,65 \text{ d}$ eingestellt (Bild 7.92). Da Wasser am Rand der Belastungsplatte ausgetreten war, wurde von einer annähernd vollständigen Sättigung ausgegangen und der Versuch entsprechend beendet. Im Vergleich zu UB I, bei dem ein höherer Quelldruck ($\sigma_{z,max} = 129,4 \text{ kN/m}^2$) erreicht wurde, zeigt sich bei UB II eine höhere Einbaudichte, ein geringerer Luftporenanteil und damit auch ein höherer Anfangssättigungsgrad. Es kann somit bei geringerem Luftporenanteil weniger Wasser zum Quellen aufgenommen werden.

Im anschließenden lastgesteuerten Quellhebungsversuch wurde ausgehend vom maximalen Quelldruck $\sigma_{z,max} = 101,3 \text{ kN/m}^2$ (Bild 7.92) jeweils die

Quelldehnungen analog zu UB I für die Entlastungsstufen 65 kN/m^2 , 32 kN/m^2 und 16 kN/m^2 gemessen (siehe auch Tab. 7.22).

Die Quellhebungen waren hier im Vergleich zu UB I deutlich früher abgeklungen. Eine Zunahme der Quelldehnungen zwischen 24 h und 48 h lag in den Entlastungsstufen 65 kN/m^2 und 32 kN/m^2 bei weniger als 0,05 %. Es wurde nach 12 d eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 1,72 \%$ (UB I: $\varepsilon_{z,E} = 1,84 \%$) erreicht (Bild 7.93). Die Dauer der ersten beiden Entlastungsstufen betrug 48 h und die der letzten 96 h. Im Vergleich zu einer Auswertung der Dehnungen nach nur 48 h hat sich bei 16 kN/m^2 ein zusätzlicher Dehnungsanteil bei Auswertung von 96 h von 0,058 % (UB I: 0,145 %) ergeben.

Die mit abnehmenden Spannungen zunehmenden Quelldehnungen zeigen sich wie beim UB I im logarithmischen Maßstab in einem annähernd linearen Anstieg (Bild 7.94). Die Auswertung des Quellparameters $K_{z,q}$ ist in Abhängigkeit der mittleren Spannung in Bild 7.95 dargestellt.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,max}$	ε_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,2	4,1	101,3	1,00	0,000	0,000	-	-
2	2,3	48,0	65,0	0,64	0,151	0,251	83,2	0,0130
3	4,3	48,5	32,0	0,32	0,548	0,913	48,5	0,0215
4	8,3	96,6	16,0	0,16	1,034	1,722	24,0	0,0269
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0205$

Tab. 7.22: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 1, UB II

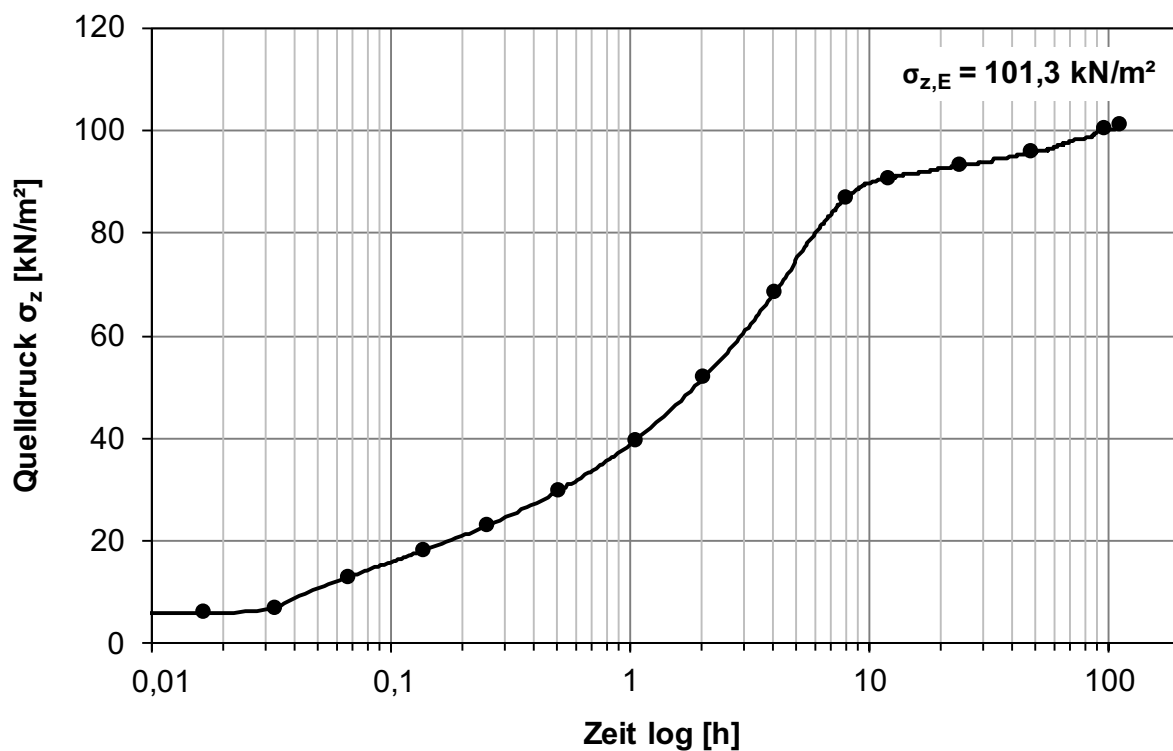


Bild 7.92: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 1, UB II

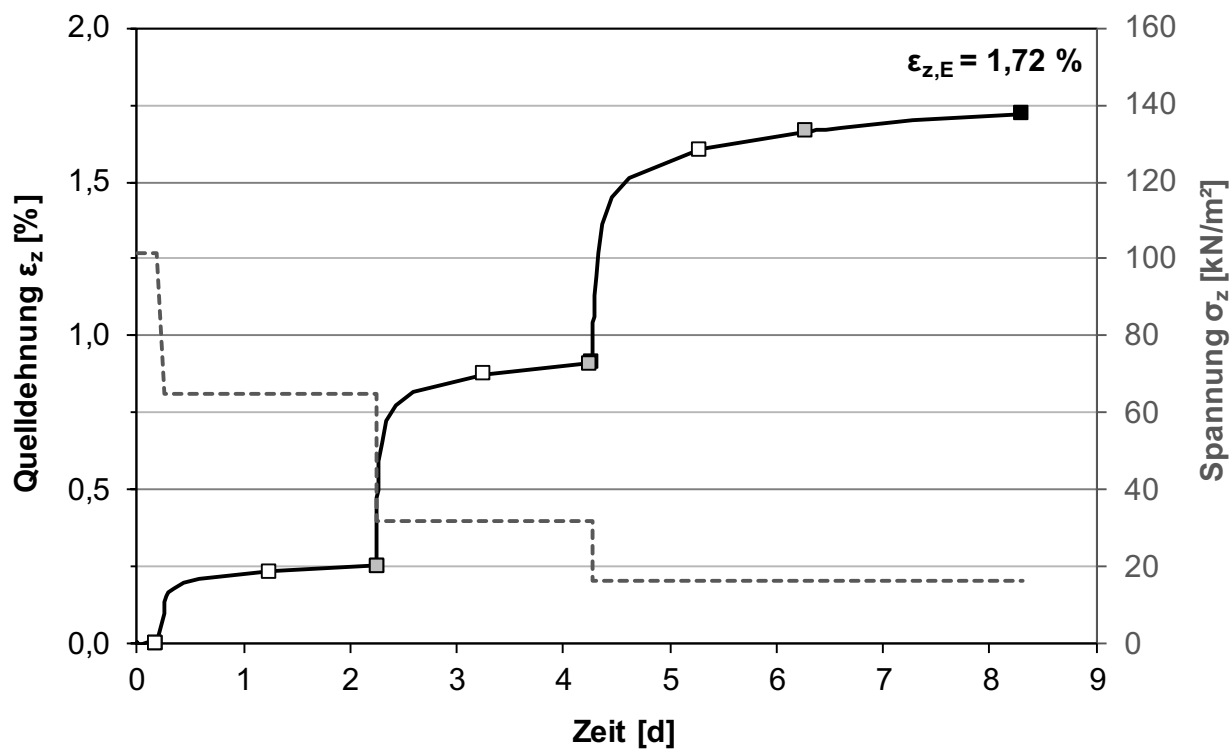


Bild 7.93: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 1, UB II

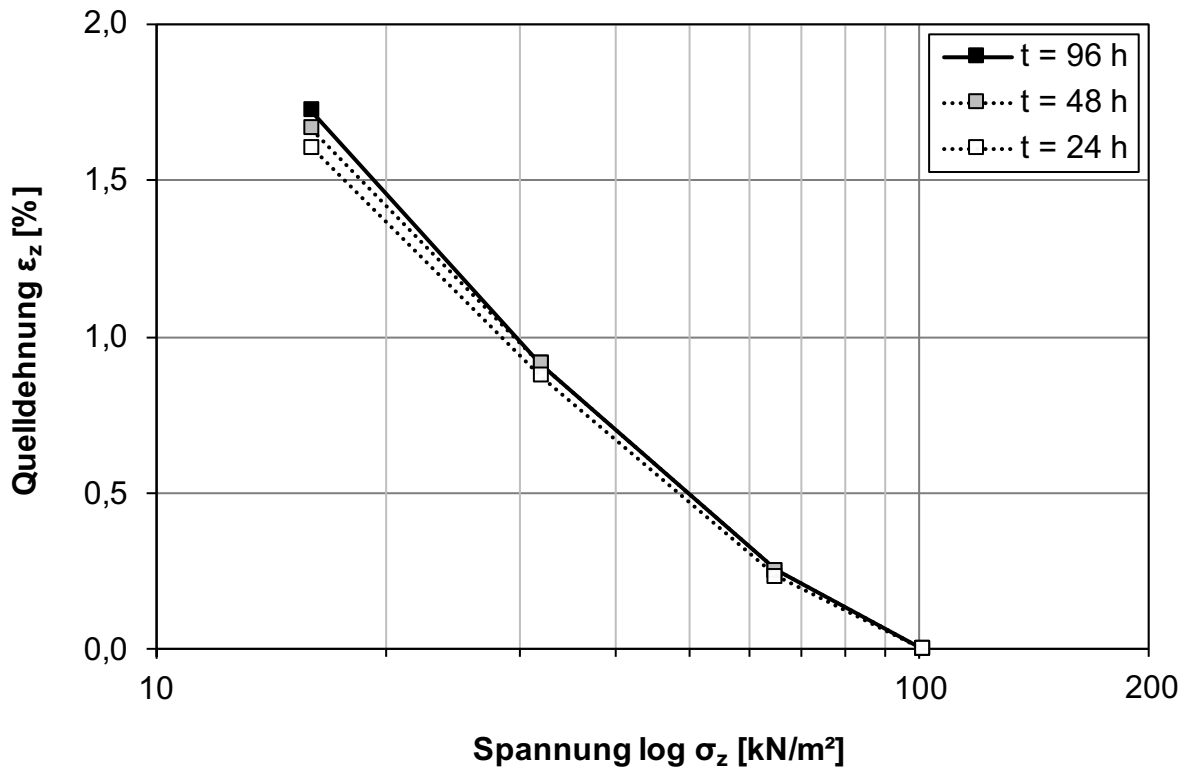


Bild 7.94: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB II

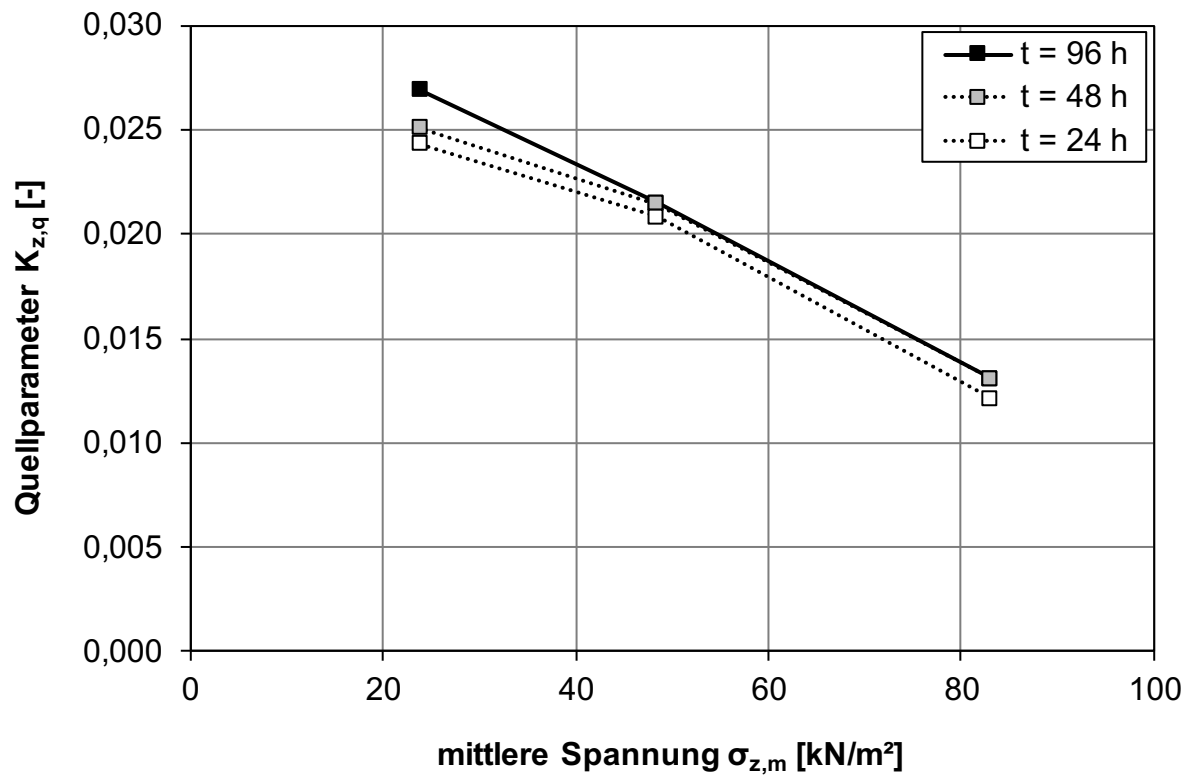


Bild 7.95: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB II

7.5.3 Tertiärer Ton VZ 4, UB IV

Da, wie bereits mehrfach erläutert, die Versuche im VZ 4 in Ödometern mit $d = 10$ cm in mechanischen Belastungsbänken durchgeführt werden mussten und diese Ergebnisse aber nicht direkt mit den kombinierten Versuchen verglichen werden konnten, wurden am Feuerletten-Zersatz (Kapitel 7.6) und tertiären Ton auch im VZ 4 die Proben in Ödometern mit $d = 30$ cm eingebaut und getestet.

Beim tertiären Ton liegt der Unterschied von VZ 1 zu VZ 4 lediglich in einem TBW. Die Proctorkurven liegen relativ ähnlich zu einander.

Es hatte sich im Allgemeinen gezeigt, dass mit zunehmendem VZ die Quelldrücke und Quelldehnungen gegenüber VZ 1 abnehmen. Demnach er-

reichte die Probe im UB IV mit einem Anfangsluftporenanteil von $n_{a,0} = 9,9$ % (siehe Tab. 7.27 in Kapitel 7.5.7) einen geringeren Quelldruck von $\sigma_{z,max} = 106,7$ kN/m² (Bild 7.96) gegenüber dem äquivalenten Einbauzustand auf der trockenen Seite der Proctorkurve UB I in VZ 1 ($n_{a,0} = 11,6$ %) mit $\sigma_{z,max} = 129,4$ kN/m².

Obwohl die Entlastungsstufen länger dauerten als bei UB I (12 d), wurde nach 21 d eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 1,51$ % gegenüber UB I ($\varepsilon_{z,E} = 1,84$ %) erreicht (Bild 7.97).

Im logarithmischen Maßstab verläuft die Quellgerade annähernd linear (Bild 7.98). Entsprechend nimmt der Quellparameter zunächst zu, fällt aber zur letzten Entlastungsstufe wieder ab (Bild 7.99). Die Werte sind auch in Tab. 7.23 aufgelistet.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ε_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,02	0,3	106,7	1,00	-0,001	0,002	-	-
2	6,0	144,0	65	0,61	0,194	0,328	85,9	0,0153
3	12,0	144,0	32	0,30	0,547	0,925	48,5	0,0194
4	21,0	216,2	16	0,15	0,895	1,514	24,0	0,0196
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0181$

Tab. 7.23: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

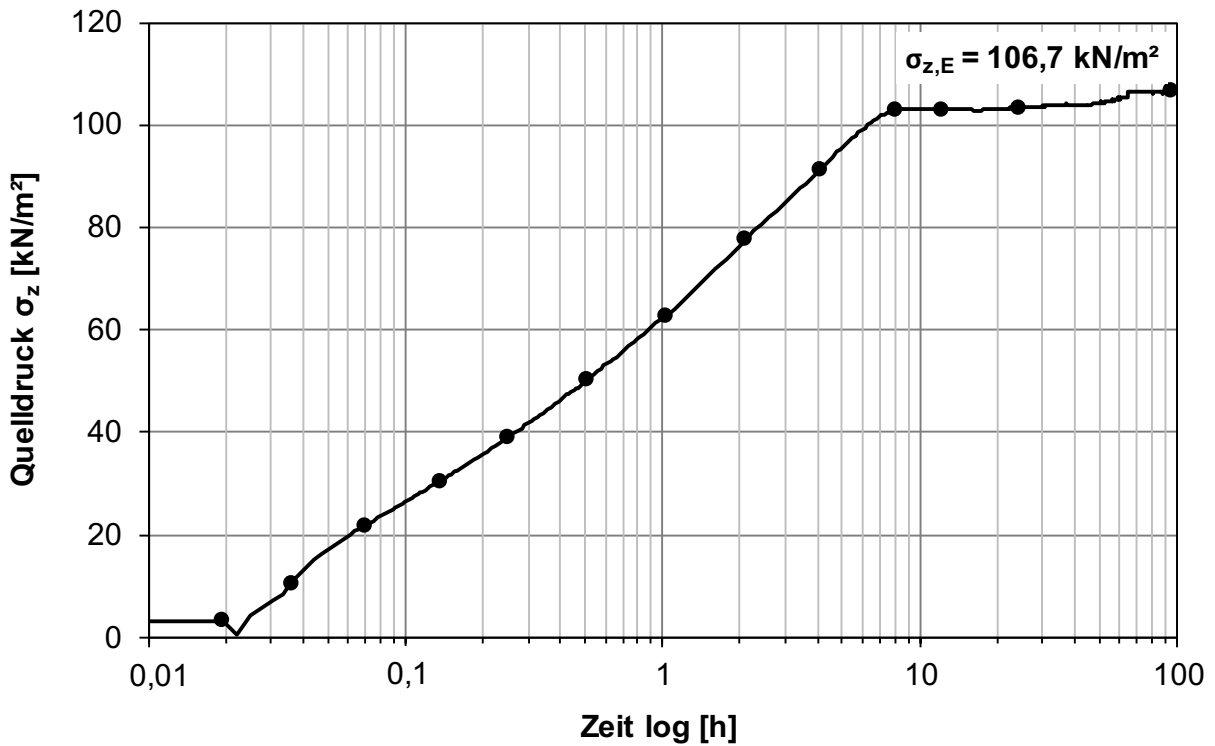


Bild 7.96: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

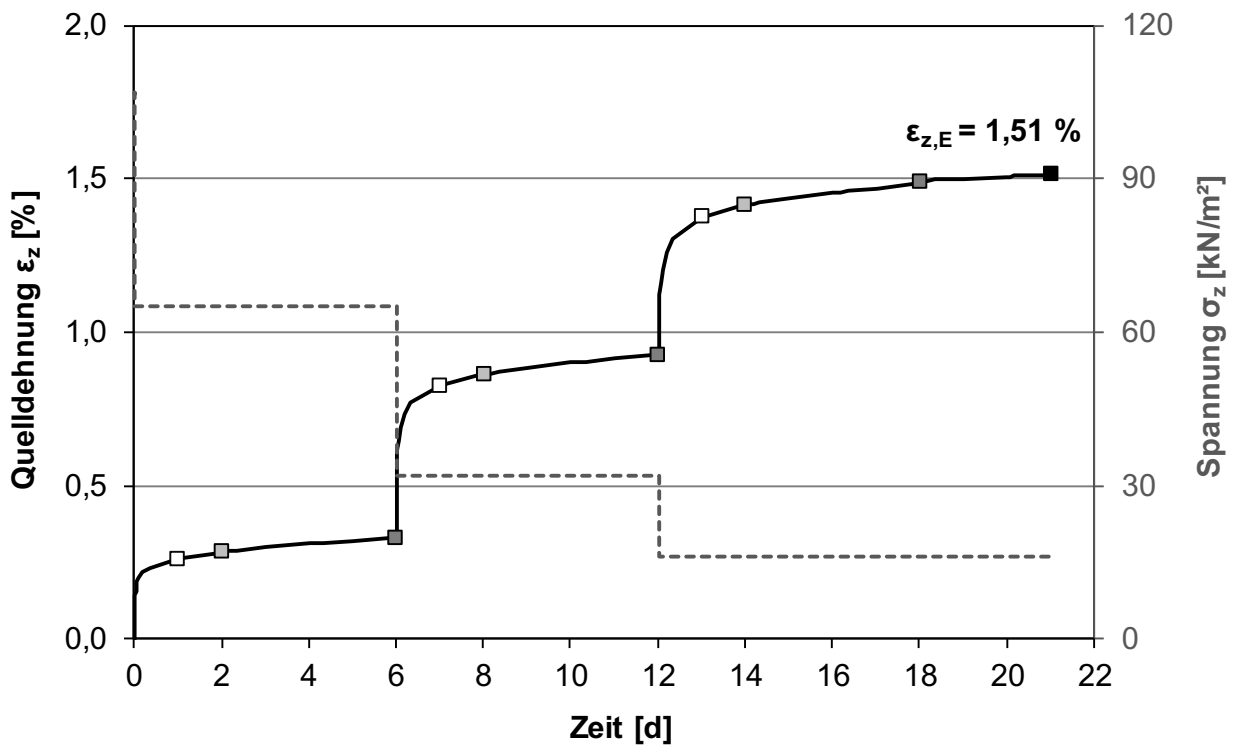


Bild 7.97: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

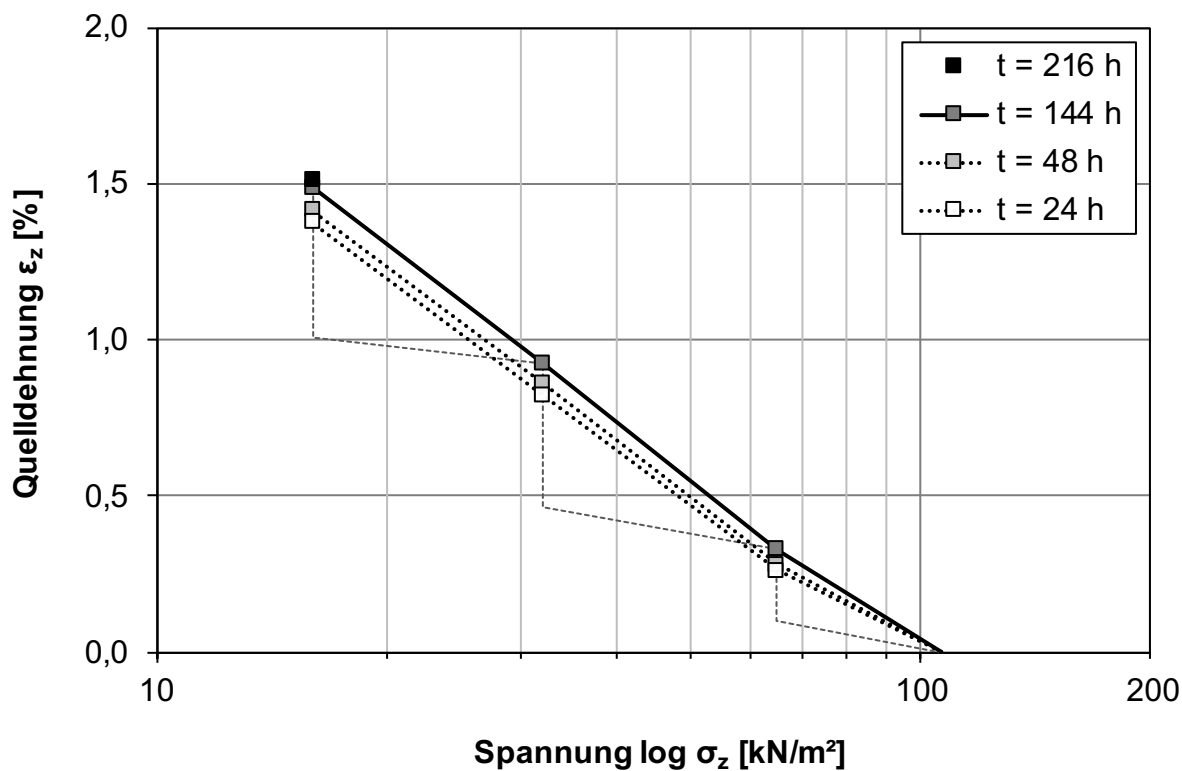


Bild 7.98: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

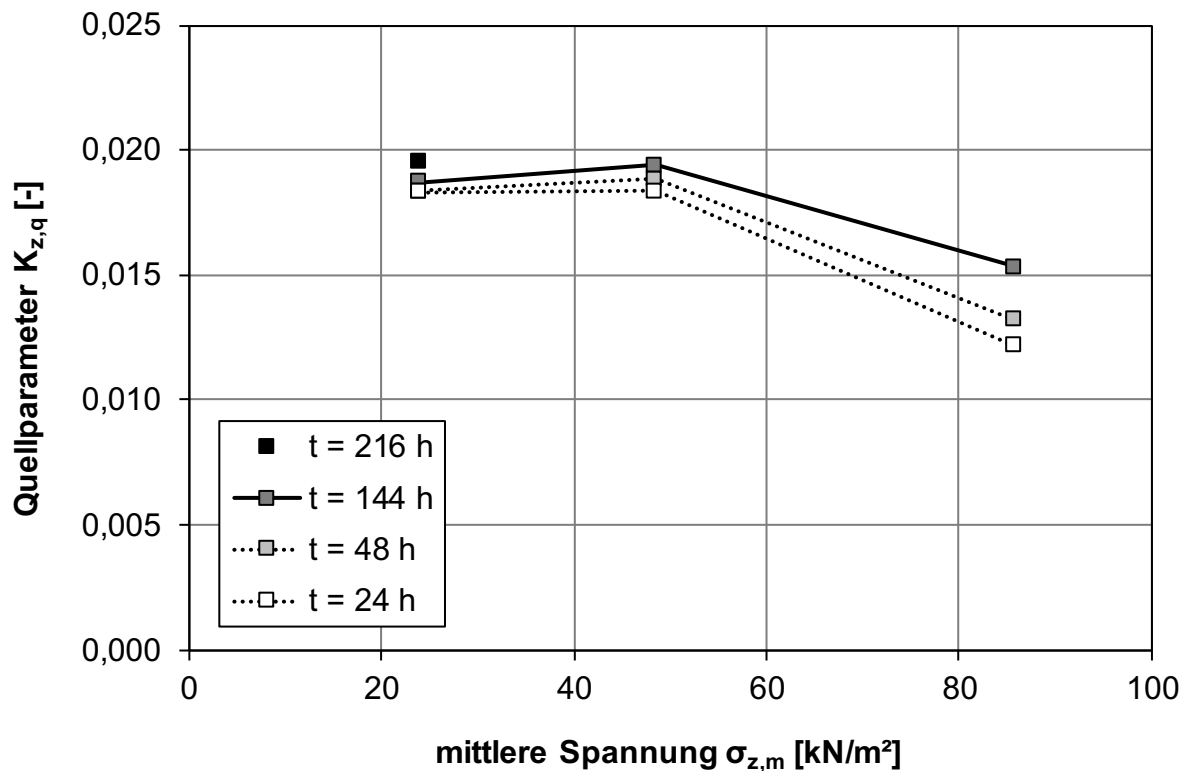


Bild 7.99: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

7.5.4 Tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

Im Folgenden sind die Ergebnisse des tertiären Tons im VZ 4 für den Untersuchungsbereich UB IV dargestellt und die Ergebnisse des Quellhebungsversuches in Tab. 7.24 zusammengefasst. Die Einbaubedingungen sind in Kapitel 7.5.7 in Tab. 7.27 aufgelistet.

Im Gegensatz zur softwaregesteuerten Quelldruckentwicklung musste der Weg hier händisch durch Nachregelung (NR) konstant gehalten werden. Das es zu Überregelungen kam, ist in Bild 7.101 erkennbar. Aufgrund dieser Problematik wurden auch zwei Versuche durchgeführt (Bild 7.102). Abhängig von den Einbaubedingungen (siehe Kapitel 7.5.7 in Tab. 7.27) stellten sich unterschiedliche maximale Quelldrücke ein. QD 1 mit der höheren Einbaudichte und dem geringeren Luftporenanteil entwickelte einen höheren Quelldruck.

Der Quellhebungsversuch wurde an einer weiteren separaten Probe durchgeführt. Die Spannungen wurde unterhalb des zu erwartenden Quelldrucks gewählt (siehe Tab. 7.24). Nach 20 d wurde eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 2,14 \%$ erreicht (Bild 7.103).

Mit zunehmender Entlastung und damit geringeren Spannungen nehmen die Quelldehnungen zu, wobei sich diese Tendenz nur bis zu einer Mindestspannung von ca. 10 % des maximalen Quelldruckes zeigt (Bild 7.104). Würde man aus den Dehnungen der zweiten und dritten Laststufe den maximalen Quelldruck extrapolieren, läge dieser bei ca. 90 kN/m². Damit waren 3,7 kN/m² zu gering gewählt. Dies zeigt sich auch bei der Auswertung des Quellparameter $K_{z,q}$. Die geringere Steigung der Quellgeraden als Ausdruck für die geringeren Quelldehnungen bewirkt auch den geringeren Quellparameter (Bild 7.105).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$	ε_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,8	20,0	37,5	1,00	-0,153	-0,785	-	-
2	6,8	144,3	37,5	1,00	0,151	0,774	-	-
3	13,6	161,6	18,7	0,50	0,267	1,369	28,1	0,0198
4	20,6	167,2	3,7	0,10	0,417	2,138	11,2	0,0110
*LS = Laststufe					$\Delta\varepsilon_{z,q} =$	1,364		$\varnothing = 0,0154$

Tab. 7.24: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

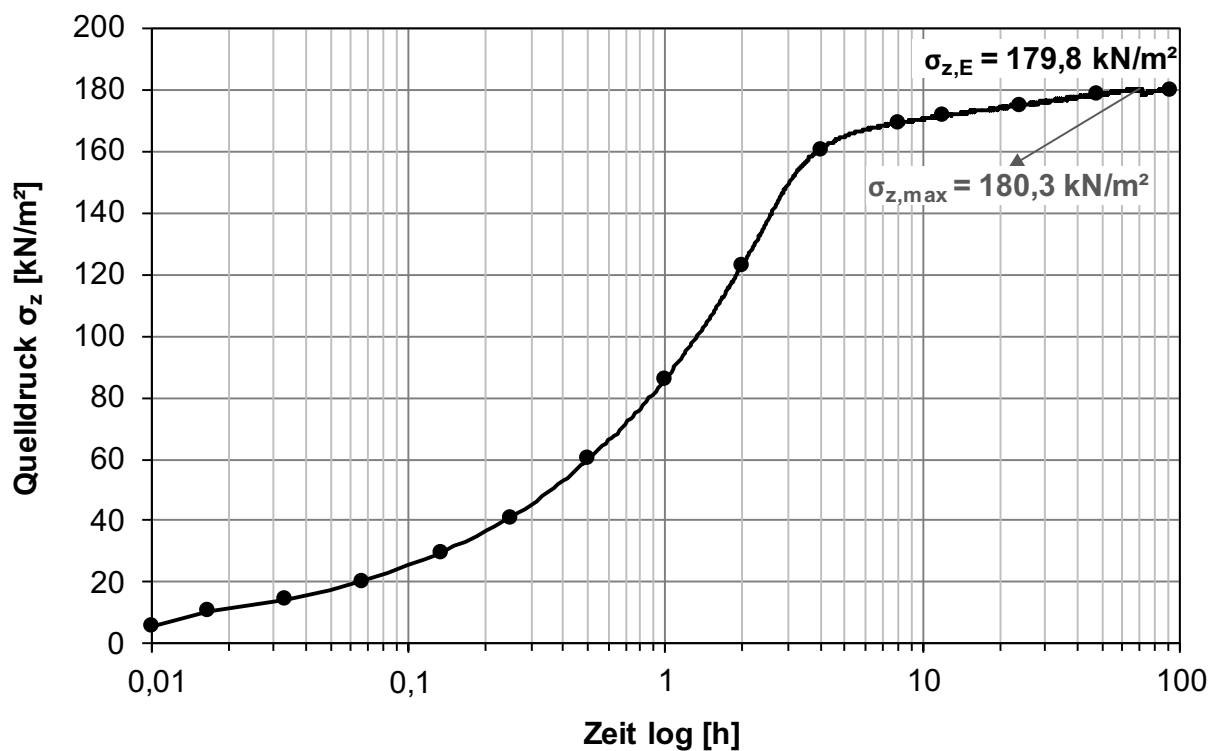


Bild 7.100: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV QD 1 (10 kN)

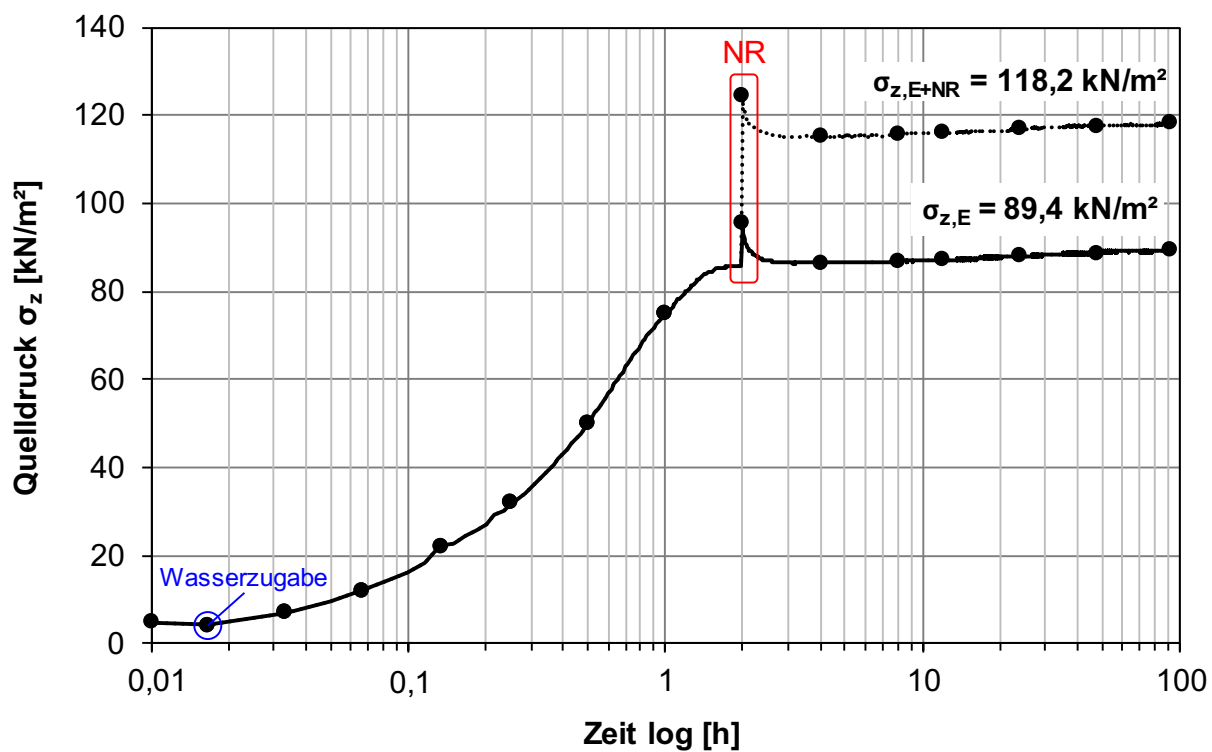


Bild 7.101: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV QD 2 (5 kN)

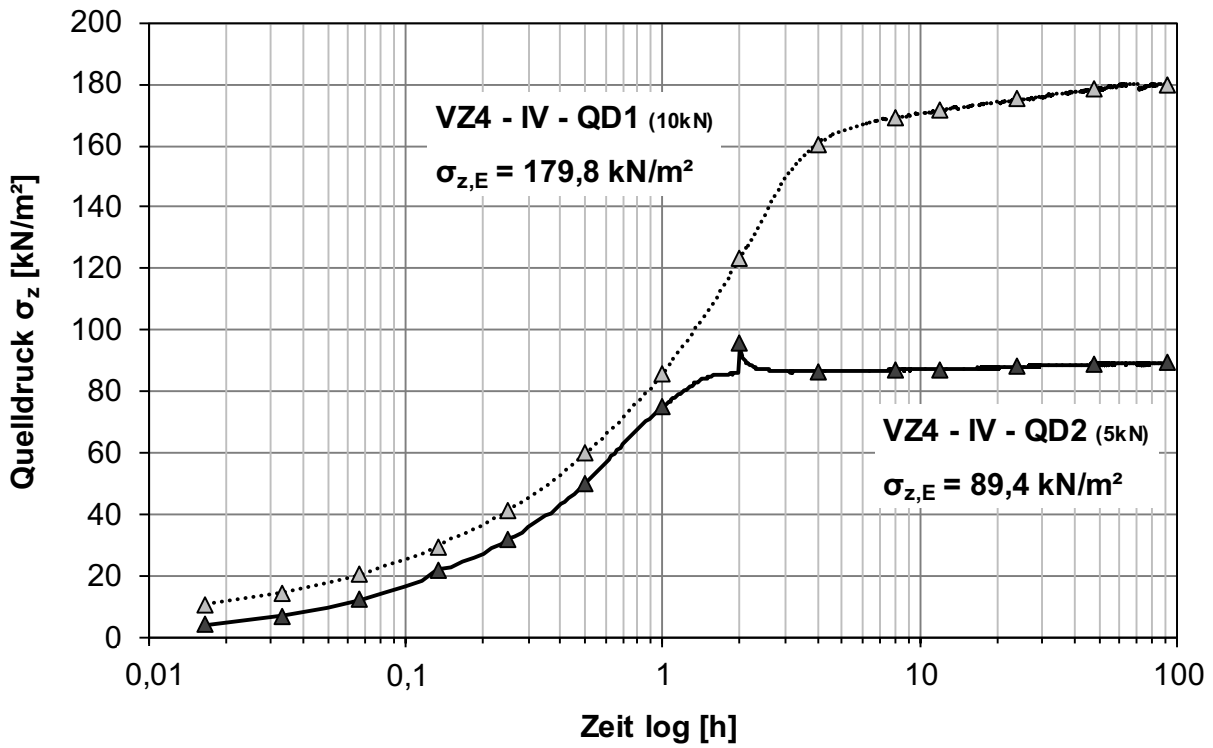


Bild 7.102: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

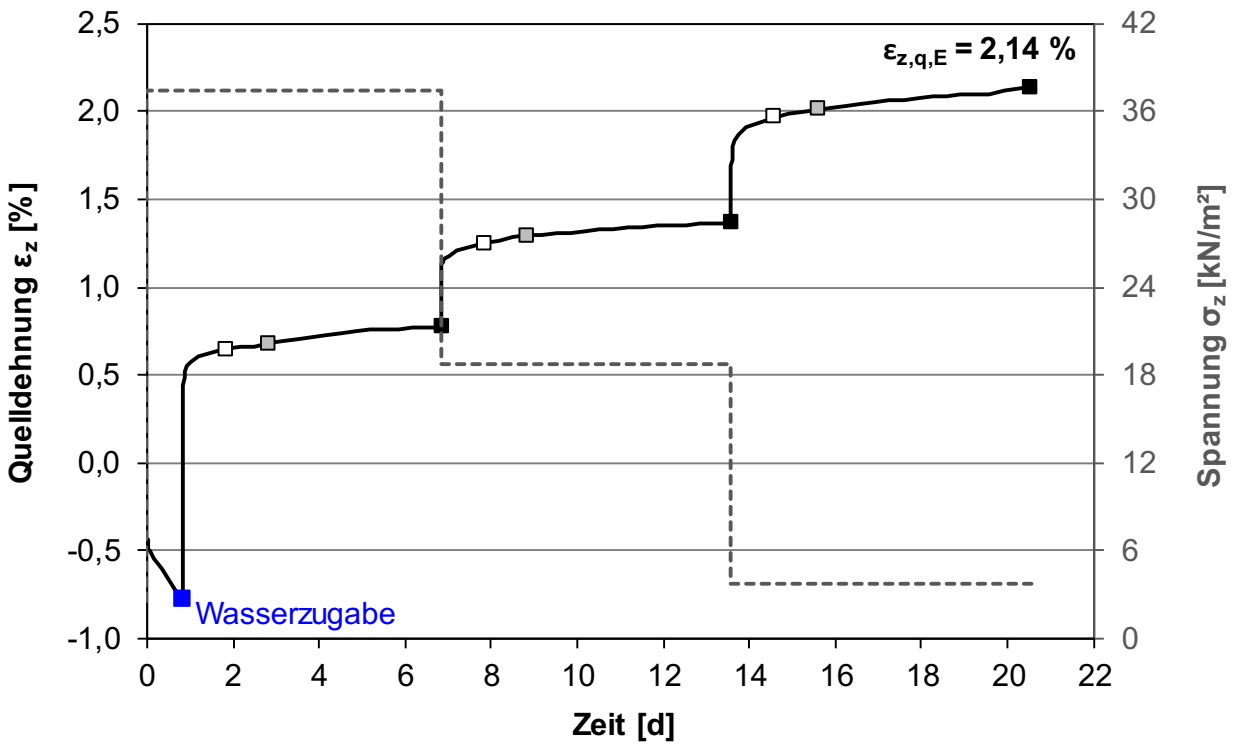


Bild 7.103: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

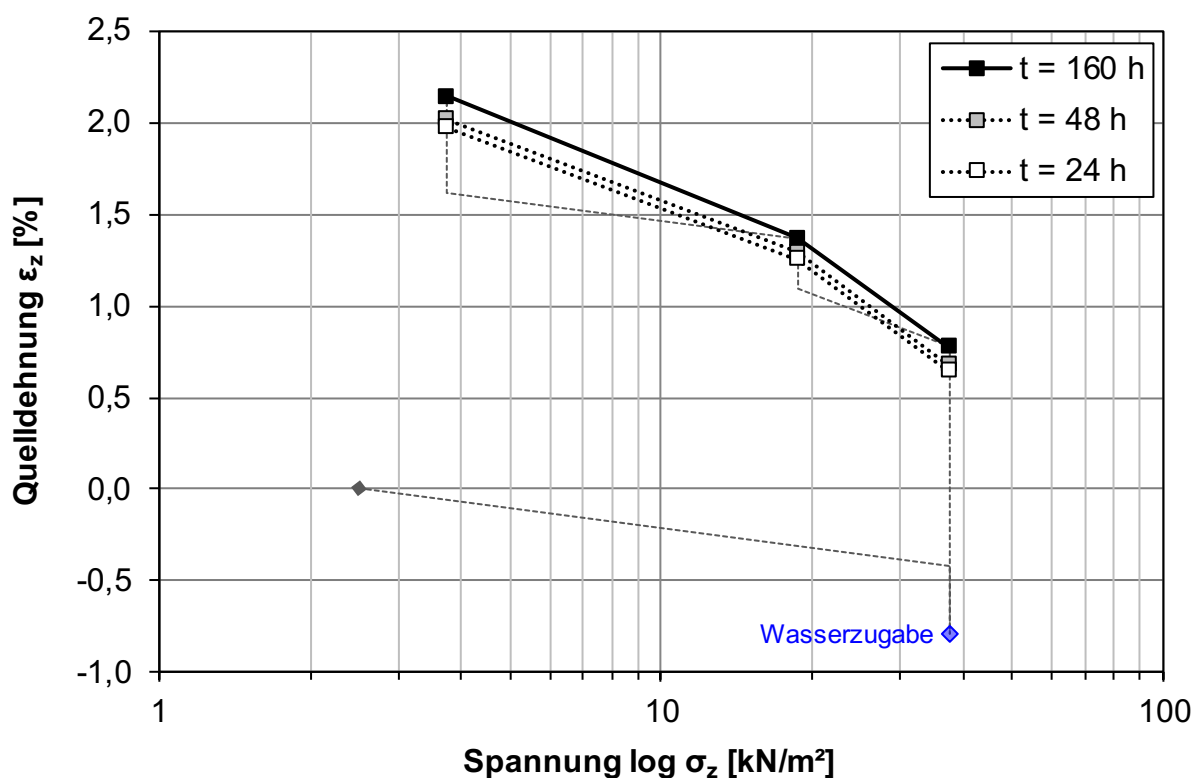


Bild 7.104: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

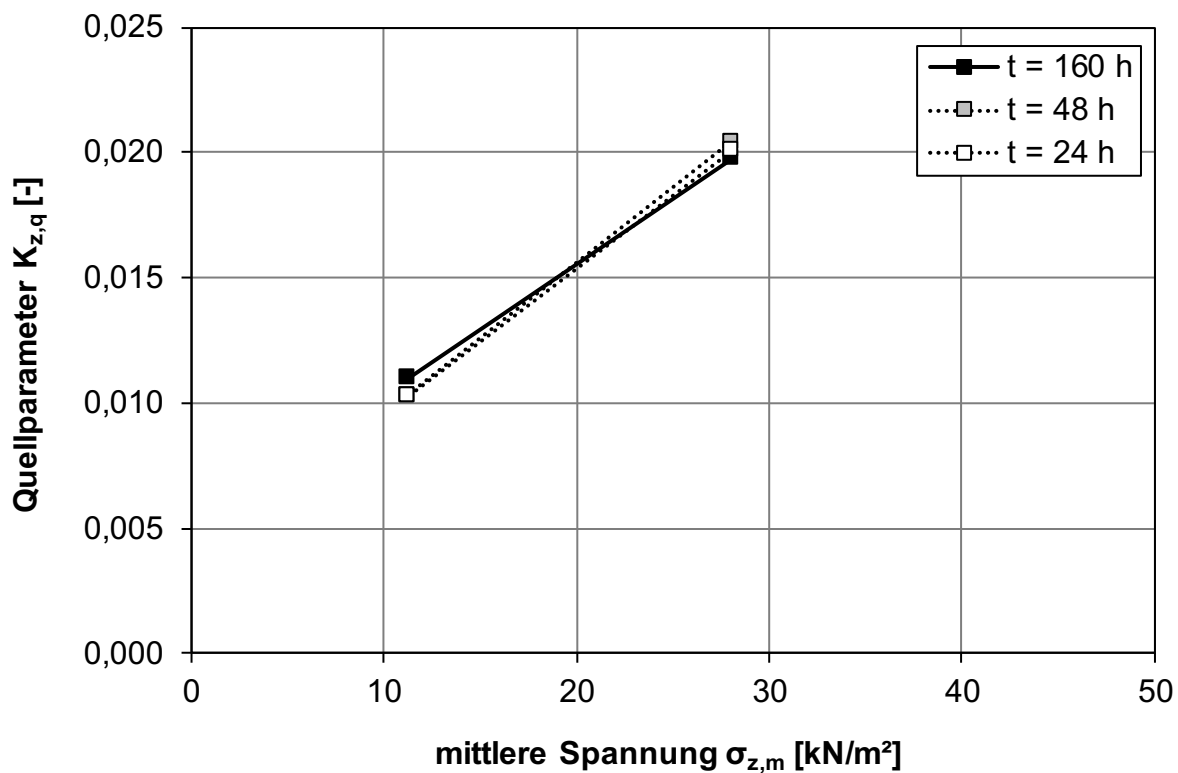


Bild 7.105: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

7.5.5 Tertiärer Ton VZ 4, UB V

Wie bereits bei den Versuchen am Opalinustonstein (Kapitel 7.2) haben technische Störungen auch hier zum Absturz des Quelldruckversuches geführt. Wegen des Ausfalls des Netzwerkadapters wurde nach ca. 13,5 d ein Endwert des Quelldrucks von ca. 67,6 kN/m² gemessen (Bild 7.106). Der Wert liegt deutlich unterhalb von UB IV ($\sigma_{z,max} = 106,7$ kN/m²).

Nach einer kurzzeitigen Entlastung und dem Wechsel auf ein anderes Pressengerät wurde dennoch

der Quellhebungsversuch gestartet (Tab. 7.25). Daher resultiert auch die anfängliche Belastungssetzung (Bild 7.107). Bis zum Ende des Quellhebungsversuches war am oberen Rand der Probe kein Wasser zu sehen. Für eine nahezu vollständige Sättigung wäre hier ein Vielfaches der bereits durchgeführten Zeitdauer erforderlich gewesen. Im logarithmischen Maßstab zeigt sich der Verlauf der Dehnungen nicht ganz linear (Bild 7.108). Die zunehmenden Dehnungen zeigen sich auch im Anstieg des Quellparameters (Bild 7.109).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,00	24,00	68,0	1,00	-0,036	-0,060	-	-
2	7,00	144,00	32,0	0,47	0,135	0,224	50,0	0,0087
3	13,93	166,26	16,0	0,24	0,356	0,592	24,0	0,0122
*LS = Laststufe								$\varnothing = 0,0104$

Tab. 7.25: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB V

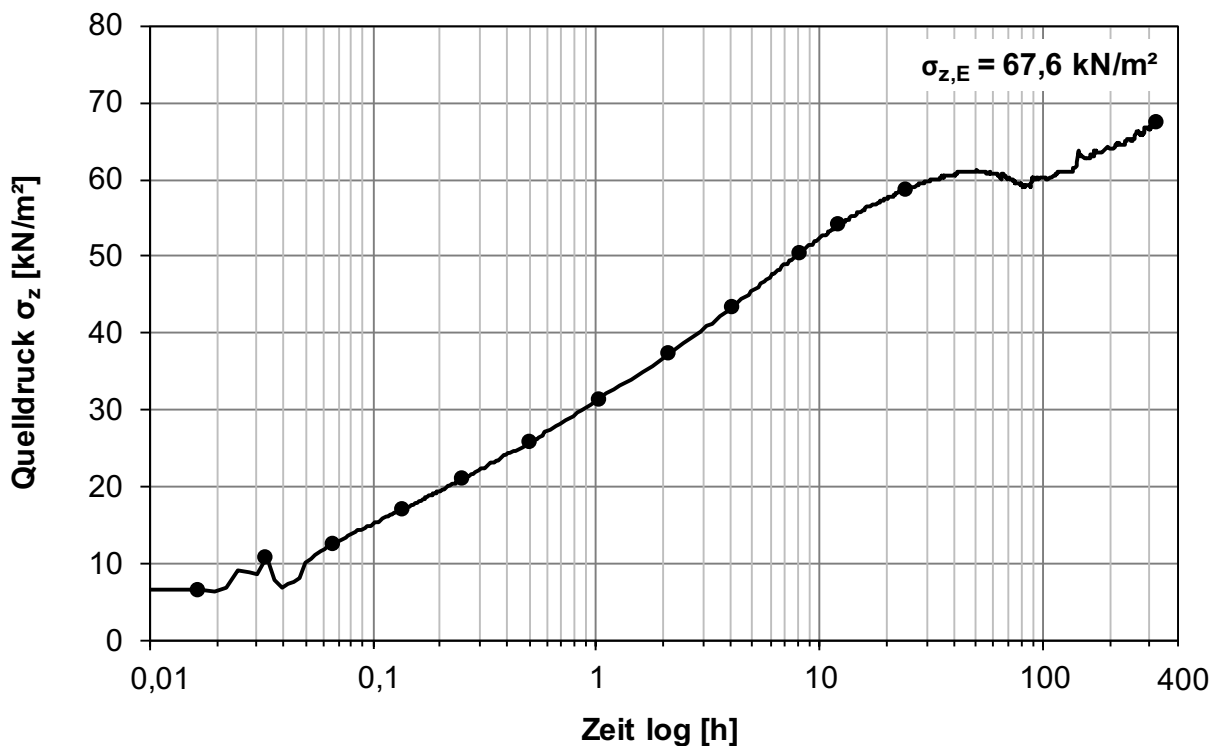


Bild 7.106: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V

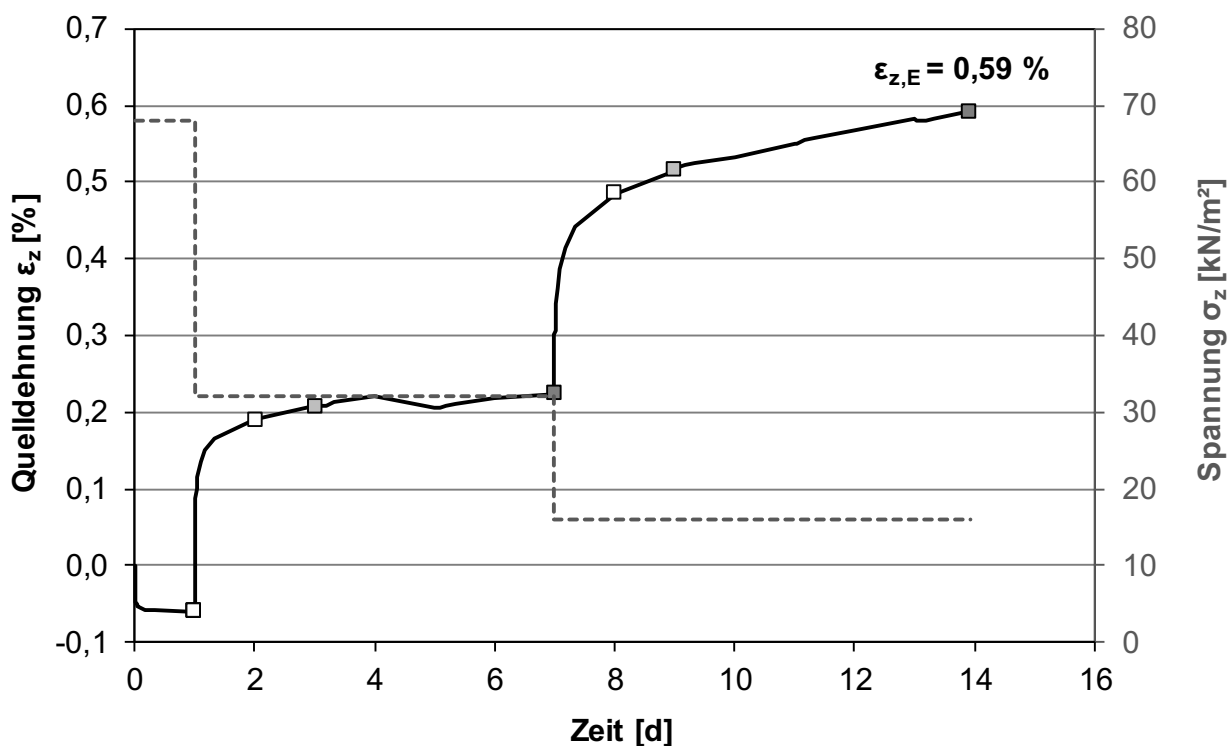


Bild 7.107: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB V

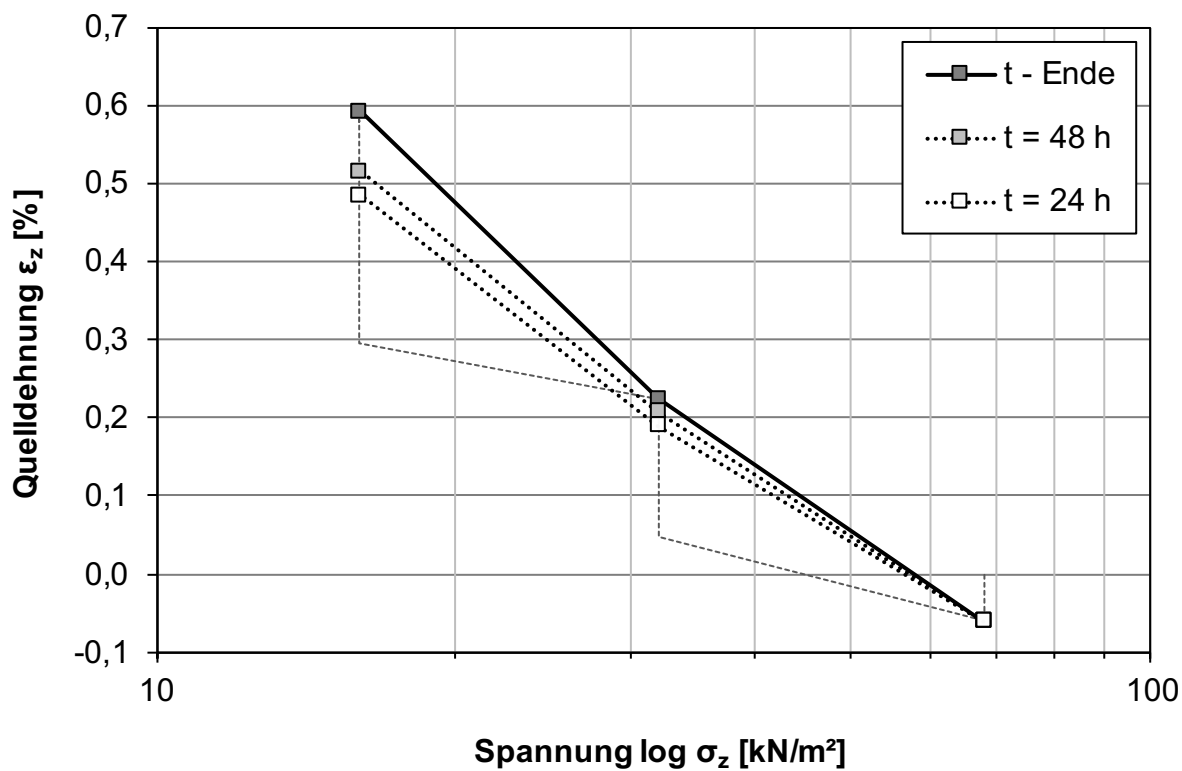


Bild 7.108: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V

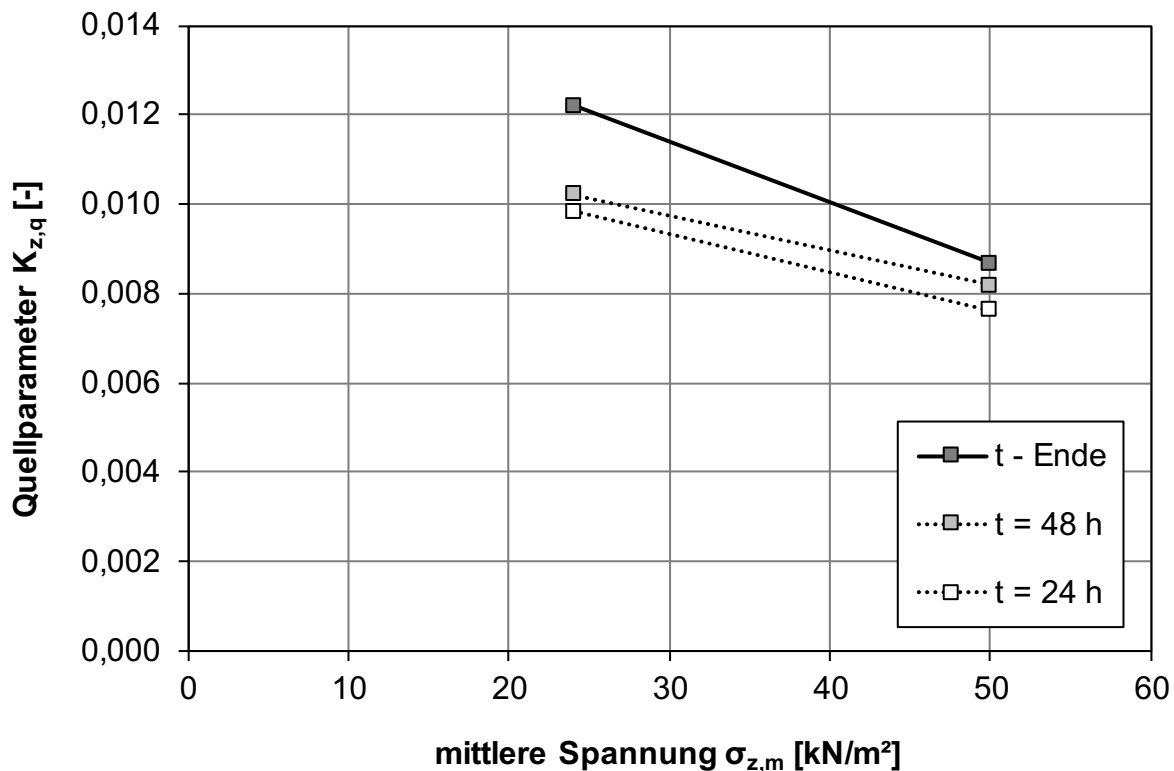


Bild 7.109: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V

7.5.6 Tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)

Im Folgenden sind die Ergebnisse des tertiären Tons im VZ 4 für den Untersuchungsbereich UB V dargestellt und die Ergebnisse des Quellhebungsversuches in Tab. 7.26 zusammengefasst. Die Einbaubedingungen sind in Kapitel 7.5.7 in Tab. 7.27 aufgelistet.

Die Ergebnisse der mechanischen Quelldruckentwicklung mit den Nachregelungen (NR) sind in Bild 7.110 bis Bild 7.112 dargestellt. Abhängig von den Einbaubedingungen (siehe Kapitel 7.5.7 in Tab. 7.27) stellen sich unterschiedliche maximale Quelldrücke ein. Beide Versuche zeigen hier jedoch relativ ähnliche Einbaubedingungen. Allerdings kann hier die fehlerhafte leichte überdrückende Nachregelung bei QD 1 innerhalb der ersten Minuten zu einer höheren Dichte und damit zu einer stärkeren Quelldruckentwicklung geführt haben. Eine mechanische Handregelung eines konstanten Weges ist in

jedem Fall subjektiv und damit stark fehlerbehaftet. Als ungefähre Einschätzung eines maximalen Quelldrucks aber dennoch hilfreich.

Der Quellhebungsversuch wurde an einer weiteren separaten Probe durchgeführt. Die Spannungen wurden unterhalb des zu erwartenden Quelldrucks analog zu UB IV zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewählt (siehe Tab. 7.24). Nach 20 d wurde eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 2,14\%$ erreicht (Bild 7.113).

Analog zu UB IV treten zwar bei der geringsten Spannung die größten Quellhebungen auf. Wegen Überschreitung der Mindestspannung geht das behinderte Quellen hier über in ein freies Quellen, weswegen in Bild 7.114 die Steigung der Quellgeraden und damit auch der Quellparameter (Bild 7.115) abnimmt.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,8	20,3	37,5	1,00	-0,202	-1,036	-	-
2	6,8	144,1	37,5	1,00	-0,014	-0,072	-	-
3	13,6	161,6	18,7	0,50	0,076	0,390	28,1	0,0153
4	20,5	167,2	3,7	0,10	0,207	1,062	11,2	0,0096
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	1,133		$\emptyset = 0,0124$

Tab. 7.26: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB V

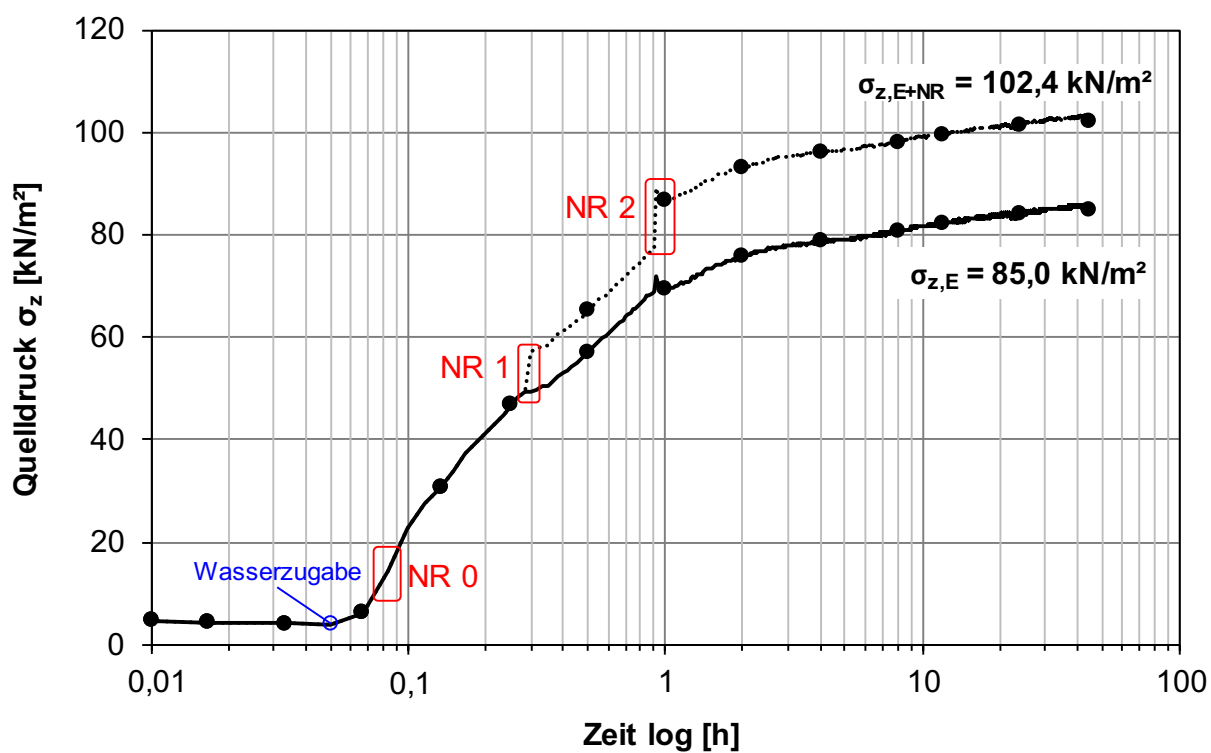


Bild 7.110: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V QD 1 (10 kN)

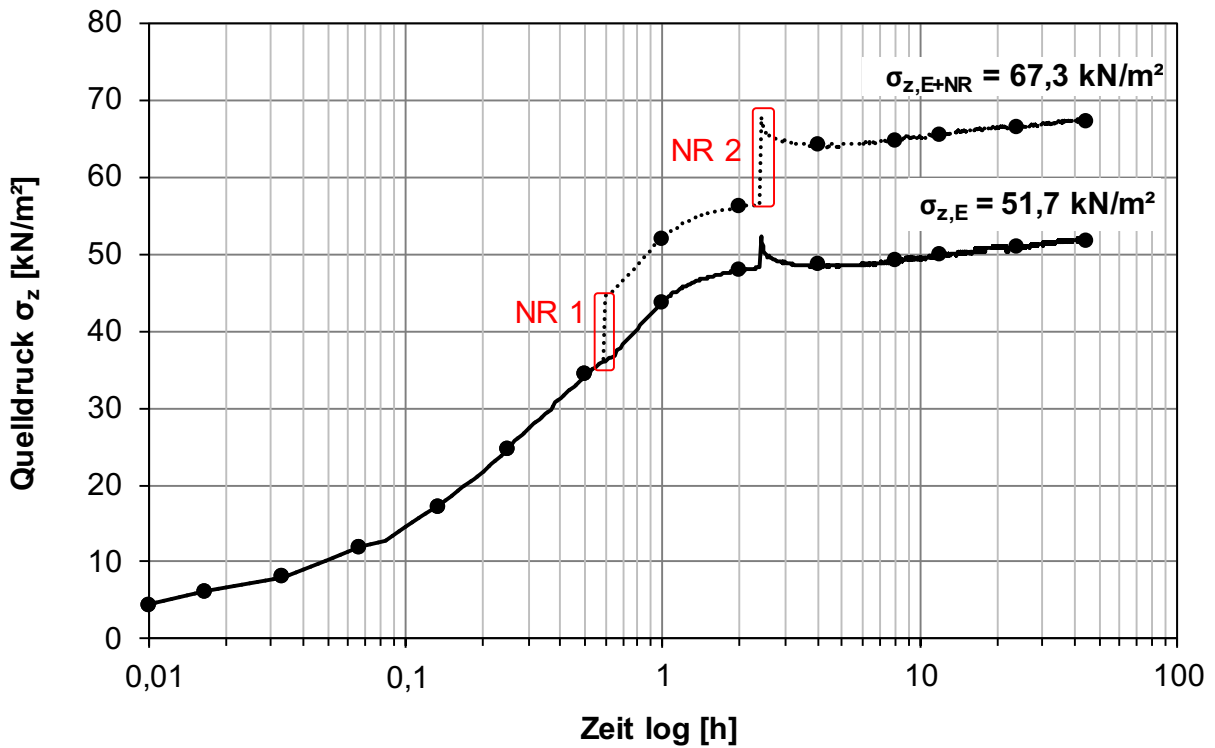


Bild 7.111: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V QD 2 (5 kN)

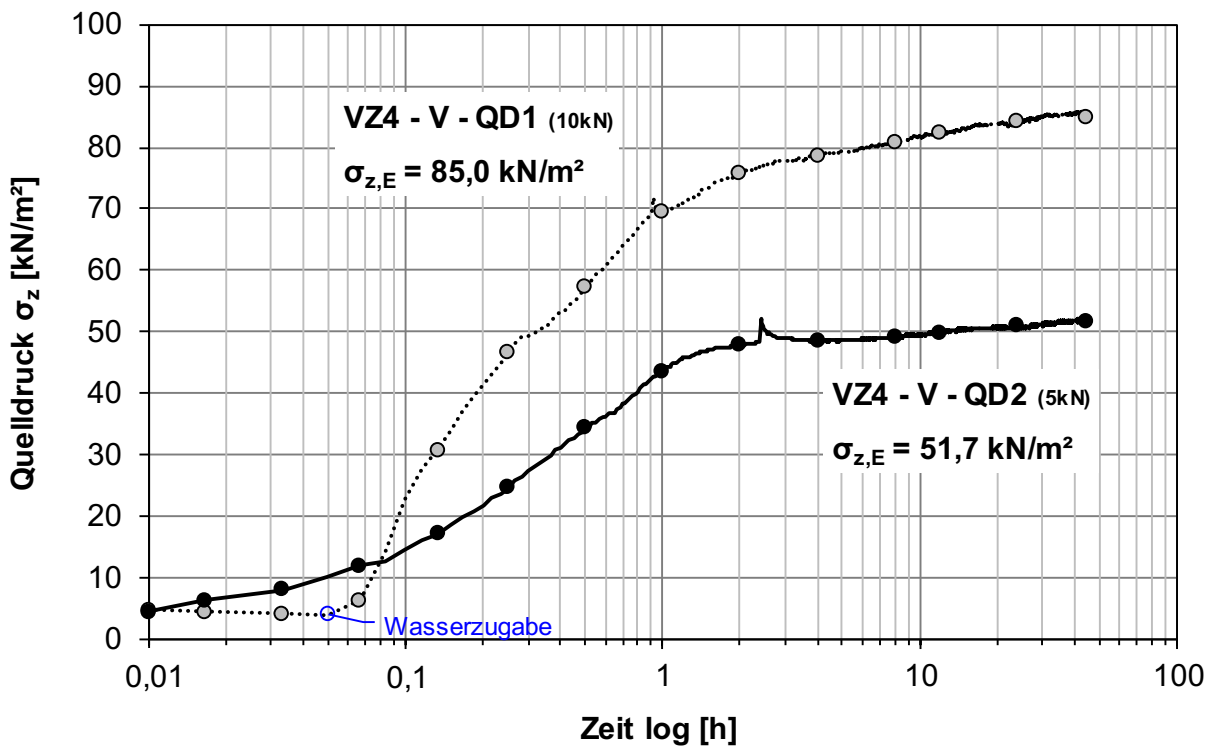


Bild 7.112: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

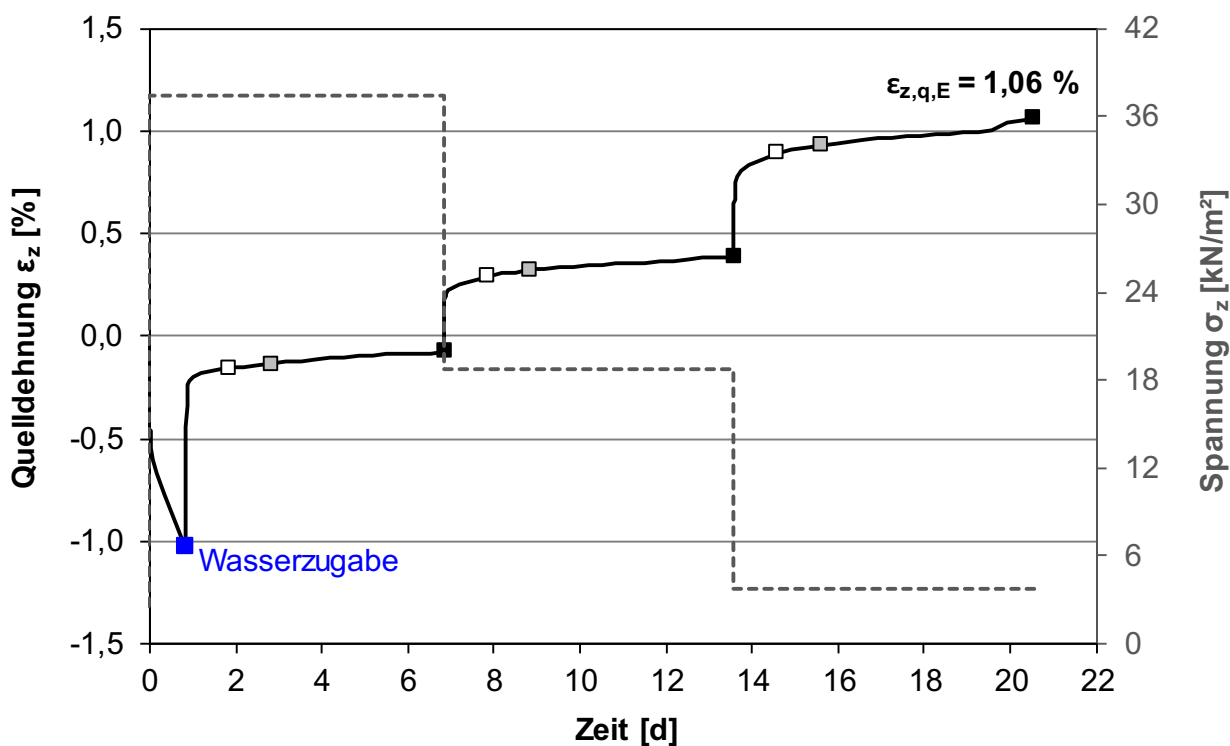


Bild 7.113: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)

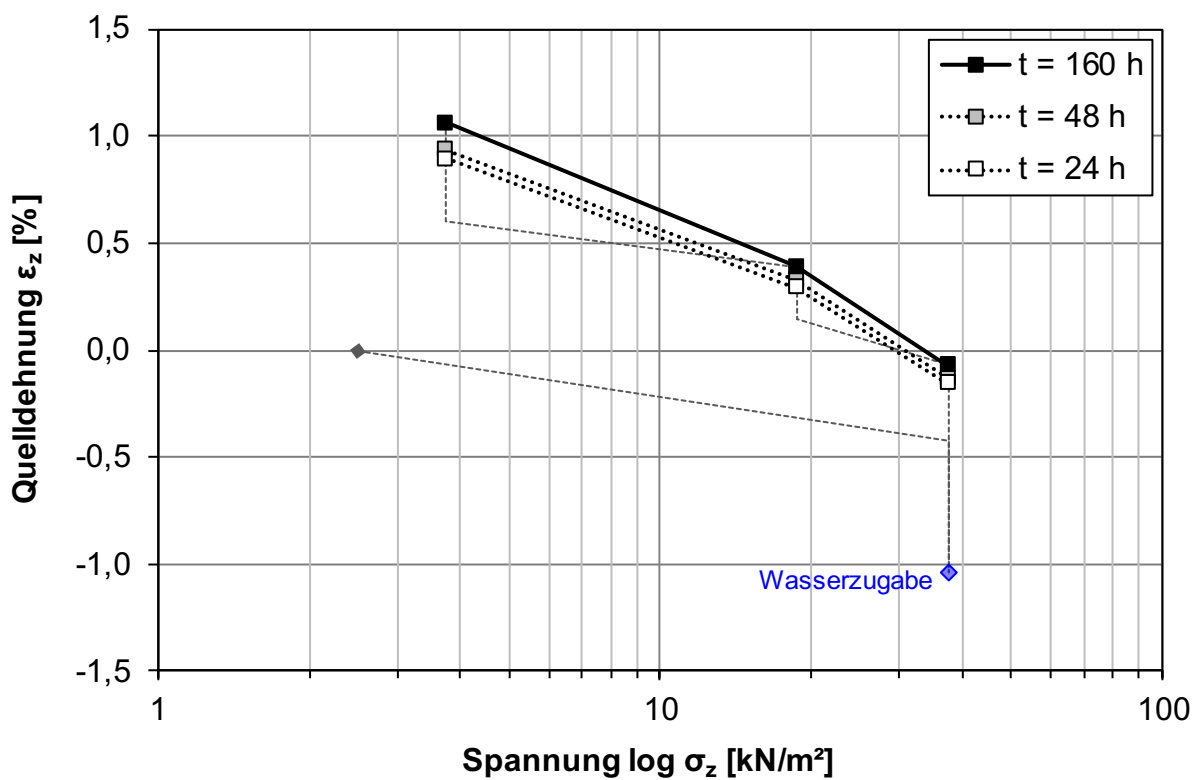


Bild 7.114: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)

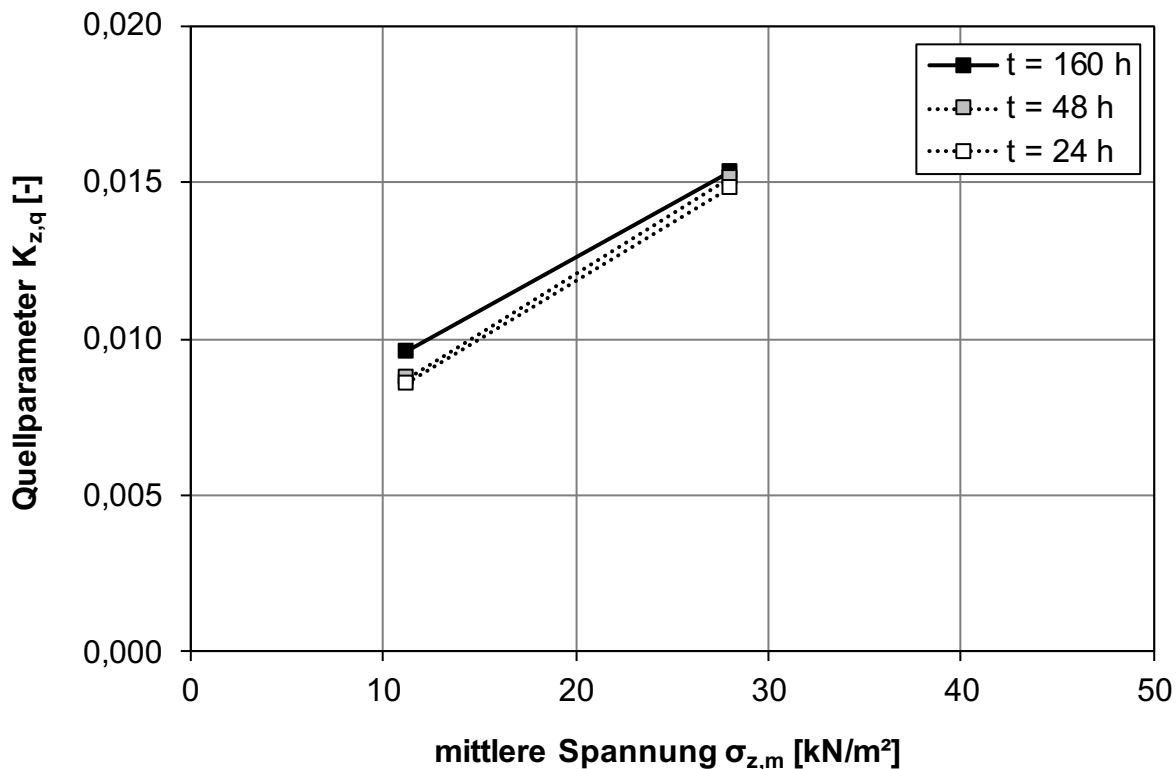


Bild 7.115: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)

7.5.7 Zusammenfassung tertiärer Ton

Im Folgenden sind die Ergebnisse des tertiären Tons im VZ 1 und VZ 4 in den folgenden Diagrammen und in Tab. 7.27 zusammengefasst. Zum Vergleich der Ergebnisse im VZ 4 sind sowohl kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche als auch Quellhebungsversuche in Standard-Ödometern mit separater Quelldruckermittlung durchgeführt worden.

Bei den kombinierten Quellversuchen lässt sich analog zu vorhergehenden Ergebnissen erkennen, dass Proben mit höherem Luftporenanteil zusammen mit einer geringeren Dichte, d.h. UB I gegenüber UB II sowie UB IV gegenüber UB V den höheren Quelldruck entwickelten (Bild 7.116). Durch den größeren Porenraum kann mehr Wasser in die Probe gelangen und dabei zum Quellen führen, dass bei entsprechender Behinderung zur Ausbildung des Quelldrucks führt. Bei Betrachtung der drei Quelldruck-Versuche im UB IV lässt sich das Gegenteil sagen. QD 1 mit geringstem Luftporenanteil entwickelte den höchsten Quelldruck und QD 2

mit höchstem Luftporenanteil den geringsten Quelldruck. QD 1 und QD 2 wurden jedoch in Zellen mit Durchmesser 7 cm durchgeführt und mechanisch per Hand nachgeregelt. Dass die Nachregelung den wahrscheinlich größeren Einfluss hatten, zeigte UB V, denn trotz ähnlicher Einbaubedingungen entwickelten sich unterschiedliche Endwerte des Quelldrucks. Es hat den Anschein, als würden die beiden Quelldruckmessgeräte jeweils obere und untere Grenzwerte abbilden, da das Ergebnis des kombinierten Quelldruckversuches zwischen beiden Werten liegt.

Die Quellhebungsversuche sind in Bild 7.117 über die Zeit sowie in Bild 7.118 in Abhängigkeit der Spannungen dargestellt. Der Verlauf von UB I und UB II sind nahezu deckungsgleich bis auf den unterschiedlichen maximalen Quelldrücken. UB V wurde im Vergleich zu UB IV mit einem deutlich höheren Wassergehalt (und folglich geringerem Luftporenanteil) bei vergleichsweise ähnlicher Dichte eingebaut und belastet. Die höhere Anfangssättigung führte zu höheren Verformungen und insgesamt weniger Quelldehnungen.

Die Quellhebungen erreichten im VZ 1 höhere Werte als im VZ 4 (Bild 7.118), das sich auch im höheren Quellparameter widerspiegelt (Bild 7.119).

Proben, die mehr Wasser während der Quelldruckentwicklung aufgenommen haben, zeigten auch die etwas höheren Quelldehnungen, d.h. UB I gegenüber UB II sowie UB IV gegenüber UB V.

UB	Art	Einbaubedingungen						Quelldruck		Endquell-	Quellpara-
		w_0	$w_{s,0}$	$\rho_{d,0}$	$D_{Pr,0}$	$S_{r,0}$	$n_{a,0}$	$\sigma_{z,max}$	$\sigma_{z,min}$	dehnung	meter
		[%]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[%]	[-]
I	QD-QH	14,0	20,7	1,743	97,3	67,7	11,6	129,4	-	1,84	0,0203
II	QD-QH	16,7	19,0	1,794	100,2	87,8	4,2	101,3	-	1,72	0,0205
IV	QD-QH	16,4	22,3	1,695	94,7	73,7	9,9	106,7	-	1,51	0,0181
V	QD-QH	19,9	21,5	1,719	97,6	92,8	2,6	67,6	-	0,59	0,0104
IV	QD1	15,0	17,2	1,855	105,4	87,1	4,1	179,8	-	-	-
IV	QD2	14,4	21,5	1,718	97,6	67,2	12,1	89,4	-	-	-
V	QD1	18,4	20,9	1,734	98,5	87,8	4,4	85,0	-	-	-
V	QD2	18,7	21,1	1,729	98,3	88,6	4,2	51,7	-	-	-
IV	QH	17,3	26,1	1,591	90,4	66,3	14,0	-	37,5	2,14	0,0154
V	QH	20,7	24,6	1,632	92,7	84,4	6,3	-	37,5	1,06	0,0125

Tab. 7.27: Zusammenfassung der Ergebnisse, tertiärer Ton VZ 1 und VZ 4, UB I bis V

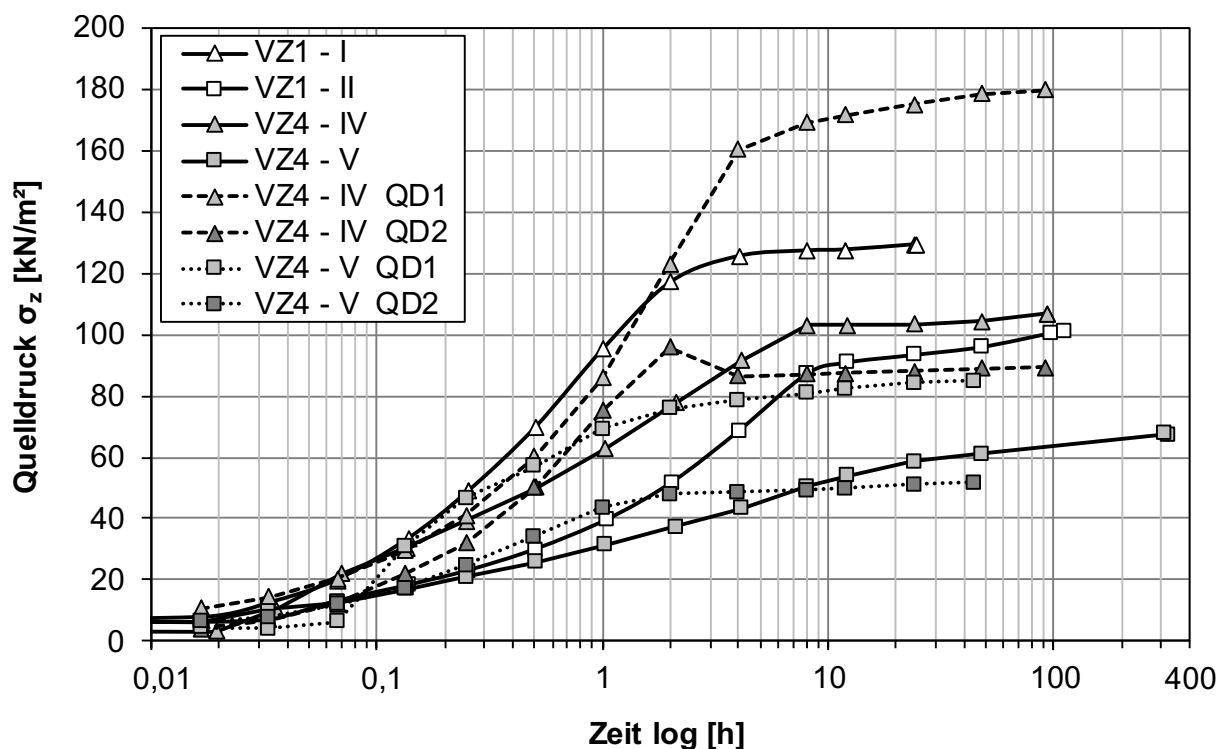


Bild 7.116: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

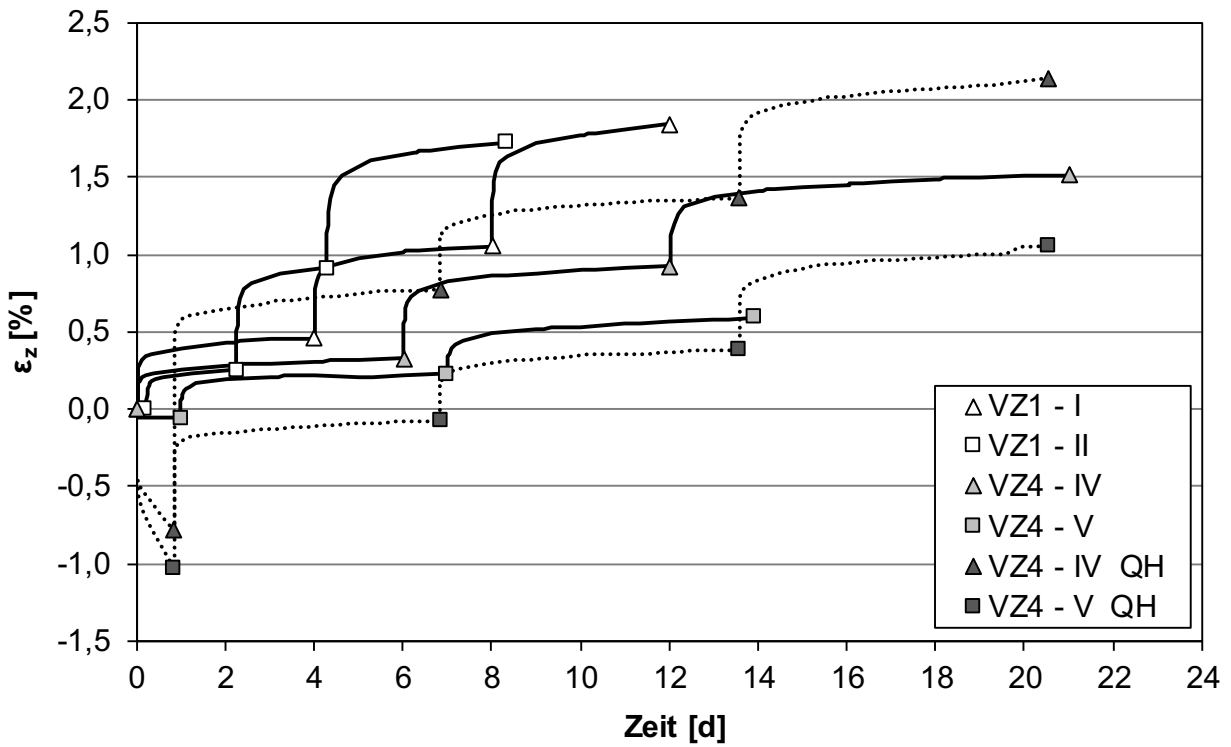


Bild 7.117: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

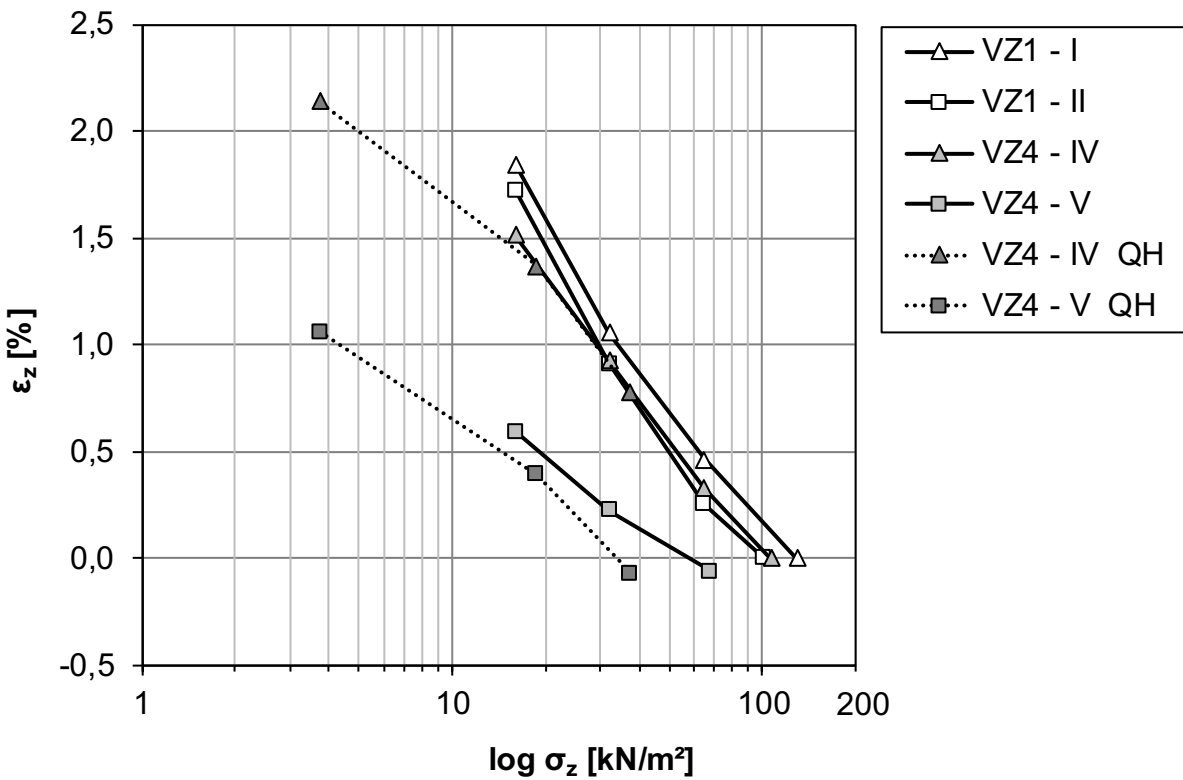


Bild 7.118: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

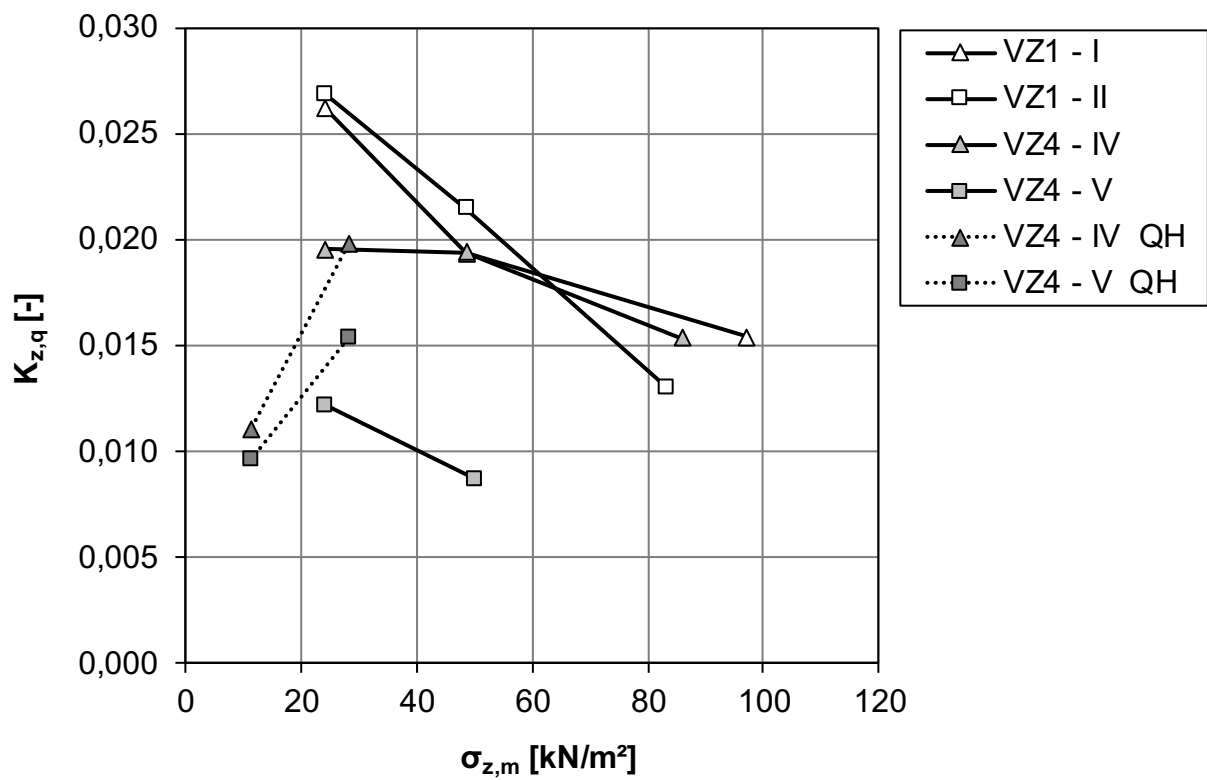


Bild 7.119: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

7.6 Feuerletten-Zersatz

7.6.1 Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

Ähnlich wie beim tertiären Ton im VZ 1 UB I ($\sigma_{z,\max} = 129,4 \text{ kN/m}^2$) wurde beim Feuerletten-Zersatz im VZ 1 UB I ein maximaler Quelldruck von $\sigma_{z,\max} = 127,3 \text{ kN/m}^2$ relativ schnell erreicht. Da bereits nach 24 h keine weiteren Spannungsänderungen auftraten und da ebenfalls Wasser am oberen Rand der Belastungsplatte ausgetreten war, konnte eine annähernd vollständige Sättigung mit einer abgeschlossenen Quelldruckentwicklung mit einem

Endwert von $\sigma_{z,E} = 126,4 \text{ kN/m}^2$ (Bild 7.120) angenommen werden.

Im Vergleich zum tertiären Ton im UB I ($\varepsilon_{z,E} = 1,84 \%$) wurde mit $\varepsilon_{z,E} = 2,78 \%$ bei gleicher Versuchsdauer eine höhere Endquellung erreicht (Bild 7.121). Dies könnte an den geringeren Einbaudichten des Feuerletten-Zersatzes liegen.

Die mit zunehmender Entlastung steigende Quellgeraden (Bild 7.122) zeigt sich durch die Zunahme des Quellparameters (Bild 7.123). Die Werte des Quellhebungsversuches sind in Tab. 7.28 aufgelistet.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,\max}$	ε_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,1	2,0	126,5	1,00	0,000	0,000	-	-
2	3,1	72,0	64,0	0,51	0,359	0,598	95,3	0,0202
3	6,1	72,0	32,0	0,25	0,948	1,580	48,0	0,0326
4	11,1	119,6	16,0	0,13	1,665	2,775	24,0	0,0397
*LS = Laststufe								$\varnothing = 0,0308$

Tab. 7.28: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

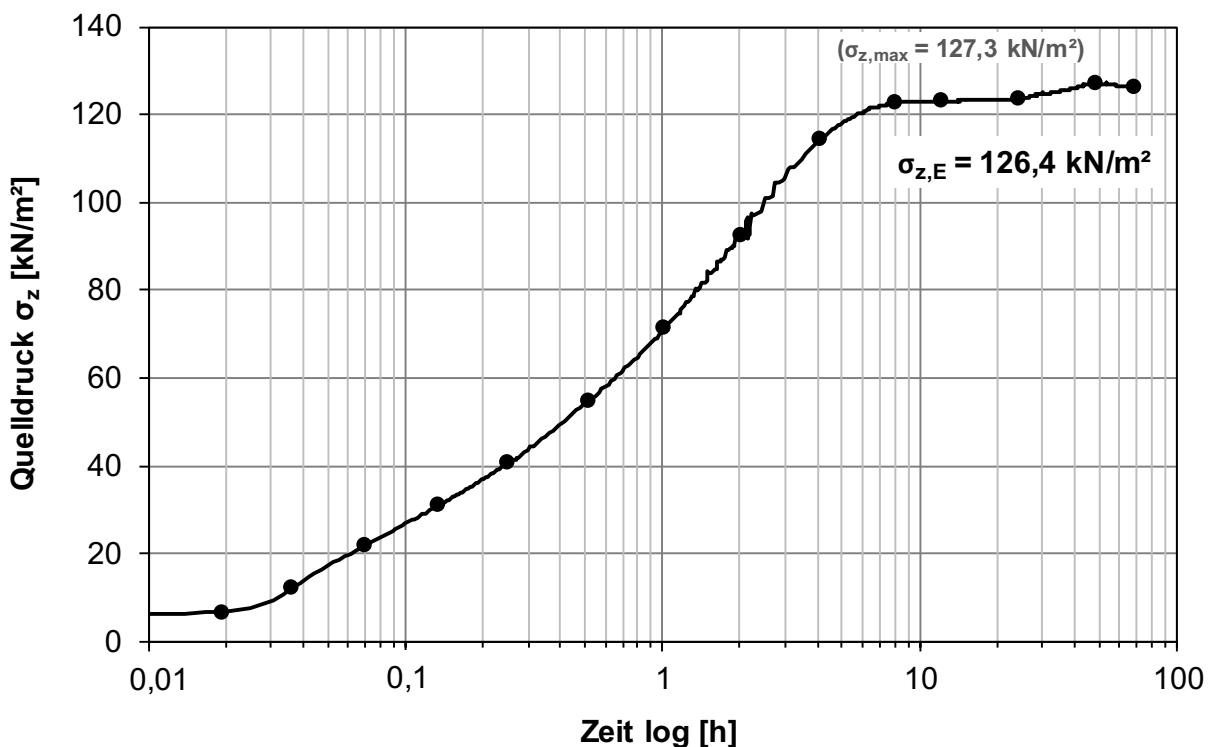


Bild 7.120: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

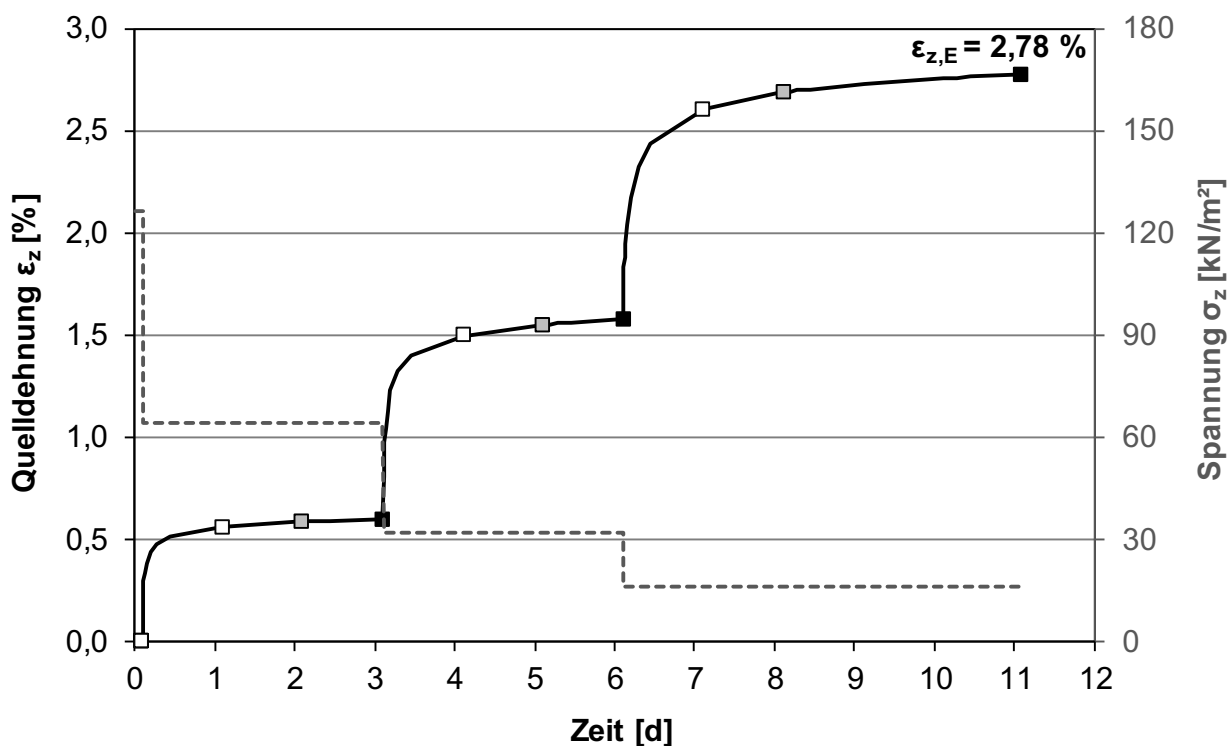


Bild 7.121: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

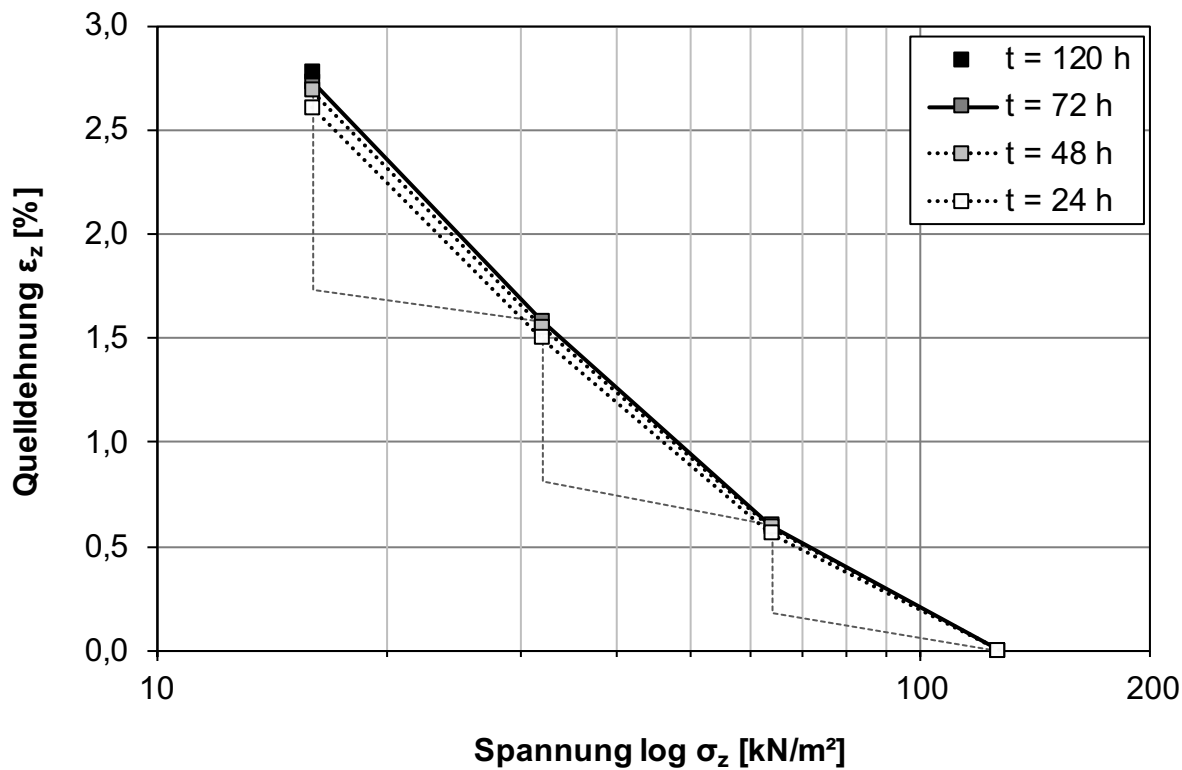


Bild 7.122: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

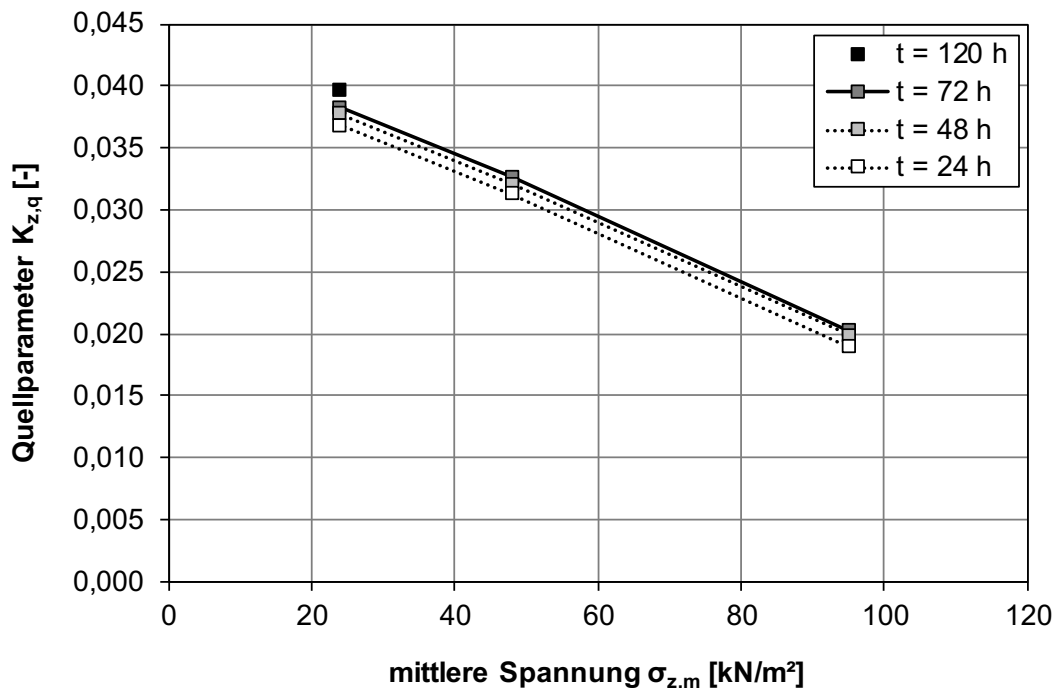


Bild 7.123: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

7.6.2 Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

Im UB II war im Vergleich zum UB I bis zum Ende des kombinierten Versuches kein Wasser am oberen Rand der Probe zu sehen. Dass demnach bereits die Quelldruckentwicklung noch um ein Vielfaches länger dauern würde als 300 h zeigt sich in Bild 7.124, wo noch eine deutliche Steigung des Quelldrucks zu sehen ist. Zwischenzeitlich näherte sich der Wert zwar asymptotisch an, aber stieg dann wieder weiter an. Hier zeigte sich, dass zunächst die unteren Bereiche der 6 cm hohen Probe sättigen und quellen. Durch das Quellen verringert sich die Durchlässigkeit so stark, dass die Probe nur langsam weiter sättigen und entsprechend nur allmählich weiter quellen kann. Im Gegensatz zu UB I ($\sigma_{z,max} = 126,4 \text{ kN/m}^2$) wurde ein höherer Quelldruck erreicht. Da die vollständige Quelldruckentwicklung nicht abgewartet werden konnte, wurde der Versuch nach $> 300 \text{ h}$ mit einem Quelldruck von $\sigma_{z,max} = 145,2 \text{ kN/m}^2$ beendet, da die Änderungen des Quelldrucks innerhalb von 24 % weniger als 1 % betragen.

Im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen zeigte sich trotz des geringen Anfangsluftporenanteils ($n_{a,0} = 2,9 \%$, siehe Tab. 7.34 in Kapitel 7.6.7) ein

höherer Quelldruck als auf der trockenen Seite der Proctorkurve. Bisher fiel die Quelldruckentwicklung geringer aus, wenn der Luftporenanteil geringer war und entsprechend weniger Wasser aufgenommen werden konnte. Jedoch scheint nicht nur die aufgenommene Wassermenge, sondern auch die Durchlässigkeit und die Zugänglichkeit zu reaktiven Tonmineralen mitentscheidend zu sein. Sind bei einer zwar dichten Proben wiederum mehr Tonminerale zugänglich und die Durchlässigkeit derart, dass diese Tonminerale durch das Wasser erreicht werden können, dann kann auch ein Quellen stattfinden bzw. sich ein Quelldruck aufbauen, wenn das Quellen durch die dichte Probe verhindert wird, weil nicht genügend Porenraum für ungehindertes Quellen zur Verfügung steht. Eine Erhöhung der Zugänglichkeit der Tonminerale resultiert aus einer höheren Feinkörnigkeit des Bodens. Der Feuerletten-Zersatz war der feinkörnigste Boden (siehe Bild 6.27 in Kapitel 6.4).

Auch im anschließenden Quellhebungsversuch (siehe Tab. 7.29) war bis zum Ende des Versuches kein Wasser zusehen. Trotz der vermutlich geringen Wasseraufnahme, die aus dem geringen Anfangsluftporenanteil resultiert, sind deutliche Quellhebungen zu erkennen. Diese sind dann vermutlich

auf den höheren Anfangswassergehalt der Probe zurückzuführen. Ähnlich wie bei UB I ($\varepsilon_{z,E} = 2,78\%$) wurde eine Endquellung von $\varepsilon_{z,E} = 2,86\%$ erreicht

(Bild 7.125). Die Zunahme der Dehnungen (Bild 7.126) zeigt sich in einer Zunahme des Quellparameters (Bild 7.127).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,max}$	ε_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,04	0,9	145,3	1,00	0,000	0,000	-	-
2	2,1	48,0	72,0	0,50	0,368	0,613	108,7	0,0201
3	4,1	48,0	32,0	0,22	1,058	1,761	52,0	0,0326
4	8,1	96,8	16,0	0,11	1,719	2,862	24,0	0,0366
*LS = Laststufe								$\varnothing = 0,0298$

Tab. 7.29: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

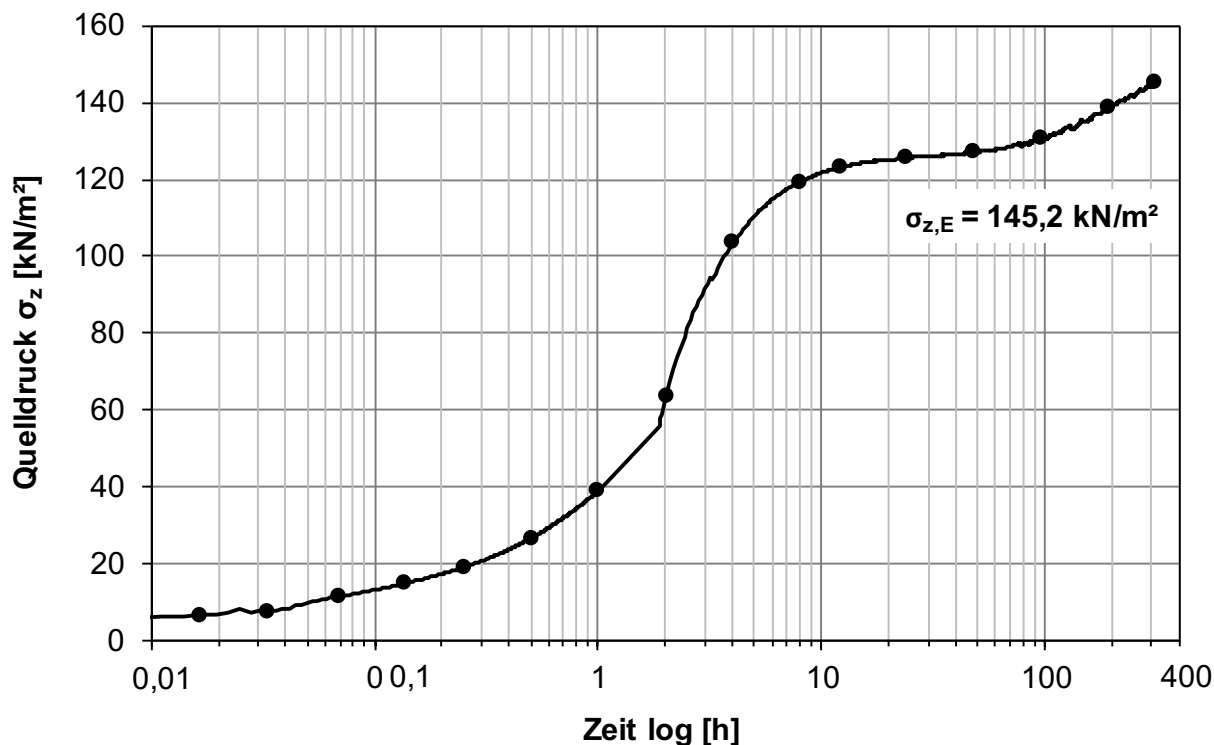


Bild 7.124: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

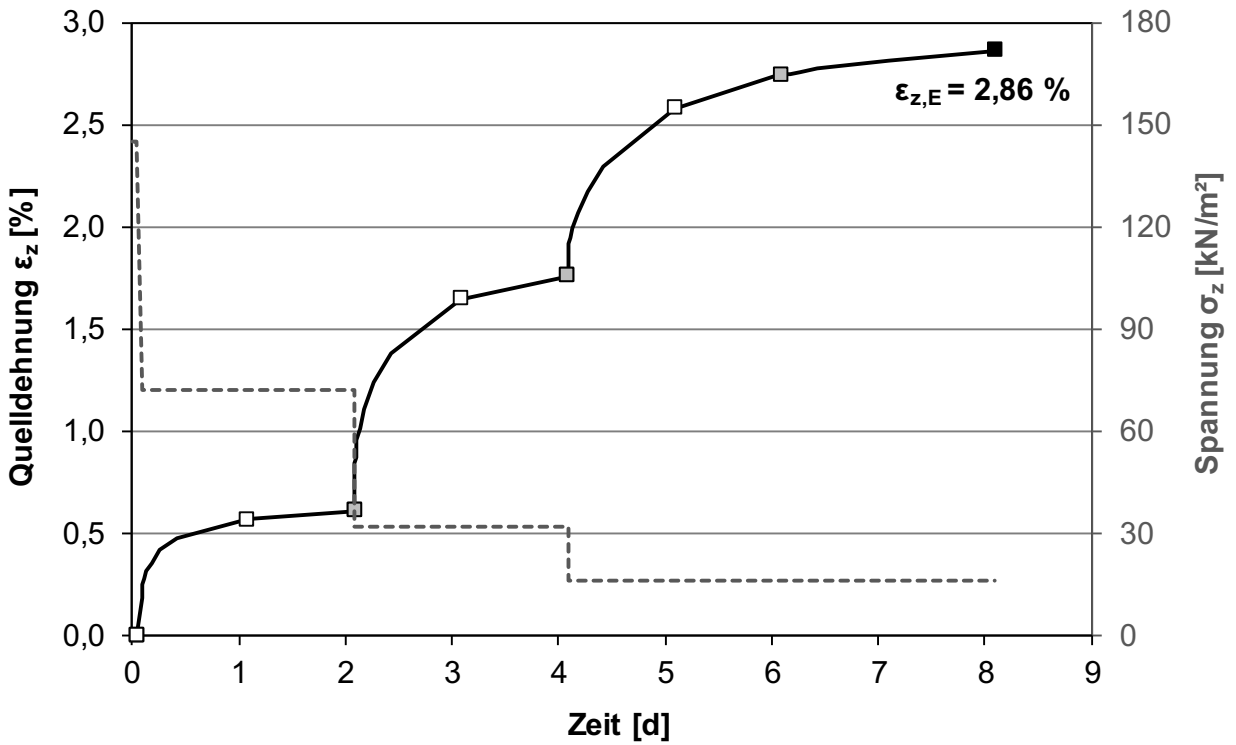


Bild 7.125: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

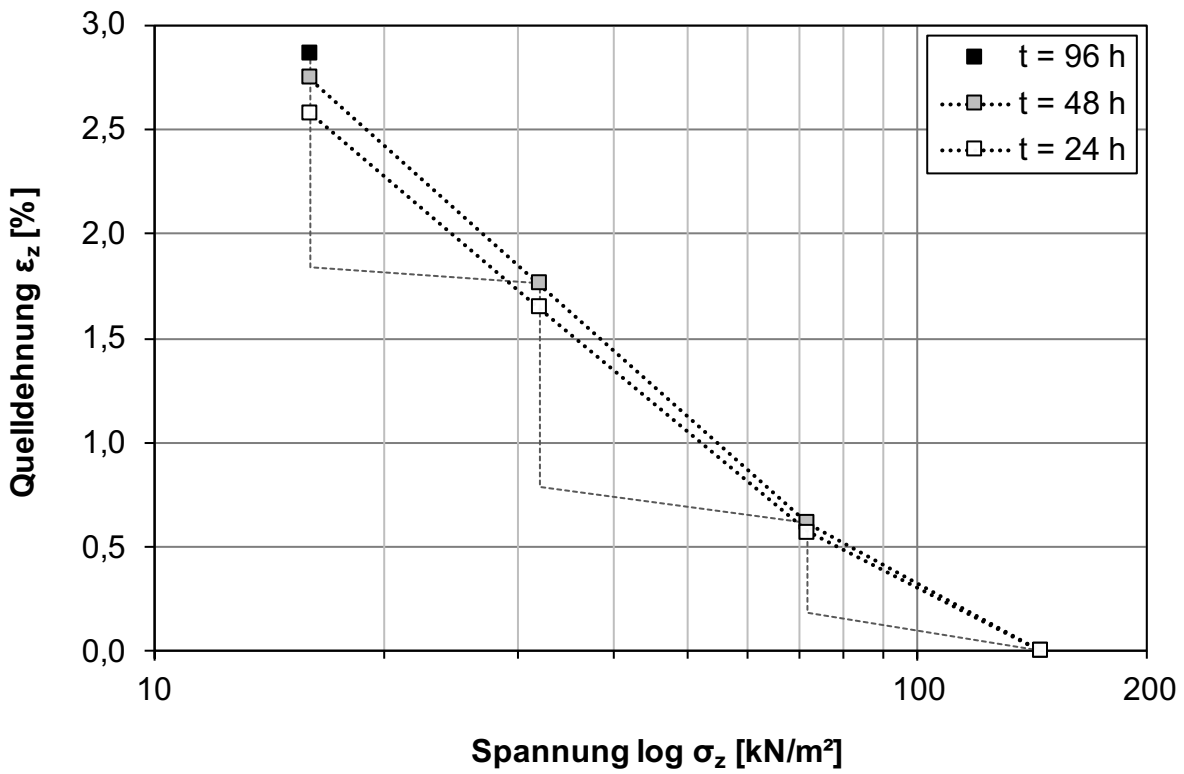


Bild 7.126: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

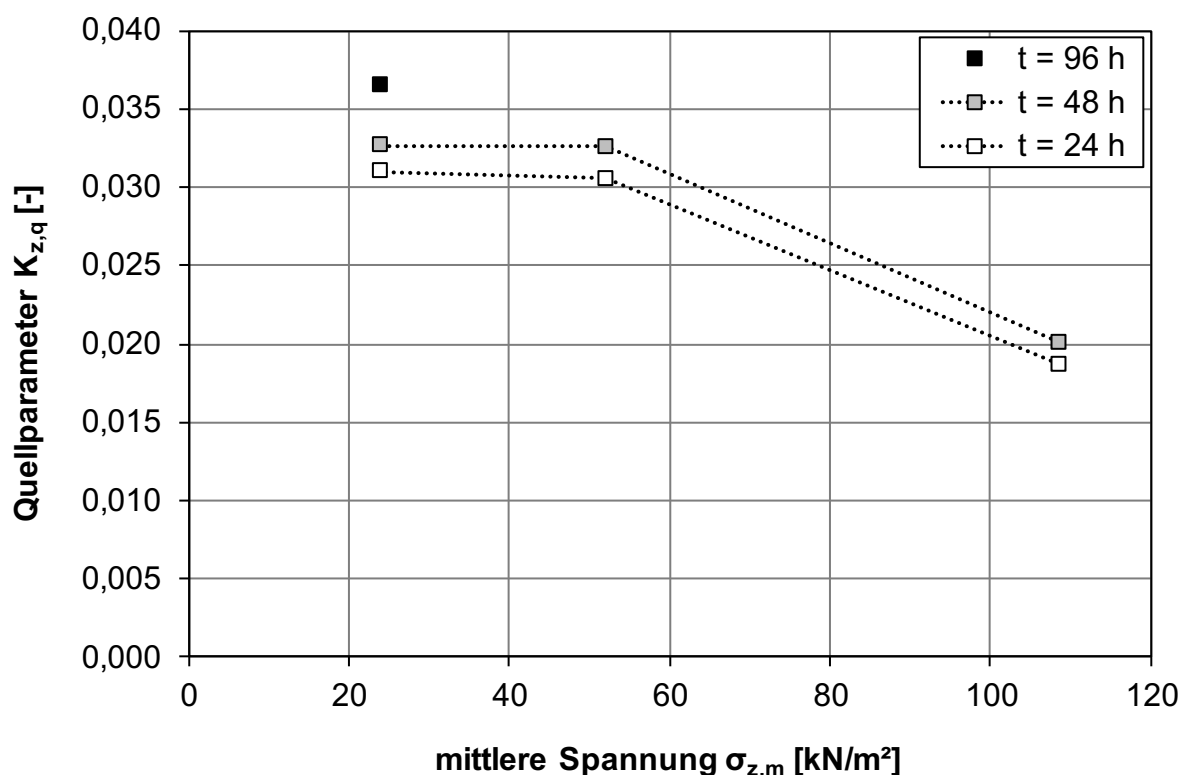


Bild 7.127: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

7.6.3 Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

Der Untersuchungsbereich auf der trockenen Seite der Proctorkurve UB III im VZ 4 erreicht mit $\sigma_{z,max} = 127,6 \text{ kN/m}^2$ (Bild 7.128) einen nahezu gleich hohen maximalen Quelldruck wie UB I im VZ 1 ($\sigma_{z,E} = 126,4 \text{ kN/m}^2$) aufgrund ähnlicher Einbaubedingungen (siehe Tab. 7.34 in Kapitel 7.6.7). Im VZ 4 erfolgt die Zunahme des Quelldrucks lang-

samer, dass vermutlich an dem gegenüber VZ 1 höheren Feinkornanteil und der damit geringeren Durchlässigkeit liegt.

Aufgrund seiner bisher festgestellten Quellfähigkeit werden wie in VZ 1 ähnlich hohe Endquellungen erreicht (Bild 7.129). Die Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch enthält Tab. 7.30. Die Zunahme der Quellhebungen mit abnehmender Spannungen (Bild 7.130) zeigt sich in der Zunahme des Quellparameters (Bild 7.131).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,04	0,9	127,6	1,00	0,000	0,000	-	
2	3,1	72,0	64,0	0,50	0,366	0,615	95,8	0,0205
3	7,1	96,0	32,0	0,25	0,925	1,553	48,0	0,0312
4	11,1	96,7	16,0	0,13	1,547	2,598	24,0	0,0347
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0288$

Tab. 7.30: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

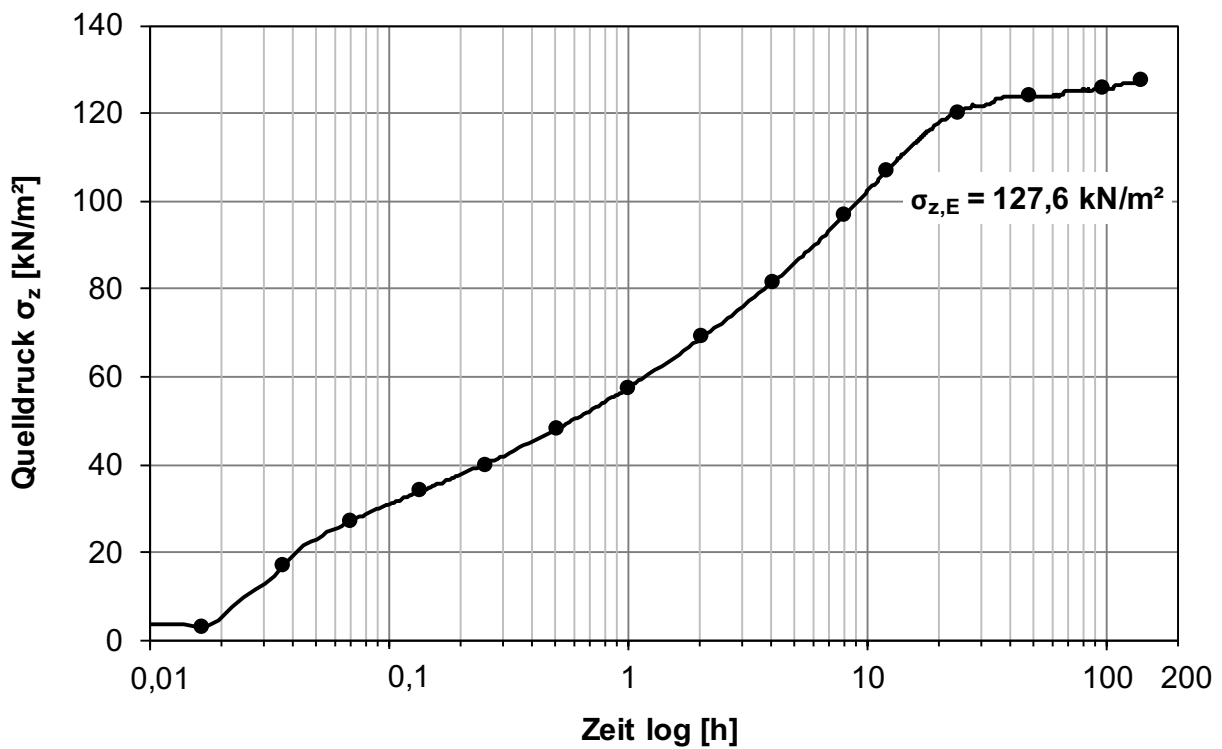


Bild 7.128: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

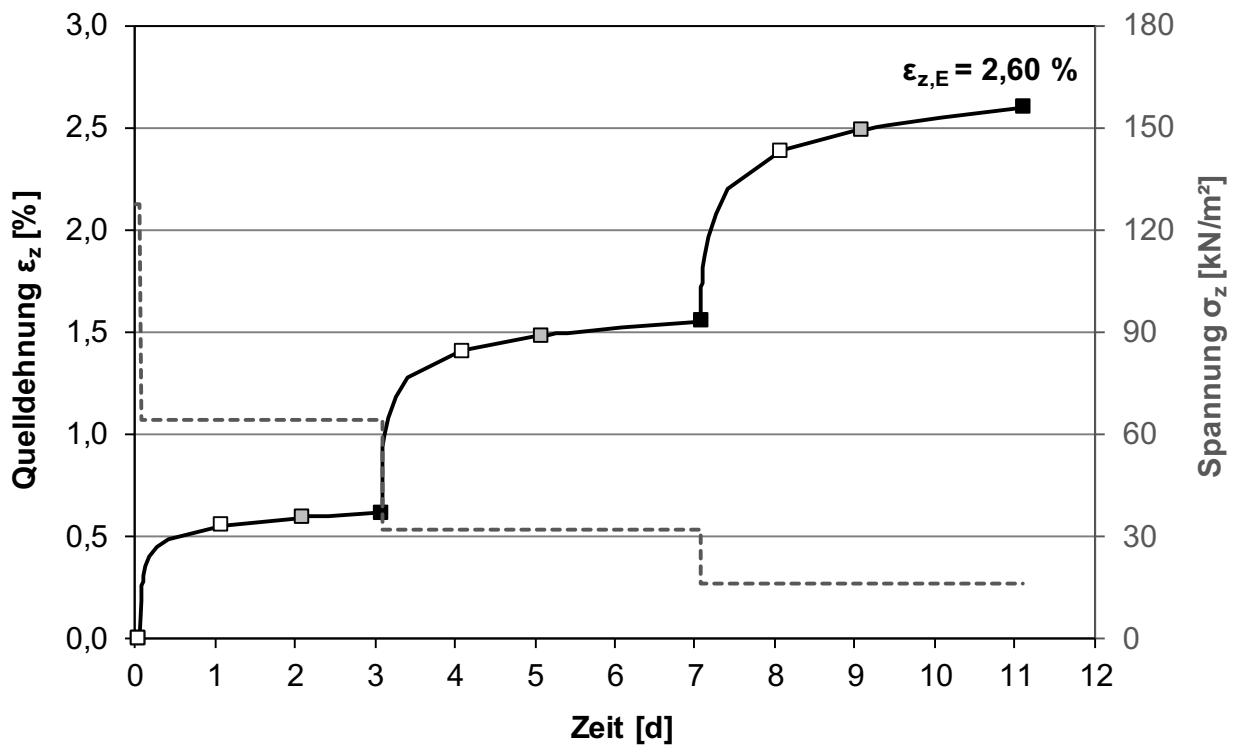


Bild 7.129: Zeitlicher Verlauf der Quelldrehung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

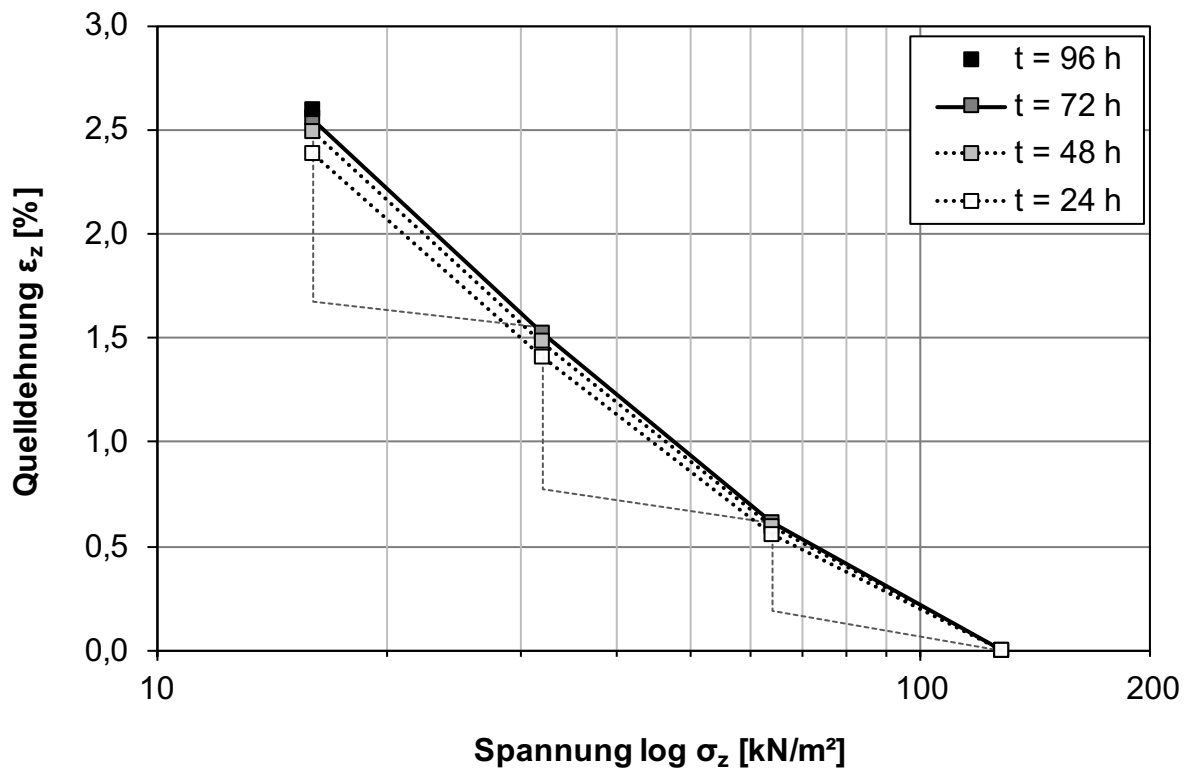


Bild 7.130: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

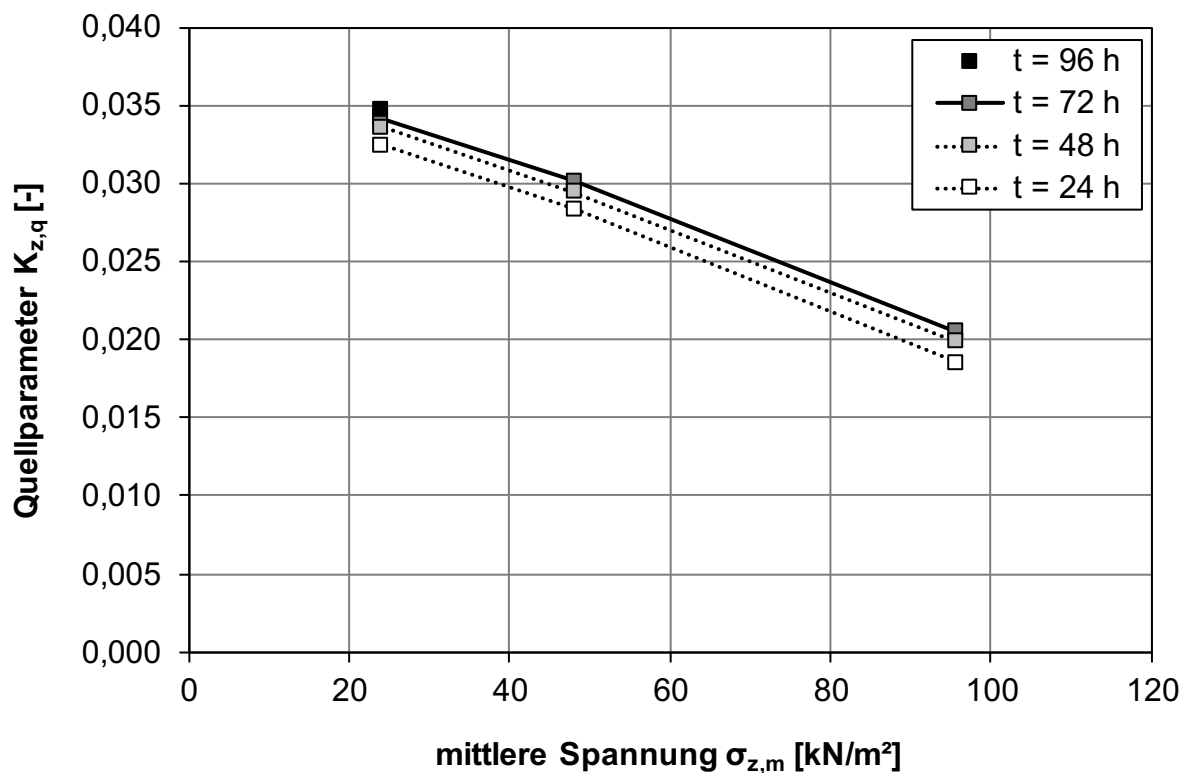


Bild 7.131: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

7.6.4 Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

Zum Vergleich zu den kombinierten Quelldruck-Quellhebungs-Versuchen (siehe Kapitel 7.6.3) sind separate Quelldruck- und Quellhebungsversuche am UB III durchgeführt worden.

Der relativ hohe Quelldruck wird bei den händisch geregelten Quelldruckversuchen nicht erreicht (Bild 7.132). Hier wurde aber auch zu lange vor Wasserzugabe nachgeregelt, womit der Einbauzustand der Probe ggf. zu stark verändert wurde. Andererseits konnte aber in den vorhergehenden UB auch festgestellt werden, dass sich der Quelldruck beim Feuerletten-Zersatz nur langsam entwickelt, was durch eine mechanische Nachregelung schwer zu kontrollieren war. Bei Proben, die allmählich mit der Zeit

sättigen und quellen, hat die Probenhöhe einen entscheidenden Einfluss. Geringer durchlässigere Proben mit 2 cm Höhe sättigen schneller auf als Proben mit 6 cm Höhe. Dies kann schließlich auch Auswirkungen auf die Höhe des Quelldruckes haben. Die Proben im Ödometer mit 30 cm Durchmesser sättigen von unten auf. Mit zunehmender Sättigung verringert sich durch das Quellen infolge Wasseraufnahme die Durchlässigkeit der Proben. Somit dauert die Sättigung einer 6 cm gegenüber einer 2 cm hohen Proben länger.

Es werden ähnlich hohe Quelldehnungen wie bei den kombinierten Versuchen erreicht (Tab. 7.31, Bild 7.133, Bild 7.134). Der Quellparameter nimmt bis zur letzten Laststufe ab (Bild 7.135)

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$	ε_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,0	24,3	17,5	1,00	0,231	1,185	-	-
2	12,8	283,6	17,5	1,00	0,328	1,682	-	-
3	21,8	214,4	8,7	0,50	0,425	2,179	13,1	0,0165
4	35,8	337,8	3,7	0,21	0,525	2,692	6,2	0,0139
*LS = Laststufe					$\Delta\varepsilon_{z,q} =$	1,010		$\varnothing = 0,0152$

Tab. 7.31: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

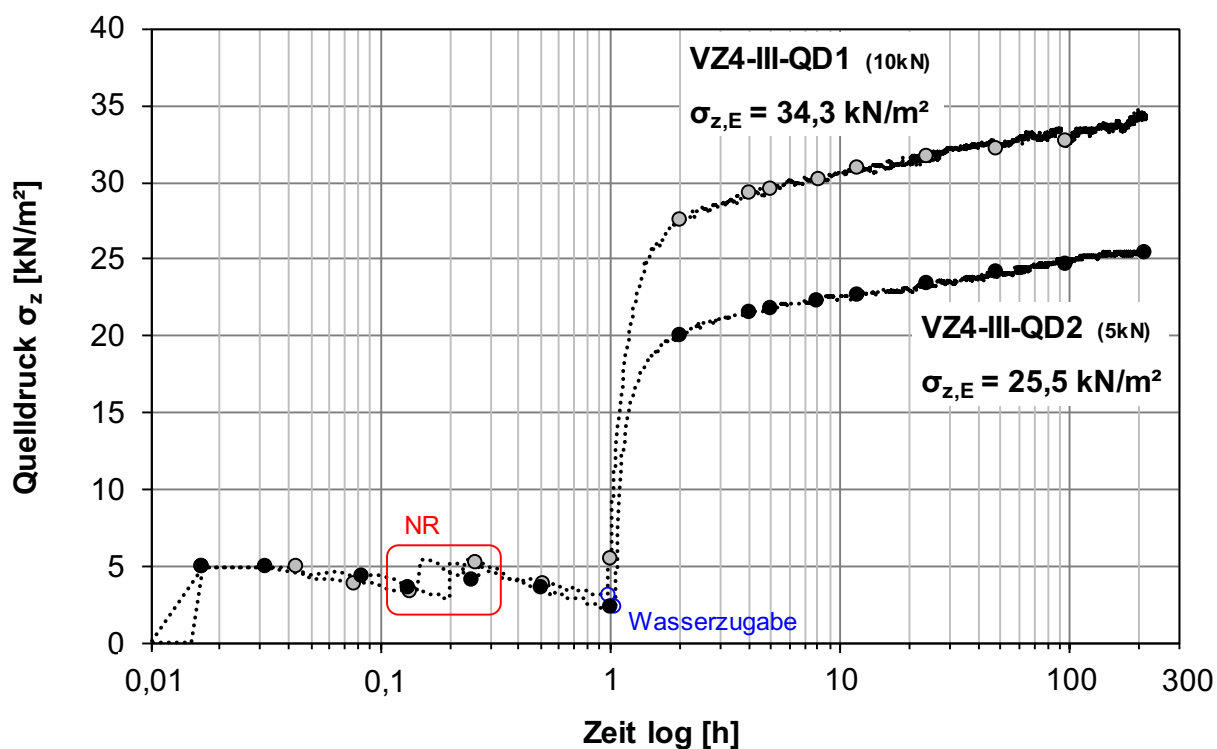


Bild 7.132: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

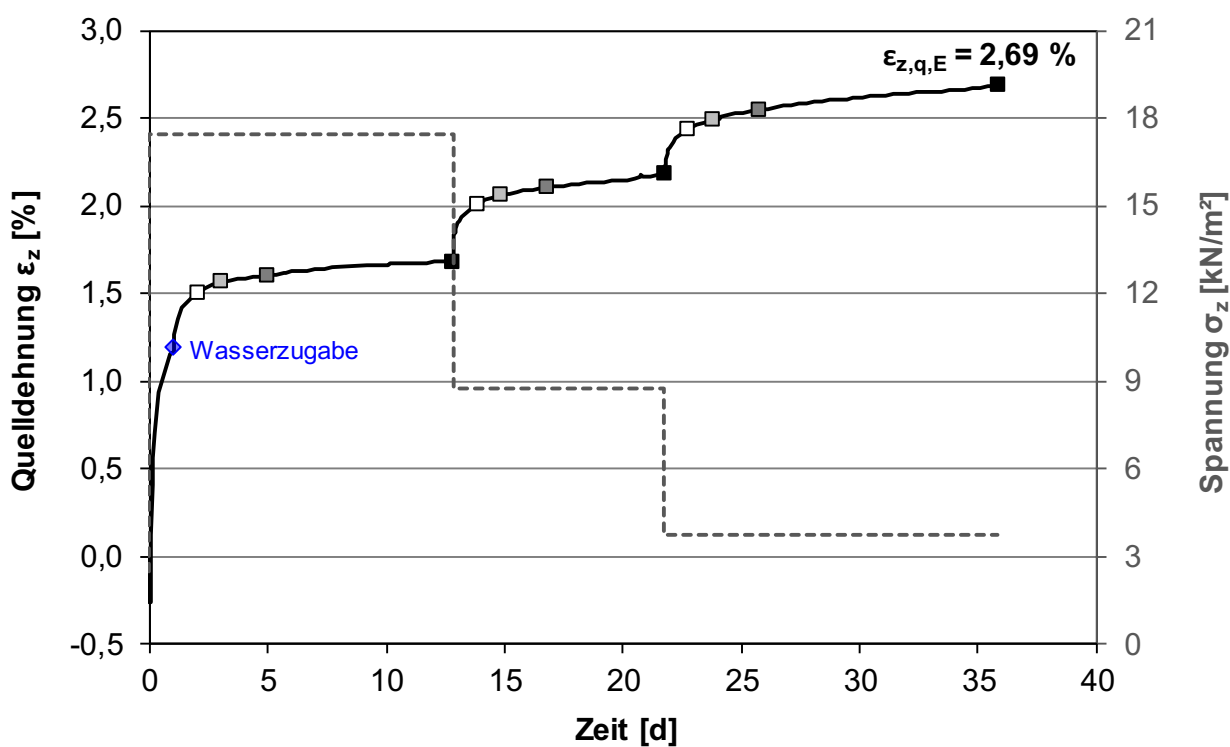


Bild 7.133: Zeitlicher Verlauf der Quelldrehung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

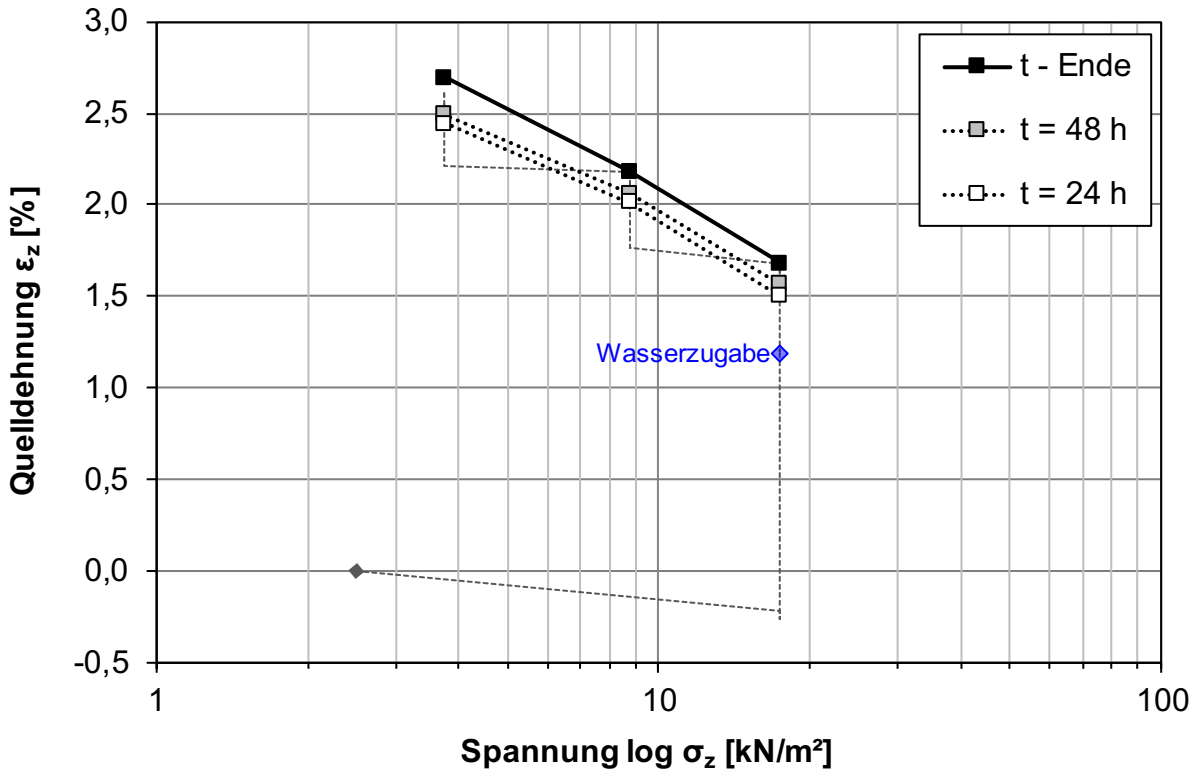


Bild 7.134: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

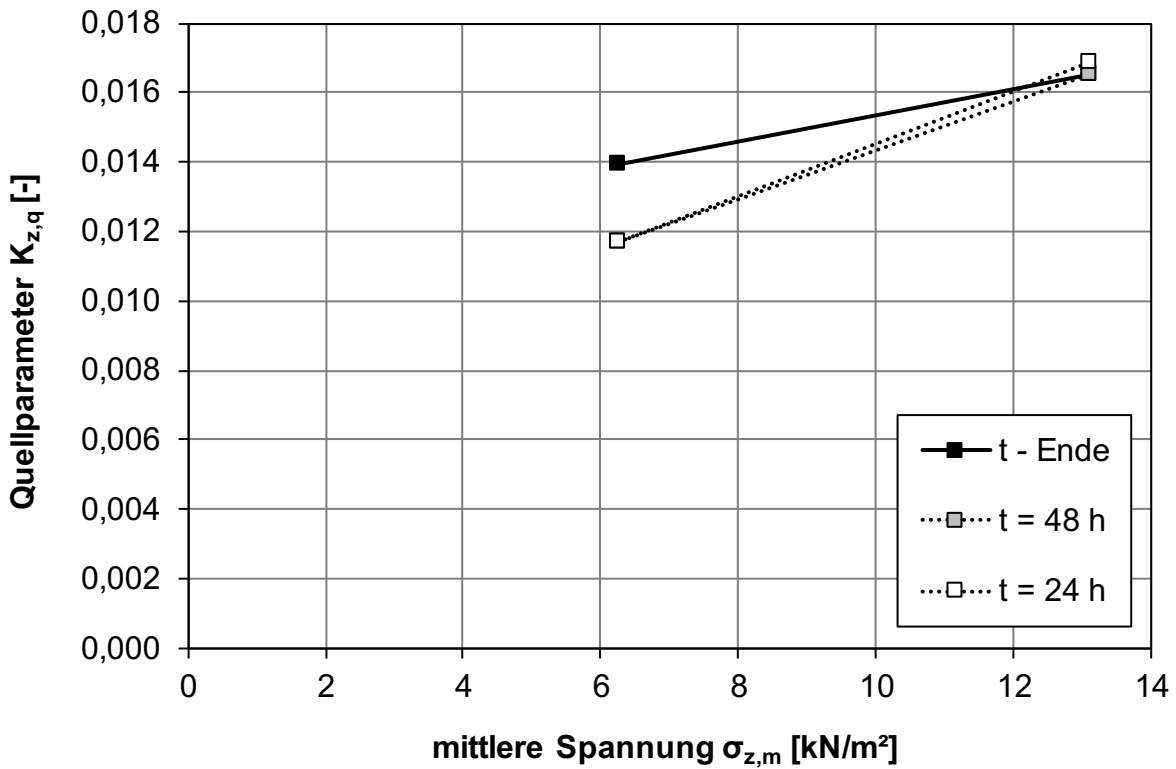


Bild 7.135: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

7.6.5 Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

Analog zu UB II war auch bei der dichteren Probe im UB IV des VZ 4 bis zum Ende des kombinierten Versuches kein Wasser zu sehen. Von allen kombinierten Versuchen entwickelte sich hier der höchste

Quelldruck (Bild 7.136) und die größten Quelldehnungen (Bild 7.137, Bild 7.138) sowie ein entsprechend hoher Quelldruck (Bild 7.139). In Tab. 7.32 sind die Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch aufgelistet.

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z	$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$	
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	0,0	0,06	176,6	1,00	0,000	0,000	-	-
2	4,0	96,0	88,0	0,50	0,363	0,606	132,3	0,0200
3	8,0	96,0	32,0	0,18	1,292	2,157	60,0	0,0353
4	16,0	192,0	16,0	0,09	2,147	3,584	24,0	0,0474
*LS = Laststufe								$\emptyset = 0,0343$

Tab. 7.32: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

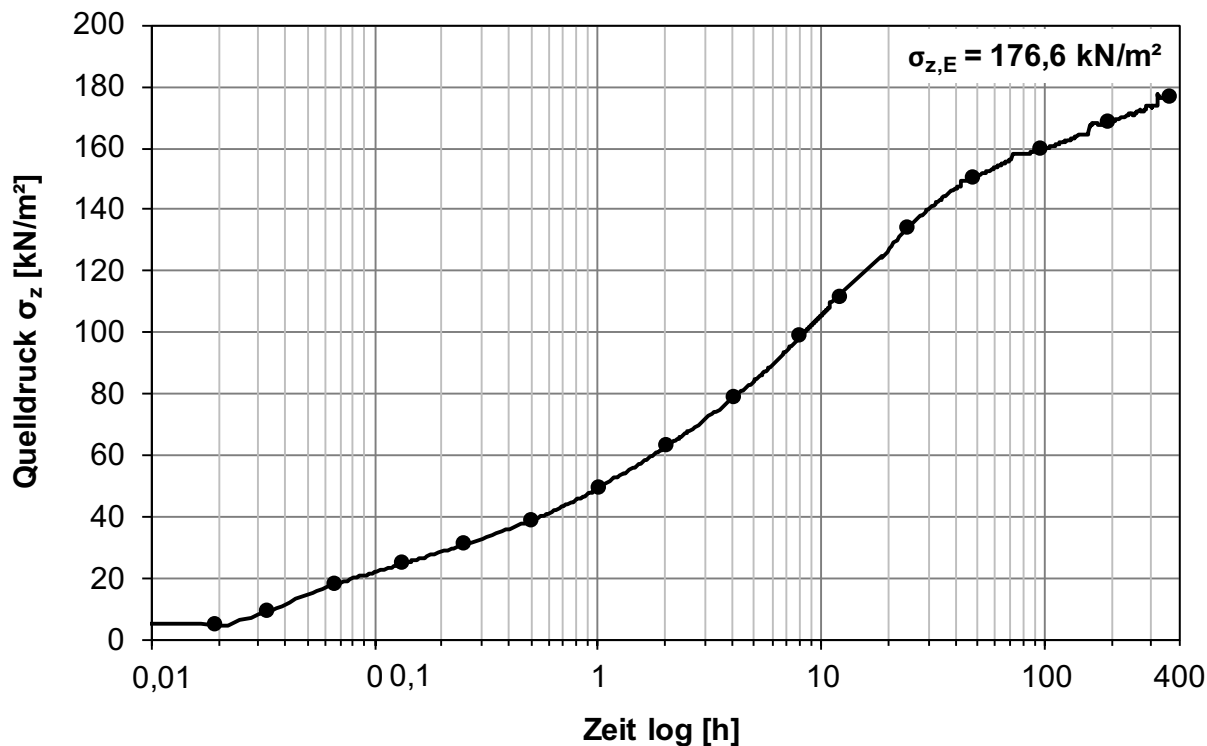


Bild 7.136: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

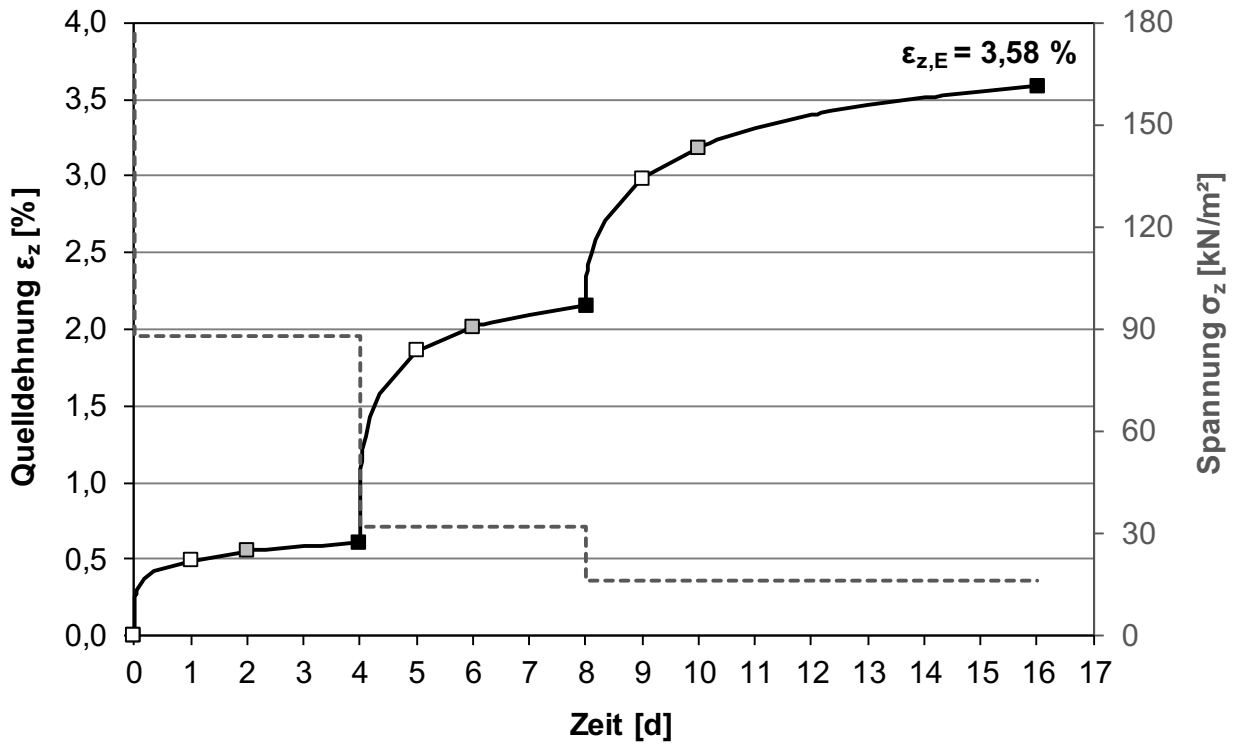


Bild 7.137: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

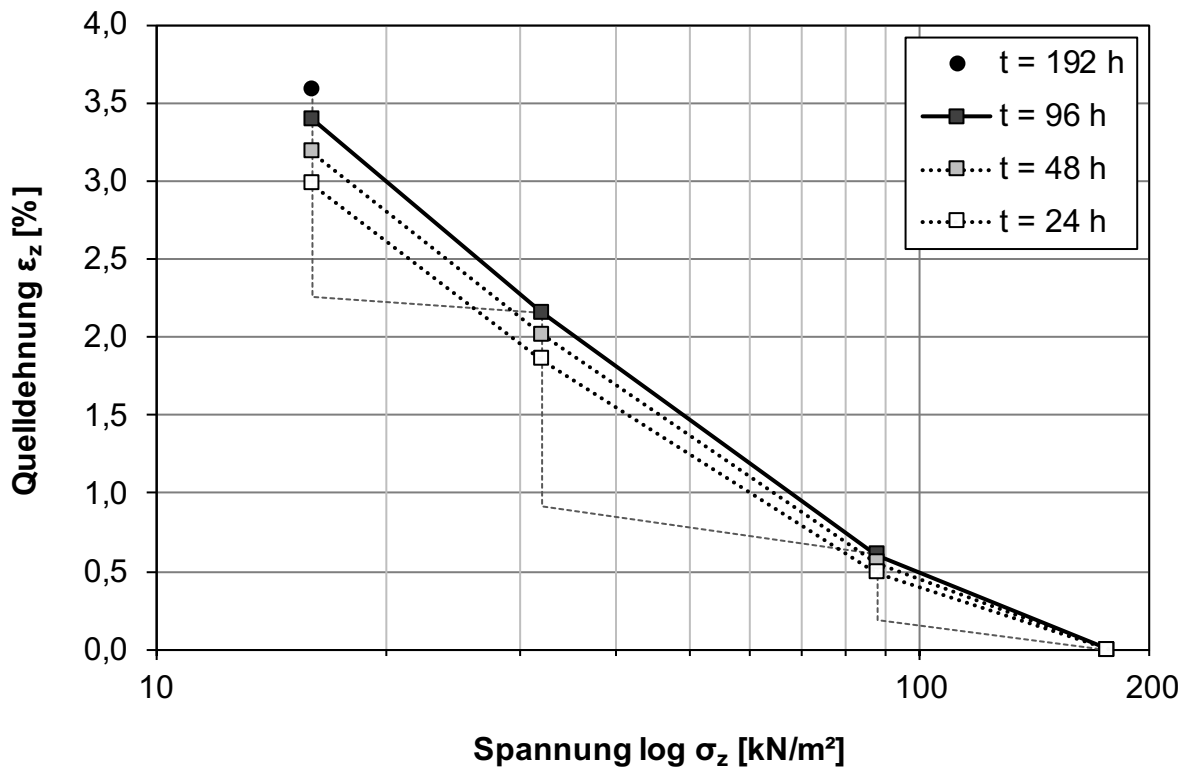


Bild 7.138: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

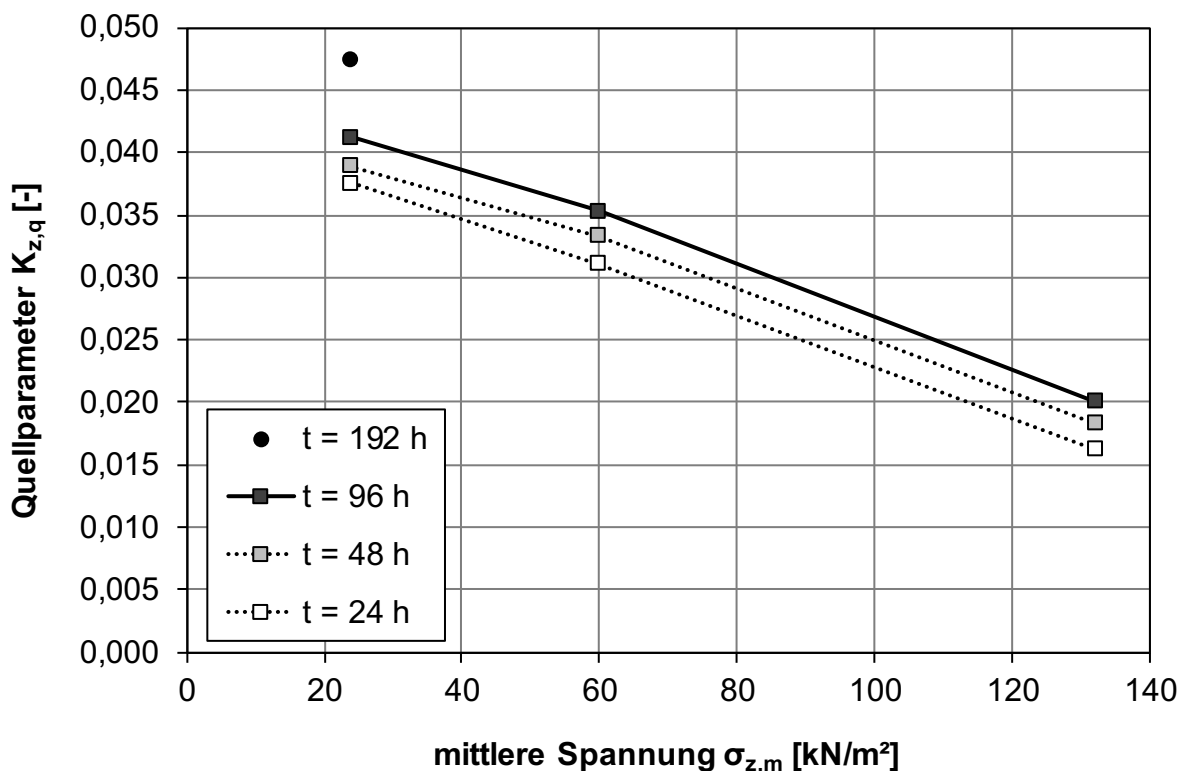


Bild 7.139: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

7.6.6 Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

Die Ergebnisse aus dem kombinierten Versuch sind nicht vergleichbar mit den separaten Quellhebungsversuchen (Tab. 7.33). Während im softwaregesteuerten Versuch der 6 cm hohen Probe ein Quelldruck von $\sigma_{z,E} = 176,6 \text{ kN/m}^2$ erreicht wurde, zeigten die mechanisch geregelten Versuche in 7 cm hohen Proben nur Werte kleiner als 70 kN/m^2 (Bild

7.140). Die Probenhöhe und Versuchsdurchführung können daher entscheidenden Einfluss auf die Quelldruckentwicklung haben.

Der Betrag der Quelldehnungen nach Wasserzugabe (Tab. 7.34 in Kapitel 7.6.7) fällt etwas geringer aus als in UB III (2) (Bild 7.141, Bild 7.142). Der Quellparameter nimmt analog zu UB III (2) bis zur letzten Laststufe ab (Bild 7.143).

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$	ϵ_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,0	24,2	15,0	1,00	-0,239	-1,292	-	-
2	12,8	283,6	15,0	1,00	-0,187	-1,011	-	-
3	21,8	214,4	7,5	0,50	-0,114	-0,616	11,2	0,0131
4	35,8	337,8	3,7	0,25	-0,050	-0,270	5,6	0,0115
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	0,741		$\emptyset = 0,0123$

Tab. 7.33: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

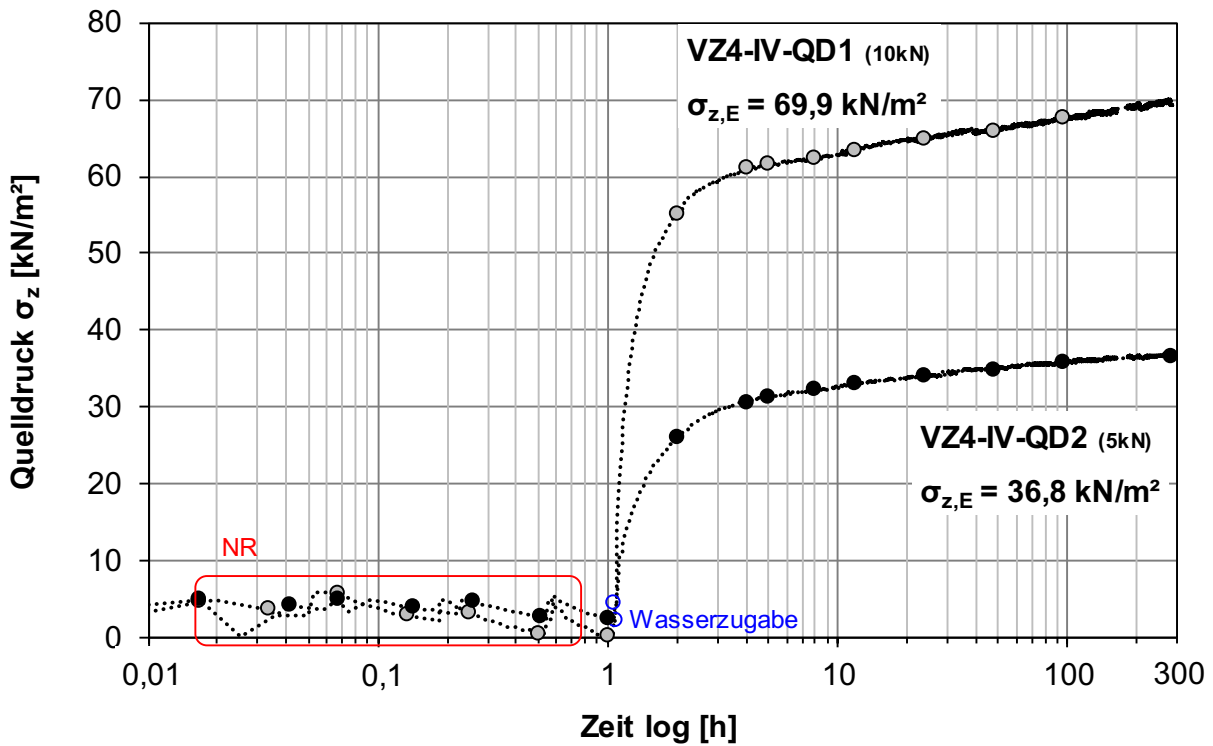


Bild 7.140: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

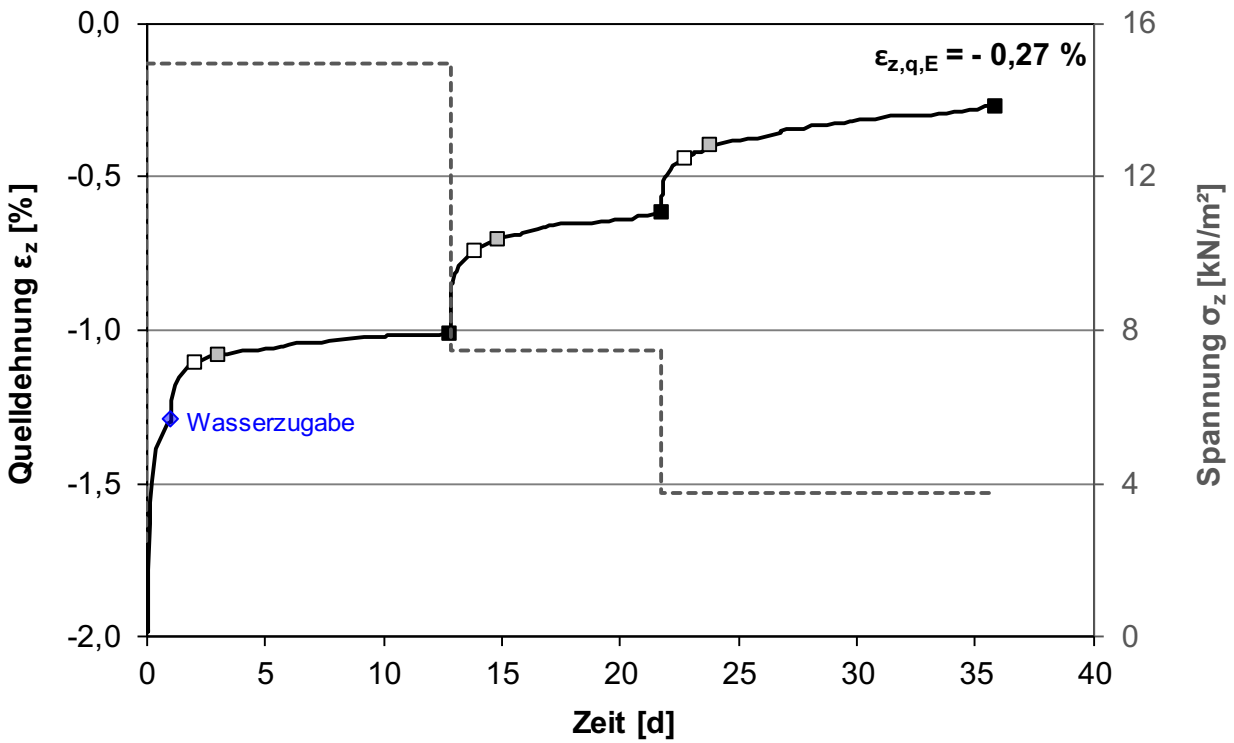


Bild 7.141: Zeitlicher Verlauf der Quelldrehung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

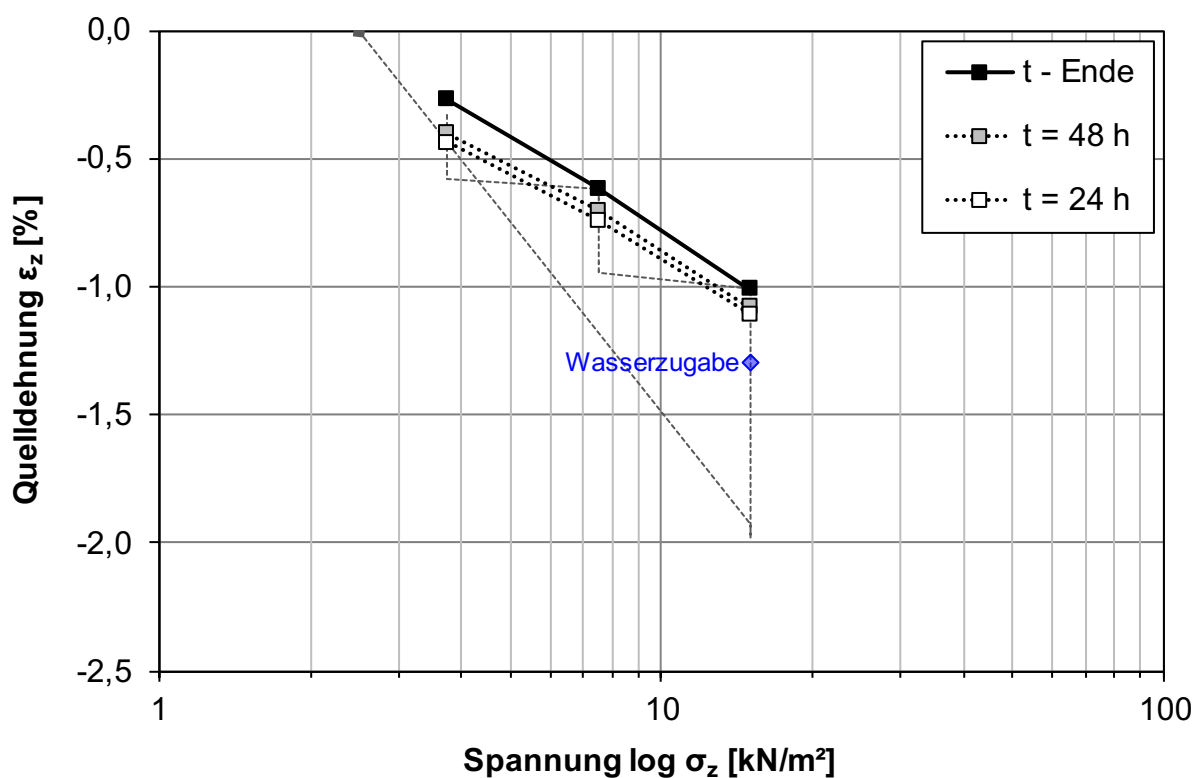


Bild 7.142: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

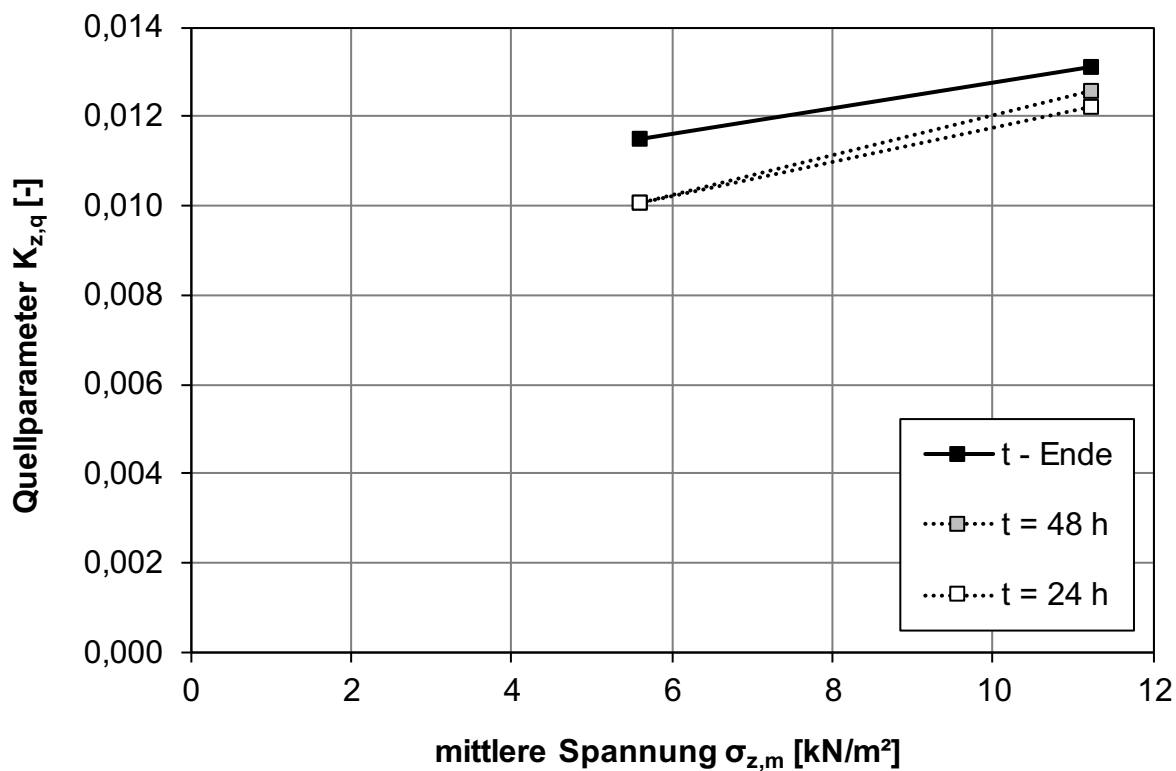


Bild 7.143: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

7.6.7 Zusammenfassung Feuerletten-Zer-satz

Für die Quellversuche wurde der Feuerletten-Zer-satz aufgrund seiner bekannten quellfähigen Eigenschaften, der ermittelten bodenmechanischen Eigenschaften und auch aufgrund der Tonmineralanalyse ausgewählt, da hier Illit/Smektit-Wechsellaagerungen auf quellfähige Eigenschaften hinweisen. Letztlich zeigten sich ähnlich hohe Quelldrücke und Quelldehnungen wie beim Opalinustonstein und tertiären Ton. Der Zerfallsverlauf ähnelt dem des tertiären Tons. Im Unterschied zum tertiären Ton liegt die Proctordichte geringer.

Die Einbaubedingungen des VZ 1 und VZ 4 sind relativ ähnlich (Tab. 7.34), so dass Unterschiede in den Ergebnissen der Quellversuche nur noch auf die Materialeigenschaften, die sich durch den TBW ändern, zurückzuführen sind. Insbesondere erhöht sich bei der Verwitterung der Feinkornanteil.

Bei der Quelldruckentwicklung erreichten UB I im VZ 1 und UB III im VZ 4 nahezu identische Werte des maximalen Quelldrucks. Unterschiedlich war die Quelldruckentwicklung innerhalb der ersten 24 h. Hier stieg der Quelldruck bei UB III deutlich langsamer an, was am verwitterungsbedingten höheren Feinkornanteil liegen könnte, der die Durchlässigkeit des Bodens verringert und damit die Quelldruckentwicklung verlangsamt. Die im VZ 1 schnellere Quelldruckentwicklung zeigt sich auch bei den Proben im Proctoroptimum. Bei der dichteren Probe mit höherem Verdichtungsgrad als Proctoroptimum im UB IV entwickelte sich trotz höherem Luftporenanteil gegenüber UB II ein höherer Quelldruck. UB II besitzt jedoch auch einen höheren Anfangswassergehalt und damit auch eine höhere Anfangssättigung. Dadurch kann weniger Wasser aufgenommen werden als bei UB IV, und sich damit

also auch der geringere Quelldruck ausbilden gegenüber UB II (Bild 7.144).

Anschließende Quelldehnungen sind im Optimum (UB II, UB IV) größer (Bild 7.145, Bild 7.146). Die größten Quelldehnungen und damit auch den höchsten Quellparameter erreicht UB IV analog zum größten Quelldruck (Bild 7.147).

Die separaten händisch geregelten Quellhebungsversuche passen hier nicht so gut zu den kombinierten Versuchen wie beim tertiären Ton. Bedingt durch die geringere Quelldruckentwicklung der kleineren Proben in den mechanischen Geräten wurde die Spannungen zu gering gewählt. Die Quelldehnungen nehmen insgesamt nicht so stark zu wie bei den kombinierten Versuchen. Ursächlich für die Unterschiede sind hier die beiden Versuchsvarianten. Beim kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuch nimmt der Boden erst unter konstant gehaltenem Weg Wasser auf. Der zur Verfügung stehenden Porenraum wird hierdurch nicht verändert und Verformungen behindert, sondern erst im lastgesteuerten Versuchsabschnitt zugelassen. Beim einzelnen Quellhebungsversuch wird die Probe bis zur maximalen Spannung belastet, wodurch Verformungen auftreten. In der Regel wird der Porenraum verkleinert. Unter dieser Last kann die Probe dann Wasser aufnehmen, wobei sich dieser durch Verformungen ändern kann. Damit sind sozusagen der Einbauzustand bei Beginn der Entlastungsstufen unterschiedlich, womit folglich auch die Quelldehnungen unterschiedlich ausfallen können.

Wie bereits mehrfach beobachtet, fällt der Quellparameter im unteren Spannungsbereich meist wieder ab. Die Spannungen sind dann zu gering für behindertes Quellen.

UB	Art	Einbaubedingungen						Quelldruck		Endquell-	Quellpara-
		w_0	$w_{s,0}$	$\rho_{d,0}$	$D_{Pr,0}$	$S_{r,0}$	$n_{a,0}$	$\sigma_{z,max}$	$\sigma_{z,min}$	dehnung	meter
		[%]	[%]	[g/cm ³]	[%]	[-]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[%]	[-]
I	QD-QH	21,0	27,3	1,553	97,0	77,1	9,7	126,4	-	2,77	0,0308
II	QD-QH	23,7	25,6	1,596	99,6	92,8	2,9	145,2	-	2,86	0,0298
III	QD-QH	21,6	27,5	1,548	96,6	78,3	9,3	127,6	-	2,60	0,0288
IV	QD-QH	21,4	24,7	1,617	101,0	86,5	5,4	176,6	-	3,58	0,0343
III	QD1	21,1	27,7	1,544	96,4	76,3	10,1	34,3	-	-	-
III	QD2	21,1	27,7	1,544	96,4	76,2	10,2	25,5	-	-	-
IV	QD1	21,0	23,7	1,645	102,7	88,8	4,4	69,6	-	-	-
IV	QD2	21,0	24,9	1,614	100,7	84,6	6,2	36,6	-	-	-
III	QH	20,5	25,9	1,587	99,1	79,3	8,5	-	17,5	1,01	0,0152
IV	QH	23,0	23,7	1,646	102,7	97,0	1,2	-	15,0	0,74	0,0123

Tab. 7.34: Zusammenfassung der Ergebnisse, Feuerletten-Zersatz VZ 1 und VZ 4, UB I bis IV

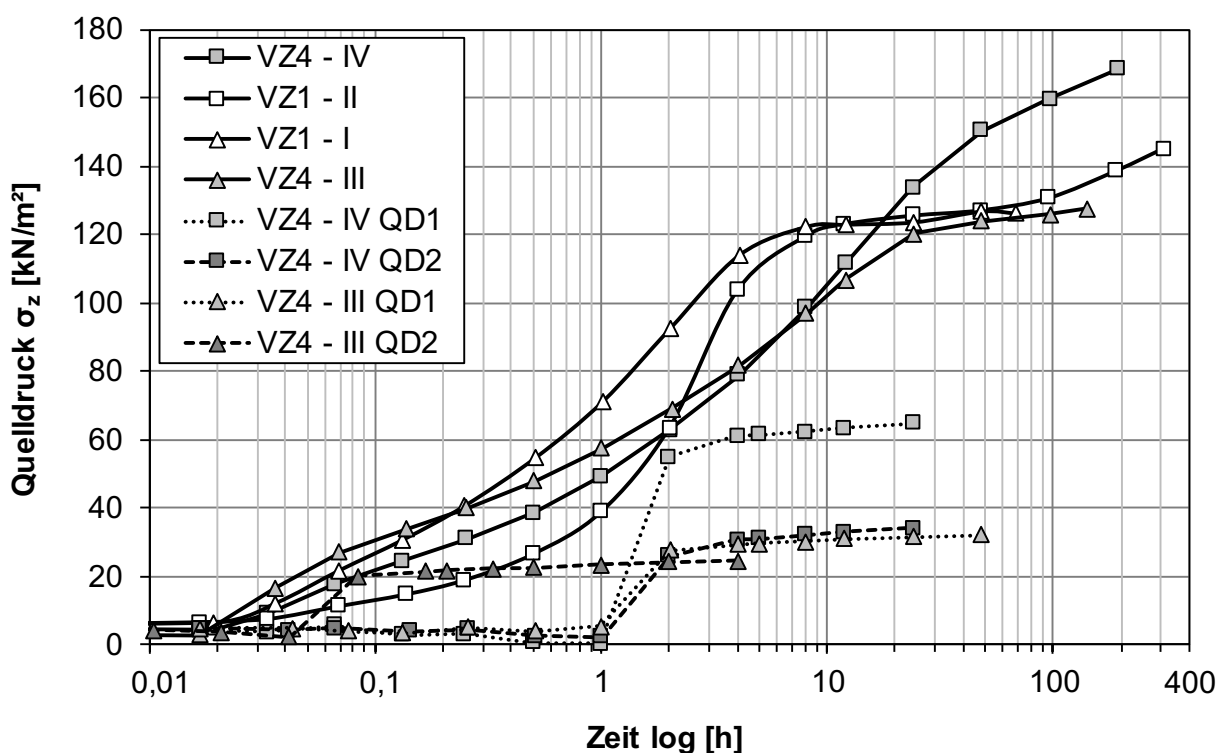


Bild 7.144: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

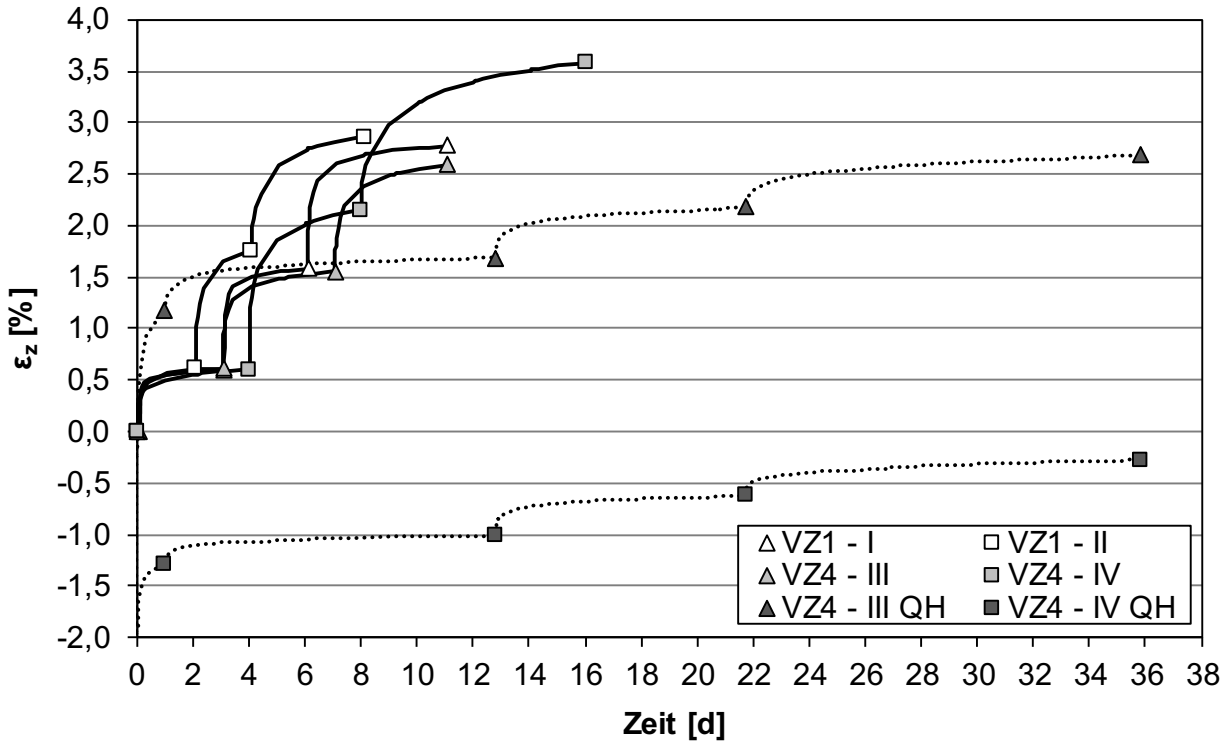


Bild 7.145: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

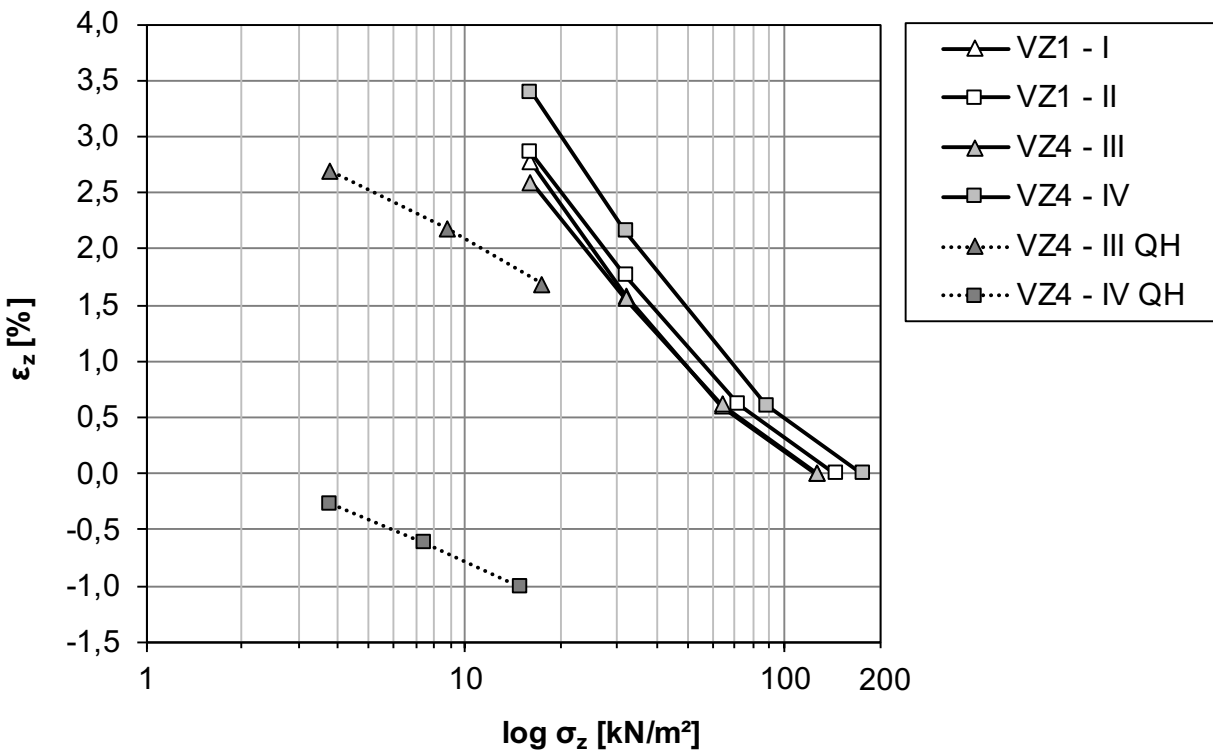


Bild 7.146: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

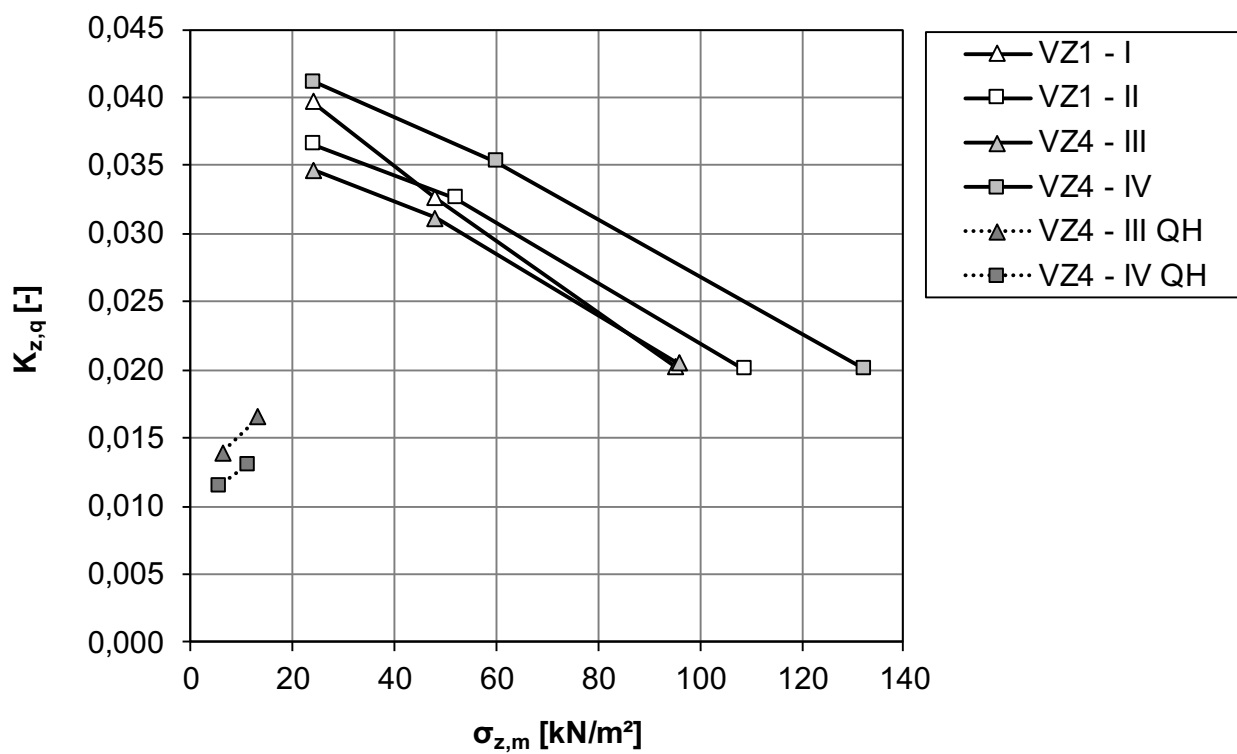


Bild 7.147: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

7.7 Bentonit

Der Bentonit besteht nahezu aus reinem quellfähigen Smektit. Die Ergebnisse sollten vergleichend zur Einschätzung der Quellfähigkeit der anderen veränderlich festen Gesteinen herangezogen werden. Dafür wurden zum einen die frischen Brocken zu Probekörper zurechtgeschnitten und entsprechend Quelldruck- und Quellhebungsversuche durchgeführt. Zum anderen wurde das Material bei 50° getrocknet und pulverisiert und damit eine Art Verwitterung erzeugt.

Wie bereits bei den vorhergehenden Ergebnissen hat sich auch beim quellfähigen Bentonit gezeigt, dass eine händische Nachregelung bei der Quelldruckentwicklung, um den Weg konstant zu halten, schwierig ist. Die Empfindlichkeit der mechanischen Nachregelung zeigte sich beim frischen Bentonit, dessen Ergebnisse je Quelldruckversuch in Bild 7.148 bis Bild 7.150 sowie zusammengefasst in Bild 7.151 dargestellt sind. Die Quelldruckentwicklung beim pulverisierten Bentonit verlief ohne Schwierigkeiten bei der Nachregelung (Bild 7.152).

Beim frischen Material zeigte sich zudem die Variabilität der unterschiedlichen Brocken, die zu unterschiedlich hohen Quelldrücken führte. Trotz nahezu gleicher Entnahmestelle bedingen unterschiedliche Zusammensetzungen und Überlagerungen unterschiedliche Dichten, aber auch unterschiedliche Wassergehalte. Je nachdem, wieviel Wasser noch aufgenommen werden kann, fallen entsprechend die Reaktionen infolge zusätzlicher Wasseraufnahme aus.

Die Ergebnisse aus jeweils zwei vergleichenden Quellhebungsversuchen sind für den frischen Bentonit in Tab. 7.35 und Tab. 7.36 sowie für den pulverisierten Bentonit in Tab. 7.37 und Tab. 7.38 dargestellt. Die Quelldehnungen für das frische Material mit höherem Ausgangswassergehalt fielen deutlich geringer aus (Bild 7.153, Bild 7.154) als für das trockene Pulver (Bild 7.155, Bild 7.156), das deutlich mehr Wasser aufnehmen und dadurch quellen kann. Es zeigte sich im Allgemeinen, dass die Versuche wiederholbar sind (Bild 7.157 bis Bild 7.160). Die im Vergleich zu den vorhergehenden Materialien sehr hohen Quelldehnungen zeigen sich auch in den deutlich größeren Quellparametern (Bild 7.161 bis Bild 7.164).

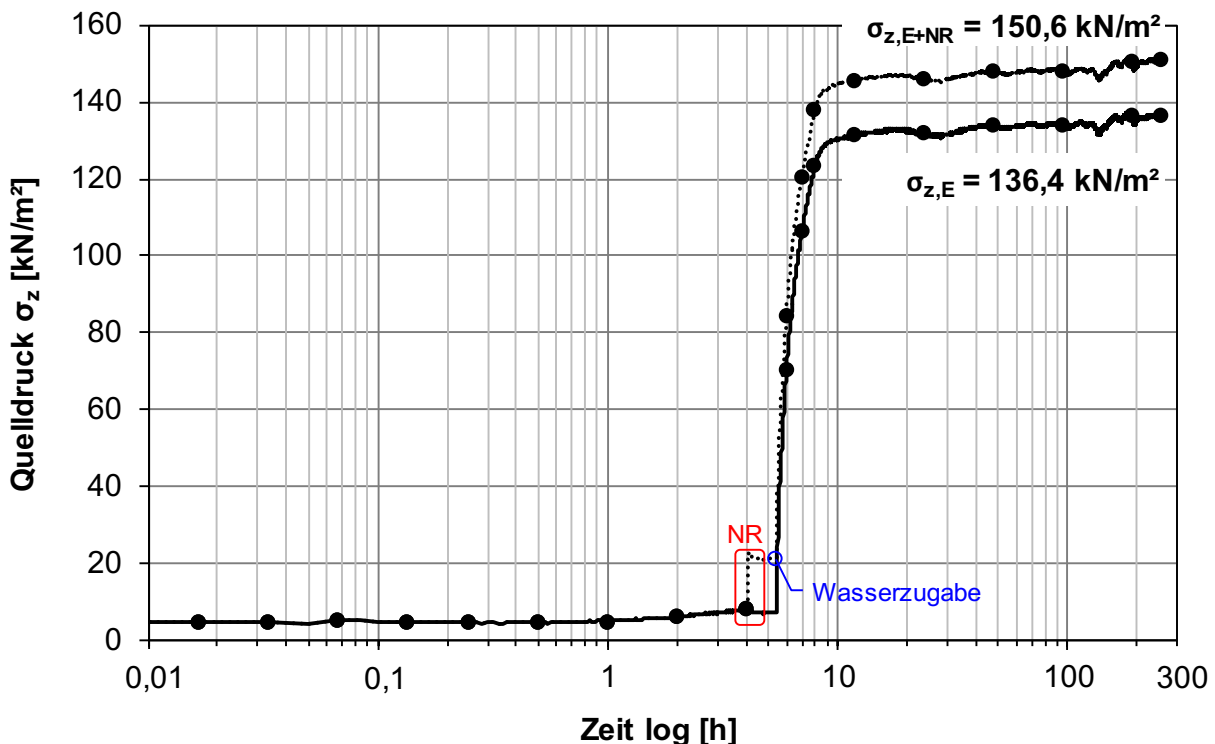


Bild 7.148: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.1 (10 kN-Dose)

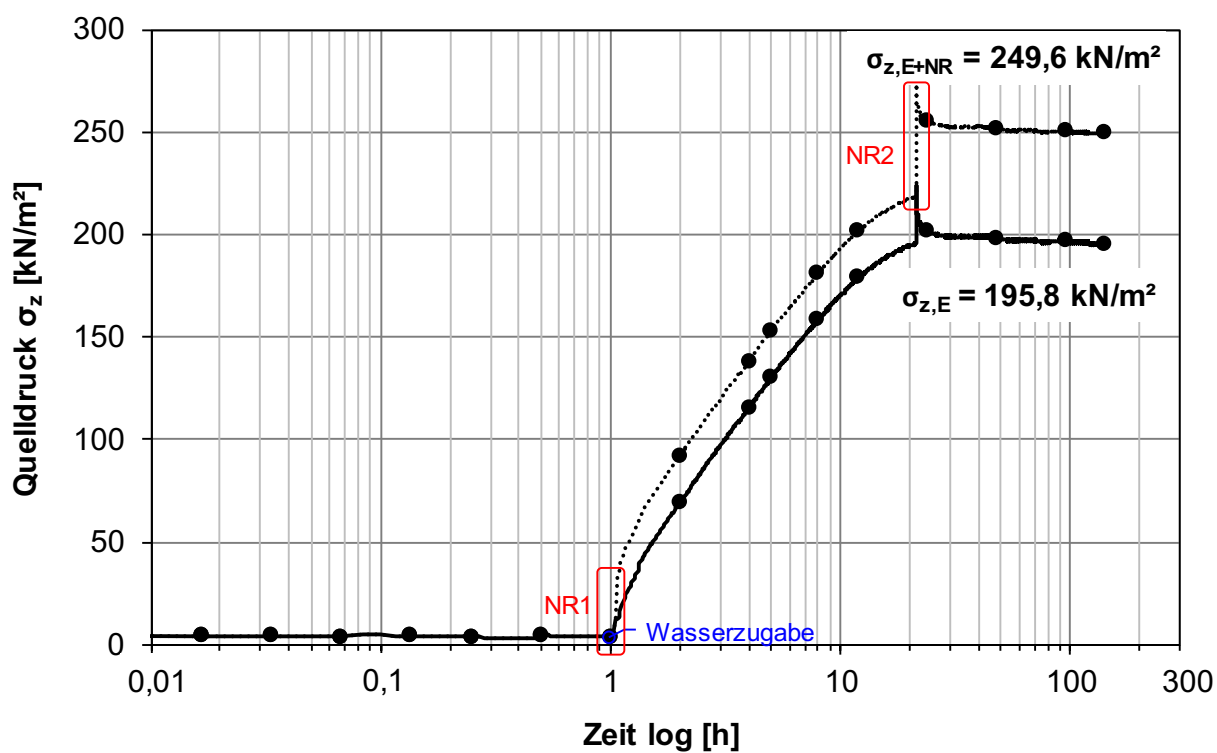


Bild 7.149: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.2 (10 kN-Dose)

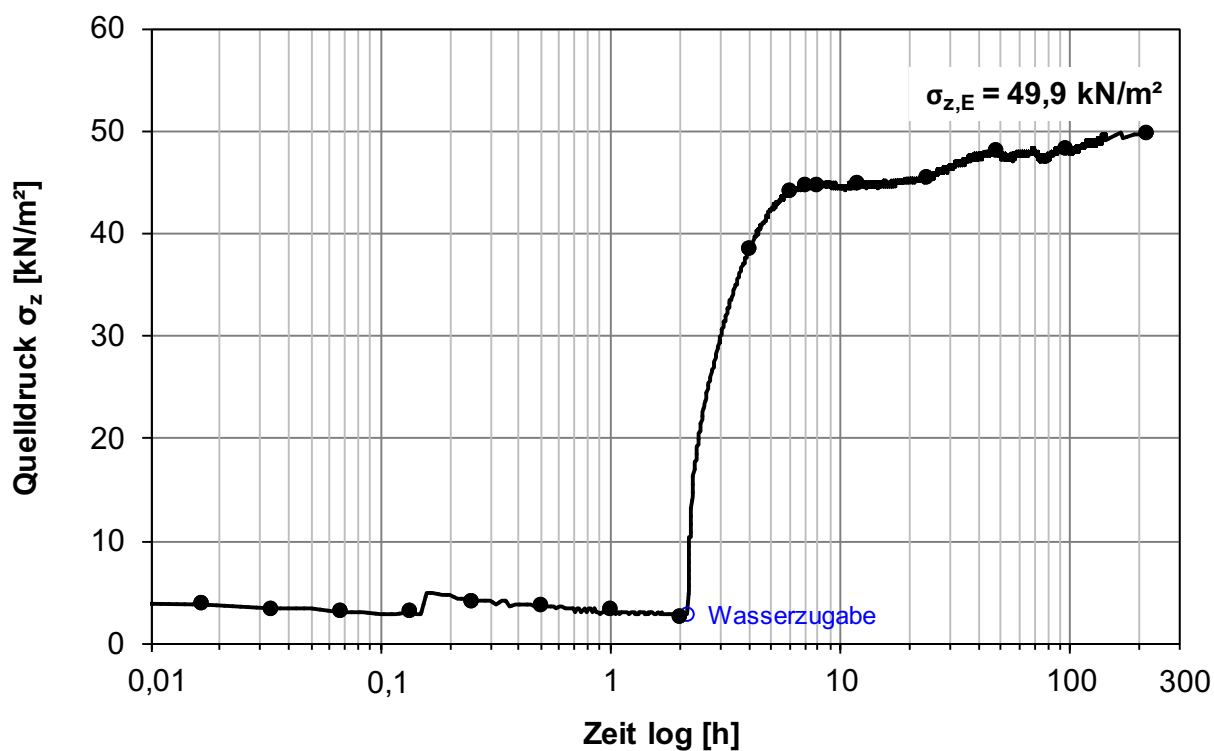


Bild 7.150: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.3 (5 kN-Dose)

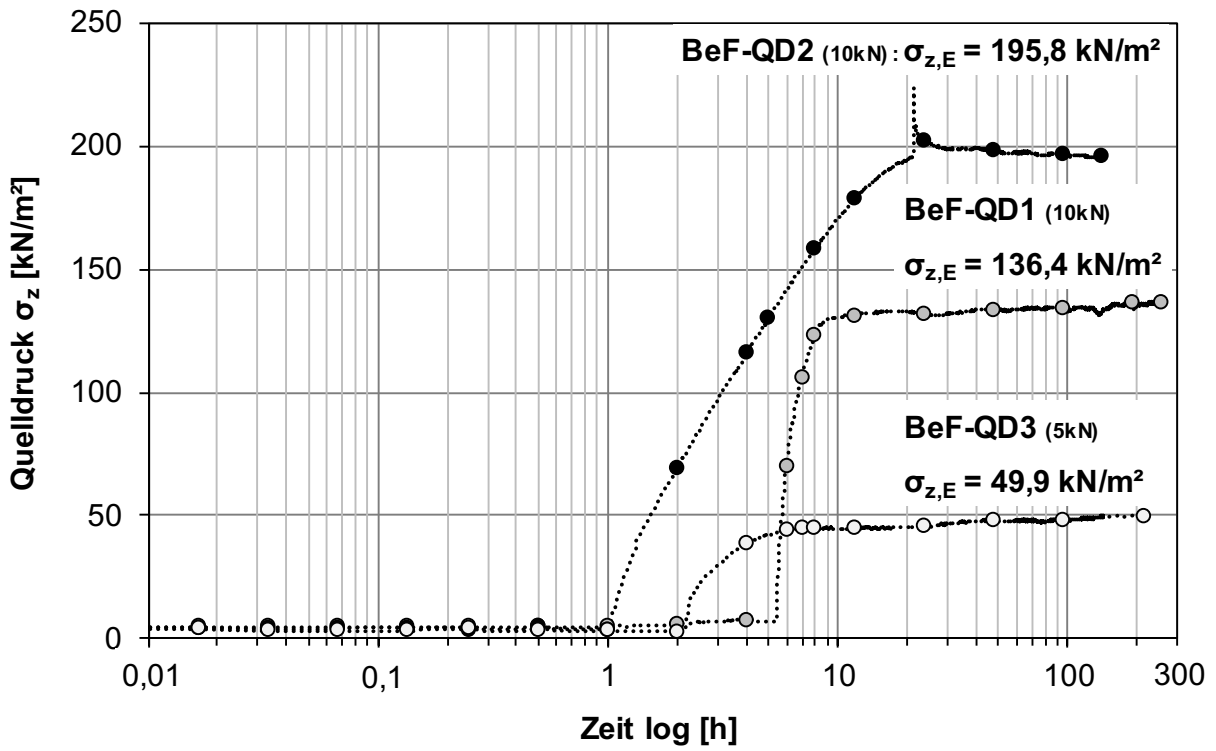


Bild 7.151: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.1 bis QD1.3

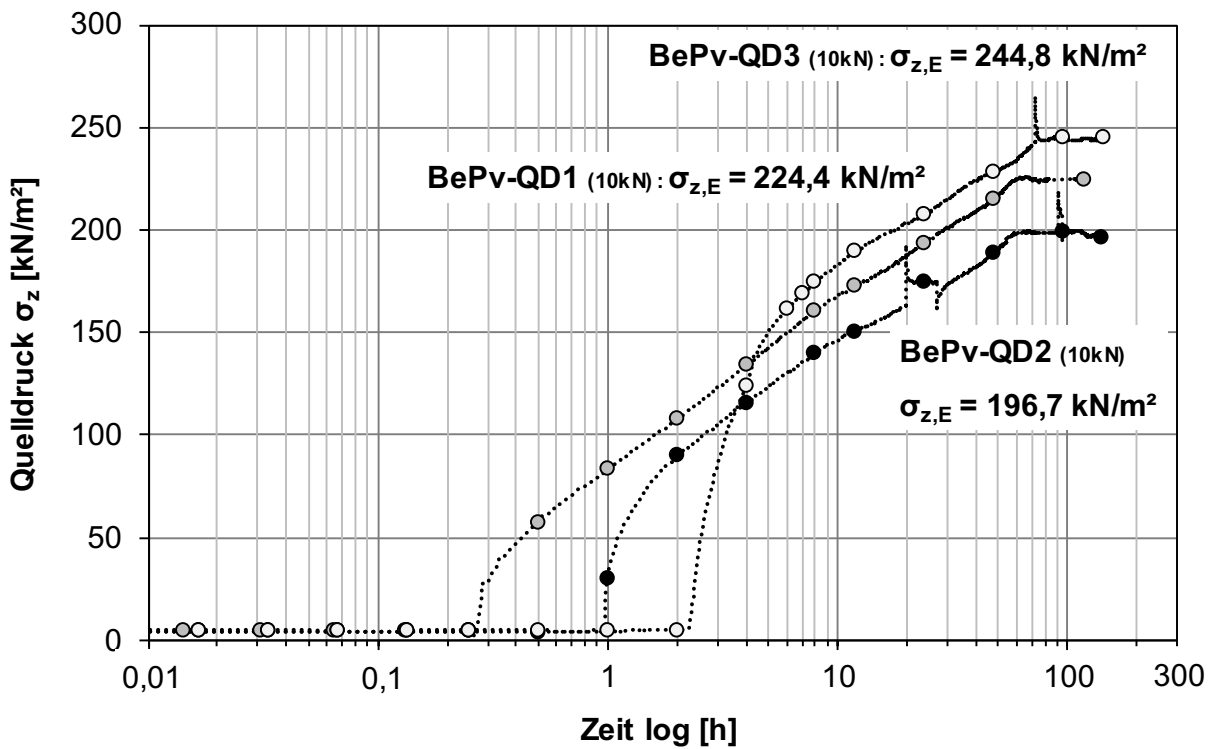


Bild 7.152: Quelldruckentwicklung Bentonit, Pulver, QD2.1 bis QD2.3

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	2,1	50,0	149,8	1,00	-0,501	-2,569	-	-
2	7,9	139,5	149,8	1,00	-0,064	-0,328	-	-
3	14,9	168,4	74,9	0,50	0,142	0,728	112,4	0,0351
4	18,9	94,6	37,5	0,25	0,357	1,831	56,2	0,0366
5	27,9	216,0	18,7	0,13	0,518	2,656	28,1	0,0274
					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	2,985		$\emptyset = 0,0330$
6	45,9	433,0	3,8	0,03	0,767	3,933	11,2	0,0183
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	4,262		$\emptyset = 0,0274$

Tab. 7.35: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit frisch, QH1

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t	σ_z	$\sigma_z / \sigma_{z,ref}$	ϵ_z		$\sigma_{z,m}$	$K_{z,q}$
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	2,1	50,1	149,8	1,00	-0,398	-2,041	-	-
2	7,9	139,5	149,8	1,00	0,212	1,087	-	-
3	14,9	168,4	74,9	0,50	0,420	2,154	112,4	0,0354
4	18,9	94,5	37,6	0,25	0,556	2,851	56,2	0,0232
5	27,9	215,9	18,7	0,13	0,689	3,533	28,1	0,0227
					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	2,446		$\emptyset = 0,0271$
6	45,9	433,2	3,8	0,03	0,922	4,728	11,2	0,0171
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	3,641		$\emptyset = 0,0210$

Tab. 7.36: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit frisch, QH2

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,0	24,0	280,9	1,00	-0,949	-4,867	-	-
2	7,9	165,3	280,9	1,00	0,322	1,651	-	-
3	14,9	168,3	139,8	0,50	0,777	3,985	210,4	0,0770
4	27,8	310,5	68,7	0,24	1,255	6,436	104,3	0,0794
5	45,1	414,2	33,7	0,12	1,700	8,718	51,2	0,0739
					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	7,067		$\emptyset = 0,0767$
6	81,9	883,4	3,8	0,01	1,963	10,067	18,7	0,0141
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	8,415		$\emptyset = 0,0558$

Tab. 7.37: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit Pulver, QH3

LS	Zeitdauer	Zeitdauer je LS	vertikale Spannung	vertikale Spannung normiert	Quelldehnung		mittlere Spannung	Quellparameter
	t	t			σ_z	$\sigma_z/\sigma_{z,ref}$		
	[d]	[h]	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[%]	[kN/m ²]	[-]
1	1,78	42,79	280,9	1,00	-0,747	-3,831	-	-
2	6,93	123,56	280,9	1,00	0,253	1,297	-	-
3	21,85	358,08	139,8	0,50	0,831	4,262	210,4	0,0978
4	39,11	414,29	68,7	0,24	1,278	6,554	104,3	0,0742
5	60,82	520,96	33,7	0,12	1,729	8,867	51,2	0,0748
					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	7,569		$\emptyset = 0,0823$
6	72,16	272,00	3,8	0,01	2,836	14,544	18,7	0,0595
*LS = Laststufe					$\Delta\epsilon_{z,q} =$	13,246		$\emptyset = 0,0695$

Tab. 7.38: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit Pulver, QH4

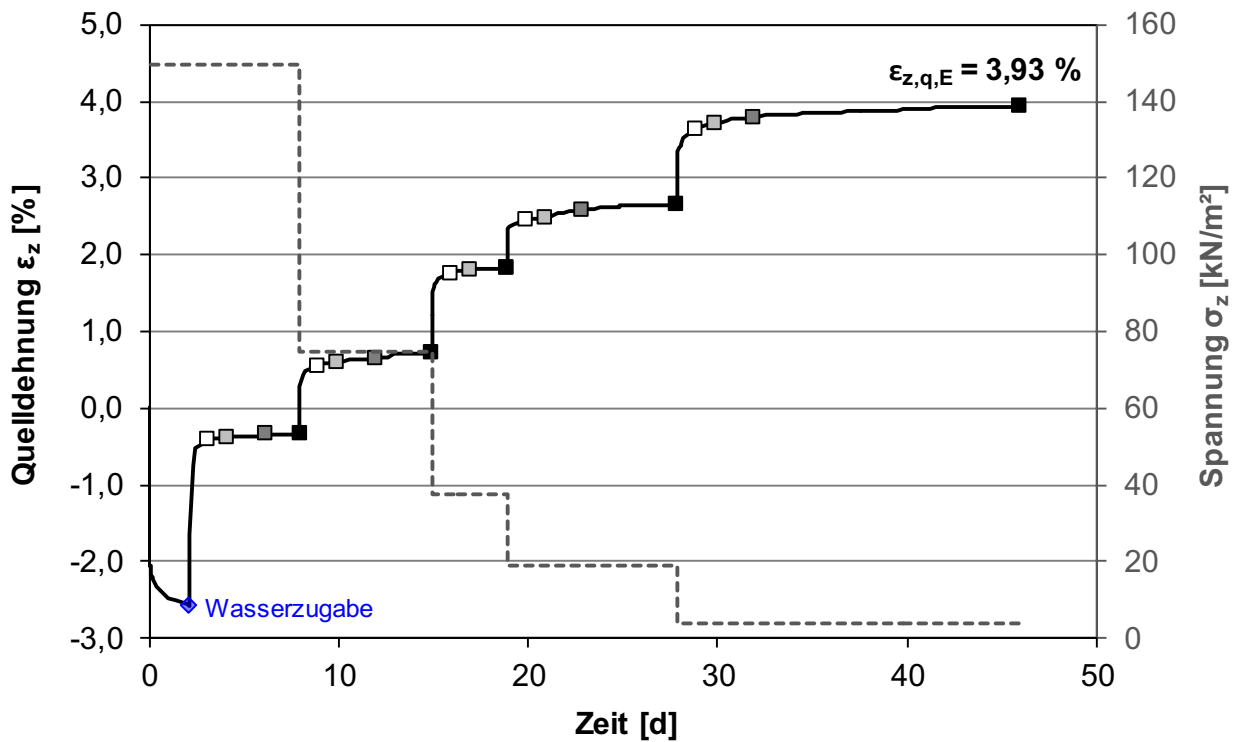


Bild 7.153: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit frisch, QH1

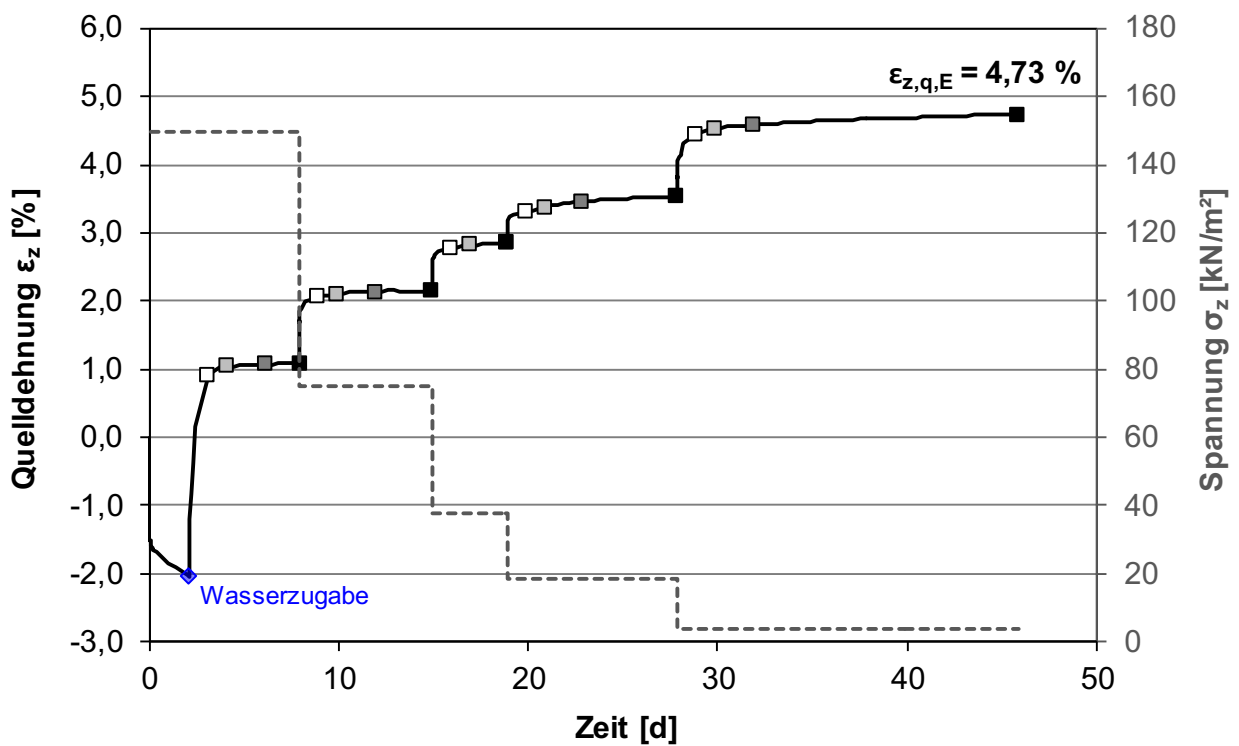


Bild 7.154: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit frisch, QH2

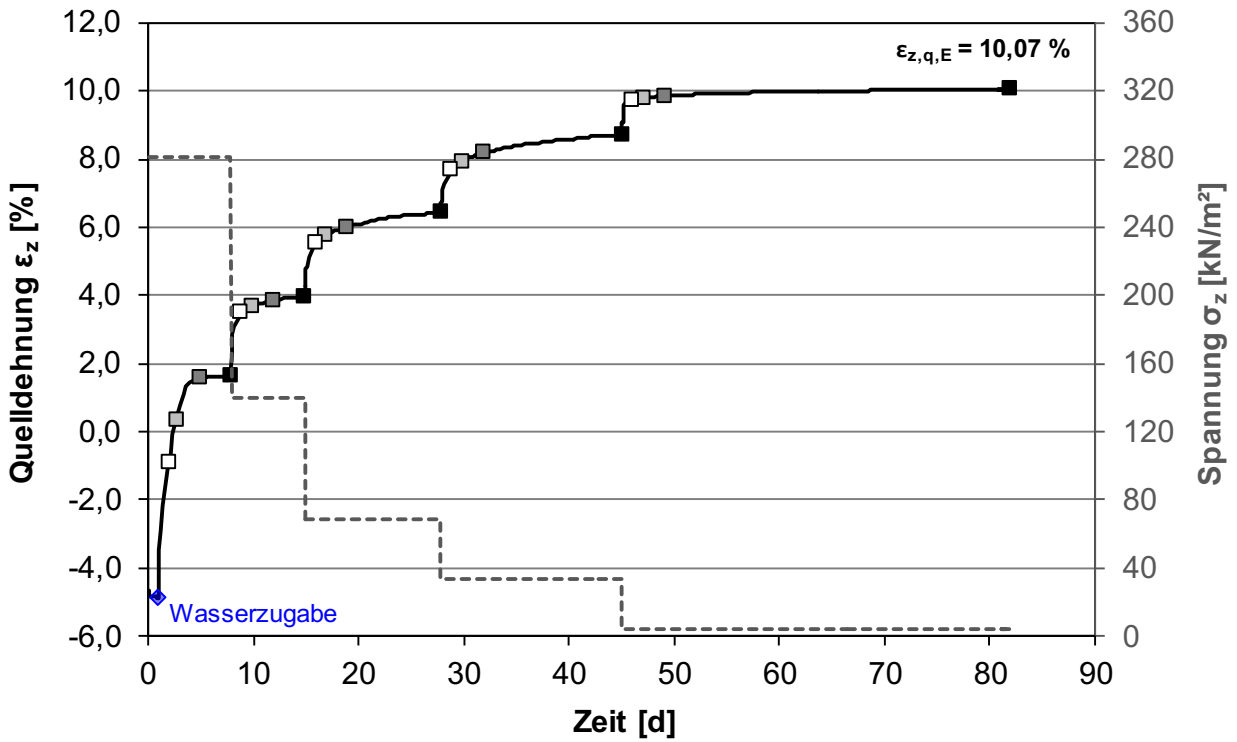


Bild 7.155: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit Pulver, QH3

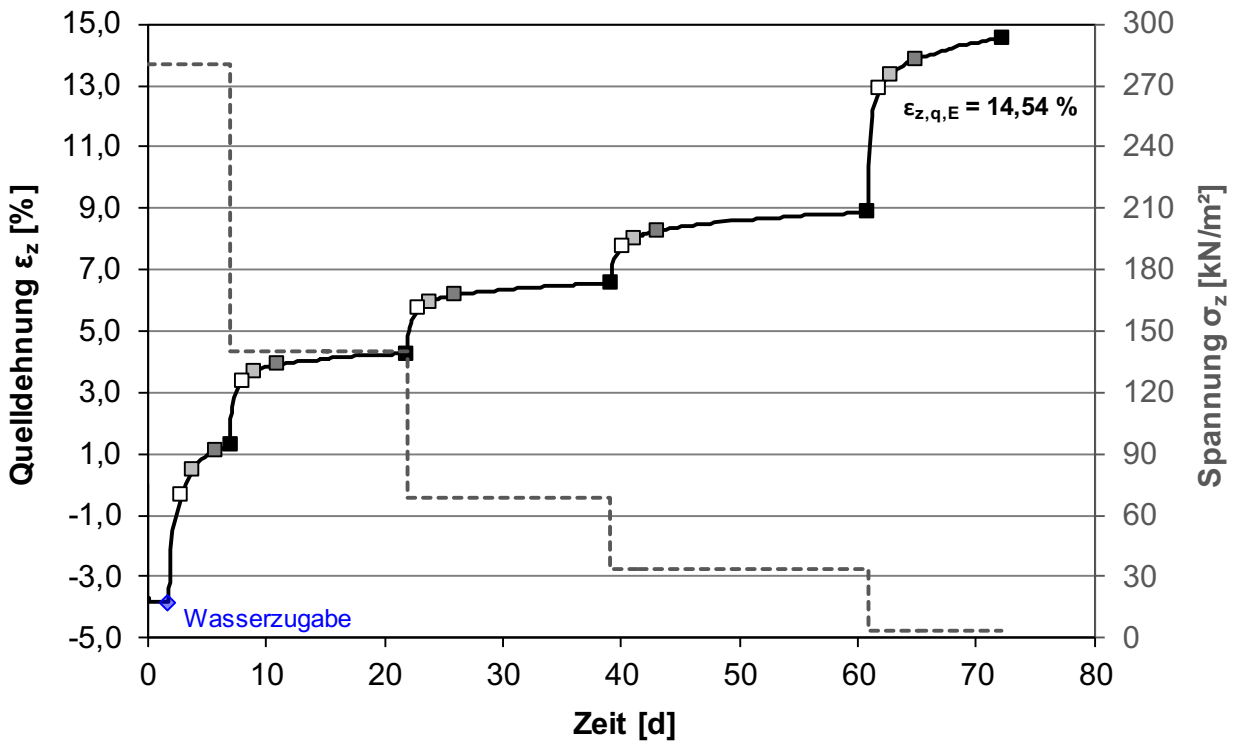


Bild 7.156: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit Pulver, QH4

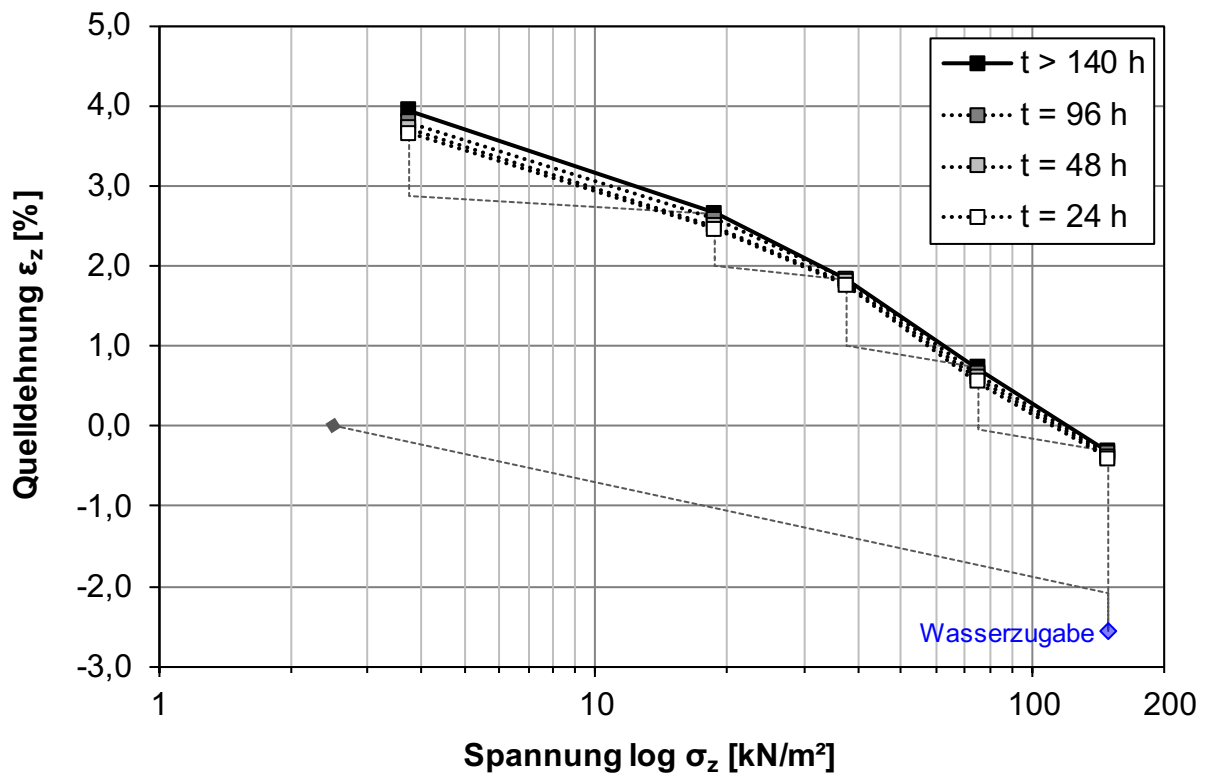


Bild 7.157: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH1

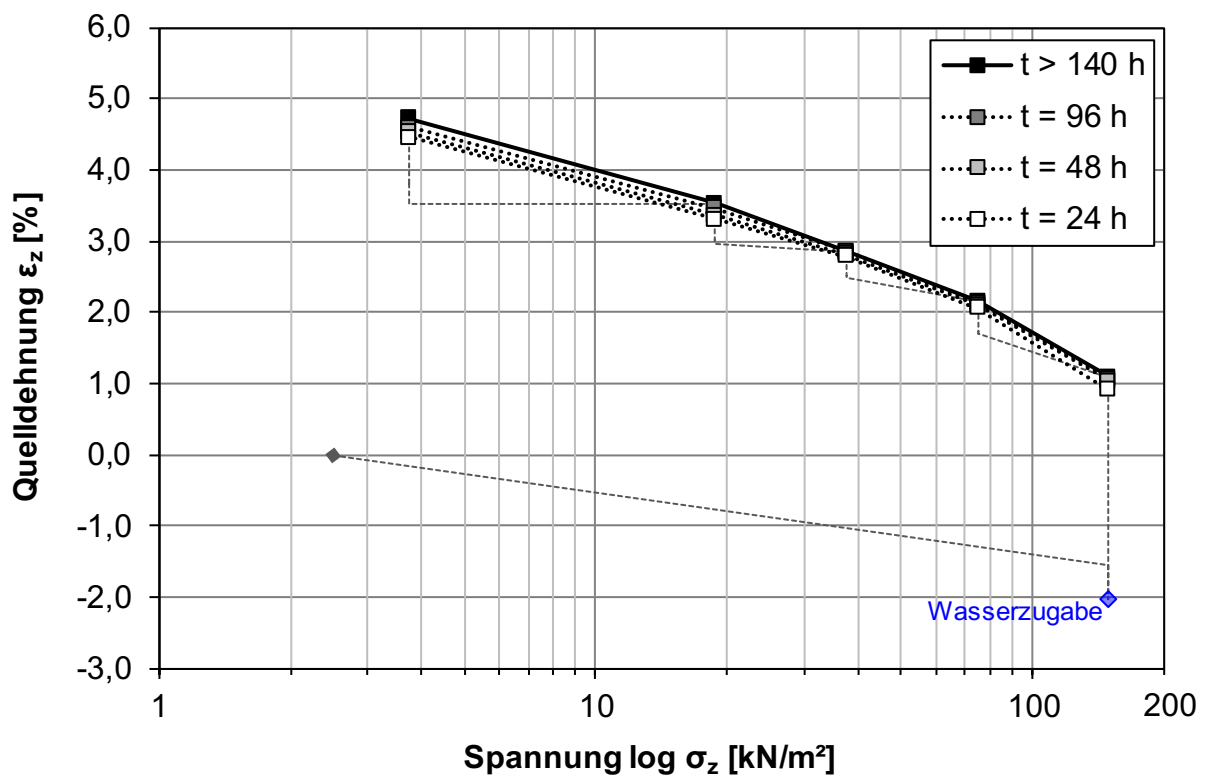


Bild 7.158: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH2

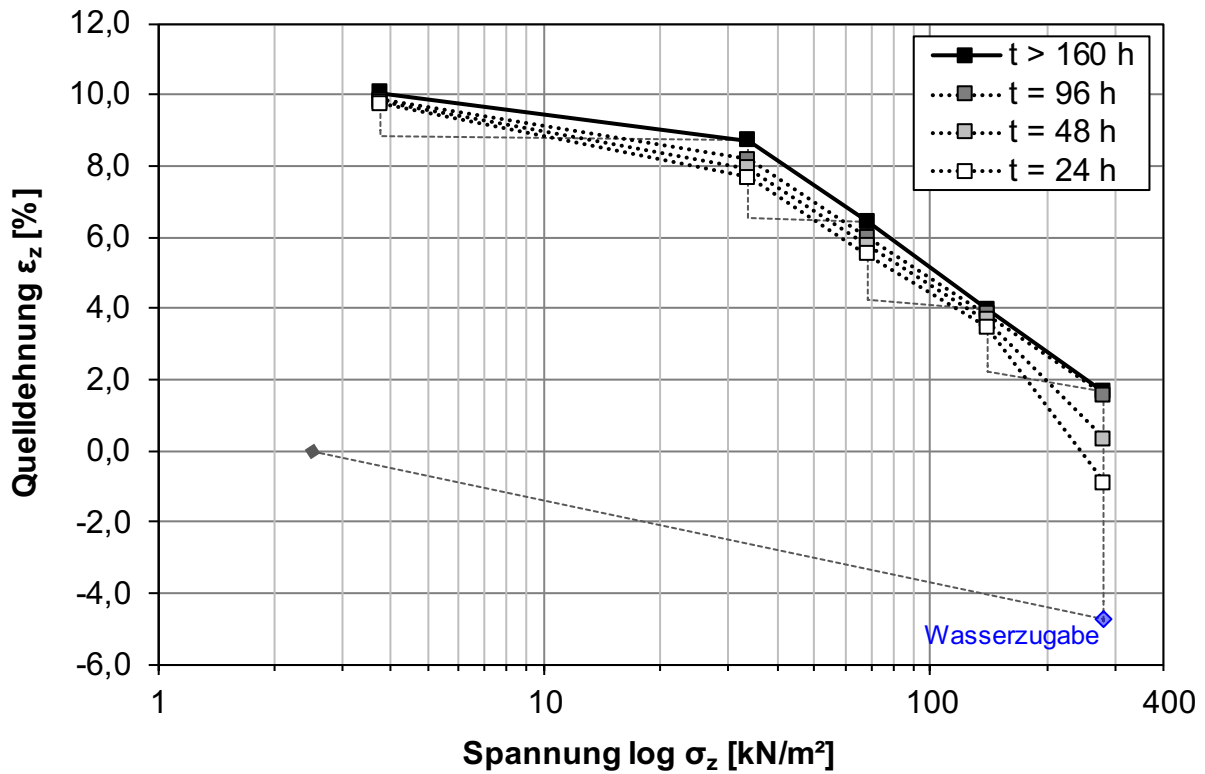


Bild 7.159: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH3

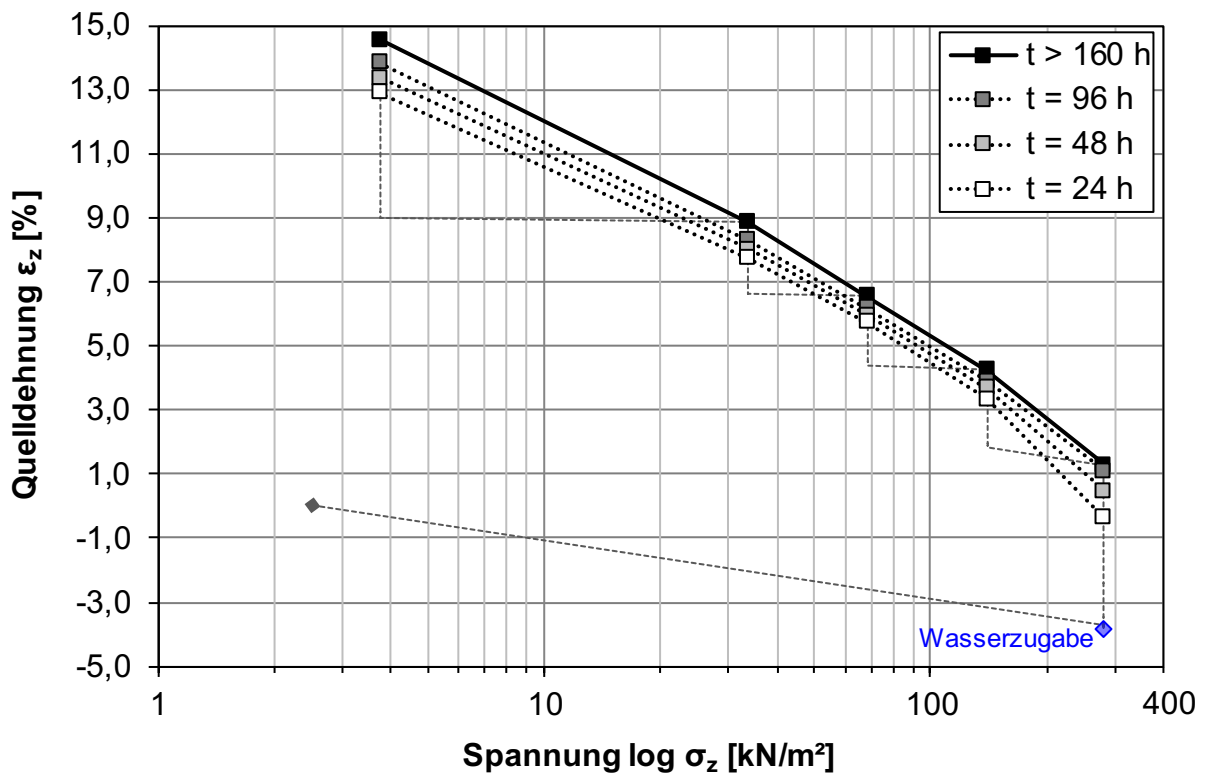


Bild 7.160: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH4

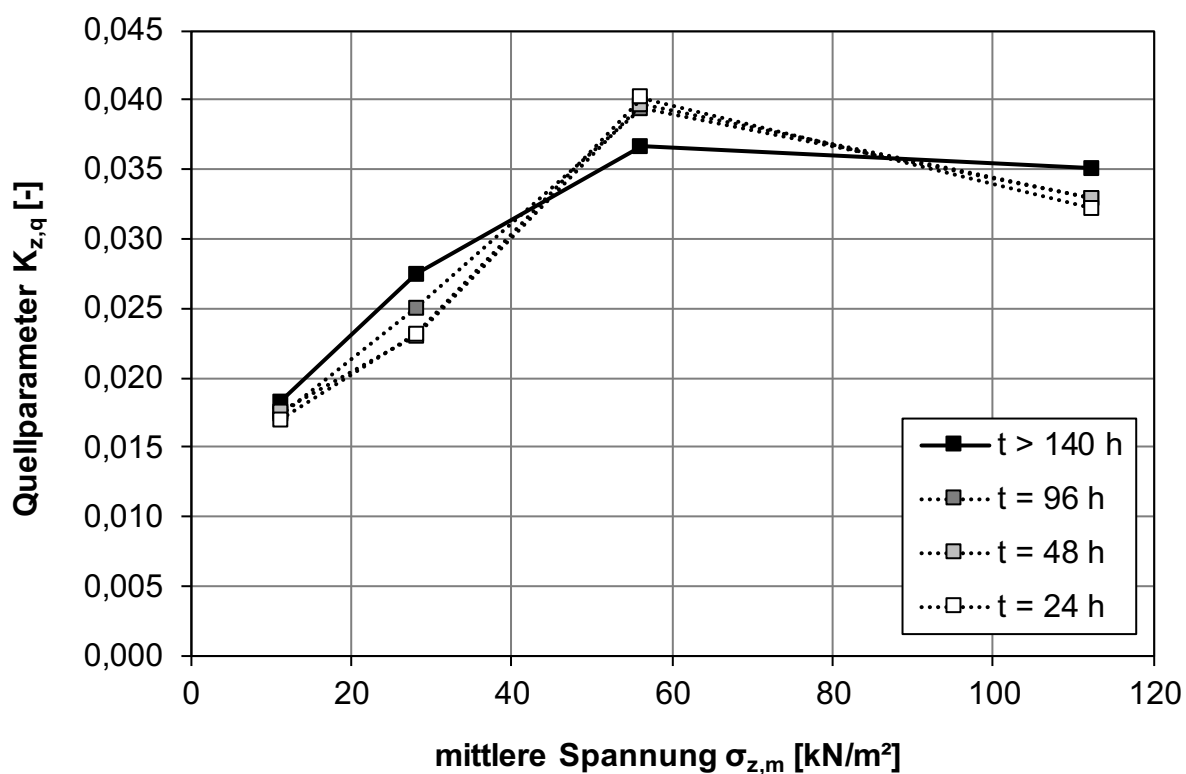


Bild 7.161: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH1

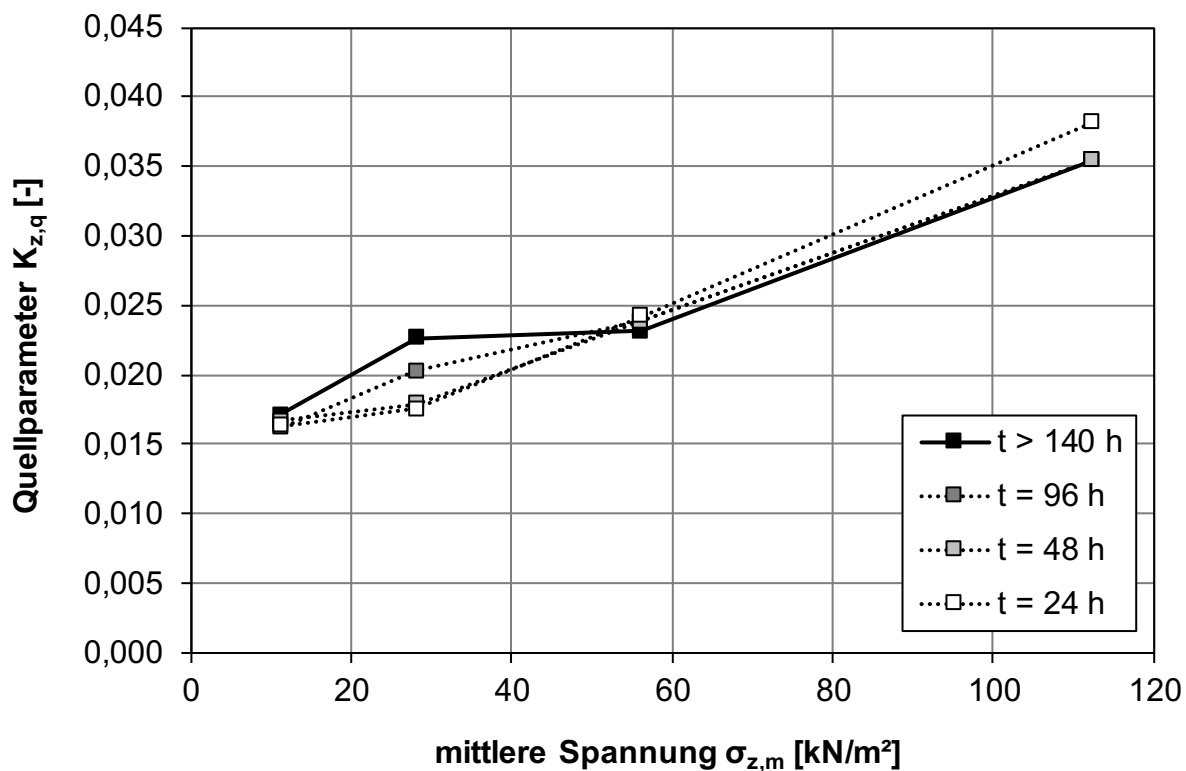


Bild 7.162: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH2

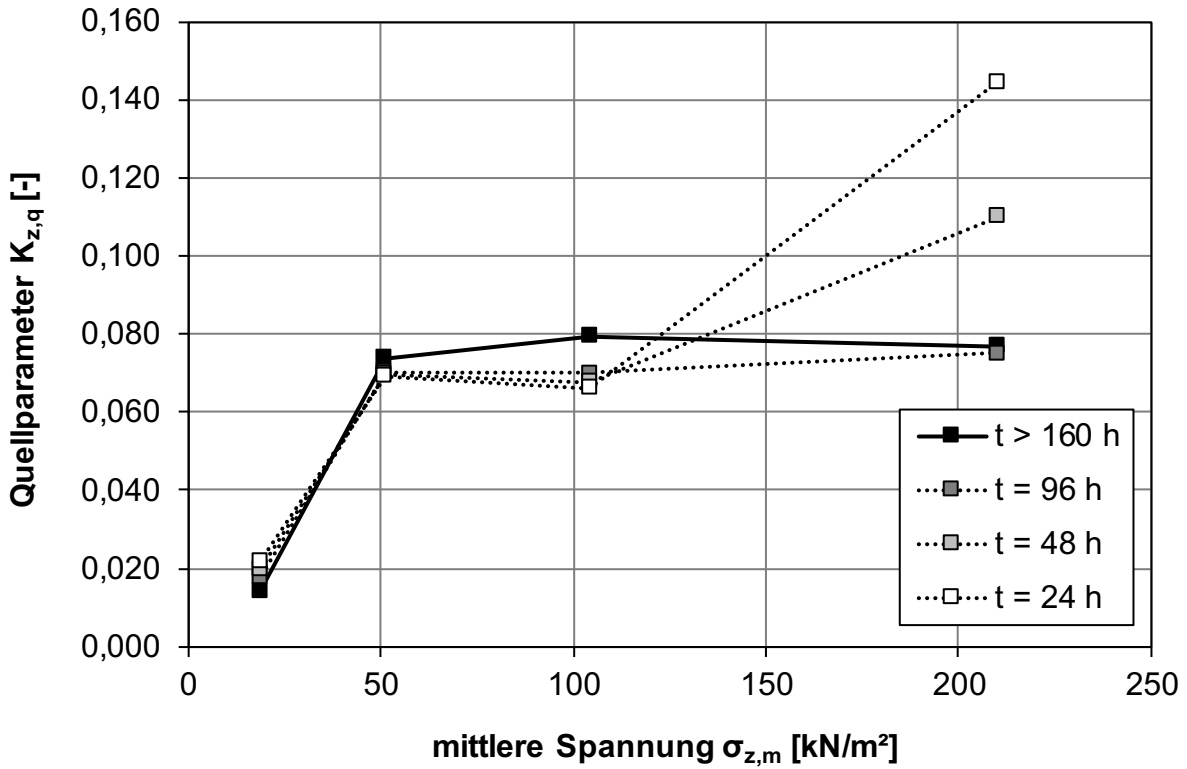


Bild 7.163: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH3

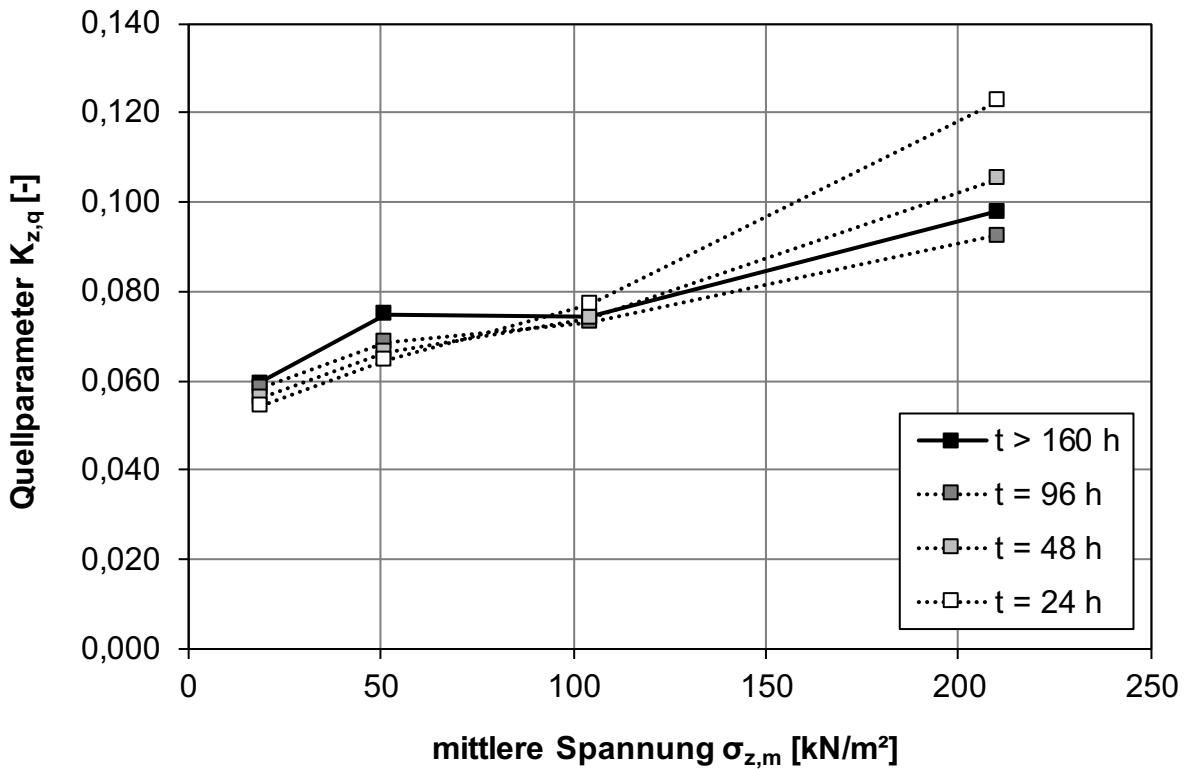


Bild 7.164: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH4

7.8 Zusammenfassung der Quellversuche

7.8.1 Allgemeines

Bei geringen Spannungen können durch Wasserzutritt Quelldrücke und daraus resultierende Quelldehnungen auftreten. In dieser Arbeit wurde dafür qualitativ ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Kenngrößen deutlich. Zudem können Abhängigkeiten zwischen dem Quelldruck und den beiden Kenngrößen Einbau- und Verwitterungszustand festgestellt werden. Diese Abhängigkeiten und Zusammenhänge werden nachfolgend beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass sich aufgrund der Heterogenität der Böden in Einzelfällen abweichende Tendenzen ergeben haben.

Ob sich Quelldrücke und Quelldehnungen einstellen, hängt zunächst vom Spannungszustand ab. Je geringer die Spannungen sind, desto höher sind die Quelldehnungen. Der Quelldruck als kennzeichnende Größe, bei der die Dehnungen null sind, hängt maßgeblich vom Material (Verwitterungszustand) und dem Einbauzustand ab. Bei Spannungen, die größer als der maximale Quelldruck werden, würden dann Setzungen auftreten, wie sie in den Kompressionsversuchen von MÖLLER und HEYER (2014) beobachtet wurden.

Für die Darstellung der Ergebnisse in den folgenden Diagrammen wurden die in Tab. 7.39 aufgeführten Abkürzungen für die Böden verwendet.

Probenbezeichnung	Abkürzung
Opalinustonstein	O-St
Tonmergelstein	TmS
Dunkelroter Mergel	drM
Tertiärer Ton	tT
Feuerletten-Zersatz	Feu
Bentonit, frisch	B-fr
Bentonit, pulverisiert	B-Pv

Tab. 7.39: Übersicht Abkürzung der Probenbezeichnung

7.8.2 Quelldruck in Abhängigkeit von den Klassifikationsparametern

Ob ein Quellpotential vorliegt, lässt sich allein aus den Klassifikationsparametern (I_P , I_A , I_{d2}) quantitativ nicht abschätzen, da v. a. der Einbau- und der Verwitterungszustand größeren Einfluss auf die Höhe der Quelldrücke und damit auch Quelldehnungen nehmen. Es lässt sich nur qualitativ feststellen, ob ein Boden überhaupt quellen könnte. So zeigten beispielsweise die am geringsten quellfähigen Böden Tonmergelstein und dunkelroter Mergel im Ausgangszustand (VZ 1) eine geringere Plastizitätszahl I_P als 21 % und zählten gleichzeitig zu den grobkörnigeren Böden mit einer Proctordichte $\rho_{Pr} > 1,90$ g/cm. Beide Böden besaßen zudem bei der nass gesiebten Korngrößenverteilung einen Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) < 15 M.-%. Der quellfähigste Vertreter, der Bentonit, zeigte auch die höchste Plastizitätszahl mit $I_P > 70$ %. Dass jedoch die Plastizitätszahl allein keine Aussage über das Quellpotential geben kann, konnte anhand der anderen drei quellfähigen Böden (Opalinustonstein, Feuerletten-Zersatz, tertiärer Ton) festgestellt werden. Deren Plastizitätszahl I_P lag gerade mal zwischen 24 % und 27 %. Dagegen waren die Unterschiede aus den Ergebnissen der Quellversuche deutlich größer. Insgesamt waren die quellfähigeren Böden tendenziell feinkörniger und besaßen auch geringere Proctordichten $\rho_{Pr} < 1,90$ g/cm sowie höhere Feinkornanteile ($d < 0,06$ mm) > 15 M.-%. Alle Böden zeigten beim Siebtrommelversuch einen Zerfallsbeständigkeitsindex $I_{d2} < 60\%$ (Einstufung als „niedrig“ zerfallsbeständig gemäß Tab. 5.2 in Kapitel 5.3.3).

Es kann also geschlussfolgert werden, dass je feinkörniger ein Boden ist, desto höher auch seine spezifische Oberfläche ist, an der Wasser angelagert werden kann, und damit auch sein Quellpotential ist. Außerdem ändert sich die Plastizität mit zunehmender Verwitterung nicht, wie bereits in den Untersuchungen nach MÖLLER und HEYER (2014) festgestellt wurde, so dass mit diesem Parameter auch nicht die Unterschiede zwischen den Verwitterungszuständen erklärt werden kann. Neben der Proctordichte ist v. a. der Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) der ausschlaggebende Materialparameter, der sich mit zunehmender Verwitterung ändert.

Da das Wasseraufnahmevermögen mit der Plastizität korreliert, liefert auch diese Kenngröße keinen hinreichenden Hinweis auf die Höhe eines Quellpotentials. Zwar steigt mit der Plastizitätszahl auch das Wasseraufnahmevermögen an, aber erst die Menge des Feinkornanteils an der Gesamtprobe prägt das Verhalten als grob-, gemischt- oder feinkörniges Material.

Mit Hilfe der Aktivitätszahl kann das Quellpotential sogar fehleingeschätzt werden. So könnte beispielsweise der dunkelrote Mergel v. a. in Bezug auf seine Aktivitätszahl überschätzt werden, zeigte aber letztlich die geringsten Quelldrücke und Quelldehnungen, was v. a. an seinem geringen Feinkornanteil lag, so dass hier der höhere Grobkornanteil das Materialverhalten prägt.

7.8.3 Quelldruck in Abhängigkeit vom Einbau- und Verwitterungszustand

Aus den Quelluntersuchungen hat sich bei den kombinierten Quelldruck-Quellhebungs-Versuchen (QD-QH) annähernd ein linearer Zusammenhang zwischen Quelldruck und Quelldehnung ergeben. Mit zunehmendem Quelldruck nehmen auch die Quelldehnungen zu. Folglich soll zunächst erläutert werden, wovon die Höhe des maximalen Quelldruckes abhängt.

Tendenziell hat sich aus den Ergebnissen herauskristallisiert, dass der Quelldruck von zwei Faktoren entscheidend beeinflusst wird. Der erste eindeutige Zusammenhang bestand zwischen dem Quelldruck und dem Einbauzustand des Bodens, insbesondere der Trockendichte. Dieser Zusammenhang ist in Bild 7.165 für alle Versuche und in Bild 7.166 separat für die kombinierten Versuche dargestellt, wobei hier der Einbauzustand nahe dem Proctroptimum liegt. Bei den kombinierten Versuchen zeigte sich im Allgemeinen, dass mit abnehmender Trockendichte $\rho_{d,0}$ der Quelldruck $\sigma_{z,max}$ ansteigt. Mit abnehmender Trockendichte steigt wiederum der Luftporenanteil, wodurch eine höhere Wasseraufnahme in den Porenraum möglich wird. Je mehr Wasser sich anlagern kann, umso höher fällt das Quellen aus. Damit zeigte sich wie bereits bei den Kompressionsversuchen von MÖLLER und HEYER (2014), dass die trockenen Einbaubedingungen und

damit großen Porenanteile den Wasserzutritt und somit das Potential zum Quellen und Sacken begünstigen. Damit wäre eine Begrenzung des Luftporenanteils von $n_a < 6$ Vol.-% zur Reduzierung von Verformungen weiterhin zu empfehlen.

Dass je Verwitterungszustand der Quelldruck mit abnehmender Trockendichte zunimmt, wurde bei allen Böden bis auf den Feuerletten-Zersatz beobachtet. Hier nahm der Quelldruck auch mit zunehmender Trockendichte zu. Dies kann mit der hohen Feinkörnigkeit des Bodens zusammenhängen. Denn tendenziell nimmt der Quelldruck zu, desto mehr das Quellen behindert wird. Allerdings ist Quellen auch immer vom Wassergehalt bzw. der zur Verfügung stehenden Wassermenge abhängig. Wenn kaum mehr Wasser fließen kann, wie bei den Proben im Proctroptimum, kann auch kein weiteres Quellen stattfinden. Proben auf der trockenen Seite der Proctorkurve können bedingt durch den höheren Luftporenanteil mehr Wasser aufnehmen, das sich anlagern kann. Je geringer also der Anfangssättigungsgrad ist, umso höher ist das Wasseraufnahmepotential bei gleichzeitig höherer Durchlässigkeit wegen dem höheren Anfangsluftporenanteil (Bild 7.167 und Bild 7.168). Wird das Quellen dann behindert, kann sich ein entsprechender Quelldruck einstellen. Die Proben des Feuerletten-Zersatzes im Proctroptimum (UB II, UB IV) konnten zwar weniger Wasser aufnehmen als die Einbauzustände auf der trockenen Seite, jedoch muss beachtet werden, dass sie aufgrund ihrer Feinkörnigkeit eine hohe spezifische Oberfläche haben. Diese hohe Angriffsfläche für Wassermoleküle in Kombination mit der hohen Dichte führt zu einer stärkeren Behinderung des Quellens und damit zu höheren Quelldrücken, auch dann, wenn diese Proben nicht vollständig gesättigt sind. Daraus lässt sich auch folgern, dass sehr dichte Proben, die eine geringe Durchlässigkeit haben, über längere Zeit sukzessive Wasser aufnehmen und sich dabei nicht nur Quelldrücke, sondern die schädlicheren Quelldehnungen entwickeln können.

Als zweite Abhängigkeit ging aus den Quellversuchen vom Opalinustonstein und Feuerletten-Zersatz hervor, dass mit zunehmendem Verwitterungszustand der Quelldruck ansteigen kann. Durch die verwitterungsbedingte Erhöhung des Feinkornanteils erhöht sich die spezifische Oberfläche und damit auch die Möglichkeit zur An- und Einlagerung

von Wasser. Besonders interessant zeigte sich dies beim Opalinustonstein, dessen Proctordichten sich zwischen VZ 1 und VZ 3 kaum unterschieden haben (siehe Bild 6.27 in Kapitel 6.4), aber hinsichtlich der Quelldrücke große Unterschiede zu erkennen waren. Einziger Unterschied war der höhere Feinkornanteil von VZ 3 mit ca. 39 % (Bild 6.17 in Kapitel 6.4) gegenüber VZ 1 mit ca. 28 % aus der Sedimentationsanalyse (siehe Bild 6.1 in Kapitel 6.2). Das gleiche gilt für den Feuerletten-Zersatz, dessen Unterschiede hinsichtlich der Proctordichten gering waren, aber eine leichte Zunahme des Feinkornanteils zu erkennen war.

Ob eine Zunahme des Quelldrucks mit steigendem Verwitterungszustand auch bei anderen Böden zutreffend ist, lässt sich nicht eindeutig sagen. Bis auf den Opalinustonstein und Feuerletten-Zersatz, wurden die Versuche im VZ 4 bei den anderen Böden in den kleineren Ödometern mit $d = 7$ cm mit mechanischer Regelung durchgeführt (QD). Eine Vergleichbarkeit zu den Versuchen im VZ 1 bzw. VZ 3, die in Groß-Ödometern mit $d = 30$ cm softwaregesteuert durchgeführt wurden (QD-QH), ist damit schwierig, da sowohl Unterschiede in der Probengröße als auch Versuchsdurchführung lagen. Beispielsweise sind die Unterschiede zwischen dem QD und QD-QH beim Feuerletten-Zersatz im VZ 4 zu erkennen, da dort beide Versuchsvarianten durchgeführt wurden (Bild 7.165).

Hinsichtlich des Einbauzustandes sowie Verwitterungszustandes, der durch die Proctordichte und den Feinkornanteil geprägt wird, lassen sich weitere Schlussfolgerungen hinsichtlich einer Ausbildung des Quelldruckes und der dabei stattfindenden Quellvorgänge ableiten. Zwar hat sich tendenziell gezeigt, dass mit zunehmendem Quelldruck die Quelldehnungen zunehmen. Allerdings gab es Ausnahmen, bei denen ein hoher Quelldruck nicht auch zu hohen Quelldehnungen führte. Dies ist davon abhängig, aus welchen Gründen sich letztlich ein Quelldruck einstellt und welche Quellprozesse dabei ablaufen.

Ein Boden, der viel Wasser in den Porenraum einlagern kann und selbst aber einen geringen Tonanteil aufweist, der quellfähig ist, zeigt im anschließenden Quellhebungsversuch kaum noch Reaktionen. So wurde bei den Versuchen am dunkelroten Mergel im UB I und UB II innerhalb von nur 1 h bereits

ca. 95 % des maximal erreichbaren Quelldruckes erreicht. Es wird vermutet, dass diese sehr schnelle Reaktion nicht durch osmotisches Quellen, sondern durch die Wasseraufnahme in den Porenraum verbunden mit einer Aufweitung dessen begründet wird. Denn die anschließenden Quelldehnungen fielen trotz eines Smektit-Anteils von 20 % in der Tonfraktion so gering aus, dass sich ein länger andauerndes Quellen von Tonmineralen bei dem grobkörnigen Material nicht schädlich auswirken würde.

Damit osmotisches Quellen stattfinden kann, müssen einerseits ausreichend reaktionsfähige Tonminerale bei entsprechend höherem Feinkornanteil vorliegen. Andererseits muss der Porenraum so groß sein, dass genügend Wasser zum Quellen aufgenommen werden kann und wiederum so klein, dass sich durch Anlagern von Wasser an reaktionsfähigen Tonmineralen ein Quelldruck aufbauen kann, weil das Quellen durch den gering verfügbaren Porenraum behindert wird. Ist der Porenraum zu klein, und die Durchlässigkeit des Bodens zu gering, wird nicht genügend Wasser aufgenommen und die Quelldruckentwicklung fällt entsprechend gering aus. Sind dabei jedoch ausreichend Tonminerale vorhanden, kann auch bei geringer Wassersättigung ein hoher Quelldruck entstehen. Ist der Porenraum deutlich größer als 12 % kann zwar mehr Wasser aufgenommen werden, jedoch findet das Quellen relativ ungehindert im Porenraum statt, ohne dass dabei eine signifikante Volumenvergrößerung auftritt. Dies zeigte sich z. B: beim Tonmergelstein im UB I ($n_{a,0} = 16,5$ %), der gegenüber UB II ($n_{a,0} = 8,9$ %) einen geringen Quelldruck ausbildete. Bereits nach ca. 2 h war der Sättigungsvorgang anscheinend abgeschlossen und der geringere Quelldruck von 30 kPa erreicht.

Ein Tonquellen zeigte sich dagegen bei Proben, die auch noch nach 2 bis 4 Tagen einen deutlichen Anstieg der Quelldehnungen verzeichneten, also bei Proben wie Opalinustonstein, Feuerletten-Zersatz und der tertiäre Ton. Je geringer dabei die Durchlässigkeit ist, desto länger dauert die Wasseraufnahme und damit der Quellvorgang bis auch die feinsten Mikroporen vom Wasser erreicht werden. Die Zugänglichkeit quellfähiger Tonminerale spielt dabei auch eine Rolle. Durch den Zerfall können geschwächte diagenetische Verbindungen aufgebrochen werden, wodurch mehr Tonminerale zur Verfügung stehen, an denen sich Wasser anlagern

kann. Insbesondere diese Proben, die ihren Quelldruck erst langsam aufbauen, und die Quelldehnungen über lange Zeit sukzessive erhöhen, sind langfristig auch hinsichtlich von langanhaltenden Verformungen schwer einzuschätzen und sollten daher eher in unempfindlichen Bauwerken wie Lärmschutzwällen verbaut werden.

Die höchsten Quelldrücke bis 100 MPa werden beim innerkristallinen Quellen erzeugt. Dabei werden die Kationen der Zwischenschichten der Tonminerale von Wasser umlagert. Dies ist aber nur bei kurzer Distanz ($< 20 \text{ \AA}$) zwischen den Tonmineralen möglich und in der Regel vor der Diagenese abgeschlossen. Da hier auch nicht durch den Bentonit derart hohe Quelldrücke erreicht wurden, scheint das innerkristalline Quellen nicht ursächlich gewesen zu sein. Wahrscheinliche Ursache für die Quellreaktionen der Böden und Gesteine ist das osmotische Quellen, dass auf deutlich längerer Distanz bis zu Schichtabständen von ca. 5000 \AA stattfinden kann. Die Quelldrücke fallen jedoch dadurch deutlich geringer aus. Durch die kontinuierliche Wassereinlagerung während der Sättigung kann es zu einer Aufweitung der zugänglichen Elementarschichten der Tonminerale gekommen sein. Werden geschwächte diagenetische Verbindungen aufgerissen, können diese Elementarschichten bis zum Konzentrationsausgleich zwischen den an der Tonoberfläche negativ geladenen Ionen und der Elektrolytkonzentration im Porenwasser auseinandergetrieben werden. Dieses osmotische Quellen kann auch bei nicht quellfähigen Tonmineralen stattfinden, wenn auch in geringerem Ausmaß als bei quellfähigen Tonmineralen.

Das Ausmaß des osmotischen Quellens hängt von vielen Faktoren ab, v.a. von den Eigenschaften der Tonminerale, insbesondere von der spezifischen Tonmineraloberfläche und deren Ladung. Je größer die für Wasser zugängliche innere und äußere Oberfläche der Tonminerale ist, desto höher ist auch ihre Quellfähigkeit. Die spezifische Oberfläche (m^2/g) erhöht sich mit abnehmender Korngröße, zunehmendem Anteil an Schichtsilicaten sowie quellfähigen Bestandteilen. Auch die bereits beschriebene Größe, Form und das Durchmesser/Dicken-Verhältnis der Minerale bestimmen die Ionenkonzentration und Ladungsverteilung und damit die osmotische Quellfähigkeit. Auch die Art und Wertigkeit der Zwischenschichtkationen beeinflussen das osmotische Quellen. Beispielsweise begünstigen Kationen mit geringer Hydratationsenergie und nicht zu großen Ionenradien das osmotische Quellen.

Zusammenfassend lässt sich Folgendes zu den Einbaubedingungen und Verwitterungszuständen, die letztlich durch die Proctordichte und den Feinkornanteil charakterisiert werden, sagen. Je höher der Feinkornanteil eines Bodens ist, also demnach auch je höher sein Verwitterungszustand, desto höher ist der Quelldruck. Dies hängt mit der größeren spezifischen Oberfläche der Tonminerale zusammen, an der Wasser angelagert werden kann. Um also Quellhebungen zu vermeiden, ist eine Vorverwitterung nicht zielführend, wenn dabei der Feinkornanteil erhöht wird. Analog zu den Kompressionsversuchen hat sich außerdem bestätigt, dass der Einbau im Proctoroptimum und damit ein geringer Luftporenanteil $n_a < 6 \text{ Vol.-%}$ wegen geringerer Quellhebungen zu bevorzugen ist.

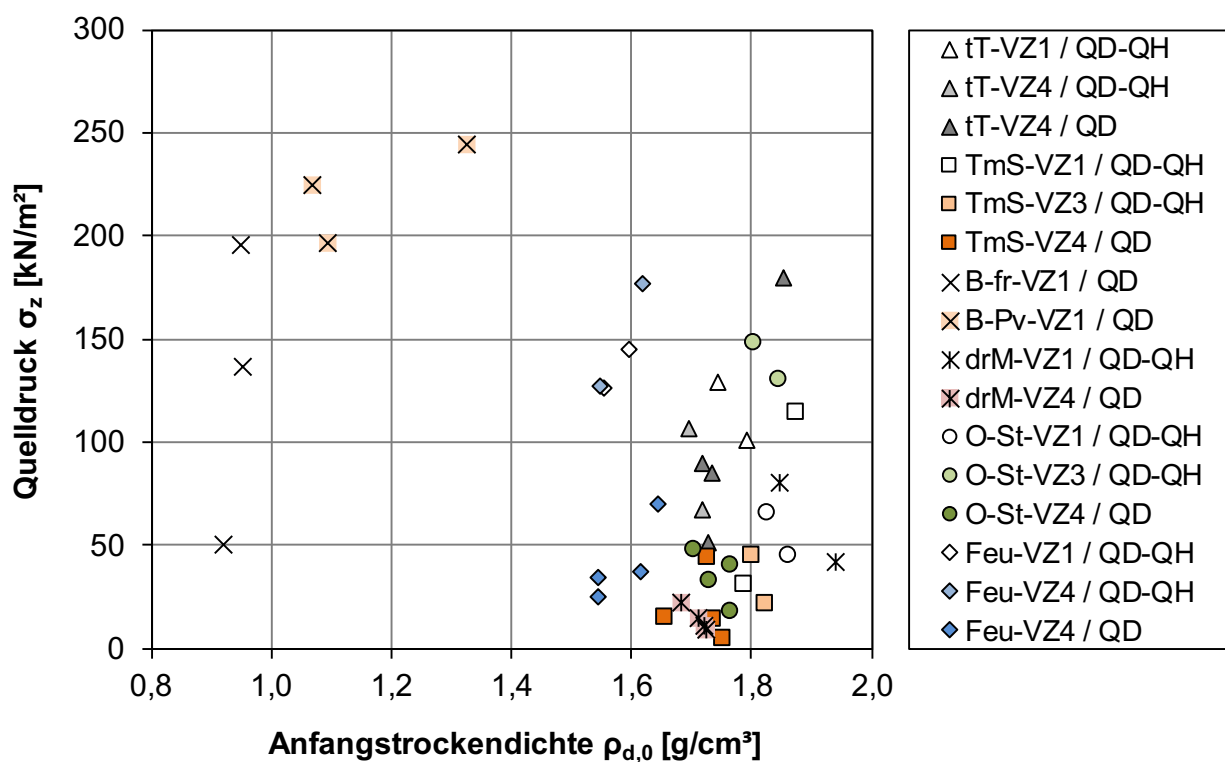


Bild 7.165: Quelldruck in Abhängigkeit von der Anfangstrockendichte für alle Böden und Verwitterungszustände

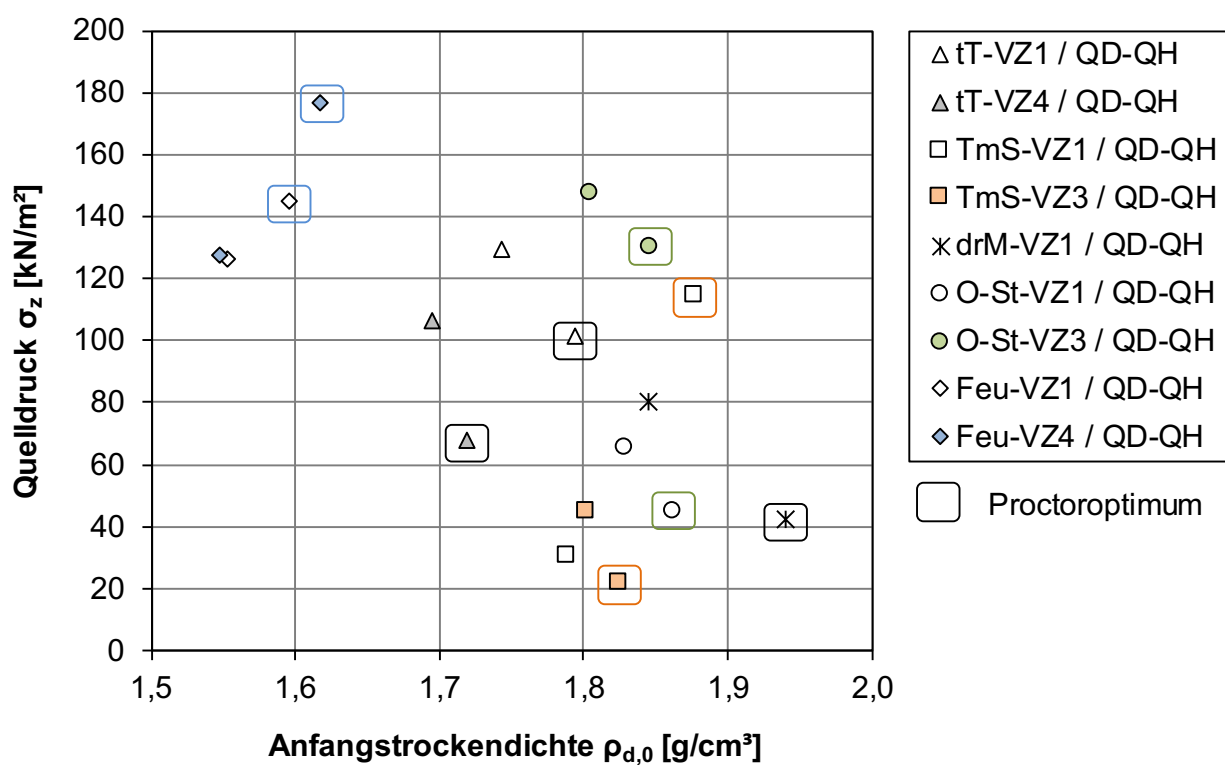


Bild 7.166: Quelldruck in Abhängigkeit von der Anfangstrockendichte für die kombinierten Versuche QD-QH

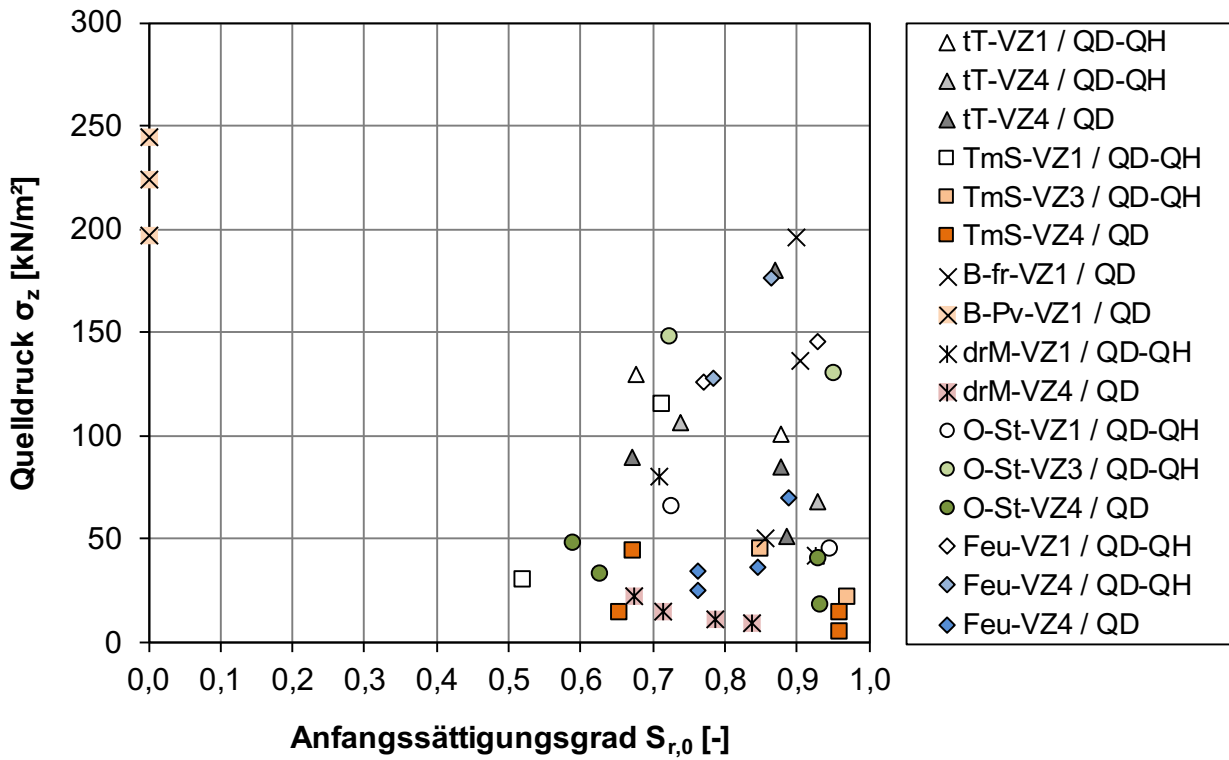


Bild 7.167: Quelldruck in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad für alle Böden und Verwitterungszustände

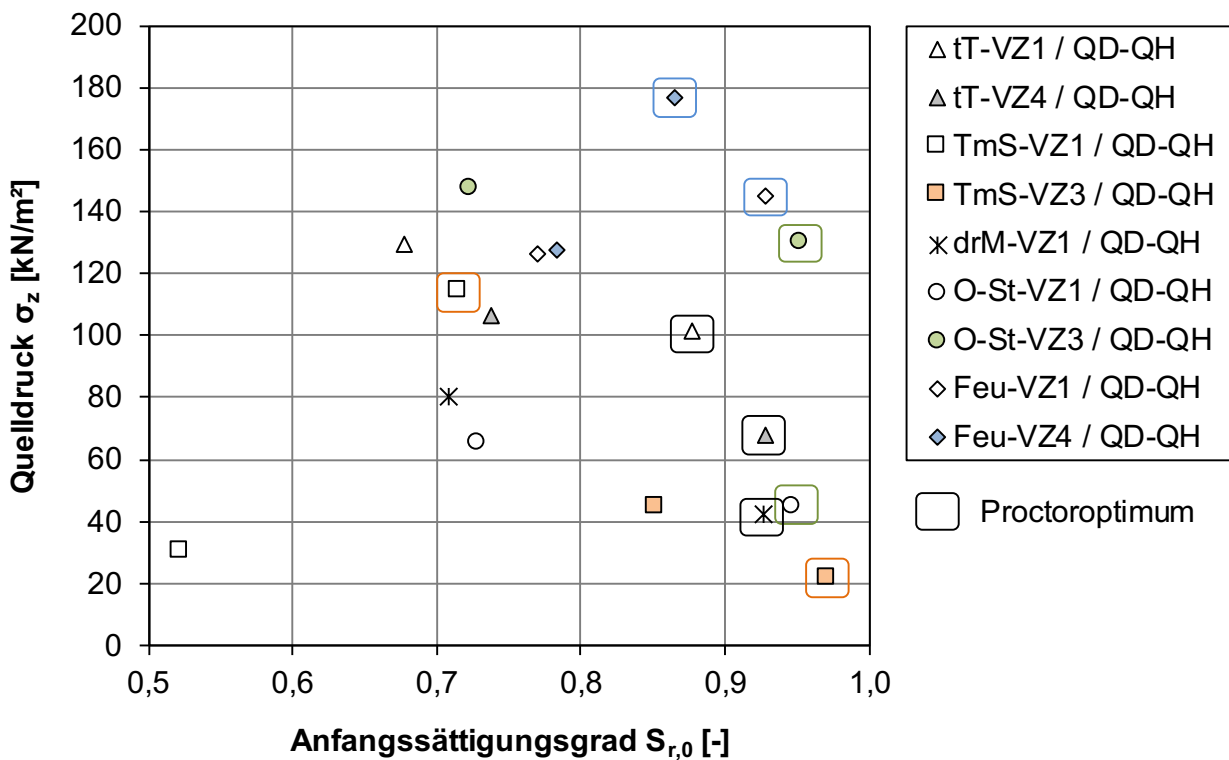


Bild 7.168: Quelldruck in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad für die kombinierten Versuche QD-QH

7.8.4 Quelldehnung in Abhängigkeit des Quelldruckes

Bei den kombinierten Versuchen QD-QH konnte festgestellt werden, dass mit zunehmenden Quelldruck auch die Quelldehnungen linear zunehmen (Bild 7.169), wobei der Quelldruck, wie bereits im Kapitel zuvor ausführlich beschrieben, maßgeblich von den beiden Faktoren Einbau- und Verwitterungszustand abhängt. Folglich ist eine Abschätzung von resultierenden Quelldehnungen aus dem Quelldruckversuch möglich.

Im Allgemeinen zeigten Proben, die Quelldrücke $\sigma < 100$ kPa entwickeln, auch geringere Quelldehnungen. Für Proben mit Quelldrücken $\sigma < 100$ kPa könnten deshalb in der Praxis weiterführende Quelldehnungsversuche entfallen. Proben, die höhere Quelldrücke $\sigma > 100$ kPa entwickeln, zeigten auch entsprechend höhere Quelldehnungen $> 1,5$ % und sollten daher hinsichtlich ihrer Quelldehnungen untersucht werden. Dies traf auf Bodengruppen mit einem höheren Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) > 15 M.-% und entsprechend geringerer Proctordichte $\rho_{Pr} < 1,90$ g/cm, einer Plastizitätszahl $I_P > 21$ % sowie bei Böden, die schnell zu einem feinkörnigen Boden zerfallen können ($I_{d2} < 60\%$), zu. Somit können aus den entsprechenden klassifizierenden Untersuchungen in Verbindung mit einem Quelldruckversuch Hinweise auf das Quellverhalten gewonnen werden.

Die Höhe der Quelldehnung $\Delta\varepsilon_{z,q}$ hängt dann noch von der Spannung und der Versuchsart ab. Mit der Quelldehnung $\Delta\varepsilon_{z,q}$ ist die Differenz zwischen der Quellhebung für den maximalen Quelldruck und der Quellhebung für die minimal aufgebrachten Spannung gemeint (Bild 7.170). Zwischen diesen beiden Spannungen wird auch der Quellparameter $K_{z,q}$ ausgewertet (siehe Kapitel 5.5.3). Da näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen dem Quelldruck und der Quelldehnung (Bild 7.169) besteht, kann schließlich geschlussfolgert werden,

dass mit zunehmendem Quelldruck auch eine Zunahme des Quellparameters $K_{z,q}$ (Bild 7.171) zu erkennen ist.

Es soll abschließend noch darauf hingewiesen werden, dass die Erstellung einer mathematischen Korrelation zwischen den Einbaubedingungen, Verwitterungszustand (Materialeigenschaften, Proctordichte, Feinkornanteil) und dem Quelldruck bzw. Quelldehnungen aufgrund der oft starken Heterogenität der veränderlich festen Gesteine nicht abgeleitet werden konnte. Außerdem ist zu beachten, dass sich z.B. die Form und Art der Tonminerale, die entscheidend für den Quellprozess sind, nur halbquantitativ erfassen lassen. Die Vernetzung des Porenraums sowie die mineralischen Bindungskräfte, die entscheidend für den Zerfall sind, lassen sich nicht bestimmen. Der Verwitterungszustand lässt sich nur durch Zerfallsversuche mit Ermittlung der sich ändernden Proctorkurve sowie durch die Änderung der Materialeigenschaften, in dem Fall nur durch die Änderung des Massenanteils < 2 mm bzw. $< 0,063$ mm in Bezug auf das Ausgangsmaterial, bestimmen. Dass allerdings die Bestimmung der Korngrößenverteilung bereits stark fehlerbehaftet und die Heterogenität der veränderlich festen Gesteine dabei oft sehr hoch ist, macht die Einbindung eines charakterisierenden Parameters auf Grundlage der Kornverteilung in einer mathematischen Beziehung schwierig. Parameter wie die Plastizitätszahl sind auch nicht zielführend, da diese sich nur auf den Feinkornanteil beziehen und diese sich während einer Verwitterung nicht maßgeblich ändern, sondern nur die Menge an Feinkornanteil. Damit kann auch nicht erfasst werden, wieviel mehr quellfähige Tonminerale durch die Verwitterung zugänglich werden, oder ob dieses Phänomen überhaupt eine zutreffende Erklärung sein kann. Hinzu kommt, dass die Untersuchungen dem Anwendungsfall anzupassen sind und daher auch die vorherrschenden Spannungen entscheidend für eine Abschätzung des Quelldruckes bzw. der Quelldehnungen sind.

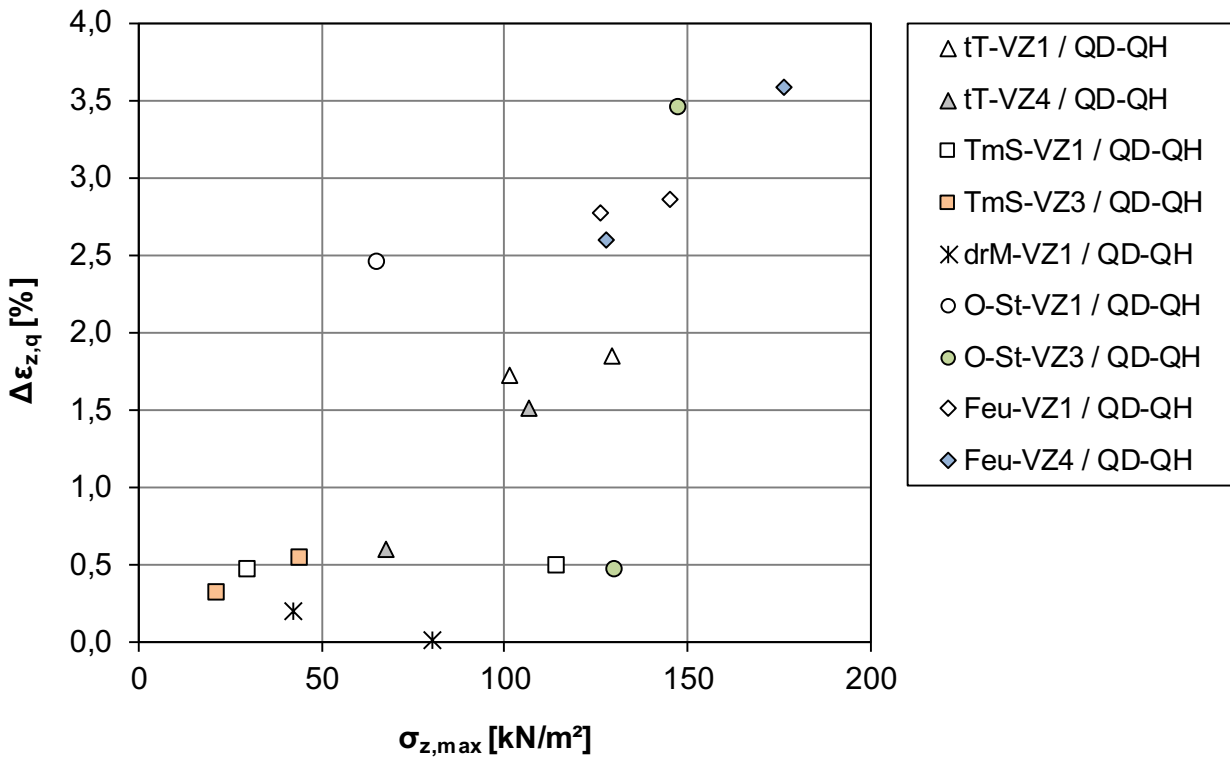


Bild 7.169: Quelldehnung $\Delta\epsilon_{z,q}$ in Abhängigkeit vom Quelldruck für die kombinierten Versuche QD-QH

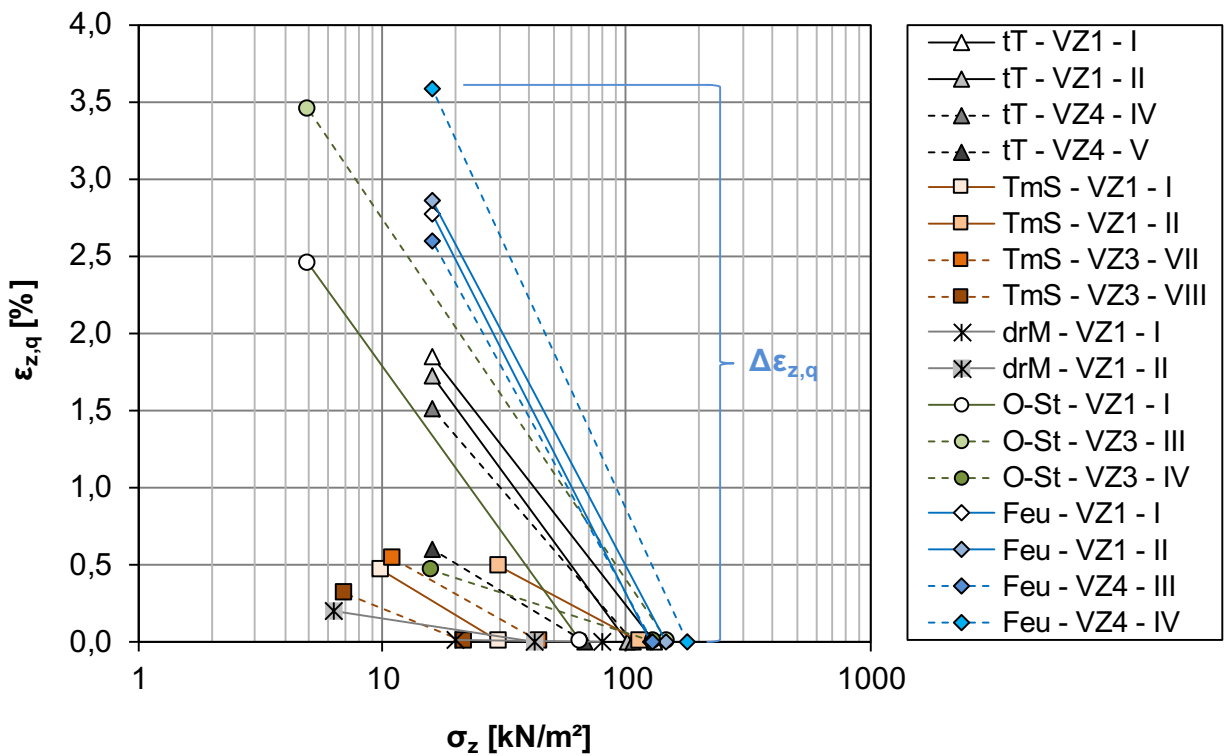


Bild 7.170: Quelldehnung $\epsilon_{z,q}$ für den Quelldruck und für die aufgebrauchte minimale Spannung für die kombinierten Versuche QD-QH

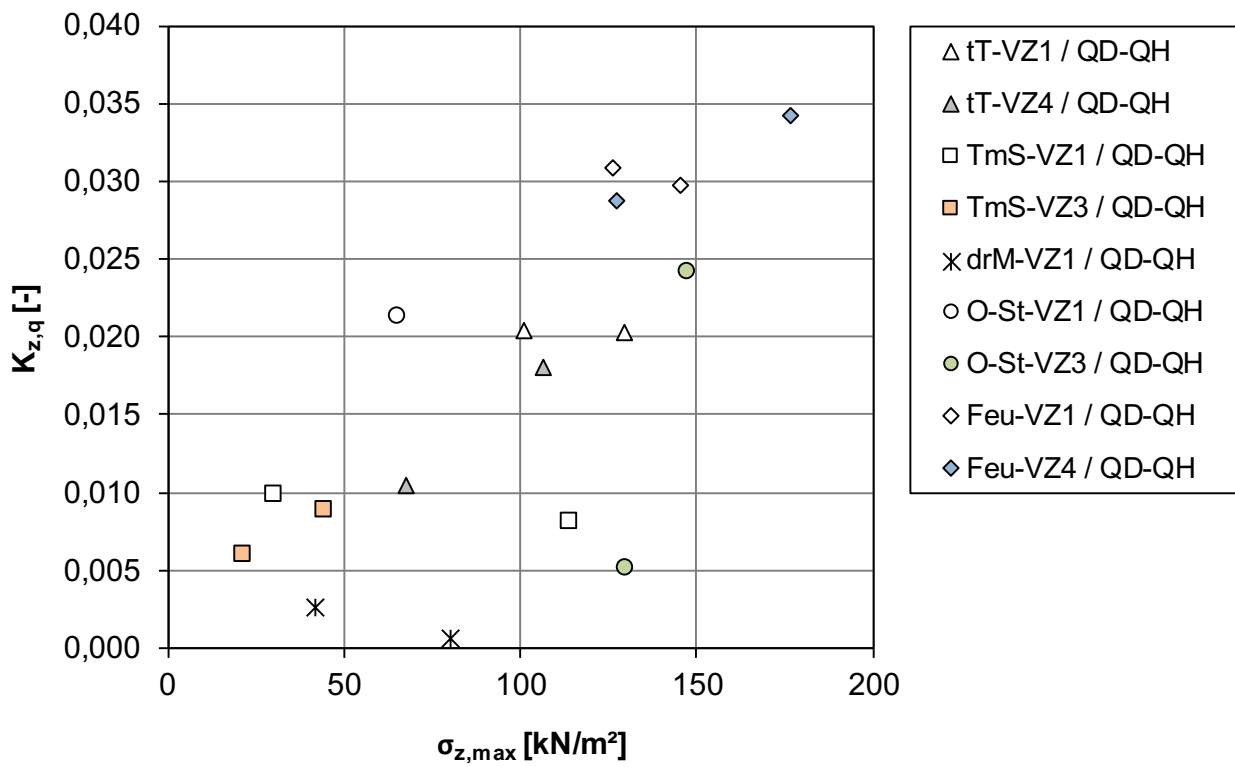


Bild 7.171: Quellparameter in Abhängigkeit vom Quelldruck für die kombinierten Versuche QD-QH

8 Ergebnisse der Trocken-Befeuchtungs-Wechsel im verdichteten Zustand

Zur Untersuchung des Einflusses von TBW im verdichteten Zustand wurden zwei Böden ausgewählt, die unterschiedlich starke Quellfähigkeiten besaßen. Es wurden der weniger quellfähige Tonmergelstein im UB II, VZ 1 (Bild 8.1) sowie der quellfähigere Opalinustonstein im UB III, VZ 3 (Bild 8.2) gewählt. An beiden Böden wurden sechs TBW unter einer Spannung von 50 kN/m² durchgeführt. Mit der geringeren Spannung sollte ein oberflächennaher Einbau simuliert werden. Da der Tonmergelstein weniger quellfähig war, musste eine Spannung gewählt werden, bei der Quellhebungen auftreten werden. Um den Unterschied der Ergebnisse in den Diagrammen besser zu verdeutlichen, wurde zudem die Skala für die Quelldehnungen beim Tonmergelstein (Bild 8.1) an die Skala des Opalinustonsteins angeglichen (Bild 8.2).

Im Allgemeinen zeigte sich bei beiden Böden eine Sackung durch die Trocknungsphase sowie eine Hebung der Probe während der Wasserzugabe. Betragsmäßig waren die Verformungen beim quellfähigeren Opalinustonstein größer und schwankten zwischen -1,6 % und 2,0 % sowie beim Tonmergelstein nur zwischen -1,2 % und 0,9 %. Eine Zu-

nahme der Endquellungen war beim Tonmergelstein zu verzeichnen, wobei der Betrag der Änderungen mit zunehmendem Zyklus auch abnahm. Im 6. Zyklus traten kaum noch Hebungen oder Sackungen auf. Auch beim Opalinustonstein waren geringfügige Änderungen mit zunehmendem TBW zu erkennen, aber in deutlich geringerem Ausmaß wie beim Tonmergelstein. Bis zur 2. Befeuchtung nahm die Endquellung noch zu, fiel dann aber bis zur 6. Befeuchtung ab.

Auch der Ausbau der Probe nach fast drei Monate ging relativ leicht. Eine Verdichtung der Probe wie erwartet wurde, hat augenscheinlich nicht stattgefunden. Aber auch bei den Quellversuchen am Opalinustonstein zeigte sich, dass Quelldehnungen sehr lange benötigen zum Abklingen.

Eine Änderung der Materialzusammensetzung im verdichteten Zustand innerhalb von sechs TBW schien nicht nennenswert stattzufinden. Das Ausmaß der Schwankungen hängt mit der Reaktionsfähigkeit der Böden zusammen. Quellfähigere Böden zeigen auch höhere Sackungen und Quellhebungen, wobei dabei nicht immer eine Zu- oder Abnahme verbunden sein muss. Eine Prognose für das Langzeitverhalten lässt sich auf Grundlage dieser Einzelversuche nicht geben. Es wird nur vermutet, dass ein signifikanter Zerfall im eingebauten Zustand nicht stattfinden kann.

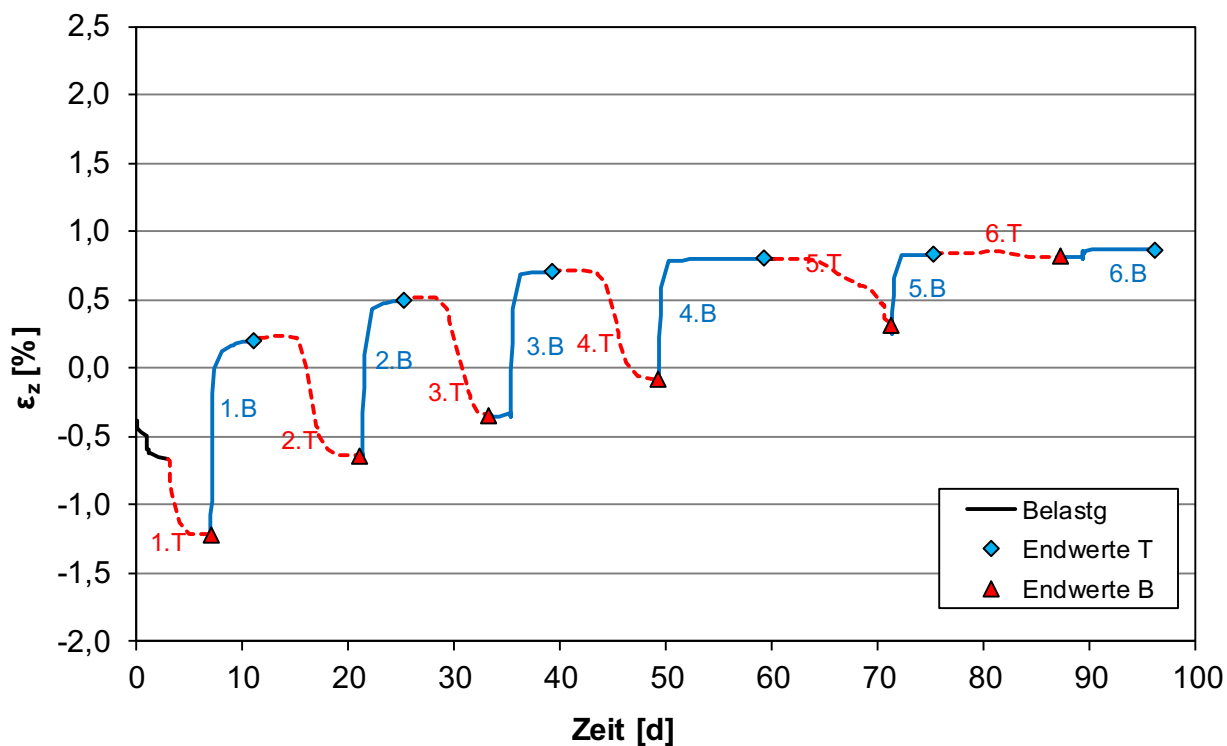


Bild 8.1: Trocken-Befeuchtungs-Wechsel im verdichteten Zustand bei 50 kPa, Tonmergelstein, VZ 1, UB II

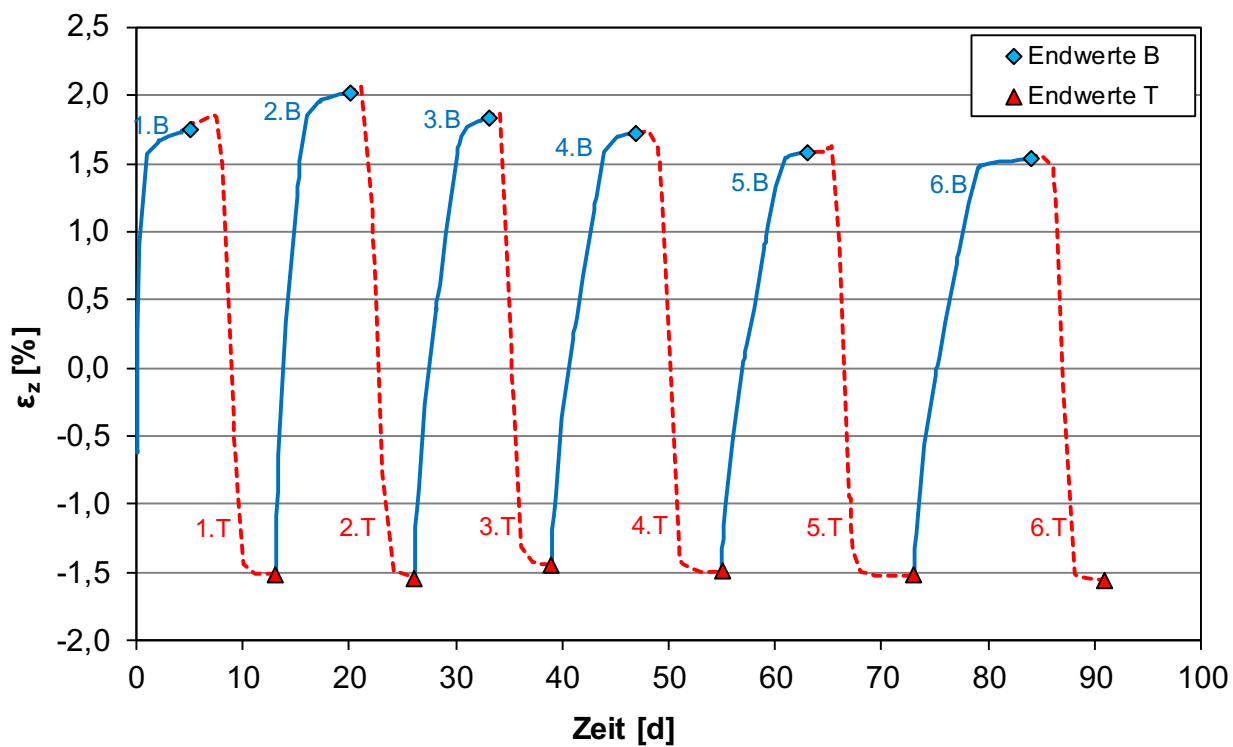


Bild 8.2: Trocken-Befeuchtungs-Wechsel im verdichteten Zustand bei 50 kPa, Opalinustonstein, VZ 3, UB III

9 Folgerungen und Empfehlungen

9.1 Allgemeines

In den folgenden Kapiteln werden die Besonderheiten veränderlich fester Gesteine bei deren Verwendung als Erdbaustoff, die sich im Rahmen vorhergehender Untersuchungen (BAUMGÄRTEL et. al., 2006, MÖLLER und HEYER, 2014) sowie aus der aktuellen Forschungsarbeit ergeben haben, vorgestellt. Bereits bei der Klassifikation ergeben sich besondere Anforderungen an die Durchführung und Interpretation der entsprechenden klassifizierenden sowie weiteren Laborversuchen (siehe Kapitel 9.2 und 9.3). Die sich darauf basierend ergebenden Anforderungen hinsichtlich ihrer Verwendung als Erdbaustoff werden im Kapitel 9.4 erläutert. Eine zusammenfassende Darstellung der Folgerungen und Empfehlungen erfolgt in Kapitel 9.5 zum einen für die Eignungsuntersuchungen an veränderlich festen Gesteinen in Tab. 9.1 sowie für deren Verwendung als Erdbaustoff in Tab. 9.2.

9.2 Klassifizierung veränderlich fester Gesteine

Bei veränderlich festen Gesteinen sind einige Besonderheiten bei der Klassifizierung zu beachten. Dazu zählt als erster wichtiger Schritt das Erkennen der Veränderlichkeit bzw. veränderlichen Festigkeit. Da eine Veränderlichkeit aufgrund von wechselnden Witterungsvorgängen aus Trocknung und Befeuchtung resultiert und daher ein Zerfallsvorgang im Rahmen der Baumaßnahme innerhalb kurzer Zeit stattfinden kann, sollte dieser Zerfallsvorgang auch erkannt und bestimmt werden. Dazu sind einfache Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel erforderlich. Dafür gibt es zwar keine normierte oder geregelte Vorgehensweise, jedoch ist ein mögliches Vorgehen beispielhaft in dieser Arbeit beschrieben worden und wurde auch in den vorhergehenden Untersuchungen (BAUMGÄRTEL et. al., 2006, MÖLLER und HEYER, 2014) angewendet. Im Allgemeinen genügen bereits drei bis fünf Wechsel aus Trocknung und Befeuchtung um einen Zerfall hinsichtlich seiner Art und Geschwindigkeit qualitativ festzustellen. Das Beurteilungsschema nach

SANTI ist dabei sehr hilfreich, um das Zerfallsprodukt zu bewerten. Insbesondere kann die Erhöhung von Feinanteilen wie Ton und Schluff besser beobachtet werden als bei einem klassifizierenden Siebtrommelversuch. Wenn beispielsweise in situ ein Verdacht einer Veränderlichkeit besteht und das Ergebnis kurzfristig benötigt wird, können bereits vor Ort drei und mehr handgroße Bruchstücke durch Zugabe von Wasser befeuchtet oder besser in Wasser gelagert werden und durch Sonneneinwirkung hinter einer Fensterfläche getrocknet werden, um vorab eine Veränderlichkeit zu erfassen und die folgenden Untersuchungen und Besonderheiten an die Erdbauprozesse anzupassen.

Für die Klassifizierung der Veränderlichkeit hat sich bei allen Forschungsprojekten der Siebtrommelversuch nach Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 der DGGT anhand des Zerfallsbeständigkeitsindex nach zwei Zyklen I_{d2} bewährt. Die Ergebnisse sind vergleichbar, reproduzierbar und quantifizierbar. Aus diesem Grund wäre die grundsätzliche Verwendung dieses Versuches zur Beschreibung der Verwitterungsempfindlichkeit und zum Erkennen einer möglichen Entfestigungsneigung veränderlich fester Gesteine weiterhin zu empfehlen. Sind die handgroßen Bruchstücke für den Siebtrommelversuch oder ein Siebtrommelgerät nicht vorhanden, kann auch der alternative Trocknungs-Befeuchtungs-Versuch nach NICKMANN durchgeführt werden. Die Versuche sind zwar aufwändiger, kommen dafür aber mit den üblichen Standardlaborgeräten wie einem Trocknungsofen und Sieben aus. Die Versuchsdurchführungen und Auswertungen beider Versuchsvarianten wurden in Kapitel 5.3 erläutert.

Neben dem speziellen Erkennen und Klassifizieren der Veränderlichkeit sind v.a. bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung weitere Besonderheiten zu beachten. Insbesondere hängt die Aussagekraft der Korngrößenverteilung aufgrund der Wasserempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine von der Art der Versuchsdurchführung und damit von der Art und Dauer der Wassereinwirkung ab. In Verbindung mit den Plastizitätsgrenzen können sich völlig unterschiedliche Bodenarten nach DIN EN ISO 14688-1 bzw. Bodengruppen nach DIN 18196 ergeben. So kann sich beispielsweise ein veränderlich festes Gestein nach einer Trocken-

siebung als GW ergeben, während es sich nach einer Nasssiebung als ST* oder bei noch stärkerer Verfeinerung als TM ergibt. Damit werden dann auch die darauf basierenden Anforderungen (z. B. hinsichtlich der Einbauvorgaben) falsch zugeordnet. Nichtsdestotrotz kann eben genau diese Bandbreite zwischen Trocken- und Nasssiebung bzw. Sedimentationsanalyse einen Hinweis auf die Empfindlichkeit des Materials gegenüber Wassergehaltsänderungen und damit auf die Veränderlichkeit liefern. Ist eine Kornverteilungskurve erforderlich, sollte sie immer am einzubauenden Material bestimmt werden, da Veränderungen während der Erdbauprozesse bis zum Einbau nicht ausgeschlossen werden können, sofern das Material nicht geschützt vor Witterungseinflüssen gelagert wird. Bei einer Trockensiebung werden anhaftende Feinkornanteile nicht erfasst, weswegen eine schonende Nasssiebung trotz der Veränderungen zu bevorzugen ist. Als Grundlage zur Beschreibung nach DIN EN ISO 14688-1 bzw. Einteilung in Bodengruppen nach DIN 18196 sollte die Korngrößenverteilung allerdings in keinem Fall dienen. Vielmehr sollten grundsätzlich veränderlich feste Gesteine als eigenständige Bodengruppe mit besonderen Eigenschaften und Anforderungen betrachtet werden.

Eine besondere Einschränkung wie bei der Korngrößenverteilung hat sich bei der Bestimmung der Plastizität des Feinkornanteils $< 0,4$ mm für veränderlich feste Gesteine nicht ergeben. Eine ausschlaggebende Änderung der Plastizität mit zunehmendem Zerfall konnte bereits bei vorhergehenden Untersuchungen von MÖLLER und HEYER (2014) nicht erkannt werden. Was sich allerdings mit zunehmendem Zerfall ändert, ist die Menge an Feinkorn, wodurch aus einem grobkörnigen ein feinkörniges Material entstehen kann und sich dadurch die prägenden Materialeigenschaften vom Grob- zum Feinkorn verschieben. Dieser Anteil des Feinkorns bezogen auf die Gesamtmasse ist zudem entscheidend für die Einschätzung des Quellpotentials als die Plastizitätszahl allein.

Sowohl die Plastizitätsgrenzen als auch die Korngrößenverteilung sind zur Einschätzung eines Quellpotentials nicht ausreichend. Zwar hat sich grundsätzlich gezeigt, dass je feinkörniger ein Boden ist, desto höher seine Plastizitätszahl und dadurch bedingt auch sein Quellpotential ist. Aller-

dings sind bei Verwendung veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff andere Randbedingungen wie die Einbaubedingungen und der Verwitterungszustand entscheidende Faktoren, die Einfluss auf die Höhe der Quelldrücke und damit auch Quelldehnungen nehmen. Näheres wird im anschließenden Kapitel 9.3 erläutert.

Die Wasseraufnahmefähigkeit ist abhängig vom Feinkornanteil und korreliert damit auch mit der Plastizität. Je feinkörniger ein Boden und damit je höher auch seine spezifische Oberfläche ist, umso höher ist tendenziell seine Plastizität und damit auch seine Wasseraufnahmefähigkeit.

Eine Tonmineralanalyse des Kornanteils < 2 μm zur Erfassung von Art und Anteil quellfähiger Tonminerale ist zusätzlich anwendungsfallbezogen zielführend, wenn sich aus der nassgesiebten Korngrößenverteilung ein Boden mit einem Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) > 15 M.-% sowie ein niedrig zerfallsbeständiger Boden mit $I_{d2} < 60$ % ergeben hat und die zu erwartenden Quelldrücke bei $\sigma > 100$ kPa liegen.

9.3 Laborversuche an veränderlich festen Gesteinen

Um das veränderlich feste Gestein als Erdbaustoff wieder fachgerecht einzubauen und zu verdichten, sind entsprechende Laborversuche vorzusehen. Art und Umfang der Laborversuche hängen vom Anwendungsfall und deren Randbedingungen ab. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass das veränderlich feste Gestein als Dammbaustoff verwendet werden soll. Für abweichende Sonderfälle sind weiterführende Versuche erforderlich. In jedem Anwendungsfall ist bei der Durchführung und Auswertung der Versuche einerseits die Zerfallsempfindlichkeit der Gesteine bei Wassereinwirkung zu beachten sowie andererseits, dass Materialänderungen während der Erdbauprozesse auftreten können und daher Untersuchungen am Verwitterungszustand des einzubauenden Materials durchgeführt werden sollten.

Analog zu den Ergebnissen der klassifizierenden Untersuchungen können auch die Versuche zur Verdichtbarkeit teilweise stark durch Materialstreu-

ungen beeinflusst werden, die durch die Zusammensetzung aber auch der Wasserempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bedingt werden. Dieses heterogene Verhalten kann dazu führen, dass sich keine einheitliche Proctorkurve abbilden lässt, sondern vielmehr nur eine Bandbreite möglicher Proctorkurven. Um dieses Proctorband zu erfassen, sind daher in der Regel mehr als fünf Einzelversuche notwendig. Trotz der Variabilität in der Verdichtbarkeit veränderlich fester Gesteine ist die Ermittlung einer Proctorkurve jedoch zur Festlegung der Einbauanforderungen erforderlich. Außerdem ist die Proctorkurve dann zwingend am einzubauenden Material durchzuführen, da bereits ein bis zwei Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel entscheidende Materialveränderungen bewirken können. Die Einbauvorgaben sollten sich bei einem Proctorband an den schärferen Einbaubedingungen der oberen Grenzkurve (bzw. geringeren Luftporenanteilen) orientieren. Insbesondere die Forschungsergebnisse von MÖLLER und HEYER (2014) haben gezeigt, dass zur Reduzierung der Verformungen eine Begrenzung des Luftporenanteils auf $n_a < 6$ Vol.-% als erforderlich angesehen wird.

Hinsichtlich spannungsabhängiger Verformungen können bei geringer Auflast durch Wasserzutritt Quelldrücke und daraus resultierende Quelldehnungen auftreten. In den in dieser Forschungsarbeit durchgeführten Quellversuchen hat sich zum einen gezeigt, dass das Abschätzen eines Quellpotentials allein auf Grundlage der klassifizierenden Untersuchungen nicht möglich ist. Zum anderen konnte festgestellt werden, dass mit zunehmenden Quelldruck auch die Quelldehnungen linear zunehmen. Dabei hängt der Quelldruck maßgeblich von den beiden Faktoren Einbau- und Verwitterungszustand ab. Folglich ist eine Abschätzung von resultierenden Quelldehnungen aus dem Quelldruckversuch möglich.

Ob überhaupt Quellversuche erforderlich sind, hängt vom Material bzw. vom Verwitterungszustand ab. Alle im Rahmen dieser Forschungsarbeit untersuchten Böden zeigten zunächst einen Zerfallsbeständigkeitsindex mit $I_{d2} < 60$ % (Einstufung als „niedrig“ zerfallsbeständig). Ihre Materialunterschiede lagen v.a. in der Proctordichte und dem Feinkornanteil, der vom Verwitterungszustand des Bodens abhängt. Proben, die Quelldrücke von $\sigma < 100$ kPa entwickelten, zeigten auch geringe

Quelldehnungen. Dazu zählten die grobkörnigeren Böden mit einer Proctordichte $\rho_{Pr} > 1,90$ g/cm und damit auch geringeren Plastizitätszahl $I_P < 21$ % sowie einen Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) < 15 M.-% bei der nass gesiebten Korngrößenverteilung. Dies betraf den Tonmergelstein und dunkelroten Mergel im Ausgangszustand (VZ 1).

Im Umkehrschluss dazu bedeutet dies, dass bei Bodengruppen mit einem höheren Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) > 15 M.-%, das vermutlich zu einer geringeren Proctordichte $\rho_{Pr} < 1,90$ g/cm sowie einer höheren Plastizitätszahl $I_P > 21$ % führt sowie bei Böden, die schnell zu einem feinkörnigen Boden zerfallen können ($I_{d2} < 60\%$) ein mögliches Quellpotential vorliegen kann. Hier sollten in jedem Fall zunächst Quellruckversuche durchgeführt werden. Liegen zu den beschriebenen Grenzen der Klassifikationsparameter die maximalen Quelldrücke $\sigma > 100$ kPa, sind zusätzlich Quelldehnungsversuche und eine Tonmineralanalyse zur Erfassung quellfähiger Tonminerale zu ergänzen.

Zur Beurteilung weiterer spannungsabhängiger Verformungen des Erdbauwerks (Sackungen, Hebungen) können anwendungsbezogen und wenn Quelldrücke $\sigma > 100$ kPa ermittelt wurden, Kompressionsversuche erforderlich sein. Der Versuchsablauf hinsichtlich einer Sättigung (bei hoher oder geringer Spannung) sowie die Belastungs- und Entlastungsstufen sind dem Anwendungsfall anzupassen. Aufgrund der gemischtkörnigen Struktur veränderlich fester Gesteine sind die Versuche in größeren Ödometern mit Durchmesser $d > 25$ cm durchzuführen.

9.4 Verwendung veränderlich fester Gesteine

Grundsätzlich hat sich in den bisherigen Forschungen von BAUMGÄRTEL et. al. (2006), MÖLLER und HEYER (2014) sowie den aktuellen Untersuchungen gezeigt, dass eine Verwendung veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff grundsätzlich möglich ist. Aufgrund ihrer speziellen bodenmechanischen Eigenschaften und ihrer Zerfallsneigung bedarf es jedoch einiger Anpassungen, um sie in dauerhaften Erdbauwerken einzusetzen.

Hinsichtlich der Einbauvorgaben ist, wie bereits erwähnt, ein Luftporenanteil von $n_a < 6$ Vol.-% anzustreben. Diese Anforderung wird jedoch aktuell in den ZTV E-StB 17 nur als Empfehlung ausgesprochen. Bei höheren Luftporenanteilen, insbesondere bei der dort einzuhaltenden Grenze von $n_a < 12$ Vol.-% können jedoch schädliche Sackungen und Quellhebungen trotz ordnungsgemäßen Einbau nicht ausgeschlossen werden. Dagegen bedeuten wiederum noch geringere Luftporenanteile und höhere Dichten nach Vorschlägen von BAUMGÄRTEL et. al. (2006) einen deutlich größeren wirtschaftlichen Aufwand.

Wenn eine anforderungsgerechte Verdichtung auf einen Luftporenanteil von $n_a < 6$ Vol.-% mit dem Ausgangsmaterial nicht möglich ist, muss das veränderlich feste Gesteine aufbereitet werden. Außerdem soll mit Hilfe der Optimierung der Korngrößenzusammensetzung durch Beschränkung des Größtkorndurchmessers auf 2/3 der Schichtdicke größere Porenräume reduziert werden. Dabei ist das Brechen von frischem, erdfeuchten Material einer Vorverwitterung zu bevorzugen. Es hat sich aus den Kompressionsversuchen nach MÖLLER und HEYER (2014) sowie den Quelluntersuchungen dieser Forschungsarbeit gezeigt, dass eine Verwitterung zu einer Erhöhung des Feinkornanteils und damit zu einer Erhöhung der Wasseraufnahme und gleichzeitig zu einer Verschlechterung der bodenmechanischen Eigenschaften führt. Dadurch haben sich sowohl das Sackungs- und Quellpotential bei den Kompressionsversuchen als auch die Quelldrücke und infolge dessen die Quelldehnungen erhöht. Dagegen bewirkt das Brechen von Material eine Verschiebung der Korngrößenverteilung in den Kies- bzw. Sandkornbereich ohne nennenswerte Erhöhung des Feinkornanteils.

Muss dem trockenen Material zur Einhaltung des Luftporenanteils von 6 Vol.-% Wasser zugegeben werden, sind außerdem zum Einmischen und zur Homogenisierung geeignete Geräte (z. B. Fräse) erforderlich. Der höhere Aufwand ist jedoch erforderlich, um eine flächendeckend homogene Wassergehaltsverteilung zu gewährleisten. Vor dem Verdichten ist eine ausreichende Homogenisierungszeit zum Abklingen von Quellhebungen vorzusehen.

Wie bereits erwähnt, ist eine Vorverwitterung zu vermeiden. Ist jedoch eine Zwischenlagerung in exponierter Lage erforderlich, sollten Änderungen des Wassergehaltes (Austrocknung) und eine verwitterungsbedingte Erhöhung des Feinkorns vermieden werden. Zudem konnte bei den Feldversuchen von MÖLLER und HEYER (2014) festgestellt werden, dass sich bei einer unkontrollierten Verwitterung eine inhomogene Materialverteilung bilden kann. Die obere Schicht verwittert zum ungünstig wirkenden Feinkorn, während unterhalb größere Bruchstücke verbleiben. Diese müssten dann trotz Vorverwitterung zerkleinert werden. Erst nach der Zwischenlagerung sind dann die Einbaubedingungen vom Material zu bestimmen.

Um neben einem geringem Porenraum auch eine ausreichend tiefwirkende Verdichtung zu gewährleisten, sollte die Schichtdicke bei leistungsfähigen Verdichtungsgeräten auf 30 cm beschränkt werden. Da veränderlich feste Gesteine sehr wasser- und verwitterungsempfindlich sind, sollten Einbau und Verdichtung bei trockener Witterung erfolgen. Bei Regen können Oberflächen einerseits schnell schmierig werden und aufweichen, wie auch bei den Feldversuchen von MÖLLER und HEYER (2014) beobachtet wurde. Andererseits können sich durch den höheren Wassergehalt die Bodeneigenschaften verschlechtern und die Tragfähigkeit reduzieren. Außerdem führen die höheren Einbauanforderungen dazu, dass die Böden kaum noch Wasser aufnehmen können, so dass diese Problematik relativ schnell eintreten kann. Daher sollten verdichtete Oberflächen vor Witterungseinflüssen z. B. durch Überschüttung geschützt werden. Bereits aufgeweichte Oberflächen müssten dann beispielsweise mit Kalk verbessert werden.

Um eine hohlraumarme Verdichtung zu ermöglichen, muss mit hoher Energie verdichtet werden. Dazu sollten entsprechende Geräte wie Stampffuß- oder Felstrümmerwalzen eingesetzt werden sowie die Oberflächen anschließend mit Hilfe einer Glattmantelwalze geebnet werden.

Aufgrund ihrer Veränderlichkeit und damit oft heterogenen Materialzusammensetzung sind vor dem Einbau veränderlich fester Gesteine Probefelder zur Auswahl und Prüfung der Verdichtungsvorgaben und damit zur Begrenzung der Porenräume zwingend erforderlich. Dazu sind in Abhängigkeit der

Verdichtungsgeräte die Anzahl der Walzenübergänge und Schütthöhen zu wählen und zu prüfen. Beispielsweise kann eine höhere Anzahl der Walzenübergänge in Abhängigkeit von der Gesteinsart und den Einbaubedingungen erforderlich sein. Allerdings kann bei zu hohem Einbauwassergehalt diese höhere Anzahl an Walzenübergängen das Material auch negativ beeinflussen. Insbesondere bei halbfesten bis festen Tönen kann eine Überverdichtung zu Strukturzerstörung und damit zu einem Festigkeitsverlust führen. Aus diesem Grund sind Probefelder unumgänglich.

Aufgrund ihrer Witterungsempfindlichkeit sollten veränderlich feste Gesteine, wie bereits in MÖLLER und HEYER (2014) erwähnt, nicht in den oberen 1 m bis 2 m, d. h. nicht im Böschungsbereich und Planum, eingebaut werden. Zum einen soll damit eine Mindestspannung auf das Gestein wirken können, so dass Quelldrücke überdrückt und damit Hebungen verringert werden können. Zum anderen können im oberen Bodenbereich andauernde Wassergehaltsänderungen infolge von Niederschlag und Verdunstung zu Bewässerungs- und Entwässerungsvorgängen führen, die wiederum einen Zerfall zur Folge haben können. Da allerdings diese witterungsbeeinflusste Bodenzone eine begrenzte Mächtigkeit aufweist und nach LU et. al. (2004) die darunterliegende stationäre Bodenzone mit konstanter Sättigungsgradverteilung von witterungsbedingten Randbedingungen unabhängig ist, kann ein Einbau derartiger Gesteine und Böden in dieser stationären Bodenzone erfolgen. Nach Untersuchungen von VIEWEG (1991) beträgt die Mächtigkeit der witterungsbeeinflussten Zone ca. 1 m, wobei ausgeprägte Wassergehaltsänderungen nur bis Tiefen von etwa 80 cm gemessen wurden. Diese Verwendung im Inneren des Damms wird auch als Kernbauweise nach FLOSS (2009) bezeichnet.

Ein Wasserzutritt in das Dammbauwerk kann nicht nur durch den Einbau im Inneren des Damms, sondern auch durch konstruktive Maßnahmen reduziert und vermieden werden.

Insgesamt sollte bei der Herstellung von Erdbauwerken beachtet werden, dass keine Verformungen zugelassen werden, sondern eine porenraumarme Bauweise angestrebt wird, bei der nach Herstellung des Damms keine Hebungen oder Sackungen mehr auftreten. Denn erst ein durchlässiger Erdbaukörper

mit ausreichend großem Porenraum bietet Raum für Veränderungen durch den Wasserzutritt sowohl hinsichtlich Sackungen und als Quellhebungen. Daher ist eine Qualitätskontrolle für den ordnungsgemäßen Einbau und Verdichtung von großer Bedeutung.

Böden, die auch unter höherer Auflast (> 100 kPa) langsam und daher lange quellen können, sollten im Dammbauwerk mit entsprechend hoher Überdeckung eingebaut werden. Da dies nicht immer zielführend ist, sollte eine Anwendung in unempfindlichen Erdbauwerken wie z. B. Lärmschutzwällen, wo sich Sackungen und Hebungen nicht schädlich auf das Erdbauwerk auswirken, bevorzugt werden.

Zum Langzeitverhalten liegen keine Felduntersuchungen vor. Die Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel im verdichteten Zustand im Labor haben zwar exemplarisch gezeigt, dass abhängig vom Material und Einbauzustand eine Zunahme der Verformungen möglich ist. Allerdings ist eine zuverlässige Prognose aufgrund der vielen verschiedenen Einflussfaktoren (bodenmechanisches Verhalten des Bodens, Verwitterungszustand, Spannungen im Erdbauwerk und klimatische Verhältnisse) damit nicht möglich.

Zusammenfassend können veränderlich feste Gesteine grundsätzlich als Erdbaustoff eingesetzt werden. Der Einbau sollte wegen ihrer Witterungsanfälligkeit mindestens 1 m unterhalb der Böschungsoberfläche bzw. Planum erfolgen. Bei Einhaltung des höheren Aufbereitungs- sowie Einbau- und Verdichtungsaufwandes sollte auch im eingebauten Zustand kein nennenswerter Zerfall stattfinden. Das Sackungs- und Quellpotential bleibt bei Luftporenanteilen ≤ 6 Vol.-% vergleichsweise gering. Probefelder zur Überprüfung der Vorgaben sind zwingend erforderlich.

9.5 Zusammenfassung

Die sich aus den Laborversuchen der drei Forschungsprojekten ergebenden Folgerungen und Empfehlungen sind in Tab. 9.1 zusammengefasst. Die Anforderungen, die sich daraus für die Verwendung als Erdbaustoff ergeben, sind in Tab. 9.2 aufgelistet.

Eignungsuntersuchungen	Erkennen der Veränderlichkeit
	<ul style="list-style-type: none"> • anhand von 3 – 5 Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel (qualitativ) • Bewertung des Zerfallsproduktes nach SANTI
	Klassifizieren der Veränderlichkeit
	<ul style="list-style-type: none"> • Siebtrommelversuch (quantitativ) • alternativ: Trocknungs-Befeuchtungs-Versuch nach NICKMANN
	Korngrößenverteilung
<ul style="list-style-type: none"> • abhängig von der Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung • keine Beschreibung nach DIN EN ISO 14688-1 sowie keine Einstufung nach DIN 18196 möglich • gibt eine Bandbreite zwischen Trocken- und Nasssiebung bzw. Sedimentation an (Hinweis auf die Veränderlichkeit) 	
Proctorversuch	
<ul style="list-style-type: none"> • Bei starker Heterogenität des Materials > 5 Punkte schlagen, um Bandbreite der möglichen Proctorkurven zu erfassen (Einbauvorgaben an oberen Proctorkurve festlegen) 	
Quelldruckversuch und Tonmineralanalyse	
<ul style="list-style-type: none"> • bei Feinkornanteil ($d < 0,06 \text{ mm}$) > 15 % und Proben, die zu einem feinkörnigen Boden zerfallen können ($I_{d2} < 60\%$ „niedrig“) sowie bei Quelldrücken $\sigma < 100 \text{ kPa}$ • im Einzelfall bei Quelldrücken $\sigma > 100 \text{ kPa}$ ggf. Quellhebungsversuche im Kompressionsgerät 	

Tab. 9.1: Zusammenfassung der Folgerungen und Empfehlungen für die Eignungsuntersuchungen an veränderlich festen Gesteinen

Aufbereitung und Zwischenlagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Kornabstufung • Beschränkung des Größtkorndurchmessers auf 2/3 der Schichtdicke (Reduzierung größerer Porenräume) • Wasserzugabe und Homogenisierung vor dem Verdichten mit geeigneten Geräten (Fräse) und mit ausreichender Homogenisierungszeit • Brechen ist besser als „Vorverwittern“ • Bei Zwischenlagerung Änderungen des Wassergehaltes (Austrocknung) und Erhöhung des Feinkorns vermeiden durch zusätzliche Schutzmaßnahmen 	
	Einbau und Verdichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzung der Schichtdicke (30 cm) • Luftporenanteil $n_a < 6 \text{ Vol.-%}$ • Einbau bei trockener Witterung, da bei Regen stark wasser- und verwitterungsempfindliches Verhalten möglich, wodurch Oberflächen schmierig werden und aufweichen können • Verdichtung mit hoher Energie (hohlraumarme Verdichtung) mit Stampffuß- oder Felstrümmervalzen und zusätzlich mit Glattmantelwalzen • Probefelder zwingend erforderlich zur Prüfung der Verdichtungsangaben (Verdichtungsgeräte, Anzahl der Walzenübergänge, Schütthöhen) • Besondere Schutzmaßnahmen bei ungünstiger Witterung vorsehen (z. B. zeitweilige Übersichtung mit einer Schutzschicht, Verwendung von Kalk etc.)
		Konstruktive Ausbildung

Tab. 9.2: Zusammenfassung der Folgerungen und Empfehlungen für die Verwendung veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff

10 Zusammenfassung

Um die Entnahme und Nutzung natürlicher Rohstoffe nachhaltiger zu gestalten und damit die Umweltbelastungen zu reduzieren, soll die Verwendung bautechnisch weniger geeigneter und bereits vor Ort anstehender Erdbaustoffe vorangetrieben werden. Zu diesen Baustoffen zählen auch die veränderlich festen Gesteine, deren Einsatz aufgrund fehlender Erfahrungen sowohl zum Trag- und Verformungsverhalten als auch zum Quellverhalten noch zögerlich ist, so dass bisweilen eine Deponierung oder Grubenverfüllung vorgezogen wird.

Die Problematik veränderlich fester Gesteine besteht darin, dass sich ihre bodenmechanischen Eigenschaften nach dem Lösen aus dem Gebirgsverband unter Witterungseinflüssen unterschiedlich stark verändern können. Bereits wenige Wechselvorgänge zwischen Austrocknung und Befeuchtung, die während der Bauzeit und den damit verbundenen Erdbauprozessen (Lösen, Laden, Fördern, Zwischenlagerung, Einbau und Verdichtung) stattfinden können und oft nicht zu vermeiden sind, führen zu veränderlichen Festigkeitseigenschaften, die einen mehr oder weniger starken Zerfall derartiger Gesteine bewirken. Diese Änderungsprozesse können während einer jahrzehntelangen Nutzung zunächst zu Sackungen bzw. Quellhebungen und infolge fortschreitender Verwitterung zu langanhaltenden Verformungen und damit zu Schäden an Erdbauwerken führen.

Um veränderlich feste Gesteine im Erdbau als Erdbaustoff oberflächennah einsetzen zu können, müssen die veränderlichen Eigenschaften identifiziert und klassifiziert und je nach Verwendung das Trag- und Verformungsverhalten sowie ggf. das Quellverhalten in Abhängigkeit vom Einbauzustand (Einbauwassergehalt, Einbaudichte) und Verwitterungsstatus untersucht werden. Denn es hat sich in den Untersuchungen sowie auch in BÖNSCH (2006) gezeigt, dass bei veränderlich festen Gesteinen das Quellvermögen sogar erst durch eine Lösung der diagenetischen Verbindungen, z. B. infolge von Rissbildung durch Austrocknung, durch Zerfall infolge von Verwitterungsvorgängen (Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel) und durch mechanische Einwirkung (Entlastung bei Freilegung, Aufbereitung und Verdichtung) aktiviert werden kann.

Es wurden an sechs Böden und jeweils ein bis drei Verwitterungszuständen und je zwei Untersuchungsbereichen Quellversuche durchgeführt. In den Verwitterungszuständen VZ 1 und VZ 3 wurden softwaregesteuerte kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche in Großödometern und an den fast vollständig zerfallenen Proben im VZ 4 aufgrund der geringen Durchlässigkeit mechanisch geregelte separate Quelldruck- und Quellhebungsversuche in Standard-Ödometern durchgeführt.

Aus den kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuchen hat sich ein linearer Zusammenhang zwischen Quelldruck und Quelldehnung ergeben. Mit zunehmendem Quelldruck nehmen auch die Quelldehnungen zu, wobei der Quelldruck maßgeblich von den beiden Faktoren Einbau- und Verwitterungszustand abhängt. Es zeigte sich wie bereits bei den Kompressionsversuchen von MÖLLER und HEYER (2014), dass die trockenen Einbaubedingungen und damit großen Porenanteile den Wasserzutritt und somit das Potential zum Quellen und Sacken begünstigen. Schlussfolgernd wäre eine Begrenzung des Luftporenanteils von $n_a < 6$ Vol.-% zur Reduzierung von Verformungen weiterhin anzustreben. Eine Zunahme der Quelldrücke und damit Quellhebungen wurde auch bei Zunahme des Verwitterungszustandes und damit bei Zunahme des Feinkornanteils festgestellt.

Da ein linearer Zusammenhang zwischen Quelldruck und Quelldehnungen besteht, kann zunächst mit Hilfe des Quelldruckversuches beurteilt werden, ob überhaupt Quelldehnungsversuche erforderlich sind. Bei Bodengruppen mit einem höheren Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) > 15 M.-% sowie bei Böden, die schnell zu einem feinkörnigen Boden zerfallen können ($I_{d2} < 60\%$) kann ein mögliches Quellpotential vorliegen. Hier sollten in jedem Fall zunächst Quelldruckversuche durchgeführt werden. Liegen zu den beschriebenen Grenzen der Klassifikationsparameter die maximalen Quelldrücke $\sigma > 100$ kPa, sind zusätzlich Quellhebungsversuche und eine Tonmineralanalyse zur Erfassung quellfähiger Tonminerale zu ergänzen.

Zusammenfassend können veränderlich feste Gesteine grundsätzlich als Erdbaustoff eingesetzt werden. Entscheidend ist zunächst das Erkennen ihrer Veränderlichkeit im Rahmen von Verwitterungsver-

suchen (Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel, Siebtrommelversuch, Trocknungs-Befeuchtungs-Versuch nach NICKMANN), um insbesondere die Ergebnisse klassifizierender Untersuchungen richtig beurteilen und die höheren Anforderungen bei den einzelnen Erdbauprozessen richtig festlegen zu können. Da eine Beschreibung nach DIN EN ISO 14688-1 bzw. Einteilung in Bodengruppen nach DIN 18196 auf Grundlage der Korngrößenverteilung nicht möglich ist, sollten sie als eigenständige Bodengruppe angesehen werden. Weitere klassifizierende Untersuchungen (Proctorversuch, Quelldruckversuch) sollten immer am einzubauenden Material bestimmt werden, da verwitterungsbedingte Änderungen zwischen dem Lösen und Verdichten nicht ausgeschlossen werden können. Eine Zwischenlagerung sollte wegen der Erhöhung des Feinkornanteils vermieden werden. Der Einbau veränderlich fester Gesteine sollte wegen ihrer Witterungsanfälligkeit mindestens 1 m unterhalb der Böschungsoberfläche bzw. Planum erfolgen. Um das Sackungs- und Quellpotential zu reduzieren, sind Luftporenanteile ≤ 6 Vol.-% anzustreben. Zur Überprüfung der Einbau- und Verdichtungsvorgaben sind jedoch aufgrund der Heterogenität veränderlich fester Gesteine Probefelder zwingend erforderlich.

Literatur

- BÖNSCH, C. (2006): Auswirkungen der Saugspannungen auf physikalische und mechanische Eigenschaften von überkonsolidierten Tonen und Tonsteinen im Verwitterungsprozess, Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- DOBROWOLSKY, M. (2008): Quellverhalten teilgesättigter bindiger Böden mit mittlerem Quellpotential. Dissertation. Kaiserslautern.
- DOOSTMOHAMMADI, R.; MOOSAV M. (2009): Influence of cyclic wetting and drying on swelling behavior of mudstone in south west of Iran. *Environmental Geology*, 58: S. 999-1009.
- EINSELE, G.; LEMPP, C. (1981): Ursache und Einfluß der Entfestigung veränderlich-fester Gesteine auf die Tragfähigkeit des Erdplanums, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 330, 1981, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.
- EINSELE, G.; WALLRAUCH, E. (1964): Verwitterungsgrade bei mesozoischen Schiefertönen und Tonsteinen und ihr Einfluß bei Standsicherheitsproblemen, *Vorträge Baugrundtagung, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau*, S. 59 – 89.
- EINSELE, G. (1983): Mechanismus und Tiefgang der Verwitterung bei mesozoischen Ton und Mergelsteinen, *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, Band 134, 1983, Hannover, S. 289 – 315.
- EINSELE, G.; HEITFELD, K.-H.; LEMPP, C.; SCHETELIG, K. (1985): Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Übersicht, *Feldansprache, Klassifikation (Verwitterungsprofile) – Einleitender Beitrag*, In: HEITFELD, K.-H. (Hrsg.) (1985): *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein*, S. 2 – 23, Springer Verlag, Berlin.
- FLOSS, R. (2011): *Handbuch ZTVE-StB: Kommentar und Leitlinien mit Kompendium Erd- und Felsbau*, Kirschbaum Verlag Bonn, 4. Auflage.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2017): Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau*, ZTV E-StB 17, Eigenverlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2009): Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau*, ZTV E-StB 09, Eigenverlag, Köln.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2003): Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, *Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und Unterbaues im Straßenbau*, Eigenverlag, Köln.
- FÜCHTBAUER, H. (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine. Sediment-Petrologie Teil II. – 4. Auflage*, Schweizerbart, Stuttgart.
- GAMBLE, J. C. (1971): *Durability-Plasticity Classification of Shales and other Argillaceous Rocks*, Ph. D. Thesis, University of Illinois.
- GROB, H. (1972): Schwelldruck im Blechtunnel. *Proc. Internationales Symposium für Untertagebau*, Luzern, 99-119.
- GÜLZOW, H.-G. (2004): *Untersuchungen zum Quellen von Tonstein*, Fachhochschule Bielefeld – Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen - Labor für Bodenmechanik, Minden.
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (1991): *Einführung in die Bodenphysik*, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1991.
- HUDER, J. & AMBERG, G. (1970): *Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit*, *Schweizerische Bauzeitung*, 88/43, 975-980.
- HEITFELD, K.-H. (1985): *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker und Festgestein*, Springer Verlag, Berlin.
- HERZEL, P. (2002): Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: *Zerfallsbeständigkeit von Gestein – Siebtrommelversuch*, *Bautechnik* 79 (2002), S. 101 – 105, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

- HUDER, J.; AMBERG, G. (1970): Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. Schweizerische Bauzeitung 83, Heft 43, S. 975-980.
- JASMUND, K. & LAGALY, G. (1993): Tonminerale und Tone, Steinkopff Verlag Darmstadt.
- JASMUND, K. (1955): Die silicatischen Tonminerale, 2. Erweiterte Auflage, Verlag Chemie GmbH.
- KEIL, K. (1954): Ingenieurgeologie und Geotechnik, 2. Auflage, VEB Wilhelm Knapp Verlag, Halle (Saale).
- MADSEN, F. T. & KAHR, G. (1985): Quellende Gesteine als Ursache von Problemen im Untertagebau, Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt.
- MADSEN, F. T. & MÜLLER-VONMOOS, M. (1987): Das Quellverhalten der Tone, Tonmineralogie und Bodenmechanik, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich.
- MADSEN, F. T. (1992): Quellfähige Gesteine, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern, Tonmineralogie für die Geotechnische Praxis, Heft 64, 65-79.
- MERKLEIN, I. (1985): Ursachen und Mechanismen des Trocknungs-Befeuchtungs-Zerfalls überkonsolidierter Pelite, In: HEITFELD, K.-H. (Hrsg.) (1985): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein, S. 59 – 74, Springer Verlag, Berlin.
- MÖLLER, P.; HEYER, D. (2014): Verwendung veränderlich fester Gesteine und halbfester bis fester Tone als Erdbaustoff, Schlussbericht zum F&E Vorhaben 09.148/2011/HRB (unveröffentlicht).
- MORGENSTERN, N. R. (1990): Instabilitäts-Mechanismen bei veränderlich festen Gesteinen, Geotechnik 13, 1990, S. 123 – 129, Essen.
- NICKMANN, M., THURO, K. (2010): Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Charakterisierung veränderlich fester Gesteine Geotechnik 33/4, S.32-325.
- NICKMANN, M. (2009): Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten, Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Band 12, 2009, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München.
- NICKMANN, M., SPAUN, G, THURO, K. (2006): Engineering geological classification of weak rocks. Proc. 10th International IAEG Congress 2006, Nottingham: Paper no 492, IAEG London.
- PAUL, A. (1986): Quellversuche an Gesteinsproben. Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Erd- u. Grundbau e. V. Bautechnik 63 (3), S. 100-104.
- OKRUSCH, M. & MATTHES, S. (2014): Mineralogie - Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, Springer Verlag.
- OSIPOV, V. I. (1975): Structural Bonds and the Properties of Clays, Bull. of IAEG 12, S. 13 – 20, Krefeld.
- OVERBECK, R. (1979): Abhängigkeit der Verwitterung von Mergelsteinen vom Karbonatgehalt, Protokoll über das 1. Kolloquium im Schwerpunkt „Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen“, S. 30 – 31, Bonn-Bad Godesberg.
- PIMENTEL, E. (2007): Quellverhalten von Gesteinen – Erkenntnisse aus Laboruntersuchungen, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Frühjahrstagung, 154, 10-18.
- PIMENTEL, E. (1996): Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 139, Karlsruhe.
- PRESS, F.; SIEVER, R. (2003): Allgemeine Geologie, 3. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- PRINZ, H. & STRAUSS, R. (2011): Ingenieurgeologie, 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 113
- PRINZ, H.; STRAUSS, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie, 4. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

- RAUH, F. (2009): Untersuchungen zum Quellverhalten von Anhydrit und Tongesteinen im Tunnelbau, Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen Reihe B 11, München.
- RAUH, F. & THURO, K. (2007): Rasche und optimierte Vorhersage von Quelleigenschaften bei Tonen mithilfe des Pulverquellversuchs, 16. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum „Junge Ingenieurgeologen“, Bochum 2007.
- SANTI, P. M. (2006): Field Methods for Characterizing Weak Rock for Engineering. In: Environmental and Engineering Geoscience 12 (1), S. 1–11.
- STIEGELER, R.; HEYER, D.; BAUMGÄRTEL, T. (2006): Aufbereitung und Einbau veränderlich fester Gesteine, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FGSV), Heft 931, 2006, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn.
- THURO, K. (2007): Der Pulver-Quellversuch – ein neuer Quellhebungsversuch. Geotechnik 16, S.101-106.
- WICHTER, L.; BOHRMANN, R.; GAY, G. (1990): Verwitterungsbedingte Rutschungen an Dammböschungen – bodenmechanische Ursachen, Kriterien zur Erkennung der Gefährdung, Stabilisierungsmöglichkeiten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 611, 1991, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.
- von WOLFFERSDORFF, P.-A.; HEIDKAMP, H. (2005): Quellverhalten diagenetisch verfestigter Tonsteine in den Einschnitten der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt der Deutschen Bahn AG. Festschrift zum 60. Geburtstag von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 18, S.35-52.

Normen

- DIN 18127 (2012): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 18128 (2002): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Glühverlustes, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 18129 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Kalkgehaltsbestimmung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 18132 (2012): Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte – Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 14688-1 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 14689 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels (ISO 14689:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14689:2018, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-1 (2015): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts (ISO 17892-1:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17892-1:2014, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-3 (2016): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 3: Bestimmung der Korndichte (ISO 17892-3:2015, korrigierte Fassung 2015-12-15); Deutsche Fassung EN ISO 17892-3:2015, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-4 (2017): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-5 (2017): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung (ISO 17892-5:2017); Deutsche Fassung EN ISO 17892-5:2017, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-12 (2018): Laborversuche an Bodenproben – Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen (ISO 17892-12:2018); Deutsche Fassung EN ISO 17892-12:2018, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Bilder

Bild 3.1: Zerfallsrelevante Gesteinseigenschaften nach NICKMANN (2009)

Bild 3.2: schematischer Aufbau eines Zweischichtminerals (T-O) nach JASMUND (1993)

Bild 3.3: schematischer Aufbau eines Dreischichtminerals (T-O-T) nach JASMUND (1993)

Bild 3.4: Arten von gebundenem Wasser und damit verbundenen Quellmechanismen nach PIMENTEL (1996)

Bild 3.5: Hydrationsstufen der Dreischicht-Tonminerale nach JASMUND (1993)

Bild 3.6: Diffuse Doppelschicht nach JASMUND (1993)

Bild 3.7: Schema des behinderten Quellens nach JASMUND (1993)

Bild 3.8: Osmotisches Quellen nach JASMUND (1993)

Bild 3.9: Eindimensionales Quelldehnungsmodell nach WOLFFERSDORFF und HEIDKAMP (2005)

Bild 4.1: Opalinustonstein, Entnahmestelle Zwischenlager (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)

Bild 4.2: Bentonit, Entnahmestelle Aushub (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)

Bild 4.3: dunkelroter Mergel, Entnahmestelle Baugrubensohle (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)

Bild 4.4: Emscher Mergel, Entnahmestelle an der Ortsbrust (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)

Bild 4.5: Feuerletten-Zersatz, Entnahmestelle nahe Geländeoberfläche (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)

Bild 4.6: Tonmergelstein, Entnahmestelle Zwischenlager (links) und aufbereitete Proben < 31,5 mm (rechts)

Bild 4.7: tertiärer Ton, aufbereitete Proben < 31,5 mm

Bild 5.1: Jar-Slake-Test nach SANTI (2006)

Bild 5.2: Siebtrommelversuch - Prüfeinrichtung

Bild 5.3: Restanteil des größten verbleibenden Stückes gegenüber der Anzahl der Wasserlagerungen nach NICKMANN (2009)

Bild 5.4: Flussdiagramm zur Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine nach NICKMANN (2009)

Bild 5.5: Zerfallsverlauf des Opalinustonsteins anhand von Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln kombiniert mit Nasssiebungen nach MÖLLER und HEYER (2014)

Bild 5.6: Massenanteil des Siebdurchgangs < 2 mm in Abhängigkeit der Anzahl der Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel für Opalinustonstein nach MÖLLER und HEYER (2014)

Bild 5.7: Skizzenhafter Versuchsablauf des kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuches

Bild 5.8: Großödometer während eines Kompressionsversuches (links) sowie als Schema (rechts)

Bild 5.9: Skizzenhafte Auswertung zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Quelldruck und Quelldehnung aus dem kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuch

Bild 6.1: Korngrößenverteilungen Opalinustonstein (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie GT* bei Sedimentation SS)

Bild 6.2: Korngrößenverteilungen Bentonit (Bodengruppe nach DIN 18196: TA bei Nasssiebung NS sowie bei Sedimentation SS)

Bild 6.3: Korngrößenverteilungen dunkelroter Mergel (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie GT bei Sedimentation SS)

Bild 6.4: Korngrößenverteilungen Emscher Mergel (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie ST bei Sedimentation SS)

Bild 6.5: Korngrößenverteilungen Feuerletten-Zersatz (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung TS sowie TM bei Sedimentation SS)

Bild 6.6: Korngrößenverteilungen Tonmergelstein (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung sowie GT bei Nasssiebung)

Bild 6.7: Korngrößenverteilungen tertiärer Ton (Bodengruppe nach DIN 18196: GW bei Trockensiebung sowie TM bei Nasssiebung bzw. Sedimentation)

Bild 6.8: beispielhafte Bilder TBW

Bild 6.9: Vergleich TBW Opalinustonstein anhand des größten Reststückes

Bild 6.10: Vergleich TBW Bentonit anhand des größten Reststückes

Bild 6.11: Vergleich TBW dunkelroter Mergel anhand des größten Reststückes

Bild 6.12: Vergleich TBW Emscher Mergel anhand des größten Reststückes

Bild 6.13: Zusammenfassung Ergebnisse Siebtrommelversuche (Opalinustonstein, dunkelrote Mergel, Emscher Mergel)

Bild 6.14: Opalinustonstein, Bilder Siebtrommelversuche V1 und V2

Bild 6.15: dunkelroter Mergel, Bilder Siebtrommelversuche V1 und V2

Bild 6.16: Emscher Mergel, Bilder Siebtrommelversuche V1 und V2

Bild 6.17: Auswertung TBV nach NICKMANN anhand des größten Reststückes

Bild 6.18: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung der Verwitterungszustände VZ 3 und VZ 4, Opalinustonstein

Bild 6.19: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung der Verwitterungszustände VZ 3 und VZ 4, Tonmergelstein

Bild 6.20: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung des Verwitterungszustandes VZ 4, dunkelroter Mergel

Bild 6.21: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung des Verwitterungszustandes VZ 4, tertiärer Ton

Bild 6.22: Zerfallsverlauf anhand von mit Nasssiebungen kombinierten TBW zur Festlegung des Verwitterungszustandes VZ 4, Feuerletten-Zersatz

Bild 6.23: Proctorkurven Opalinustonstein (VZ 1, VZ 3, VZ 4)

Bild 6.24: Proctorkurven Tonmergelstein (VZ 1, VZ 3, VZ 4)

Bild 6.25: Proctorkurve dunkelroter Mergel (VZ 1, VZ 4)

Bild 6.26: Proctorkurve tertiärer Ton (VZ 1, VZ 4)

Bild 6.27: Proctorkurve Feuerletten-Zersatz (VZ 1, VZ 4)

Bild 6.28: Einbaubedingungen gesamt

Bild 7.1: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 1, UB I

Bild 7.2: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 1, UB I

Bild 7.3: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 1, UB I

Bild 7.4: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 1, UB I

Bild 7.5: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 3, UB III

Bild 7.6: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB III

Bild 7.7: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB III

Bild 7.8: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

Bild 7.9: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

Bild 7.10: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

Bild 7.11: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

Bild 7.12: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für Zeitpunkte < 144 h, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

Bild 7.13: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

Bild 7.14: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH1

Bild 7.15: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH2

Bild 7.16: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH1

Bild 7.17: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH2

Bild 7.18: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH1

Bild 7.19: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH2

Bild 7.20: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QD 1 (10 kN)

Bild 7.21: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QD 2 (5 kN)

Bild 7.22: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

Bild 7.23: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH1

Bild 7.24: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH2

Bild 7.25: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH1

Bild 7.26: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH2

Bild 7.27: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH1

Bild 7.28: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH2

Bild 7.29: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.30: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.31: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.32: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, Opalinustonstein VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.33: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 1, UB I

Bild 7.34: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 1, UB I

Bild 7.35: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB I

Bild 7.36: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB I

Bild 7.37: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 1, UB II

Bild 7.38: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 1, UB II

Bild 7.39: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB II

Bild 7.40: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 1, UB II

Bild 7.41: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

Bild 7.42: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

Bild 7.43: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

Bild 7.44: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

Bild 7.45: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

Bild 7.46: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

Bild 7.47: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

Bild 7.48: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

Bild 7.49: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 1 (10 kN)

Bild 7.50: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 2 (5 kN)

Bild 7.51: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

Bild 7.52: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

Bild 7.53: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

Bild 7.54: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

Bild 7.55: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 1 (10 kN)

Bild 7.56: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 4, UB IX, QD 2 (5 kN)

Bild 7.57: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 4, UB X

Bild 7.58: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB X

Bild 7.59: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Tonmergelstein VZ 4, UB X

Bild 7.60: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

Bild 7.61: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB

II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

Bild 7.62: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

Bild 7.63: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, Tonmergelstein VZ 1 (UB I, UB II), VZ 3 (UB VII, UB VIII) und VZ 4 (UB IX, UB X)

Bild 7.64: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

Bild 7.65: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

Bild 7.66: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

Bild 7.67: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

Bild 7.68: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

Bild 7.69: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

Bild 7.70: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

Bild 7.71: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 1, UB

Bild 7.72: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III QD1 (10 kN)

Bild 7.73: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III QD2 (5 kN)

Bild 7.74: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III QD1 (10 kN) und QD2 (5 kN)

Bild 7.75: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

Bild 7.76: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

Bild 7.77: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

Bild 7.78: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV QD1 (10 kN)

Bild 7.79: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV QD2 (5 kN)

Bild 7.80: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV QD1 (10 kN) und QD2 (5 kN)

Bild 7.81: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

Bild 7.82: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

Bild 7.83: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

Bild 7.84: Quelldruck-Zeit-Diagramm, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.85: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.86: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.87: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, dunkelroter Mergel VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.88: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 1, UB I

Bild 7.89: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 1, UB I

Bild 7.90: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB I

Bild 7.91: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB I

Bild 7.92: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 1, UB II

Bild 7.93: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 1, UB II

Bild 7.94: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB II

Bild 7.95: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 1, UB II

Bild 7.96: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

Bild 7.97: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

Bild 7.98: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

Bild 7.99: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

Bild 7.100: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV QD 1 (10 kN)

Bild 7.101: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV QD 2 (5 kN)

Bild 7.102: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB IV QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

Bild 7.103: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

Bild 7.104: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

Bild 7.105: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB IV (2)

Bild 7.106: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V

Bild 7.107: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB V

Bild 7.108: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V

Bild 7.109: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V

Bild 7.110: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V QD 1 (10 kN)

Bild 7.111: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V QD 2 (5 kN)

Bild 7.112: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 4, UB V QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

Bild 7.113: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)

Bild 7.114: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)

Bild 7.115: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, tertiärer Ton VZ 4, UB V (2)

Bild 7.116: Quelldruck-Zeit-Diagramm, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.117: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.118: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.119: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, tertiärer Ton VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB IV, UB V)

Bild 7.120: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

Bild 7.121: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

Bild 7.122: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

Bild 7.123: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

Bild 7.124: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

Bild 7.125: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

Bild 7.126: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

Bild 7.127: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

Bild 7.128: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

Bild 7.129: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

Bild 7.130: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

Bild 7.131: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

Bild 7.132: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

Bild 7.133: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

Bild 7.134: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

Bild 7.135: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

Bild 7.136: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

Bild 7.137: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

Bild 7.138: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

Bild 7.139: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

Bild 7.140: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV QD 1 (10 kN) und QD 2 (5 kN)

Bild 7.141: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

Bild 7.142: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

Bild 7.143: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

Bild 7.144: Quelldruck-Zeit-Diagramm, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.145: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.146: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.147: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung, Feuerletten-Zersatz VZ 1 (UB I, UB II) und VZ 4 (UB III, UB IV)

Bild 7.148: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.1 (10 kN-Dose)

Bild 7.149: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.2 (10 kN-Dose)

Bild 7.150: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.3 (5 kN-Dose)

Bild 7.151: Quelldruckentwicklung Bentonit, frisches Material, QD1.1 bis QD1.3

Bild 7.152: Quelldruckentwicklung Bentonit, Pulver, QD2.1 bis QD2.3

Bild 7.153: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit frisch, QH1

Bild 7.154: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit frisch, QH2

Bild 7.155: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit Pulver, QH3

Bild 7.156: Zeitlicher Verlauf der Quelldehnung und Spannung, Bentonit Pulver, QH4

Bild 7.157: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH1

Bild 7.158: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH2

Bild 7.159: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH3

Bild 7.160: Quelldehnung in Abhängigkeit von der Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH4

Bild 7.161: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH1

Bild 7.162: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit frisch, QH2

Bild 7.163: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH3

Bild 7.164: Quellparameter in Abhängigkeit von der mittleren Spannung für verschiedene Zeitpunkte, Bentonit Pulver, QH4

Bild 7.165: Quelldruck in Abhängigkeit von der Anfangstrockendichte für alle Böden und Verwitterungszustände

Bild 7.166: Quelldruck in Abhängigkeit von der Anfangstrockendichte für die kombinierten Versuche QD-QH

Bild 7.167: Quelldruck in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad für alle Böden und Verwitterungszustände

Bild 7.168: Quelldruck in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad für die kombinierten Versuche QD-QH

Bild 7.169: Quelldehnung $\Delta\varepsilon_{z,q}$ in Abhängigkeit vom Quelldruck für die kombinierten Versuche QD-QH

Bild 7.170: Quelldehnung $\varepsilon_{z,q}$ für den Quelldruck und für die aufgebrauchte minimale Spannung für die kombinierten Versuche QD-QH

Bild 7.171: Quellparameter in Abhängigkeit vom Quelldruck für die kombinierten Versuche QD-QH

Bild 8.1: Trocken-Befeuchtungs-Wechsel im verdichteten Zustand bei 50 kPa, Tonmergelstein, VZ 1, UB II

Bild 8.2: Trocken-Befeuchtungs-Wechsel im verdichteten Zustand bei 50 kPa, Opalinustonstein, VZ 3, UB III

Tabellen

Tab. 3.1: Vergleich theoretischer maximaler Quelldrücke σ_{\max} und Verformungen ϵ_{\max} bei physikalischen Quellvorgängen nach BÖNSCH, 2006

Tab. 5.1: Zerfallstypen nach dem Jar-Slake-Test

Tab. 5.2: Siebtrommelversuch - Beurteilung der Zerfallsbeständigkeit nach GAMBLE (1971) [HERZEL, 2002]

Tab. 5.3: Einteilung der Veränderlichkeitsklassen (VK) nach NICKMANN (2009)

Tab. 5.4: Übersicht der Verwitterungszustände

Tab. 6.1: Anzahl der Trocken-Befeuchtungs-Wechsel TBW für VZ 3 und VZ 4 der untersuchten Böden

Tab. 6.2: Übersicht der Kennwerte

Tab. 6.3: Übersicht der Mineralanalyse an der Gesamtprobe (Gew.-%)

Tab. 6.4: Übersicht der Tonmineralanalyse, Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ (Gew.-%)

Tab. 6.5: Beurteilung des Zerfalls nach SANTI (2006)

Tab. 6.6: Zerfallsbeständigkeitsindex I_z

Tab. 6.7: Veränderlichkeitsindex I_v und Veränderlichkeitsklasse VK nach NICKMANN (2009)

Tab. 6.8: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den Opalinustonstein

Tab. 6.9: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den Tonmergelstein

Tab. 6.10: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den dunkelroten Mergel

Tab. 6.11: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den tertiären Ton

Tab. 6.12: Untersuchungsbereiche mit Sollwerten für den Feuerletten-Zersatz

Tab. 6.13: Übersicht Abkürzung der Probenbezeichnung

Tab. 7.1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 1, UB I

Tab. 7.2: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 3, UB III

Tab. 7.3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 3, UB IV

Tab. 7.4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH 1

Tab. 7.5: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB V, QH 2

Tab. 7.6: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH 1

Tab. 7.7: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Opalinustonstein VZ 4, UB VI, QH 2

Tab. 7.8: Zusammenfassung der Ergebnisse, Opalinustonstein VZ 1 bis VZ 4, UB I bis VI

Tab. 7.9: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 1, UB I

Tab. 7.10: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 1, UB II

Tab. 7.11: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 3, UB VII

Tab. 7.12: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 3, UB VIII

Tab. 7.13: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 4, UB IX

Tab. 7.14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Tonmergelstein VZ 4, UB X

Tab. 7.15: Zusammenfassung der Ergebnisse, Tonmergelstein VZ 1 bis VZ 4, UB I bis X

Tab. 7.16: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 1, UB I

Tab. 7.17: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 1, UB II

Tab. 7.18: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 4, UB III

Tab. 7.19: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, dunkelroter Mergel VZ 4, UB IV

Tab. 7.20: Zusammenfassung der Ergebnisse, dunkelroter Mergel VZ 1 und VZ 4, UB I bis IV

Tab. 7.21: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 1, UB I

Tab. 7.22: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 1, UB II

Tab. 7.23: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB IV

Tab. 7.24: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB IV(2)

Tab. 7.25: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB V

Tab. 7.26: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, tertiärer Ton VZ 4, UB V

Tab. 7.27: Zusammenfassung der Ergebnisse, tertiärer Ton VZ 1 und VZ 4, UB I bis V

Tab. 7.28: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB I

Tab. 7.29: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 1, UB II

Tab. 7.30: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III

Tab. 7.31: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB III (2)

Tab. 7.32: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV

Tab. 7.33: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Feuerletten-Zersatz VZ 4, UB IV (2)

Tab. 7.34: Zusammenfassung der Ergebnisse, Feuerletten-Zersatz VZ 1 und VZ 4, UB I bis IV

Tab. 7.35: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit frisch, QH1

Tab. 7.36: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit frisch, QH2

Tab. 7.37: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit Pulver, QH3

Tab. 7.38: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Quellhebungsversuch, Bentonit Pulver, QH4

Tab. 7.39: Übersicht Abkürzung der Probenbezeichnung

Tab. 9.1: Zusammenfassung der Folgerungen und Empfehlungen für die Eignungsuntersuchungen an veränderlich festen Gesteinen

Tab. 9.2: Zusammenfassung der Folgerungen und Empfehlungen für die Verwendung veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff

Anlagen

- Anlage A:** Probengewinnung und Aufbereitung
- Anlagen B:** Untersuchungen zum Erkennen und Klassifizieren der Veränderlichkeit
- Anlagen B.A:** Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel (TBW)
- Anlage B.A-1:** TBW – Opalinustonstein
- Anlage B.A-2:** TBW – Bentonit
- Anlage B.A-3:** TBW – dunkelroter Mergel
- Anlage B.A-4:** TBW – Emscher Mergel
- Anlage B.B:** Trocknungs-Befeuchtungs-Versuche (TBV) nach NICKMANN
- Anlage C:** Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel kombiniert mit Nasssiebungen (NS+TBW)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Radenberg, Holzwarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

Wolf, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost € 15,50

S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser € 16,50

S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Groschup, Große, Eger, Freudenstein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

Radenberg, Flottmann, Drewes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

Radenberg, Manke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

Bräu, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

Weise, Werner, Maier, Wilsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Klein, Gehlen, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eikschen, Hermerschmidt, Müller, Perkes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.