

1 Einleitung

Oberflächennahe Bodenschichten liegen in der Regel in einem teilgesättigten Zustand vor, bei dem der Porenraum des Bodens zwischen den einzelnen Partikeln sowohl mit einer Flüssigkeit (Porenwasser) als auch mit einem Gas (Porenluft) gefüllt ist. Im Vergleich zu trockenen Böden (gasgesättigter Porenraum) und wassergesättigten Böden wird das Verhalten teilgesättigter Böden durch Kapillareffekte beeinflusst. Hierzu zählt z. B. das bekannte Phänomen der Kapillarkohäsion, die bei nichtbindigen, kohäsionslosen Böden über eine von äußeren Lasten unabhängige Erhöhung der Scherfestigkeit zu einer zusätzlichen Stabilisierung des Korngerüsts führt. Die Kapillarkohäsion trägt nicht nur zur Festigkeit und Tragfähigkeit des Bodens bei, sondern beeinflusst auch dessen Verdichtbarkeit. Dies lässt sich besonders anhand des Proctorversuches verdeutlichen.

So wirkt die Kapillarkohäsion bei niedrigen Wassergehalten zunächst einer Verdichtung entgegen, wodurch nur eine geringe Trockendichte erreicht werden kann. Ein steigender Wassergehalt führt zu einer Reduktion der Kapillarkohäsion, sodass sich schließlich ein optimaler Wassergehalt finden lässt, bei dem bei gleichbleibender Verdichtungsarbeit eine maximale Trockendichte erzielt werden kann. Bei nahezu vollständiger Wassersättigung der Poren nimmt die erreichbare Trockendichte wieder stark ab, da die Kompressionssteifigkeit des Wassers eine Verdichtung verhindert und der Boden unter den Randbedingungen des Proctorversuchs auch nicht schnell genug entwässern kann (Richwien, 2017). Der typische Verlauf einer solchen Proctorkurve ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

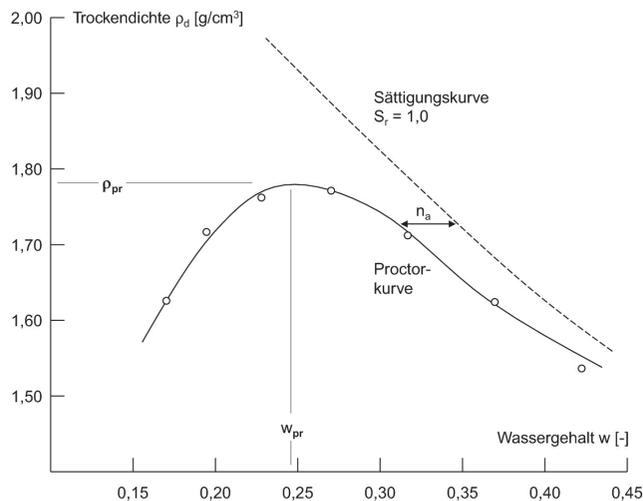


Abbildung 1.1: Exemplarischer Verlauf einer Proctorkurve (Genske, 2021).

Ein teilgesättigter Boden kann aufgrund der durch die Kapillarkohäsion eingeschränkten Verdichtungsfähigkeit somit auch unter Last lockerere Lagerungen aufweisen als im trockenen oder wassergesättigten Zustand. Sowohl eine Aufsättigung als auch eine Austrocknung führen jedoch zu einem Verschwinden der Kapillarkräfte, weshalb die Kapillarkohäsion auch als scheinbare Kohäsion bezeichnet wird. Dies impliziert, dass bei Austrocknung und Bewässerung bzw. Aufsättigung ein Zusammenbruch des Korngerüstes möglich ist, sofern die Festigkeit ohne den Anteil der Kapillarkohäsion nicht ausreicht, um den Gleichgewichtszustand des Bodens bei unveränderter vertikaler Last aufrechtzuerhalten.

Sowohl in der Baupraxis als auch bei den zu führenden statischen Nachweisen werden Kapillarkräfte oftmals vernachlässigt, obwohl teilgesättigte Böden einen häufig anzutreffenden Regelfall darstellen. Dies kann problematisch werden, wenn hierdurch die Tragfähigkeit eines im teilgesättigten Zustand vorliegenden Bodens überschätzt wird. Als Beispiel sei der Plattendruckversuch genannt, mithilfe dessen die Verformbarkeit und die Tragfähigkeit des Bodens im Feld bestimmt werden. Dies kann auch erklären, weshalb es in der Vergangenheit bereits mehrfach zu Schadensfällen nach Wassergehaltsänderungen des Bodens gekommen ist.

Das Phänomen eines Kollapses durch Austrocknung ist zwar selten, aber gefährlich. Es tritt vor allem an Sandstränden auf, wenn Tunnel, Löcher oder andere Strukturen aus Sand infolge der zunehmenden Verdunstung plötzlich zusammenbrechen. Befinden sich zu diesem Zeitpunkt Menschen, meist spielende Kinder oder Jugendliche, in der Nähe, kann der Einsturz solcher Löcher zu einer tödlichen Falle werden, in der die Opfer lebendig begraben werden (Maron u. a., 2007; Heggie, 2013).

Aus geotechnischer Sicht relevanter sind Kollaps-Ereignisse in Zusammenhang mit einer Erhöhung des Wassergehalts des Bodens, von denen im Folgenden ein paar Fallbeispiele vorgestellt werden. Zu den vergleichsweise harmlosen Fällen zählen z. B. die in den 1940er und 1950er Jahren von Landwirten in den USA bei der Bewirtschaftung unberührter Talböden infolge einer Bewässerung festgestellten ungleichmäßigen Höhenveränderungen („near-surface subsidence“) mit lokal begrenzten Absenkungen von bis zu 3 m (California Natural Resources Agency, 2017).

Zur weiteren Erforschung dieser Beobachtungen wurde 1954 das „Inter-Agency Committee on Land Subsidence“ gegründet, dessen wichtigstes Projekt die Anlage von Bewässerungsversuchsflächen mit einer Größe von jeweils etwa 100 Quadratfuß sowie die Laboruntersuchung der dort gewonnenen Bohrkern war. Die Betrachtung des westlichen Fresno Countys offenbarte schon damals die Relevanz und Bedeutung des Phänomens. Rund 82 Quadratmeilen waren durch Bewässerung bereits abgesunken, etwa 42 Quadratmeilen würden bei Bewässerung wahrscheinlich absinken und weitere ca. 13 Quadratmeilen könnten möglicherweise absinken, wenn sie bewässert werden würden (Bull, 1964).

Angesichts dieses Ausmaßes ist es nicht verwunderlich, dass neben den angelegten Bewässerungsgräben auch Bauwerke in der Region durch den kapillaren Kollaps teilweise beschädigt wurden. Nachdem in den Jahren 1887 bis 1912 weitreichende Flächen für die Landwirtschaft erworben worden waren, wurde 1915 mit der „Chaney Pump Station“ das wohl erste später vom kapillaren Kollaps betroffene Bauwerk in der Region errichtet. Das Gebäude wies nicht nur eine erhebliche Schiefstellung sowie bis zu 5 cm breite Risse im Boden auf, auch der knapp 20 m hohe Schornstein war um ca. 30 cm aus dem Lot geraten

und das Gehäuse eines Brunnens gebrochen, sodass die Anlage bereits 1935 umfassend saniert werden musste. Weitere Schäden in der Region betrafen Gebäude, Kanäle, Stromleitungen und deren Tragmasten (teilweise Neigung um bis zu 5°), Öl- und Gaspipelines (Verformungen bis hin zum Bruch), aber auch Autobahnen (Bull, 1964).

Die umfangreiche Dokumentation von Kollapsereignissen in Lössböden begann weltweit, vor allem in den USA, bereits in der Mitte der 1950er Jahre (El Howayek u. a., 2011). Dies liegt vor allem daran, dass Löss und Löss-ähnliche Ablagerungen als Teil der kollabierbaren Böden rund 10 % der Landfläche der Erde ausmachen und somit weit verbreitet sind (Li, Vanapalli und Li, 2016). Eine Übersicht über verschiedene Studien zum kapillaren Kollaps von Lössböden aus China, Russland, Nordamerika und Europa findet sich z. B. in Rogers u. a. (1994).

Nicht-kohäsiven Böden wurde bei der Untersuchung des Kollapsphänomens deutlich weniger Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl diese in einigen Teilen der Welt ebenso ein erhebliches Risiko für Bauwerke darstellen. Dies ist zum Teil sicherlich auch darauf zurückzuführen, dass die Entnahme ungestörter Bodenproben schwierig oder sogar unmöglich ist. Auch lässt sich das Verhalten nur schwieriger vorhersagen, da viele der Testverfahren für kollabierbare bindige Böden für diese Materialien ungeeignet sind (Rollins u. a., 1994).

Einer der ersten dokumentierten Fälle bei granularen Böden ist die Absenkung eines 38 Fuß hohen Dammes um mehr als 2 Fuß bei gleichzeitiger starker Rissbildung. Bei der Zusammensetzung des Bodens aus 44 % Kies, 37 % Sand und 19 % Schluff und Ton mit geringer Plastizität wurde unter den vorliegenden Belastungen nicht mit Setzungen gerechnet. Mithilfe von Laborversuchen konnte der Festigkeitsverlust durch Wasserzutritt jedoch bestätigt werden (Holtz und Hilf, 1961). Die durch den kapillaren Kollaps hervorgerufenen Schäden an Bauwerken können zu erheblichen finanziellen Verlusten führen. So beliefen sich die Sanierungskosten für ein Zementwerk in Utah beispielsweise auf über 20 Millionen US-Dollar (Rollins u. a., 1994).

Weitere Fallbeispiele lassen sich auch aus anderen Regionen der Erde wie dem Arabischen Golf finden. So wird aus Kuwait z. B. von zahlreichen Setzungsproblemen und Böschungsbrüchen im Zusammenhang mit der Sättigung des Bodens durch starke Regenfälle im Winter, durch Bewässerung oder durch Wasseraustritt aus unterirdischen Rohrleitungen berichtet (Ismael u. a., 1986). Generell kommt es dort in der Region an jedem vierten Standort zu einem leichten Kollaps bei Bewässerung (Ismael, 2008).

Neuere Fallstudien zeigen, dass der kapillare Kollaps nach wie vor ein relevantes Thema ist. So präsentieren Vandanapu u. a. (2016) zwei aktuelle Beispiele aus den Vereinigten Arabischen Emiraten. Beide Fälle haben gemeinsam, dass durch Bewässerung der Grünflächen gering belastete Strukturen wie Begrenzungsmauern (vgl. Abbildung 1.2), Gehwege/Straßen, außenliegende Treppen und unbebaute Grünflächen strukturell geschädigt wurden, während die auf Pfählen gegründeten Gebäude verschont blieben. Dabei setzten sich die Setzungen im ersten Beispiel eines Gästehauses mit großzügigen Gärten und Terrassen in der Stadt al-Ain auch nach Abschluss der Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten zur Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit der Gebäude noch weiter fort.

Im zweiten Fall einer betroffenen Wohnsiedlung in Abu Dhabi mit Villen, Sozialgebäuden, Gemeinschaftsgebäuden und offenen Grünflächen wurden aufwendigere Untersuchungen



Abbildung 1.2: Beispiel einer durch den kapillaren Kollaps stark beschädigten Begrenzungsmauer in einer Wohnsiedlung in Abu Dhabi (Vandanapu u. a., 2016).

vorgenommen, um nachzuweisen, dass die Schäden auf das Bewässerungswasser und eine daraus resultierende Verdichtung (Hydroverdichtung) zurückzuführen sind. So wurden zunächst Bohrungen in der Nähe der beobachteten Schäden durchgeführt und mithilfe des Standard Penetration Tests (SPT) sehr lockere bis lockere Lagerungsdichten festgestellt. Anschließend wurden einige angrenzende Freiflächen 15 Tage lang kontrolliert geflutet und der Boden anschließend mittels SPT erneut sondiert. Hierbei zeigte sich eine Zunahme der Schlagzahl in Tiefen von bis zu 1,4 m bei einem Grundwasserspiegel in ca. 1,5 m Tiefe und somit eine deutliche Reaktion des Bodens auf das zugeführte Wasser.

In Deutschland sind unter anderem die Kippenböden ehemaliger Braunkohletagebaue betroffen. Insbesondere in der Lausitz sind vielfältige geotechnische Probleme im Zusammenhang mit Grundwasserwiederanstieg und/oder Starkregenereignissen aufgetreten. Ein sehr bekanntes und dramatisches Schadensereignis ist der nach starken Regenfällen am 18.07.2009 aufgetretene Erdrutsch von Nachterstedt. Die Böschungsbewegung betraf einen Uferbereich eines Tagebaurestsees von ca. 550 m Länge, wobei die Abbruchkanten ca. 400 m von der Uferlinie entfernt lagen. Dabei gerieten ca. 4,5 Mio. m³ Erdreich in Bewegung und rissen auch drei Doppelhaushälften einer dortigen Wohnsiedlung mit in den Concordiasee, wobei zusätzlich eine weitere Schäden auslösende Flutwelle entstand. Drei Menschen starben und die Folgekosten beliefen sich auf mindestens 57,5 Mio. Euro. Unglücksursache war das Zusammentreffen eines das Böschungssystem belastenden dynamischen Initials (mechanische Störung, die eine Bodenverflüssigung auslöst, Gudehus u. a., 2015; Weißbach, 2020) sowie eines hohen artesischen Wasserüberdrucks als Folge einer anormalen lokalen Rinnenstruktur des Grundwasserleiters. Beide Faktoren wurden als unvorhersehbar eingestuft, was zeigt, dass auch eine Braunkohlesanierung keine vollständige Gefahrenabwehr garantiert (Podbregar, 2015; Kuyumcu, 2014; Wronski und Küchler, 2014).

Insbesondere in den ehemaligen Tagebauen der Lausitz sind Setzungsfließen und Bodenverflüssigungsereignisse ein häufig beobachtetes Phänomen. So wurden allein im Zeitraum von 2006 bis 2019 in den dortigen Innenkippen über 100 Ereignisse im Zusammenhang mit dem Grundwasserwiederanstieg und der damit verbundenen Aufsättigung registriert (Rosenzweig u. a., 2020). Es wird vermutet, dass der kapillare Kollaps einer der möglichen Mechanismen ist, die eine Bodenverflüssigung auslösen (Baille u. a., 2016). Verflüssigungsereignisse traten gehäuft Ende 2010/Anfang 2011 auf, bedingt durch die starken Niederschläge im zweiten Halbjahr 2010 und den weitgehend abgeschlossenen Grundwasserwiederanstieg mit entsprechend hohen Grundwasserständen. Dazu gehört auch der gewaltige Grundbruch vom 12.10.2010, bei dem ca. 170 ha zerstört wurden und nach dem vorsorglich 42.000 ha Kippenfläche gesperrt wurden (Kudla u. a., 2012). Aufgrund der unkalkulierbaren geotechnischen Risiken wurden große Teile der Sperrgebiete bis heute aufrecht erhalten. In Charles und Watts (1996) werden fünf verschiedene Fallbeispiele aus England und den USA beschrieben, bei denen es ebenfalls zu Schäden an auf Kippen errichteten Bauwerken gekommen ist. Dies zeigt, dass der kapillare Kollaps bei Kippenböden auch international ein Problem darstellt.

Aufgrund der vielen Schadensfälle war der kapillare Kollaps schon früh Gegenstand der bodenmechanischen Forschung. So stellte der berühmte Bodenmechaniker Arthur Casagrande (1932) z. B. fest, dass die feinen Schluff- oder Tonbrücken, die für eine Zementierung des Bodens sorgen können, erweicht, geschwächt und/oder bis zu einem gewissen Grad aufgelöst werden, wenn bei dem Kontakt belasteter Böden mit Wasser ein kritischer Wassergehalt überschritten wird. Können die Bindemittel den Verformungskräften schließlich nicht mehr standhalten, kollabiert die Struktur (Casagrande, 1932 zitiert nach Al-Rawas, 2000). Trotz intensiver Forschungsbemühungen ist das Phänomen des kapillaren Kollapses bis heute nur unzureichend verstanden. Dies gilt insbesondere für kohäsionslose, granulare Böden, für die lange Zeit Methoden zur Untersuchung der auftretenden mikrostrukturellen Veränderungen fehlten.

Heutzutage ermöglicht der Einsatz bildgebender Verfahren neue Untersuchungsansätze und verspricht tiefere Erkenntnisse. Obwohl bereits erste Versuche unternommen wurden, das Kollapsphänomen mittels Computertomografie (CT) zu untersuchen, wurde der Erkenntnisgewinn durch verschiedene Faktoren erschwert. So untersuchte Bruchon (2014) aufgrund fehlenden Wissens zu einer geeigneten Probengröße ohne auftretende, verfälschende Skalierungseffekte beispielsweise Probengrößen analog zu den klassischen Kollapsversuchen im Ödometer ($d = 70$ mm), wobei die Analyse der Bilddaten durch eine unzureichende Auflösung erschwert wurde und somit der Einsatz moderner Auswertverfahren nicht möglich war. Kollapsuntersuchungen bei höherer Auflösung durch die Verwendung kleinerer Probengrößen wurden von Moscariello, Cuomo u. a. (2018) durchgeführt. Allerdings erwies sich die zugrunde gelegte Methodik zur Herbeiführung des kapillaren Kollapses als ungeeignet, da die mikroskopischen Veränderungen teilweise zu groß waren, um die ablaufenden Prozesse nachvollziehen zu können.

Sowohl bei der Bemessung und den statischen Nachweisen von Bauwerken als auch der Stabilitätsbewertung von Kippenböden verlassen sich Ingenieure auf etablierte Berechnungsverfahren und -modelle. Dabei muss aus wirtschaftlichen Gründen ein Weg gefunden werden, mit dem die Risiken weder über- noch unterschätzt werden. Die Qualität der

Verfahren, Modelle, Bauwerksauslegungen und Prognosen wird dabei wesentlich durch das Verständnis der potentiell im Bodengefüge ablaufenden Prozesse bestimmt (von Bismarck, 2016). So führte das unzureichende Wissen über das Phänomen des kapillaren Kollapses über eine nicht angepasste Bebauung und/oder Bewirtschaftung bzw. Bewässerung zu den exemplarisch vorgestellten zahlreichen, teils dramatischen Schadensfällen. Um in Zukunft weitere Schadensfälle vermeiden und die bestehenden Modelle optimieren zu können, ist ein umfassendes Verständnis der ablaufenden Prozesse essentiell.

Die vorliegende Arbeit soll daher einen Beitrag zum grundlegenden Verständnis des kapillaren Kollapses teilgesättigter granularer Materialien leisten. Der Fokus liegt hierbei auf der Untersuchung mikroskopischer Prozesse im Rahmen der Aufsättigung locker gelagerter Materialien. Hierzu wird mithilfe von Laborversuchen eine neue Methodik sowie ein entsprechender Versuchsaufbau für *in situ* CT-Versuche zum kapillaren Kollaps entwickelt.

Ziel der neuen Methodik ist es, den Kollaps in möglichst gleich großen einzelnen Schritten herbeizuführen, um die Veränderungen auf der Kornebene durch den Vergleich der Scans vor und nach den einzelnen Schritten nachvollziehen zu können. Außerdem soll erstmals auch das Kollapsverhalten eines Kippenbodens aus dem Lausitzer Braunkohletagebau computertomografisch untersucht werden, der neben den Sandkörnern auch Kohlepartikel enthält, deren Einfluss auf den kapillaren Kollaps bislang noch nicht näher untersucht wurde. Nach Voruntersuchungen mit kombinierter Computer- und Neutronentomografie am Institut Laue-Langevin (ILL) in Frankreich zur Erprobung des Versuchsaufbaus und der entwickelten Methodik an miniaturisierten Proben werden daher verschiedene CT-gestützte *in situ* Versuchsserien an der Technischen Universität Braunschweig mit hoher Auflösung durchgeführt.

Die gewonnenen Bilddaten können dann für vielfältige Auswertungen herangezogen werden. Neben der Bestimmung der Veränderung der Probenhöhe bzw. des Probenvolumens, die in makroskopischen Versuchen meist als Indikator für das Kollapsausmaß dienen, können auch die globale (über die gesamte Probe gemittelte) und lokale Phasenzusammensetzung sowie daraus abgeleitete Zustandsgrößen wie der Sättigungsgrad analysiert werden. Selbst Untersuchungen der Phasengrenzflächen und einzelner Phasencluster innerhalb der Probe sowie Plausibilitätskontrollen zur Validierung und Beurteilung der Qualität der vorgenommenen Segmentierung sind möglich. Die qualitativ hochwertigen Bilddaten können zukünftig außerdem als Grundlage für komplexere Analysen, wie jene der Kornkinematik und Partikelbewegungen, oder für numerische Untersuchungen dienen.

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Definition kapillarer Kollaps und allgemeine Zusammenhänge

Das Verhalten teilgesättigter Böden ist geprägt durch Kapillareffekte und unterscheidet sich wesentlich von jenem trockener Böden. In den Porenkanälen zwischen den Bodenpartikeln steigt Wasser durch seine große Oberflächenspannung an der Grenzfläche zur Luft sowie das Phänomen der Oberflächenbenetzung auf und wird gegen die Schwerkraft gehalten, wodurch oberhalb des Grundwasserspiegels der sogenannte Kapillarsaum mit negativen Porenwasserdrücken entsteht. Aus der Differenz zwischen Luft- und Wasserdruck ergibt sich der Kapillardruck, der auch als Saugspannung bekannt ist, und wesentlich vom Sättigungsgrad des Bodens abhängt. Dieser Zusammenhang kann mithilfe der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung oder Wasserretentionskurve (engl. *Soil Water Characteristic Curve*, SWCC) abgebildet werden und stellt eine wichtige Schlüsselfunktion für die Charakterisierung des hydraulischen und mechanischen Verhaltens teilgesättigter Böden dar.

Der Kurvenverlauf der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird wesentlich durch die Beschaffenheit des Bodens (Korn- und Porengrößenverteilung, Kornform, Lagerungsdichte kohäsionsloser Böden) bestimmt und weist bei sandigen Böden typischerweise eine S-Form auf. Während die größeren Porendurchmesser den kapillaren Anstieg bei der Bewässerung begrenzen, wird das Wasser bei der Entwässerung in den kleinen Poren zurückgehalten (vgl. Abbildung 2.1). Aufgrund dieser je nach Richtung der Wassergehaltsänderung unterschiedlichen Steighöhen besitzt die SWCC einen hysteretischen Verlauf. Dieser äußert sich bei gleichem Wassergehalt im Allgemeinen über höhere Saugspannungen bei der Entwässerung als während der Bewässerung (Lins, 2009).

Über Reibung kann der Kapillardruck in teilgesättigten Böden zu einer von äußeren Lasten unabhängigen Erhöhung der Scherfestigkeit führen, die maßgeblich zum Zusammenhalt des Korngerüstes beiträgt. Diese aus den Saugspannungen resultierende sogenannte Kapillarkohäsion verschwindet jedoch sowohl im trockenen als auch im gesättigten Zustand und ist daher auch als scheinbare Kohäsion bekannt. Bei hinreichend locker gelagerten Böden droht durch die Reduktion der Kapillarkohäsion im Falle einer Aufsättigung daher ein Stabilitätsverlust, der häufig mit einer plötzlich auftretenden, irreversiblen Umlagerung des Korngerüstes verbunden ist. Dieses Phänomen wird als kapillarer Kollaps bezeichnet und kann unter entsprechenden Voraussetzungen teils zu sehr großen Volumenreduktionen des Bodens führen.

Gemäß ASTM D5333-03:2003 ist der kapillare Kollaps definiert als „Höhenabnahme eines umschlossenen Bodens nach Bewässerung bei einer konstanten vertikalen Belastung“. Dabei kann der kapillare Kollaps auch Böden, die nur durch ihr Eigengewicht belastet werden,

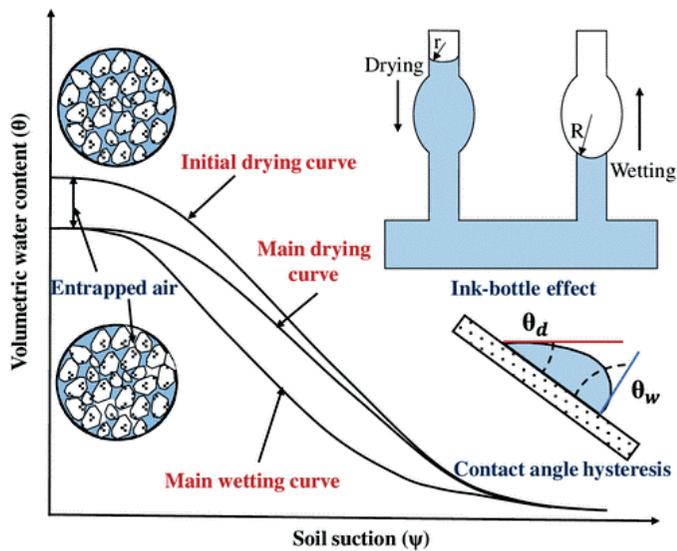


Abbildung 2.1: Exemplarischer Verlauf der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung (Saha u. a., 2022).

betreffen. Im deutschen Sprachgebrauch sind die durch den kapillaren Kollaps ausgelösten Setzungen auch als Sackungen bekannt. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die Definition von Sackungen gemäß DIN 4019 im Laufe der Zeit verändert hat und heutzutage nicht mehr zwangsläufig auf Setzungen infolge eines Wasserzutrittes (ehemals „starke Durchnäsung des Bodens“, vgl. Grimmer, 2006) begrenzt ist. In ihrer aktuellsten Fassung, der DIN 4019:2015-05, wird die Sackung allgemeiner als „Verschiebung in Richtung der Schwerkraft infolge einer Umlagerung des Korngerüsts, verursacht durch den Verlust der Bindekräfte (z. B. Kapillarkohäsion) im Korngerüst oder durch Erschütterung“ beschrieben. Da Erschütterungen als Sackungsursache im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden, bezieht sich der Begriff der Sackungen im Folgenden explizit auf Veränderungen infolge eines Wasserzutrittes.

Pereira und Fredlund (2000) versuchten die Sackungen über Veränderungen ausgelöst durch die Saugspannungsreduktion zu erklären und setzten hierbei auf eine Unterteilung in drei Phasen. In der sogenannten Vorkollapsphase (*pre-collapse phase*) bei hohen Saugspannungen führen selbst verhältnismäßig starke Reduktionen der Saugspannung nur zu geringen volumetrischen Verformungen und die Bodenstruktur bleibt intakt. Diese geringe Kompressibilität des Bodens wird auf eine elastische Kompression des Korngerüsts zurückgeführt, die auf einer Zementierung und/oder Mikrokräften durch die Saugspannungen beruht.

Erst bei weiterer Abnahme der Saugspannung beginnt die eigentliche Kollapsphase, die mit erheblichen Volumenänderungen verbunden ist. Veränderungen betreffen dabei sowohl das Makro- als auch das Mikrogefüge des kollabierenden Bodens. Ursächlich hierfür ist eine Kombination aus strukturellen Umlagerungen sowie dem lokalen Scherverhalten zwischen

Bodenteilchen und schwachen Bindemitteln wie Tonbrücken als Folge der abnehmenden Saugspannung auf der Mikroebene. Die Auflösung der Bindungen führt zu einer Zunahme der Kontaktpunkte zwischen den größeren Partikeln, bis ein neuer Gleichgewichtszustand unter der neuen Saugspannung erreicht ist und der Kollaps endet. Eine vollständige Zerstörung aller Bindungen ist hierfür nicht zwingend erforderlich.

In der letzten Phase (*post-collapse phase*) bei geringen Saugspannungswerten resultiert keine weitere messbare Volumenverringerng mehr aus der Abnahme der Saugspannung, da die Poren mit Ausnahme einer begrenzten Anzahl eingeschlossener Luftblasen (vgl. Abbildung 2.2) bereits vollständig wassergesättigt sind. Die eventuell noch auftretenden geringen Verformungen beruhen auf der sekundären Kompression des Bodens, die allerdings hauptsächlich bei bindigen weichen Böden eine Rolle spielt (Kolymbas, 2019).

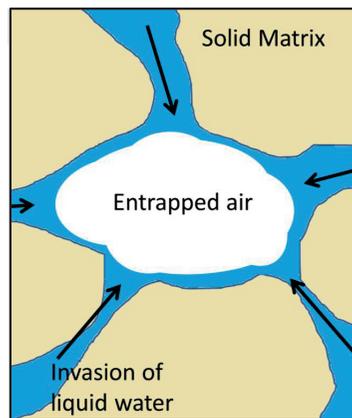


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Entstehung von Lufteinschlüssen während der Bewässerung (Fabbri u. a., 2019).

Zur Prognose des Kollapsverhaltens eines Bodens bei einer gegebenen Spannung entwickelten Pereira und Fredlund (2000) ein Modell, in dem die Veränderungen der Porenzahl in den drei Kollapsphasen über drei verschiedene lineare Gleichungen als Funktion der Saugspannung entlang des Sättigungspfades der SWCC beschrieben werden können. Bei Betrachtung des Kurvenverlaufes der Porenzahlreduktion im vorgeschlagenen Modell fiel Li, Vanapalli und Li (2016) auf, dass der Graph der s-förmigen Gestalt der SWCC in spiegelverkehrter Form ähnelt und stellten daher die Hypothese auf, dass die drei Kollapsphasen entgegengesetzt zu den drei Phasen des Bewässerungsastes der SWCC verlaufen (vgl. Abbildung 2.3). Sie setzten somit das Kollapsverhalten eines Bodens mit dessen (mikroskopischem) Wasserretentionsverhalten in Relation (Li und Vanapalli, 2018).

Bei hohen Saugspannungen (residualer Bereich der SWCC) entsprechend der Vorkollapsphase werden bis zum Erreichen des Wassereintrittswertes hauptsächlich die feinen Mikroporen (Intra-Aggregat-Poren) mit Wasser gefüllt. Die Kollapsverformung beschränkt sich auf die Kompression dieser feinen Poren, sodass die Auswirkungen vernachlässigbar klein sind.

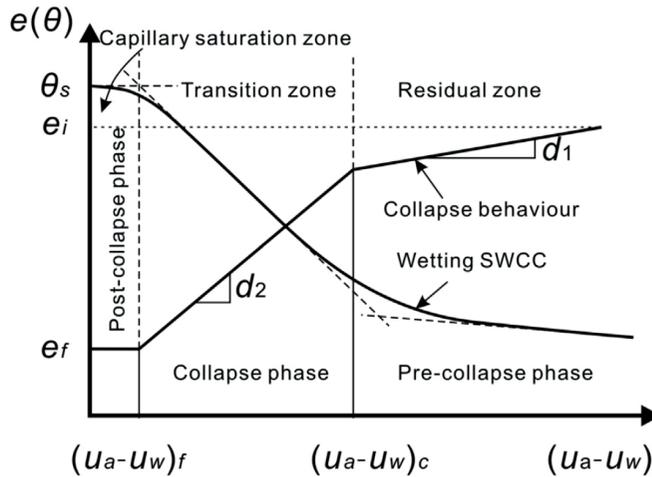


Abbildung 2.3: Schematischer Zusammenhang zwischen dem Kollapsverhalten nach Pereira und Fredlund (2000) und dem Bewässerungspfad der SWCC (Li, Vanapalli und Li, 2016).

Mit:

- d_1 = Steigung der volumetrischen Verformung in der Vorkollapsphase,
- d_2 = Steigung der volumetrischen Verformung in der Kollapsphase,
- e_i = Porenzahl des ungesättigten Bodens,
- e_f = Endporenzahl nach vollständiger Sättigung des Bodens,
- $(u_a - u_w)_c$ = kritische Saugspannung, unterhalb derer der Kollaps beginnt,
- $(u_a - u_w)_f$ = finale Saugspannung, unterhalb derer der Kollaps endet.

Mit weiterem Abfall der Saugspannung beginnt das Wasser zunehmend in die für den Kollaps hauptverantwortlichen großen Makroporen (Inter-Aggregat-Poren, definitionsgemäß größer als die Sandkörner) einzudringen. Da hierfür eine deutlich geringere Reduktion der Saugspannung nötig ist als für die initiale Sättigung der Mikroporen, kommt es in der Übergangszone der SWCC zu einem deutlich stärkeren Anstieg des Wassergehaltes als Reaktion auf die abnehmende Saugspannung. Durch die Sättigung der Makroporen verlieren die Aggregate an Stabilität und werden zunehmend aufgelöst, was sich über erhebliche volumetrische Verformungen äußert (Kollapsphase).

Sobald der Boden mit Ausnahme der eingeschlossenen Poren gesättigt ist (Kapillarsättigungszone), führt die weitere Reduktion der Saugspannung nur noch zu geringfügigen Änderungen des Wassergehaltes. Der Boden erreicht einen neuen stabilen Zustand und der Kollaps endet. Um das Kollapsverhalten eines Bodens mithilfe der SWCC prognostizieren zu können, wurde schließlich die für die Modellierung der SWCC von van Genuchten (1980) entwickelte Gleichung modifiziert bzw. erweitert.