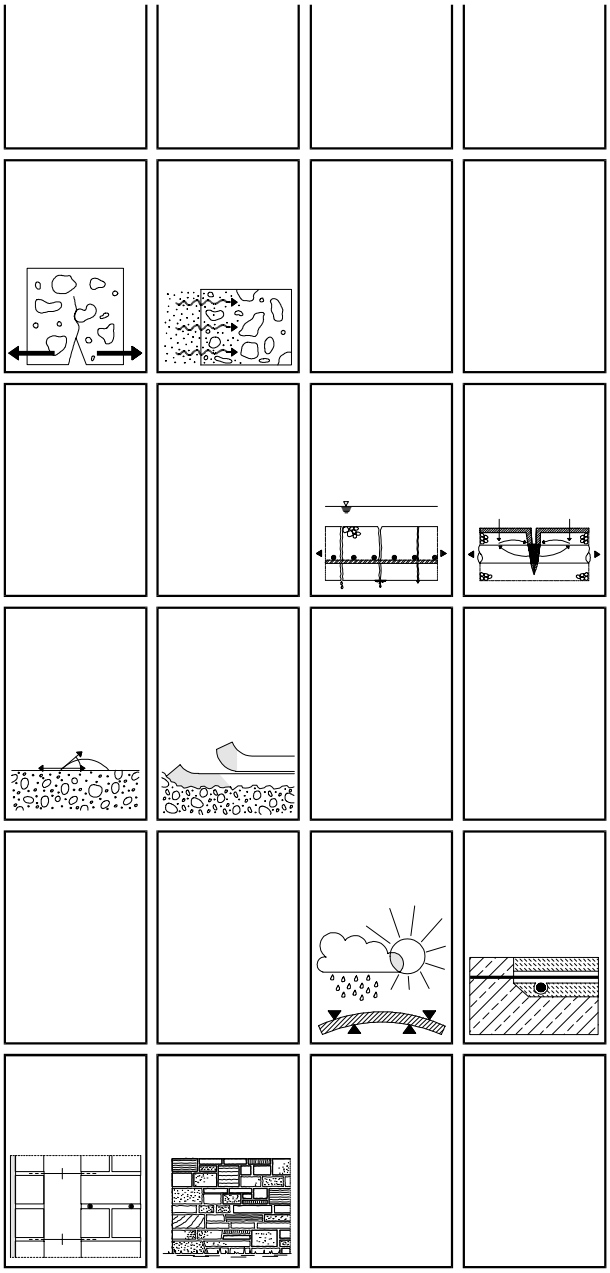
Institut für Bauforschung Aachen
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule



Baustoff · Bauteil · Bauwerk

Forschung · Entwicklung
Überwachung
Prüfung · Beratung

Forschungsbericht
F 856

Ertüchtigungskatalog
für die Stadt Korschenbroich

INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber
Professor Dr.-Ing. M. Raupach
Postfach, D-52056 Aachen
Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen
Telefon (02 41) 80-9 51 00 · Telefax (02 41) 80-9 21 39 · www.ibac.rwth-aachen.de

Sp/Ki
7. Ausfertigung

THEMA

Ertüchtigungskatalog für die Stadt Korschenbroich

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr. F 856
vom 30.07.2002

Projektbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. F. Spörel

Auftraggeber/
Förderer

Amt für Umweltschutz
Untere Wasserbehörde
Auf der Schanze 4

41513 Grevenbroich

Auftragsdatum 26.02.2002
Aktenzeichen -

Dieser Bericht umfaßt 116 Seiten, davon 116 Textseiten.
Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.
Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.
Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

INHALTSVERZEICHNIS **Seite**

1	FRAGESTELLUNG	1
2	EINLEITUNG	2
3	BAUWERKSABDICHTUNG NACH DIN 18 195	3
3.1	Allgemeines	3
3.2	Definition der Lastfälle	4
3.2.1	Bodenfeuchte/nichtstauendes Sickerwasser	4
3.2.2	Aufstauendes Sickerwasser	5
3.2.3	Drückendes Wasser	6
3.2.4	Änderungen der Zuordnung der Lastfälle in der neuen DIN 18 195	7
3.3	Abdichtungsstoffe	8
3.3.1	Allgemeines	8
3.3.2	Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen (KMB)	10
3.4	Anforderungen an den Untergrund und Verarbeitung der Stoffe	11
3.4.1	Anforderungen an den Untergrund	11
3.4.2	Anforderungen an die Verarbeitung	12
3.5	Abdichtung nach DIN 18 195-4 /DIN36/	12
3.6	Abdichtung nach DIN 18 195-6 /DIN36/	13
4	ABDICHTUNGEN AUSSERHALB DER DIN 18 195	15
4.1	Allgemeines	15
4.2	Wasserundurchlässiger Beton (WU-Beton)	16
4.2.1	Allgemeines	16
4.2.2	Vor- und Nachteile von Weißen Wannen	18
4.2.3	Eigenschaften des Betons	19
4.2.4	Bauweisen	20
4.2.4.1	Allgemeines	20
4.2.4.2	Bauweise mit verminderter Zwangbeanspruchung	21
4.2.4.3	Bauweise mit beschränkter Rißbildung	22
4.2.4.4	Bauweise mit Rißbildung	23
4.2.5	Fertigteil-/Halbfertigteilbauweise	23

Seite

4.2.6	Kombinierte Bauweise mit KMB	24
4.3	Dichtungsschlämmen	24
4.3.1	Allgemeines	24
4.3.2	Flexible Dichtungsschlämmen	25
4.3.3	Mineralische Dichtungsschlämmen	27
4.4	Sonstige Abdichtungsformen	28
4.4.1	Flüssigkunststoffe	28
4.4.2	Bentonitplatten	28
5	NACHTRÄGLICHE ABDICHTUNG	31
5.1	Allgemeines	31
5.2	Nach WTA-Merkblatt	32
5.2.1	Allgemeines	32
5.2.2	Voruntersuchungen	32
5.2.3	Abdichtungskonzept	33
5.2.4	Außenabdichtung nach WTA-Merkblatt	34
5.2.4.1	Allgemeines	34
5.2.4.2	Vorbereitende Arbeiten	34
5.2.4.3	Abdichtungsarbeiten	34
5.2.4.4	Flankierende Maßnahmen	35
5.2.5	Innenabdichtung nach WTA-Merkblatt	36
5.2.5.1	Allgemeines	36
5.2.5.2	Werkstoffe	36
5.2.5.3	Vorbereitende Arbeiten	37
5.2.5.4	Ausführung	37
5.2.5.5	Flankierende Maßnahmen	38
5.2.6	Injektionen nach WTA-Merkblatt	39
5.2.6.1	Allgemeines	39
5.2.6.2	Werkstoffe	39
5.2.6.3	Ausführung	42
5.2.6.4	Flächenabdichtung im Bauwerk	42
5.2.6.5	Injektionsdruck	43
5.2.6.6	Injektionsschleier im Baugrund	44

Seite

5.3	Horizontalabdichtung (Querschnittsabdichtung) nach WTA-Merkblatt	44
5.3.1	Allgemeines	44
5.3.2	Wirkprinzip	45
5.3.3	Injektionsmittel	46
5.3.4	Drucklose Injektion	48
5.3.5	Druckinjektion	49
5.3.6	Flankierende Maßnahmen	51
5.4	Mechanische Horizontalabdichtung	51
5.4.1	Maueraustauschverfahren	51
5.4.2	Mauertrennverfahren	51
5.4.3	Horizontalschnittverfahren – Schwertsägeverfahren	51
5.4.4	Horizontalschnittverfahren – Seilsägeverfahren	52
5.4.5	Edelstahleinschlagverfahren	52
5.5	Elektrophysikalische Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung	52
5.6	Baugrundvergelung	53
5.6.1	Allgemeines	53
5.6.2	Vorerhebungen	54
5.6.3	Injektionsstoffe und Eigenschaften	55
5.6.4	Injektionstechnologie und Materialverhalten	57
5.6.5	Einsatzgebiete	59
5.7	Weitere Verfahren	59
5.7.1	Weiße Wanne	59
5.7.2	SIFCON	60
5.7.3	Edelstahlbleche	61
5.7.4	Erdschlitztechnik	61
5.7.5	Injektions-Vertikalsperre von außen	62
5.7.6	Nachträgliche Wanne von außen	64
5.7.7	Anhebung von Gebäuden	65
5.7.8	Aufgabe des Kellers	65
6	GRUNDBAUTECHNISCHE LÖSUNGEN MIT RESTWASSERHALTUNG.	66
6.1	Allgemeines	66

Seite

6.2	Wandabdichtungen	68
6.2.1	Allgemeines	68
6.2.2	Dichtungsschlitzwände	68
6.2.2.1	Allgemeines	68
6.2.2.2	Einphasenverfahren	70
6.2.2.3	Zweiphasenverfahren	70
6.2.2.4	Kombinierte Verfahren	71
6.2.2.5	Dichtwand mit Entwässerungseinrichtung	72
6.2.3	Schmalwände	73
6.2.3.1	Allgemeines	73
6.2.3.2	Staffelrammverfahren	74
6.2.3.3	Rüttelschmalwände	75
6.2.4	Mixed-in-place Verfahren	76
6.2.5	Abdichtende stützende Wände	77
6.3	Sohlabdichtung	80
6.3.1	Allgemeines	80
6.3.2	Tiefliegende Injektionssohlen	82
6.3.2.1	Zement-/Feinstzementsohle	83
6.3.2.2	Weichgelsohlen	83
6.3.3	Hochliegende Sohlen	84
6.4	Düsenstrahlverfahren (HDI)	84
6.4.1	Allgemeines	84
6.4.2	Grundlagen	85
6.4.3	Einphasenverfahren	87
6.4.4	Zweiphasenverfahren	87
6.4.5	Dreiphasenverfahren	87
6.4.6	Suspensionsmaterial und Materialbedarf	88
6.4.7	Anwendungsbereich	88
6.4.8	Abgewandeltes Verfahren	89
6.4.9	Kombination aus Düsenstrahlverfahren und Bodenvereisung	90
6.5	Verfahren zur Abdichtung von Bodenkörpern	91
7	LÖSUNGSANSÄTZE	92

Seite

7.1	Allgemeines	92
7.2	Bauwerke ohne Gefährdung der Standsicherheit	93
7.2.1	Allgemeines	93
7.2.2	Mögliche abdichtungstechnische Maßnahmen	93
7.3	Bauwerke mit unzureichender Standsicherheit	94
7.3.1	Allgemeines	94
7.3.2	Nachträgliche außenliegende Wanne im Düsenstrahlverfahren	98
7.3.3	Nachträgliche Abdichtung mit Dichtungsschlitzwänden	99
7.3.4	Beeinflussung der Grundwasserströmung durch die Dichtungströge	100
7.4	Kostenansätze	100
7.4.1	Allgemeines	100
7.4.2	Weiße Wanne	100
7.4.3	Spezialtiefbaumaßnahme Düsenstrahlverfahren	102
7.5	Neue Konzepte	106
8	FINANZIERUNGSMÖGLICHKEIT MIT DEM B.O.T.-MODELL	106
9	LITERATUR	108

1 FRAGESTELLUNG

Mit Schreiben vom 26.02.2002 wurde das Institut für Bauforschung Aachen (ibac) vom Kreis Neuss beauftragt, einen Ertüchtigungskatalog für nachträglich abzudichtende Wohnbauten zu erstellen. Anlaß hierfür ist die Situation des Stadtbereichs Korschenbroich in Nordrhein-Westfahlen (NRW), dadurch gekennzeichnet, daß der Grundwasserspiegel kontinuierlich ansteigt und viele Gebäude keine Abdichtung gegen Feuchte und/oder Wasserdruck haben.

Es wurde daher vereinbart, zunächst den Sachstand zum Thema Bauwerksabdichtung zusammenzutragen, um darauf aufbauend Konzepte für eine nachträgliche Abdichtung von Wohnungsbauten in Abhängigkeit des Wasserstandes auszuarbeiten.

Der vorliegende Bericht behandelt zunächst allgemein den Sachstand zum Thema Bauwerksabdichtungen von Neubauten, aber auch bestehender Bauwerke. Anschließend werden mögliche Maßnahmen des Spezialtiefbaus aufgeführt. In einem zusätzlichen Kapitel wird schließlich auch auf die Finanzierung von Projekten dieser Größenordnung eingegangen.

Die Stadt Korschenbroich erstreckt sich mit ihren Außenbereichen von Mönchengladbach im Westen bis Kaarst im Osten. Sie ist gekennzeichnet durch eine für diese Gegend bei kleinen Städten und Dörfern übliche Wohn- und Industriebebauung mit vorwiegend Einzel- und Reihenhäusern. Während die ältere Bebauung mit hochliegenden Kellern oder ganz ohne ausgeführt wurde, haben neuere Bauten häufig tiefliegende Keller.

Im Rahmen einer Begehung am 13.11.2001 wurden einige repräsentative Objekte besichtigt. Vom Nutzkeller bis hin zum ausgebauten Wohnbereich ist alles vorhanden. Die Bauweisen und Qualitäten sind sehr unterschiedlich. Die Objekte lassen sich daher sinnvollerweise nicht in z. B. Bauklassen einteilen, sondern sind in bezug auf eine nachträgliche Abdichtung individuell zu betrachten.

Mit diesem Bericht soll sowohl dem interessierten Bürger wie auch Fachfirmen ein Werk an die Hand gegeben werden, mit dem man sich über den Stand der Technik und über Lösungsansätze zur nachträglichen Abdichtung von Wohngebäuden informieren kann. Die Verfasser dieses Berichts haben sich um eine möglichst umfassende Beschreibung des Sachstandes bemüht und sind für Ergänzungsvorschläge dankbar.

2 EINLEITUNG

Eine Bauwerksabdichtung hat zum einen die Aufgabe, das Bauwerk gegen Schädigungen durch das angreifende Wasser dauerhaft zu schützen, zum anderen die vorgesehene Raumnutzung zu gewährleisten. Mögliche Schädigungen sind z. B. Eindringen von Wasser in das Gebäude, Durchfeuchtung von Bauteilen und ein daraus resultierender verringerter Wärmeschutz.

Zur Sicherstellung dieser Funktion ist eine fachgerechte Planung und Ausführung sowohl bei der Bauwerksabdichtung als auch beim Bauwerk selbst im Hinblick auf die gewählte Abdichtung erforderlich. Die Abdichtung ist also bereits in die Gesamtplanung des Bauwerks mit einzubeziehen und erfordert dazu z. B. Angaben zur Pressung aus anstehendem Boden oder Baukörpern im Bau- und Endzustand, zum Schwinden, zu Bewegungen aus Temperatureinfluß sowie zu erwartender Setzungen.

Einen maßgeblichen Einfluß auf die Wahl eines Abdichtungskonzeptes hat vor allem die zu erwartende Wasserbelastung. Die Bauwerksnutzung und der anstehende Boden sind ebenfalls hinsichtlich der erforderlichen Dichtigkeit, bzw. des gewählten Abdichtungssystems von Bedeutung.

Da eine Wartung der Bauwerksabdichtung in der Regel nicht möglich ist und Reparaturen mit großem Aufwand verbunden sind, sollte die Abdichtung für die Lebensdauer des abzudichtenden Bauwerks bemessen sein. Bei Bauwerken, die für den ständigen Aufenthalt von Personen bestimmt oder die für nachträgliche Reparaturen nur schwer oder gar nicht zugänglich sind, sowie bei Bauwerken, die der Aufnahme von hochwertigen Anlagen oder feuchteempfindlicher Güter dienen, ist der Abdichtung eine besondere Bedeutung beizumessen. In diesen Fällen ist mit besonders hohen Schäden zusätzlich zu der erforderlichen Sanierung der Abdichtung bei deren Versagen zu rechnen, wie zum Beispiel chronische Erkrankungen, Qualitätsminderung oder Verrottung der Lagergüter oder Fehlfunktionen der Anlagen.

Die Wirksamkeit einer Bauwerksabdichtung ist somit von vielen Faktoren abhängig. Bei sorgfältiger Planung und Auswahl der Materialien sowie einer qualifizierten Ausführung sind die gestellten Anforderungen jedoch zu erreichen.

Für den Schadensfall gibt es Möglichkeiten, Gebäude nachträglich abzudichten. Diese Maßnahmen sind z. T. mit erheblichen Kosten verbunden, die manchmal die der ursprünglichen Abdichtung während der Bauphase deutlich übersteigen. Die folgenden Ausführungen

geben einen Überblick über die Möglichkeiten der planmäßigen und nachträglichen Bauwerksabdichtung.

Es wird dabei zunächst auf den Stand der Technik bei einer planmäßigen Abdichtung eingegangen. Danach folgen Maßnahmen zur nachträglichen Abdichtung. Unabhängig vom Objekt können dichtende Spezialtiefbaumaßnahmen ausgeführt werden. Diese bilden den Abschluß der Zusammenstellung bzgl. des Stands der Technik.

3 BAUWERKSABDICHTUNG NACH DIN 18 195

3.1 Allgemeines

Maßgebend für eine Bauwerksabdichtung sind die Normen der Reihe DIN 18 195 „Bauwerksabdichtungen“ (Teil 1-10) /DIN36/, deren Teile 1 bis 6 im August 2000 in einer neuen Fassung veröffentlicht wurden. Auf die dort eingearbeiteten Neuerungen wird später noch eingegangen. Die Teile 7-10 werden noch überarbeitet und an die Teile 1 bis 6 angepaßt. Es folgt ein Überblick über den Aufbau der DIN 18 195.

- Teil 1: Grundsätze, Definitionen, Zuordnung der Abdichtungsarten
- Teil 2: Stoffe
- Teil 3: Anforderungen an den Untergrund und Verarbeitung der Stoffe
- Teil 4: Abdichtung gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung
- Teil 5: Abdichtung gegen nichtdrückendes Wasser auf Deckenflächen und in Naßräumen, Bemessung und Ausführung
- Teil 6: Abdichtung gegen von außen drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser, Bemessung und Ausführung
- Teil 7: Abdichtung gegen von innen drückendes Wasser, Bemessung und Ausführung
- Teil 8: Abdichtung über Bewegungsfugen
- Teil 9: Durchdringungen, Übergänge, Abschlüsse
- Teil 10: Schutzschichten und Schutzmaßnahmen

Die DIN 18 195 ist bauaufsichtlich nicht eingeführt. Lediglich Auszüge des Teil 2 sind in den Ankündigungen zur Bauregelliste 2002/1 aufgenommen. Neben der DIN 18 195 kann in beidseitigem Einvernehmen kann auch ein anderes Abdichtungsverfahren, das in der

Norm nicht erfaßt ist, vereinbart und durchgeführt werden. Vereinbart man jedoch die DIN 18 195, dann muß auch dem Inhalt der DIN 18 195 entsprechend abgedichtet werden /Web95/.

Die DIN 18 195 gilt für die Abdichtung von nicht wasserdichten Bauwerken oder Bauteilen. Je nach Wasserangriffsart eignen sich dazu unterschiedliche Abdichtungsmaßnahmen, wobei der Lastfall Bodenfeuchtigkeit immer als Mindestbeanspruchung vorhanden ist. Zur fachgerechten Planung einer Abdichtung ist jedoch die Kenntnis des Bemessungswasserstandes unverzichtbar. Dieser wird nach DIN 18 195-1 wie folgt definiert: *„Der höchste nach Möglichkeit aus langjähriger Beobachtung ermittelte Grundwasser-/Hochwasserstand und bei von innen drückendem Wasser der planmäßige Wasserstand“*.

3.2 Definition der Lastfälle

In der DIN 18 195 /DIN36/ wird für den Wasserangriffsgrad zwischen unterschiedlichen Lastfällen hinsichtlich der Intensität des Angriffes unterschieden. In den folgenden Abschnitten werden die für die Bauwerksabdichtung gegen von außen angreifendes Wasser maßgebenden Fälle kurz erläutert.

3.2.1 Bodenfeuchte/nichtstauendes Sickerwasser

Bodenfeuchte ist im Erdreich vorhandenes, kapillar gebundenes und durch die Kapillarkräfte auch entgegen der Schwerkraft fortleitbares Wasser. Die Bodenfeuchte ist als Mindestbeanspruchung immer im Boden vorhanden. Eine mit diesem Lastfall vergleichbare Belastung wird durch das von Niederschlägen herrührende *nichtstauende Sickerwasser* erzeugt. Mit diesem Lastfall darf nur gerechnet werden, wenn das Baugelände bis zu einer ausreichenden Tiefe unter der Fundamentsohle und auch das Verfüllmaterial der Arbeitsräume aus stark durchlässigen Böden, zum Beispiel Sand oder Kies, besteht. Verschiedene Böden haben unterschiedliche Wasserdurchlässigkeiten, welche über den Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] nach DIN 18 130-1 /DIN35/ beschrieben werden. Dieser gibt an, mit welcher Geschwindigkeit ein bestimmtes Wasservolumen durch eine Bodenprobe bei vorgegebenem Querschnitt und hydraulischem Gefälle hindurchfließt. Stark durchlässige Böden sind für in tropfbarflüssiger Form anfallendes Wasser so durchlässig, daß es ständig von der Oberfläche des Geländes bis zum freien Grundwasserstand absickern und sich auch nicht vorübergehend, z. B. bei starken Niederschlägen, aufstauen kann. Dies erfordert für Wasser einen Durch-

lässigkeitsbeiwert des Bodens von $k > 10^{-4}$ m/s /DIN36/. Die Feuchtigkeitsbeanspruchung liegt auch vor, wenn bei wenig durchlässigen Böden eine Dränung nach DIN 4095 /DIN34/ vorhanden ist, deren Funktionsfähigkeit auf Dauer gegeben ist. Die Bilder 1 und 2 erläutern diese beiden Lastfälle.

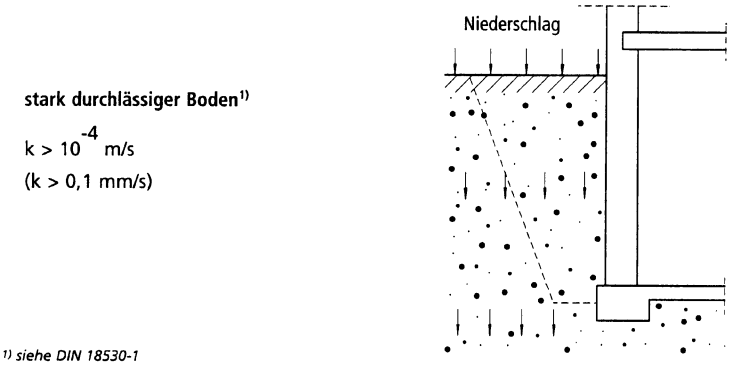


Bild 1: Lastfall: Bodenfeuchte nach DIN 18195-4 /Arb3/

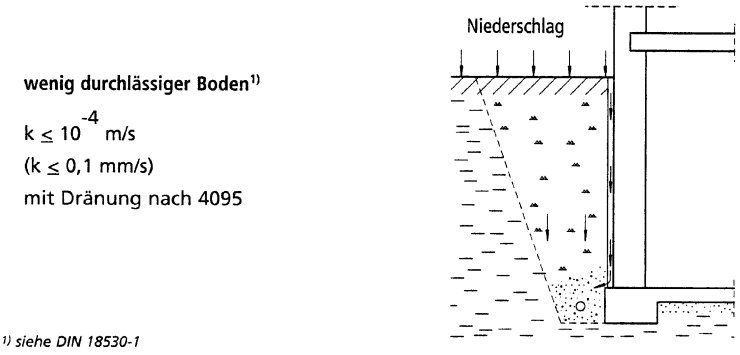


Bild 2: Lastfall: nichtstauendes Sickerwasser nach DIN 18 195-4 /Arb3/

3.2.2 Aufstauendes Sickerwasser

Bei den zuvor beschriebenen Lastfällen wirkt das Wasser nicht mit hydrostatischem Druck auf das Bauwerk ein. Für Fälle, bei denen dies jedoch der Fall ist, unterscheidet die DIN 18 195 /DIN36/ hinsichtlich der Intensität der Beanspruchung Bauteile, die in das Grundwasser eintauchen und solche, die sich oberhalb des Bemessungswasserstandes befinden.

Der Lastfall *Aufstauendes Sickerwasser* (Bild 3) liegt vor, wenn Kelleraußenwände oder Bodenplatten mit Gründungstiefen bis zu 3,0 m unter GOK in wenig durchlässigen Böden ohne Dränung nach DIN 4095 /DIN34/ vorhanden sind. Bodenart und Geländeform müssen so beschaffen sein, daß nur Stauwasser zu erwarten ist. Der nach Möglichkeit langjährig ermittelte Bemessungswasserstand muß dabei mindestens 300 mm unter der Unterkante Kellersohle liegen. Das Stauwasser kann sich z. B. vorübergehend nach starken Regenfällen ansammeln, wenn das Wasser nicht schnell genug bis zum anstehenden Grundwasser absickern kann.

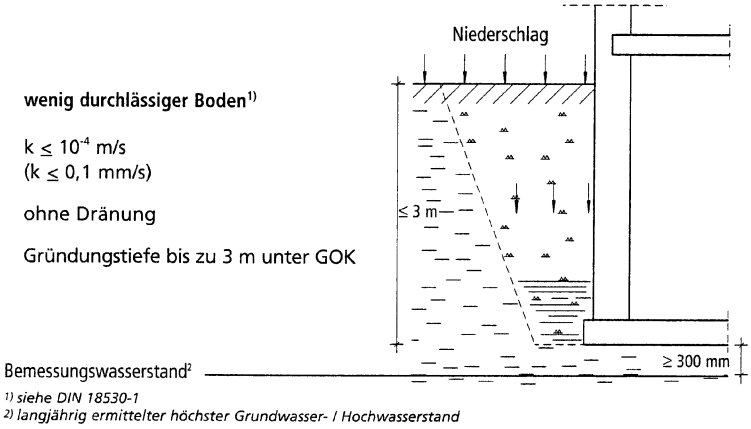


Bild 3: Lastfall: Aufstauendes Sickerwasser nach DIN 18 195-6 /Arb3/

3.2.3 Drückendes Wasser

Der Lastfall *Drückendes Wasser* (Bild 4) liegt vor, wenn Gebäude bzw. Bauteile Grundwasser oder Schichtenwasser ausgesetzt sind. Es herrscht ein hydrostatischer Druck, der von der Wasserhöhe abhängig ist. Dieser Lastfall ist unabhängig von Gründungstiefe, Eintauchtiefe und Bodenart.

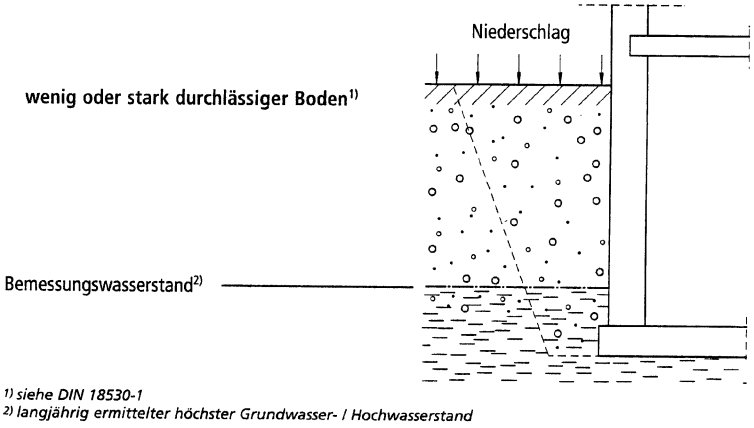


Bild 4: Lastfall: drückendes Wasser (Grundwasser) nach DIN 18 195-6 /Arb3/

Je höher das Wasser am Gebäude ansteht, desto stärker wirkt der Auftrieb auf das Gebäude. Das Wasser drückt von unten gegen die Bodenplatte. Dabei kann das Bauwerk dann aufschwimmen, wenn dessen Gewicht nicht groß genug ist. Ist die Last des Gebäudes ausreichend, aber die Platte für den Wasserdruck nicht bemessen, kann die Platte auf Biegung versagen. Bei der Abdichtung gegen drückendes oder auch aufstauendes Wasser muß diese Belastung daher bereits bei der Bauwerksdimensionierung beachtet werden.

3.2.4 Änderungen der Zuordnung der Lastfälle in der neuen DIN 18 195

Die Belastung schwach durchlässiger Böden in Verbindung mit einer Dränung nach DIN 4095 /DIN34/ wurde bisher als nichtdrückendes Wasser im Teil 5 der Norm beschrieben. Nun wird diese Einbausituation im Teil 4 als nichtstauendes Sickerwasser definiert und damit der Belastung Bodenfeuchte gleichgesetzt. Ferner werden innerhalb des Teils 6 der Norm das aufstauende Sickerwasser und das Druckwasser unterschieden. Erdberührte Keller werden somit hinsichtlich der Belastung den Teilen 4 und 6 der Norm zugeordnet.

3.3 Abdichtungsstoffe

3.3.1 Allgemeines

In DIN 18 195 sind verschiedene Abdichtungsstoffe aufgenommen, mit denen Bauwerke abgedichtet werden können. Außerhalb DIN 18 195 gibt es jedoch weitere Abdichtungsmöglichkeiten. Die neue Fassung vom August 2000 enthält einige dieser Stoffe, die in der alten Fassung nicht enthalten waren, aber in der Praxis häufig eingesetzt wurden. Im Gegensatz dazu wurden die bisher dort aufgeführten Abdichtungsstoffe, im wesentlichen Bahnen- und Folienabdichtungen, in der Praxis teilweise kaum verwendet. Die folgende Auflistung gibt eine Übersicht über die erfolgten Änderungen und der damit jetzt in DIN 18 195 enthaltenden Abdichtungsstoffe.

- Die Liste der zu verwendenden Bitumenbahnen wurde aktualisiert und um Polymerbitumenbahnen ergänzt.
- Die Liste der zu verwendenden Kunststoffbahnen wurde aktualisiert und um Elastomer-Dichtungsbahnen ergänzt.
- Kunststoff-Dichtungsbahnen aus EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat-Terpolymer) wurden aufgenommen.
- Selbstklebende Kunststoff- und Elastomer-Dichtungsbahnen sowie kaltselbstklebende Bitumen-Dichtungsbahnen wurden aufgenommen.
- Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen wurden aufgenommen.
- Kalt zu verarbeitende Deckaufstrichmittel und Spachtelmassen wurden aus der Norm entfernt.

Die Aufnahme der kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen (KMB) stellt die bedeutendste Änderung dar. Mit diesem Abdichtungssystem, das bisher nicht in der Norm enthalten war, und bezüglich deren Zugehörigkeit zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik unterschiedliche Auffassungen bestehen, wurde der Großteil der Gebäude, die der Belastung gemäß DIN 18 195-4 ausgesetzt sind, in den letzten Jahren abgedichtet.

Die Bilder 5 und 6 geben die Ergebnisse einer Marktforschung aus dem Jahr 1998 wieder, an der 2500 Ingenieur- und Architekturbüros unterschiedlicher Größe aus allen Bundesländern beteiligt waren. Die KMB nehmen dort bei nichtdrückender Wasserbelastung den

Großteil der Abdichtungen ein. Aber auch bei drückendem Wasser liegt deren Anteil noch immer über dem der hauptsächlich in der DIN enthaltenen bahnenförmigen Abdichtungen. Da die ebenfalls dort aufgeführte Bauweise mit wasserundurchlässigem Beton sowie die Abdichtung mit Dichtungsschlämmen nicht Bestandteil der DIN 18 195 ist, wird darauf später gesondert eingegangen.

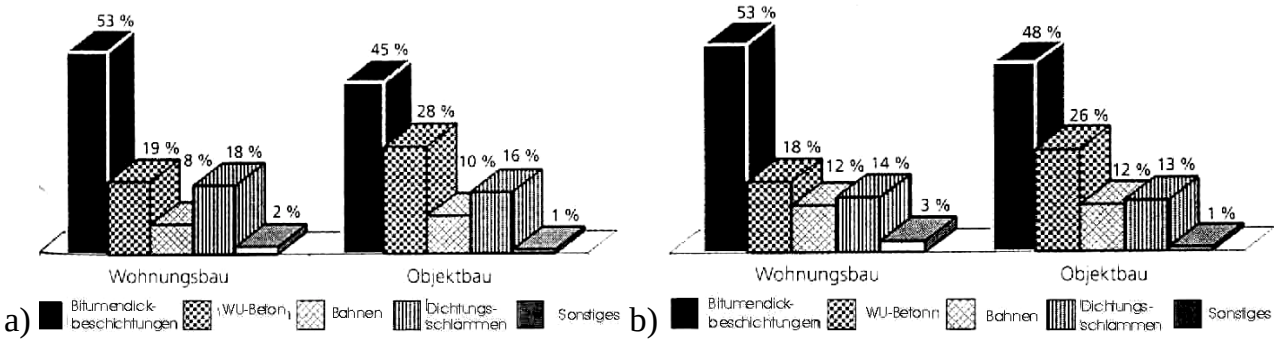


Bild 5: Abdichtungsmaßnahmen bei Bodenfeuchtigkeit (a) und nichtstauendem Sickerwasser (b) /Koh71/

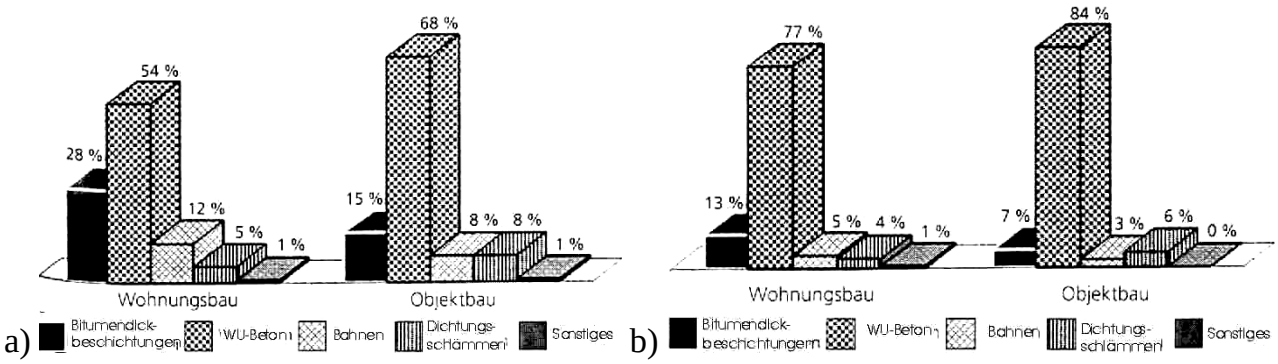


Bild 6: Abdichtungsmaßnahmen bei aufstauendem Sickerwasser (a) und drückendem Wasser (b) /Koh71/

Aufgrund der großen Verbreitung werden die KMB im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

3.3.2 Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen (KMB)

KMB werden seit mehreren Jahren für erdberührte Bauwerksabdichtungen, besonders zur Abdichtung von Kellerwänden, eingesetzt. Es handelt sich dabei um kaltverarbeitbare, lösemittelfreie pastöse, spachtel- oder spritzfähige Massen auf Basis von Bitumenemulsionen. Der Bitumenanteil wird dazu in einem wäßerigen Medium tröpfchenartig fein aufgeteilt. Aufgrund ihrer Zusammensetzung lassen sich Bitumenemulsionen auch auf feuchten mineralischen Untergründen, z. B. Beton oder Mauerwerk, gut verarbeiten. Nach dem Auftrag ist eine ausreichende Trocknungszeit zu gewährleisten, in der die fein verteilten Bitumentröpfchen zusammenlaufen und dadurch die wirksame Abdichtung bilden /Kop72/. Es gibt 1-Komponenten-Bitumendickbeschichtungen und 2-Komponenten-Bitumendickbeschichtungen, wobei letzteren eine hydraulisch abbindende Pulverkomponente hinzugefügt wird. Dadurch erfolgt eine witterungsunabhängigere, schnellere Durchtrocknung und damit eine schnellere Regenfestigkeit. Die getrockneten Schichten müssen zur Vermeidung von Beschädigungen nach dem Abtrocknungsvorgang mit einer Schutzschicht geschützt werden. Andernfalls kann es beim Auffüllen der Arbeitsräume zu Schäden an der Bitumenschicht kommen. Die Schutzschicht kann gleichzeitig auch die Funktion einer Dämmung bzw. Dränung übernehmen. So können z. B. Perimeterdämmplatten oder Dränplatten mit abdichtungsseitiger Gleitfolie verwendet werden.

In Ergänzung zur DIN 18 195 gibt es eine, allerdings völlig unverbindliche, Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen –erdberührte Bauteile-, Ausgabe 11/2001 /Arb3/, die von der verarbeitenden Industrie, den Herstellern von Bitumendickbeschichtungen sowie zahlreichen Mauerwerksverbänden und Fachleuten der Abdichtungstechnik herausgegeben wurde. Die Richtlinie enthält folgende Schwerpunkte:

- Definition der Anwendungsgebiete
- Erläuterung der Wasserbelastung (Lastfalldefinition)
- Hinweise zur Untergrundvorbereitung
- Beschreibung der Verarbeitung von KMB
- Mindestanforderungen
- Hinweise zur Ausführungskontrolle

KMB zur Abdichtung von Bauwerken sind weiterhin bauaufsichtlich nicht geregelte Produkte. Sie benötigen daher für den Einsatz als Bauwerksabdichtung einen Verwendbarkeitsnachweis nach Bauregelliste A Teil 2 in Form eines *allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfungszeugnis*. Der Übereinstimmungsnachweis erfolgt durch eine *Übereinstimmungserklärung des Herstellers nach vorheriger Erstprüfung des Bauproduktes durch eine anerkannte Prüfstelle – ÜHP*. Produkte, die diese Nachweise erbracht haben, erhalten ein Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) und dürfen nach den Bauordnungen der Länder verwendet werden /DIB26/.

Der Einsatz der neu eingeführten KMB beschränkt sich nach DIN 18 195 auf den Lastfall *Aufstauendes Sickerwasser*. Aus Bild 6 geht jedoch hervor, daß die KMB auch bei drückendem Wasser angewandt werden, obwohl sie nach DIN 18 195 nicht für diesen Lastfall vorgesehen sind. In der KMB-Richtlinie /Arb3/ werden Hinweise auch für diesen Lastfall gegeben, wobei die Einstauhöhe auf 3 m begrenzt wird. Für den Auftragnehmer besteht in diesem Fall jedoch die Pflicht, auf die Abweichung von der DIN-Norm schriftlich hinzuweisen und sämtliche Vor- und Nachteile dieser Bauweise darzulegen /Arb3/.

Gegen die KMB gibt es zum Teil erhebliche Vorbehalte bezüglich deren Praxisbewährung /Kam66, Kam67/. Auch die Aufnahme der KMB in die DIN 18 195 wird kritisch diskutiert, da in der DIN 18 195 keine klaren Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung gestellt werden /Gun51/. Vor allen Dingen bei der fachgerechten Verarbeitung durch den Ausführenden liegt eine Schwachstelle dieses Abdichtungssystems. Aus diesem Grund werden in einem Lehrgang beim Zentralverband des Deutschen Baugewerbes die entsprechenden Fachkenntnisse vermittelt /Int61/.

3.4 Anforderungen an den Untergrund und Verarbeitung der Stoffe

3.4.1 Anforderungen an den Untergrund

Der Untergrund, auf den die Bauwerksabdichtung aufgebracht wird, hat einen wesentlichen Einfluß auf den Erfolg der Abdichtungsmaßnahme. Durch einen schlecht vorbereiteten Untergrund kann die Haftung der Abdichtung beeinträchtigt werden, und es kann zu Schäden an der Abdichtung kommen. Daher müssen diese Bauwerksflächen frostfrei, fest, eben, frei von Rissen, Nestern und Graten sein, sowie frei von schädlichen Ablagerungen. Bei aufgeklebten Abdichtungen müssen die Klebeflächen oberflächentrocken sein. In Abhängigkeit der verwendeten Abdichtungsform wird der Untergrund entsprechend der produktspezifischen Anforderungen vorbehandelt. In der Neufassung der DIN 18 195 wurden Grundierungen und Kratzspachtelungen neu aufgenommen.

3.4.2 Anforderungen an die Verarbeitung

Der Verarbeitung der Abdichtungsstoffe kommt eine ebenso wichtige Bedeutung wie der Behandlung des Untergrundes zu. Ein Großteil der auftretenden Schäden, die eine nachträgliche Sanierung erforderlich machen, können auf unsachgemäße Ausführung zurückgeführt werden, bei der die produktspezifischen Verarbeitungshinweise nicht beachtet wurden. In DIN 18 195-3 sind für die folgenden Stoffe die Anforderungen an die Verarbeitung aufgeführt:

- Bitumen-Voranstriche, Grundierung, Versiegelung, Kratzspachtelung
- Klebemassen und Deckaufstrichmittel
- KMB
- Asphaltmastix und Gußasphalt
- Bitumenbahnen und Metallbänder
- Kaltselbstklebende Bitumen-Dichtungsbahnen
- Kunststoff- und Elastomer-Dichtungsbahnen

3.5 Abdichtung nach DIN 18 195-4 /DIN36/

Die DIN 18 195-4 beschreibt Bauwerksabdichtungen für die Lastfälle *Bodenfeuchte* und *nichtstauendes Sickerwasser* (s. Bild 1 und 2). Es sind alle vom Boden berührten Außenflächen der Umfassungswände bis zum Fundamentabsatz gegen seitliche Feuchtigkeit abzudichten. Außerdem sind die Außen- und Innenwände durch mindestens eine waagerechte Abdichtung (Querschnittsabdichtung) gegen aufsteigende Feuchtigkeit zu schützen. Diese muß an die Abdichtung der Außenfläche herangeführt oder verklebt werden, um Feuchtigkeitsbrücken zu vermeiden.

Die Bodenplatte ist grundsätzlich gegen aufsteigende Feuchtigkeit abzudichten. Die Abdichtung ist an die waagerechte Abdichtung der Wände so heranzuführen, daß keine Feuchtigkeitsbrücke entsteht. Bei geringer Anforderung an die Raumnutzung, unter die Räume fallen, die nicht dem ständigen Aufenthalt von Personen dienen, kann eine Abdichtung entfallen, wenn eine mindestens 150 mm dicke kapillarbrechende Schicht unter der Bodenplatte angeordnet wird, die den Wassertransport durch die Bodenplatte ausreichend behindert. Bild 7 zeigt eine Möglichkeit der Abdichtung nach DIN 18 195-4 mit KMB, wie sie in der KMB-Richtlinie /Arb3/ vorgeschlagen wird.

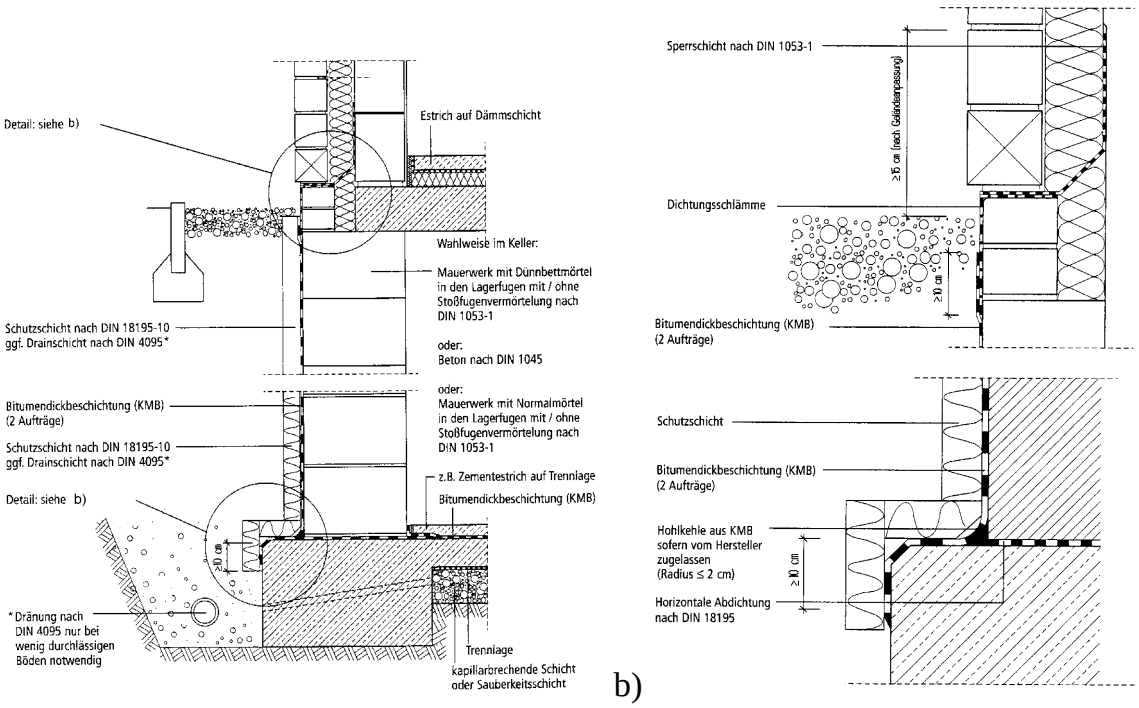


Bild 7: Anordnung der Abdichtung mit KMB für den Lastfall Bodenfeuchte und nichtstauendes Sickerwasser /Arb3/

3.6 Abdichtung nach DIN 18 195-6 /DIN36/

DIN 18 195-6 beschreibt Bauwerksabdichtungen gegen *aufstauendes Sickerwasser* und *drückendes Wasser* (s. Bild 3 und 4). Dabei wird die Abdichtung in der Regel auf der dem Wasser zugeordneten Seite angeordnet und muß eine geschlossene Wanne bilden oder das Bauwerk vollständig umschließen. Fehlstellen wirken sich bei Druckwasser besonders stark aus.

Die wasserdruckhaltende Abdichtung ist bei stark durchlässigem Boden bis mindestens 300 mm über den Bemessungswasserstand zu führen. Oberhalb dieser Abdichtung muß der Wandbereich nach DIN 18 195-4 abgedichtet werden. Bei wenig durchlässigem Boden ist die Abdichtung wegen der Gefahr der Stauwasserbildung mindestens 300 mm über die geplante Geländeoberkante zu führen. Bei den zu erwartenden Bewegungen durch Schwinden, Temperaturänderungen und Setzungen darf sie ihre Schutzwirkung nicht verlieren. Sie müssen daher bereits vorhandene Risse bis 0,5 mm und weitere unterschiedlich große Rißöffnungen in Abhängigkeit des vorliegenden Lastfalles überbrücken können. Der Abdichtung sollten keine Kräfte parallel zu ihrer Abdichtungsebene zugewiesen werden, bzw. es muß durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden, daß Bauteile auf der Abdichtung gleiten können.

Für den Lastfall drückendes Wasser dürfen nur bahnenförmige Abdichtungen nach Maßgabe von Abschnitt 8 der DIN 18 195-6 verwendet werden. Früher bestanden diese ausschließlich aus bituminösen Stoffen oder Teer. Aus diesem Grund hat sich hierfür der Begriff *Schwarze Wanne* eingebürgert. Heute werden auch Kunststoff-Dichtungsbahnen hergestellt, die hell sein können /Loh75/. Bild 8 zeigt eine Möglichkeit mit bahnenförmiger Abdichtung als sogenannte *schwarze Wanne* für den Lastfall *drückendes Wasser* und Bild 9 eine mögliche Detailausführung für den Lastfall *Aufstauendes Sickerwasser* für eine hochwertige Raumnutzung.

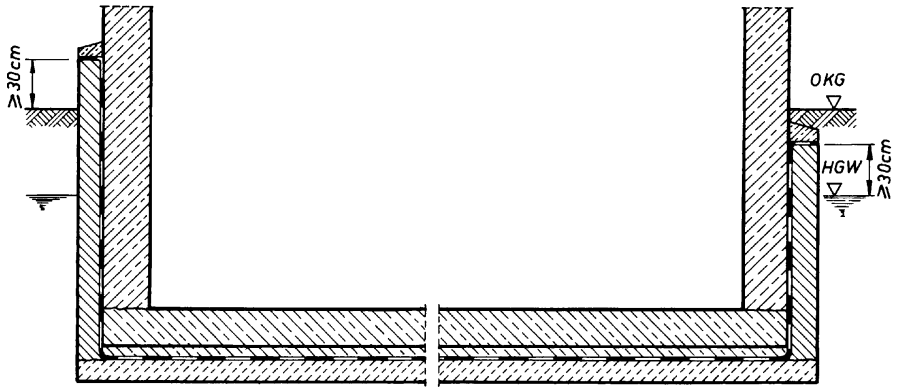


Bild 8: Bahnenförmige Abdichtung für den Lastfall *drückendes Wasser* nach DIN 18 195-6 bei einem wenig durchlässigen Boden (links) und einem stark durchlässigen Boden (rechts) /Loh75/

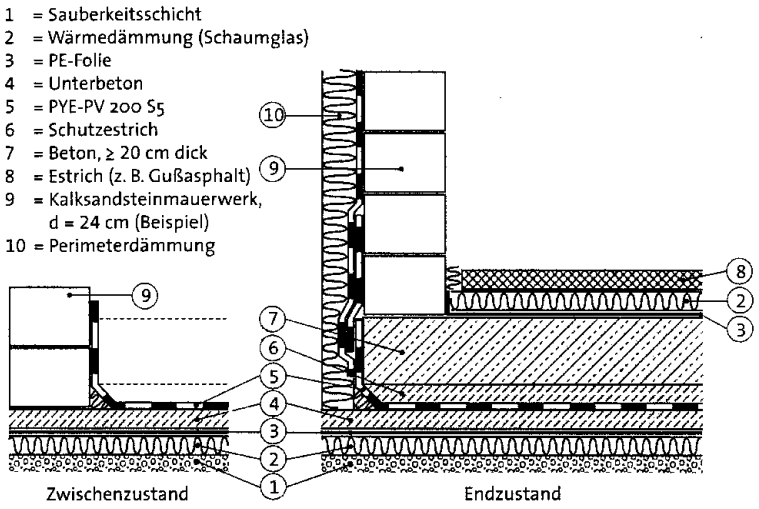


Bild 9: Detailausführung einer bahnenförmigen Abdichtung für den Lastfall *Aufstauendes Sickerwasser* bei hohen Anforderungen an die Raumnutzung /Bra10/

Bild 10 zeigt eine mögliche Ausführung der Abdichtung für den Lastfall *Aufstauendes Sickerwasser*.

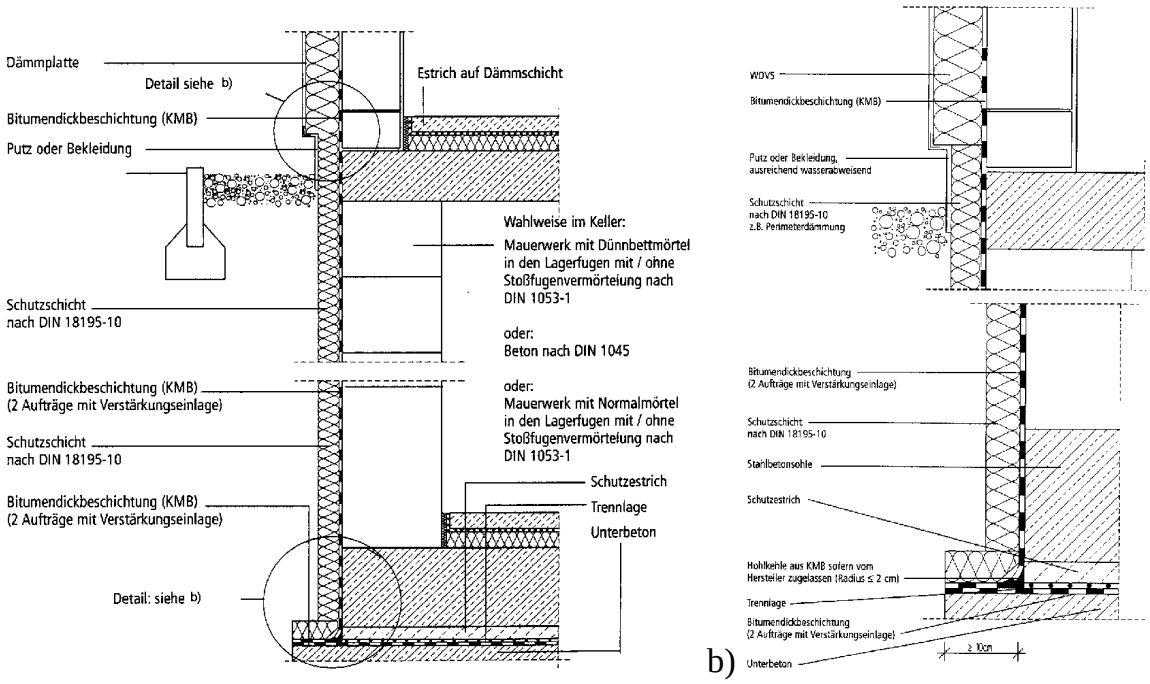


Bild 10: Abdichtung mit KMB für den Lastfall *aufstauendes Sickerwasser* nach DIN 18 195-6 /Arb3/

Der Lastfall drückendes Wasser beinhaltet neben dem abdichtungstechnischen Problem auch noch eine statisch zu berücksichtigende Komponente. Dieser sogenannte Auftrieb kann unter Umständen zu einem Aufschwimmen des Bauwerks oder zu einem Bruch der Bodenplatte führen. Die Belastung durch drückendes Wasser muß von daher auch in die statische Berechnung mit eingehen. Die Sicherheit gegen Auftrieb wird in DIN 1054 /DIN31/ behandelt.

4 ABDICHTUNGEN AUSSERHALB DER DIN 18 195

4.1 Allgemeines

Die DIN 18 195 regelt nur einen Teil der möglichen Abdichtungssysteme. Es werden jedoch noch weitere Systeme in der Praxis verwendet, die zum Teil eine hohe Verbreitung besitzen. Auch damit lassen sich erdberührte Bauteile erfolgreich gegen die verschiedenen Wasserangriffe abdichten. Auf diese Möglichkeiten wird im Folgenden eingegangen.

4.2 Wasserundurchlässiger Beton (WU-Beton)

4.2.1 Allgemeines

Wasserundurchlässiger Beton ist keine Bauwerksabdichtung nach DIN 18 195. Für den Bau von sogenannten Weißen Wannen liegt in Deutschland kein einheitliches übergeordnetes Regelwerk vor, so daß Planung und Ausführung über geeignete Vorschriften aus verschiedenen Teilbereichen erfolgen muß. Aus diesem Grund wird vom Deutschen Ausschuß für Stahlbeton zur Zeit eine Richtlinie erarbeitet, die die Bauweise aus wasserundurchlässigem Beton regeln soll /Ebe45/. Folgende Regelwerke geben Hinweise zur Ausführung von wasserundurchlässigen Bauwerken:

- DIN 1045: Ausgabe 07/88 /DIN27/
- DIN 1045-2: Ausgabe 07/01 /DIN28/
- VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen, Ausgabe 1996, DIN 18 331 – Beton- und Stahlbetonarbeiten /DIN37/
- Vorschrift: für die Abdichtung von Ingenieurbauwerken (AIB) der Deutschen Bundesbahn, DS 835 /Deu22/
- ZTV-K 96: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauwerke, Ausgabe 1996 /Bun11/
- DBV-Merkblatt: Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton, Fassung Juni 1996 /Deu25/
- DAfStb Richtlinie: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton, Entwurf Stand 02/2002 /DAf24/

Ein anerkanntes Buch zur Ausführung von Weißen Wannen ist /Loh75/.

Aufgrund seines Erscheinungsbildes wird ein Keller aus WU-Beton auch als *Weiße Wanne* bezeichnet. Für diesen Beton wurde früher häufig Hochofenzement verwendet, der dem Beton im trockenen Zustand ein sehr helles Aussehen gibt.

WU-Beton ist keine Abdichtung im eigentlichen Sinne, da er nicht rißüberbrückungsfähig und gefügedicht gegen fließendes Wasser ist /Klo70/. Erst die gesamte Konstruktion aus einzelnen Bauteilen einschließlich der Fugen kann als Bauweise aus WU-Beton in der

Bauwerksabdichtung bezeichnet werden /Bre8/. Die abdichtende Wirkung dieser Bauweise ist nicht so stark ausgebildet wie bei den bahnenförmigen Abdichtungen nach DIN 18 195, die als wasserdicht bezeichnet werden können. Ein Stoff kann als wasserdicht angesehen werden, wenn in ihn kein Wasser eindringt. Dies ist der Fall für Stoffe mit einem Wasseraufnahmekoeffizient nach DIN 52 617 /DIN39/ von $w \leq 0{,}001$ kg/($m^2*h^{1/2}$) /Loh75/.

Die Bauweise in WU-Beton wird als wasserundurchlässig bezeichnet, da Wasser bis zu einer bestimmten Tiefe eindringen kann. Der Transport von Wasser erfolgt nicht als flüssige Phase (Permeation), sondern durch Diffusion des Wasserdampfes. Daher kann WU-Beton auch nicht als Abdichtung im eigentlichen Sinne betrachtet werden. Beton gilt nach alter DIN 1045 /DIN27/ als wasserundurchlässig, wenn bei der Prüfung nach DIN 1048-5 /DIN29/ bei einem mit 5 bar wirkenden Wasserdruck (entsprechend 50 m Wassersäule) innerhalb von 72 Stunden die Eindringtiefe nicht größer als 50 mm ist. In der neuen, noch nicht bauaufsichtlich eingeführten DIN 1045-2 /DIN28/ wird der Wassereindringwiderstand indirekt über den w/z-Wert in Abhängigkeit von der Bauteildicke gesteuert. Als obere Grenze gilt wie bisher $w/z \leq 0{,}6$.

In einer Konstruktion aus WU-Beton findet bei anstehendem Wasser sowohl ein kapillarer Wassertransport als auch Wasserdampfdiffusion statt /Loh75/, so daß es zu einer langsamen Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit im Rauminneren kommen kann. In der Regel überwiegt die Diffusion. Dies ist bei der geplanten Raumnutzung zu beachten. Neueren Laboruntersuchungen /Bed6/ ist zu entnehmen, daß in WU-Beton, der einseitig mit drückendem Wasser beaufschlagt wird, Wasser eindringt, während auf der trockenen Seite ein Austrocknungsvorgang einsetzt, bei dem überschüssiges, nicht für die Hydratation benötigtes Wasser durch Wasserdampfdiffusion an die Umgebung abgegeben wird, wenn die Raumluft ausreichend trocken ist. Diese Austrocknungsfront schreitet bis zu einem gewissen Maße ins Bauteilinnere fort, während von der anderen Seite das Wasser bis zu einer gewissen Tiefe eindringt. Dieses Eindringen von Wasser nimmt mit der Zeit ab, da der Beton sich selbst abdichtet und damit undurchlässiger wird. Ist das Bauteil so dünn, daß sich der Austrocknungs- und der Eindringbereich überschneiden, kann ein Wassertransport durch das Bauteil stattfinden. Bei ausreichender Dicke, die bei etwa 15 bis 20 cm beginnt, liegt in der Mitte des Bauteils ein Bereich, in dem der Wassertransport durch den Beton geringfügig bis vernachlässigbar ist /Bed6/. In diesem Fall wird praktisch nur die Eigenfeuchte des Betons an die Umgebung abgegeben (Bild 11). Daraus ergibt sich die Möglichkeit, auch ohne Anordnung einer zusätzlichen Abdichtung mit WU-Beton eine hochwertige Raumnutzung zu erlangen, sobald hinsichtlich der Baufeuchte ein stabiler Ausgleichszustand eingetreten ist.

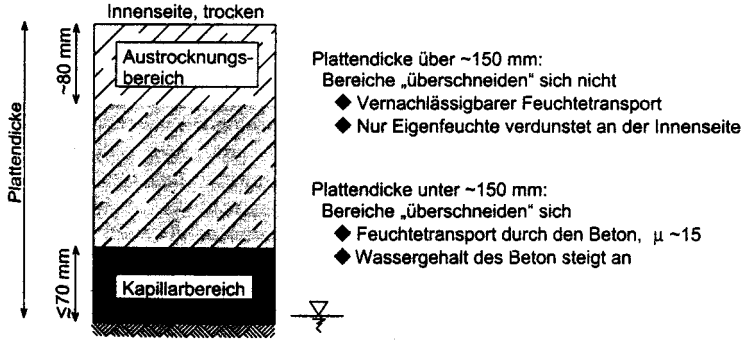


Bild 11: Modell für den Feuchtetransport in Betonplatten /Bed6/

In der Praxis wird der Wassertransport durch Risse, Verdichtungsmängel, Entmischungen und in Druckrichtung liegender Bewehrungsstäbe im Vergleich zu den in den Laboruntersuchungen festgestellten Wassertransporten erhöht.

Näherungsweise kann im ersten Jahr nach der Herstellung davon ausgegangen werden, daß das Verhältnis zwischen dem diffundierenden Wasser und dem aus der Restfeuchte abgegebenen Wasser größenordnungsmäßig 1 : 20 beträgt. Ganz allgemein kann eine täglich eindiffundierende Wasserdampfmenge von $m_d \leq 0{,}5$ g/(m²·d) angenommen werden, sowie eine während des ersten Jahres nach der Herstellung beim Austrocknen der Bauteile auftretende Wassermenge $m_A \leq 10$ g/(m²·d) /Loh75/.

4.2.2 Vor- und Nachteile von Weißen Wannen

Ein Vorteil von Weißen Wannen ist die Einfachheit der Konstruktion. Da der Beton in Verbindung mit der Stahlbewehrung die abdichtende Wirkung übernimmt, entfallen die Arbeiten zur Herstellung der Hautabdichtung mit den zugehörigen Nebenarbeiten. Dies führt i. d. R. zu Bauzeitverkürzungen. Bild 12 zeigt das Grundprinzip einer Weißen Wanne. Im Vergleich zu Bild 8 ist die wesentlich einfacher gehaltene Konstruktion zu erkennen. Mögliche Undichtigkeiten sind besser zu lokalisieren als bei Hautabdichtungen, da der Wasseraustritt auf der Rauminnenseite meist an Fehlstellen auftritt. Nachbesserungen sind leicht durchzuführen und sind auch Bestandteil des Bauens mit WU-Beton /Loh75/.

Zu den Nachteilen gehört, daß das Bauwerk möglichst rissearm konstruiert werden muß, was unter anderem auch eine lange Nachbehandlung erfordert. Bauwerksfugen müssen durch Sonderkonstruktionen abgedichtet werden, wie z. B. Fugenbänder oder Injektionsschläuche. Die Bauteile sind auf eine gute Betonierbarkeit hin zu konstruieren, um Fehl-

stellen und damit Undichtigkeiten zu vermeiden. Die bereits erwähnte nicht völlige Wasserdichtheit erfordert je nach Nutzung der Räumlichkeiten die Beachtung von Einflüssen aus bauphysikalischen Gesetzmäßigkeiten und eventuell daraus folgender besonderer Maßnahmen, wie z. B. eine Wärmedämmung, einen regelmäßigen Luftwechsel oder einen entsprechenden möglichst wasserdampfdurchlässigen Innenausbau. Durch diese Maßnahmen lassen sich Wasseransammlungen unter dem Innenausbau oder Kondenswasser an kalten Wänden infolge fehlender Wärmedämmung vermeiden. Bei Bauwerken im Grundwasser kann eine sogenannte Perimeterdämmung diese Funktion übernehmen. Andernfalls kann es zu sichtbaren Feuchteschäden und als Folge daraus auch zu Schimmelpilzbefall mit dessen gesundheitsgefährdenden Folgen kommen /Loh75/.

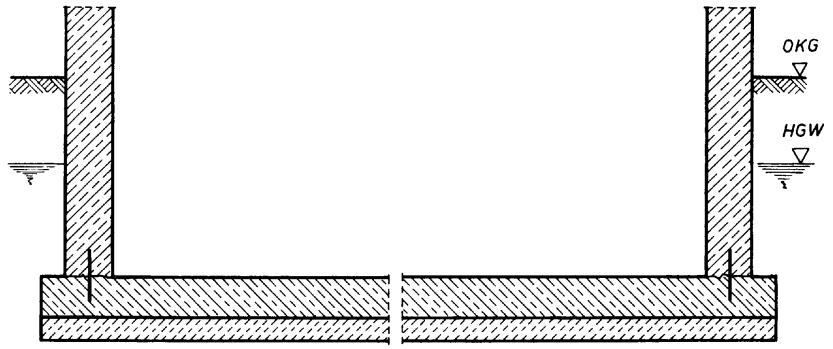


Bild 12: Bauweise mit WU-Beton als Weiße Wanne /Loh75/

4.2.3 Eigenschaften des Betons

Richtig zusammengesetzter und gut verarbeiteter Beton ist ohne besondere Zusätze und weitere Abdichtungen von sich aus wasserundurchlässig. Die Wasserundurchlässigkeit kann jedoch durch Risse beeinträchtigt werden. Diese können zum einen durch die auftretenden Zugspannungen aus Lasten und Zwang, aber auch durch das Verhalten des Betons und damit seiner Eigenschaften entstehen /Loh75/.

Ein möglichst dichtes Betongefüge ist die Voraussetzung für die Wasserundurchlässigkeit und kann über die folgenden Forderungen an die Bestandteile Zementstein und Zuschlag erreicht werden.

- Möglichst dichtes Zementsteingefüge
- Zuschlag mit dichtem Gefüge
- Innige Verbindung zwischen Zementstein und Zuschlag

Ein dichtes Zementsteingefüge entsteht, wenn die Zusammensetzung des Zementleims so erfolgt, daß möglichst wenig Kapillarporen, die im erhärteten Zustand die Wassereindringtiefe bestimmen, vorhanden sind. Ein Großteil der Kapillarporen entsteht im Zementsteingefüge durch Wasser, das am Erhärten des Beton nicht beteiligt ist, wie überschüssiges Wasser und verdunstendes Wasser. Das überschüssige Wasser wird in DIN 1045 durch die Begrenzung des Wasserzementwertes auf 0,6 limitiert, da der Zement nur in etwa 40 % seines Gewichtes an Wasser zur vollständigen Hydratation benötigt. Wasser, das darüber hinaus noch vorhanden ist, erzeugt Kapillarporen im erhärteten Zementstein. Eine Verdunstung des vorhandenen Wassers kann die Entstehung von Kapillarporen ebenfalls fördern, da dem Zement das für das Erhärten erforderliche Wasser entzogen wird. Die Hydratation wird durch die Wasserverdunstung aufgrund von Wassermangel unterbrochen und bleibt unvollständig. Die Folge ist eine deutlich schlechtere Betonqualität. Daher muß Beton in Form von Feuchthalten der Betonoberfläche ausreichend nachbehandelt werden /Loh75/.

Anforderungen an die Wasserundurchlässigkeit werden in DIN 1045 /DIN27/ festgelegt. Außerdem wird dort die Zusammensetzung von WU-Beton geregelt. Die Prüfungen zum Nachweis der Wasserundurchlässigkeit sind in DIN 1048 Teil 5 /DIN29/, Abschnitte 3.6, 6.4 und 7.6 beschrieben. Für DIN 1045-2 /DIN28/ bzw. DIN EN 206-1 /DIN40/ gilt zukünftig DIN EN 12390-8 /DIN43/.

4.2.4 Bauweisen

4.2.4.1 Allgemeines

Wie bereits erwähnt kann die Funktionsfähigkeit wasserundurchlässiger Baukörper durch Risse entscheidend beeinträchtigt werden. Daher muß es das Ziel sein, wasserführende Risse zu vermeiden bzw. sie unschädlich zu machen. In den meisten Fällen sind Zwangs- oder Eigenspannungen die Rißursache, so daß diesen Beanspruchungen in der Bauweise besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muß. Es gelten folgende Grundsätze:

- Eigen- und Zwangsspannungen möglichst vermeiden.
- Unvermeidbare Eigen- und Zwangsspannungen möglichst gering halten.

Zwangs- und Eigenspannungen können im frühen Stadium auftreten durch abfließende Hydratationswärme und Schwinden. Aber auch später sind solche Spannungen nicht zu vermeiden, z. B. bei Witterungseinflüssen. Zwangsspannungen entstehen durch abschnitts-

weises Betonieren, Verformungsbehinderungen oder auch Querschnittsänderungen. Sind die oben genannten Grundsätze nicht einzuhalten, müssen andere Maßnahmen getroffen werden, um die Wasserundurchlässigkeit zu gewährleisten. Dabei muß zwischen dem betriebenen Aufwand und dem erreichbaren Nutzen abgewogen werden, um eine geeignete Bauweise und zusätzliche Maßnahmen auszuwählen.

Eine weitere Schwachstelle sind die Fugen, denen bei der Abdichtung eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muß. Sie werden angeordnet, wenn größere Verformungen sie notwendig machen und sie zum Abbau von Zwangsspannungen führen.

Aus diesen Ansätzen ergeben sich drei unterschiedliche Bauweisen, die im Folgenden kurz erläutert werden /Loh75/.

4.2.4.2 Bauweise mit verminderter Zwangbeanspruchung

Bei dieser Bauweise werden die Zwangbeanspruchungen so gering wie möglich gehalten und wasserführende Risse möglichst vermieden. Dies ist mit drei unterschiedlichen Maßnahmen zu erreichen:

- Konstruktive Maßnahmen
- Betontechnologische Maßnahmen
- Ausführungstechnische Maßnahmen

Auf konstruktiver Seite ist es günstig, Gebäudeteile mit unterschiedlichen Höhen und wesentlich anderen Belastungen des Baugrundes durch Bewegungsfugen voneinander zu trennen. Ebenso sind scharfe Querschnittsänderungen möglichst zu vermeiden, da durch sie Kerbspannungen verursacht werden. Wände und Sohlplatte sollten möglichst jeweils eine einheitliche Dicke besitzen und so ausgebildet werden, daß sie in einem Arbeitsgang hergestellt werden können. Eine Sohlplatte in einer Ebene ermöglicht eine Bewegung der Platte durch Längenänderungen auf dem Untergrund. Bei Wänden sind in Abhängigkeit von der vorhandenen Höhe und Dicke Fugen anzuordnen, die durch eine geeignete Abdichtung zu sichern sind /Loh75/.

4.2.4.3 Bauweise mit beschränkter Rißbildung

Bei dieser Bauweise werden unvermeidbare Zwänge durch Bewehrung abgedeckt, wodurch entstehende Risse möglichst fein verteilt werden. Bei ausreichend kleinen Rißweiten beeinträchtigen diese nicht die Wasserundurchlässigkeit. Risse können entstehen, wenn die konstruktiven, betontechnologischen oder ausführungstechnischen Maßnahmen nicht eingehalten werden können. Bei der Rißbildung wird die plötzlich frei werdende Betonzugkraft vom Betonstahl aufgenommen und über einen Einleitungsbereich wieder in den Beton eingeleitet. Der Riß öffnet sich nur bis zu einer bestimmten Weite und bleibt damit unschädlich. Bild 13 zeigt ein Rißbild bei Bewehrung aus Rippenstahl.

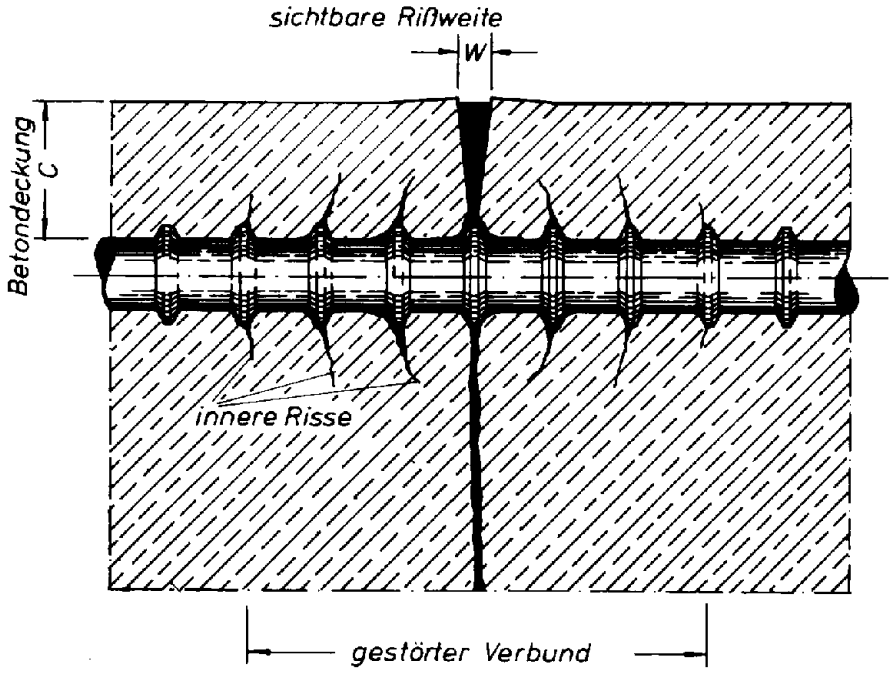


Bild 13: Rißbild in zwang- und lastbeanspruchtem Beton /Loh75/

Die die Risse verteilende Bewehrung kann die Rißbildung jedoch nicht verhindern, sondern lediglich die Rißweite auf ein bestimmtes Maß begrenzen, da die Stahlspannung im Wesentlichen erst nach einer Rißbildung, aktiviert wird. Bei ausreichender Rißweite stellen diese Risse keinen Baumangel dar /Bre9, Loh75/.

4.2.4.4 Bauweise mit Rißbildung

Bei dieser Bauweise wird auf den Einbau einer umfangreichen Bewehrung sowie enger Fugenabstände verzichtet. Die Risse werden bewußt in Kauf genommen und die durch anstehendes Wasser durchfeuchteten Risse werden planmäßig geschlossen. Diese Bauweise macht nur Sinn, wenn das Bauwerk im Bauzustand im Wasser steht und seinem höchsten Wasserdruck ausgesetzt ist. Außerdem müssen die Sohl- und Wandflächen des Bauwerks für eine nachträgliche Abdichtung zugänglich sein. Diese Bauweise ist kostengünstig, allerdings muß der Auftraggeber dieser Bauweise zustimmen /Loh75/.

4.2.5 Fertigteil-/Halbfertigteilbauweise

Wände von Weißen Wannen lassen sich auch mit Fertigteilen oder Halbfertigteilen herstellen. Die Fertigteillösung erfordert Wanddicken von mindestens 20 cm. Besondere Bedeutung kommt der horizontalen und auch vertikalen Fugenausbildung und –abdichtung zwischen den einzelnen Teilen zu, da diese die wesentlichen Schwachstellen der Fertigteillösung darstellen. Die Gefahr von Rissen durch Zwangsspannungen infolge Zwängungen bei der Erhärtung kann hingegen ausgeschlossen werden /Bre9/.

Die Halbfertigteillösung bedient sich zweier 4 bis 6 cm dünner großformatiger Fertigteilplatten, die durch Gitterträger zu einem Doppel-Element zusammengefügt werden. Nach dem Aufstellen werden sie mit wasserundurchlässigem Ortbeton vergossen. Die Verfüllung kann auch mit selbstverdichtendem Beton (SVB) erfolgen. Der notwendige Verbund wird durch die Gitterträger und die Rauhigkeit der Schaleninnenfläche hergestellt. Es entsteht eine Dreifachwand, deren Gesamtquerschnitt gemeinsam im Verbund wirkt und bei der Bemessung auch so berücksichtigt werden darf. Diese Bauart erfordert eine besondere Sorgfalt hinsichtlich der Planung, der Fugendichtung sowie ausführungstechnischer Gesichtspunkte, wodurch jedoch die Umsetzung der oben beschriebenen Bauweisen als Weiße Wanne ermöglicht wird /Alf1, Loh75/. Für diese Elementwände bestehen allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik. Bild 14 zeigt einen beispielhaften Aufbau einer solchen Elementwand mit Ortbetonergänzung und Fugenabdichtungssystem.

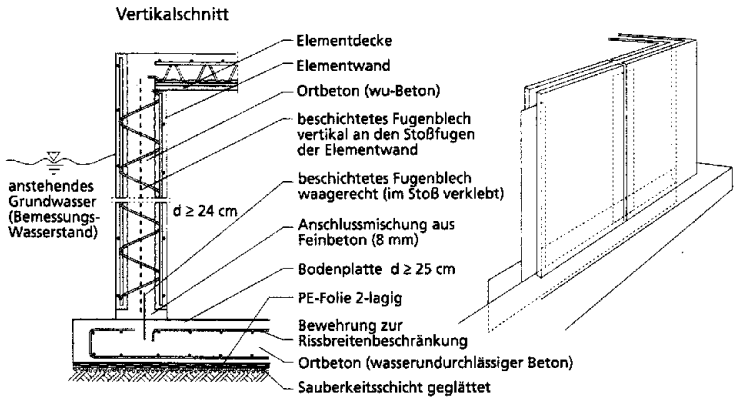


Bild 14: Ausführung einer Elementwand mit Ortbetonergänzung und Fugenabdichtung /Alf1/

4.2.6 Kombinierte Bauweise mit KMB

Bei Bauwerken mit hohen Anforderungen an die Raumnutzung kann eine Kombination aus WU-Beton und KMB vorteilhaft sein /Bre8, Hei53/. Die Wasserdampfdiffusion läßt sich auf diese Weise reduzieren. Häufig wird eine WU-Bodenplatte in Kombination mit Mauerwerkwänden eingesetzt. Diese werden zum Beispiel mit KMB abgedichtet, wobei dem Anschluß der Wandabdichtung an die Bodenplatte große Bedeutung zukommt /Hei53/. Die KMB-Richtlinie /Arb3/ gibt für diesen Fall entsprechende Hinweise.

4.3 Dichtungsschlämmen

4.3.1 Allgemeines

Wie aus Bild 5 und 6 hervorgeht, werden Dichtungsschlämmen ebenfalls häufig in der Praxis eingesetzt, sind aber noch nicht Bestandteil der DIN 18195. Es kann zwischen zwei Arten von Dichtungsschlämmen unterschieden werden:

- Rissüberbrückende (flexible) Dichtungsschlämmen
- Nichtrißüberbrückende (rein mineralische) Dichtungsschlämmen

Die hauptsächliche Wirkung der Schlämmen beruht auf der Kapillarunterbrechung und Kapillardepression. Durch einen optimierten Kornaufbau wird ein Porensystem erreicht, in dem die Anzahl der Kapillarporen reduziert wird und in erster Linie nur noch Gelporen vorhanden sind. Dadurch sind die Dichtungsschlämmen weitgehend dicht gegen Wasser in

flüssiger Form, aber nicht dampfsperrend /Wol99/. Für den Wasserdampfdiffusionswiderstand wird in etwa der 5- bis 10fache Wert von WU-Beton angegeben /Hei53/. Die Kapillardepression wird durch die Verwendung hydrophobierender Zusätze erzielt, wodurch die abdichtende Wirkung gegen Bodenfeuchtigkeit und nichtdrückendes Wasser unterstützt wird. Für den Einsatz gegen drückendes Wasser wird teilweise der Gebrauch von Dichtungsschlämmen als problematisch angesehen /Loh75/.

Wie bei den KMB wird von verschiedenen Verbänden eine Anwendungsrichtlinie für flexible Dichtungsschlämmen /Arb2/ herausgegeben, die Hinweise für den Einsatz der Dichtungsschlämmen gegen Bodenfeuchte, nichtdrückendes und drückendes Wasser geben. Die entsprechende Richtlinie für mineralische Dichtungsschlämmen befindet sich zur Zeit noch in der Bearbeitung. Der Einsatz dieser Richtlinien kann als Basis für die Planung und Steigerung der Verarbeitungssicherheit dienen. Außerdem werden dort Grundanforderungen und Grenzwerte festgelegt.

4.3.2 Flexible Dichtungsschlämmen

Bei flexiblen Dichtungsschlämmen handelt es sich um Ein- oder Zwei-Komponentensysteme, die hauptsächlich aus Zement, Zuschlägen und einem Kunststoffanteil bestehen. Die Beschichtung weist wegen des hohen Kunststoffanteils flexible Eigenschaften auf.

Aufgrund der bauaufsichtlichen Relevanz für Bauwerksabdichtungen von außen sind für Dichtungsschlämmen für diese Anwendung Verwendbarkeitsnachweise in Form von Allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen erforderlich. Flexible Dichtungsschlämmen mit diesem Prüfzeugnis sowie einer Übereinstimmungserklärung des Herstellers sind mit dem Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) gekennzeichnet.

Eine Abdichtung von innen ist ebenfalls möglich, wodurch sich ein weiterer Lastfall ergibt. *Rückseitig einwirkendes Wasser* ist Wasser, das auf der Haftseite der Abdichtung einwirkt (Bild 15). Bei einer fehlenden Außenabdichtung kann das Wasser weiterhin von außen in die Wand eindringen. Diese ist dann ständig feucht. Bei einer von innen angeordneten Abdichtungsschicht aus Dichtungsschlämme dringt die Feuchtigkeit bis zur Haftungsebene der Dichtungsschlämme vor und wirkt somit rückseitig auf diese Schicht ein. Die Haftungsebene muß die dadurch entstehenden Belastungen, die bei allen Lastfällen nach DIN 18 195 /DIN36/ auftreten kann, schadlos ertragen können.

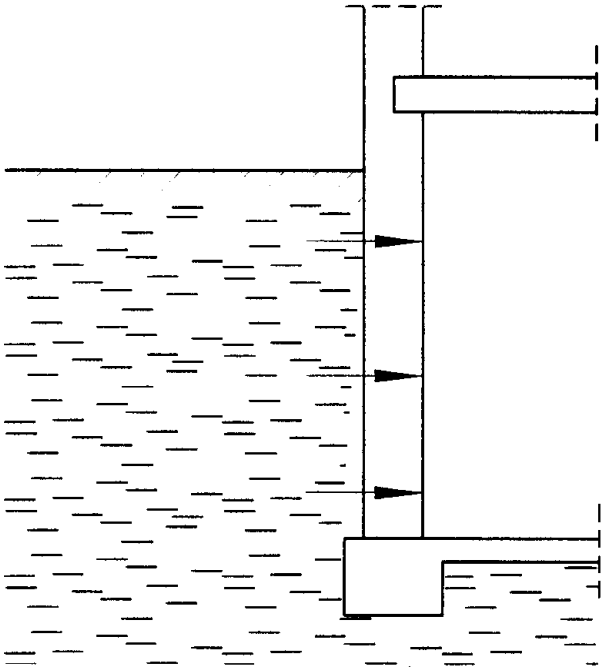


Bild 15: Lastfall rückseitig einwirkendes Wasser /Arb2/

Flexible Dichtungsschlämmen können für folgende Bereiche eingesetzt werden /Arb2/:

- Vertikalabdichtung von erdberührten Bauteilen.

  Die flexiblen Dichtungsschlämmen sind hier zur Abdichtung gegen Bodenfeuchtigkeit und nichtdrückendes Wasser bei Mauerwerk nach DIN 1053 /DIN30/, Stahlbeton nach DIN 1045 /DIN27/ und auf den Untergrund abgestimmten Putz nach DIN 18 550 /DIN38/ geeignet, sowie gegen drückendes Wasser bis 3,0 m Eintauchtiefe bei Stahlbeton nach DIN 1045 /DIN27/ mit einer rechnerischen Rißbreite $w_{cal} \leq 0{,}25$ mm.

- Horizontalabdichtung von erdberührten Bauteilen.

  Eine Abdichtung kann ebenfalls gegen Bodenfeuchte und nichtdrückendes Wasser durchgeführt werden. Bei drückendem Wasser bis 3,0 m Eintauchtiefe ist die obengenannte Rißbreitenbeschränkung einzuhalten.

- Vertikalabdichtung des spritzwassergeschützten Sockelbereiches.

  Bei Mauerwerk nach DIN 1053 /DIN30/, Stahlbeton nach DIN 1045 /DIN27/ und auf den Untergrund abgestimmtem Putz nach DIN 18 550 /DIN38/ können Dichtungsschlämmen für diesen Zweck eingesetzt werden.

- Horizontalabdichtung in Wänden beziehungsweise des Wandfußpunktes.

- Abdichtung gegen (zeitweise) von innen drückendes Wasser (während der Bauphase).

  Für zeitweise während der Bauphase stauendes Wasser sind Dichtungsschlämmen geeignet. Zur Abdichtung von Stahlbetonbauteilen gegen von innen drückendes Wasser sind sie bis zu einer Stauhöhe von 5,0 m geeignet. Die obengenannten Rißbreitenbeschränkungen sind dazu einzuhalten.

- Abdichtung gegen rückseitig einwirkendes Wasser.

  Für diesen Lastfall ist eine Bestätigung des Herstellers erforderlich. Es handelt sich um einen sehr objektspezifischen Fall, der dementsprechend geplant werden muß. Von einem generellen Einsatz ist abzuraten, da Wasserdruck und Dampfdruck von der Abdichtung zumindest zu einem gewissen Prozentsatz ertragen werden müssen.

Bei der Ausführung sind gewisse Aspekte zu beachten, worauf in der Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen erdberührter Bauteile mit flexiblen Dichtungsschlämmen /Arb2/ näher eingegangen wird.

4.3.3 Mineralische Dichtungsschlämmen

Im Gegensatz zu den flexiblen Dichtungsschlämmen können mineralische Dichtungsschlämmen nach dem Auftragen, d. h. während und nach dem Erstarren, keine Risse mehr überbrücken.

Der Anwendungsbereich liegt beispielsweise in der Abdichtung gegen Bodenfeuchtigkeit und nichtstauendes Sickerwasser nach DIN 18 195 Teil 4 und in der nachträglichen Abdichtung von Kellerinnenflächen. Sie dienen auch als Zwischenabdichtung zum Schutz von Abdichtungen, die keiner Wassereinwirkung von der Haftseite ausgesetzt werden dürfen,

wie z. B. KMB, Dichtungsbahnen oder Folien. In der Altbausanierung dienen sie zur Schaffung eines trockenen Untergrundes für nachfolgende Abdichtungen, für die ein feuchter Untergrund nicht geeignet ist. Mineralische Dichtungsschlämmen sind zementgebunden und deshalb unempfindlich beim Auftrag auf durchfeuchtete, mineralische Untergründe /Wol99/.

Für den Einsatz von mineralischen Dichtungsschlämmen ist ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis als Verwendbarkeitsnachweis erforderlich. Zur Zeit ist ein Merkblatt entsprechend dem der flexiblen Dichtungsschlämmen in Bearbeitung, welches voraussichtlich Mitte des Jahres 2002 erscheinen wird. Bis dahin kann das Merkblatt *Bauwerksabdichtungen mit zementgebundenen starren und flexiblen Dichtungsschlämmen* /Ind57/ herangezogen werden. Dort sind die Prüfungen der Ausgangsstoffe sowie der Eigenschaften der fertigen Schicht beschrieben.

4.4 Sonstige Abdichtungsformen

4.4.1 Flüssigkunststoffe

Bei Abdichtungen mit Flüssigkunststoffen handelt es sich um eine Beschichtung, die auf die abzudichtenden Baukörper aufgetragen wird. Nach der Verfestigung entsteht dann die wirksame Abdichtung /Klo70/.

4.4.2 Bentonitplatten

Als Bentonit bezeichnet man tonhaltiges Gestein, das durch die Verwitterung vulkanischer Asche entstanden ist. Das Montmorillonit ist das Tonmineral, das die besonderen Eigenschaften des Bentonits ausmacht. Es handelt es sich um ein quellfähiges Dreischichtsilikat, das der Gruppe der Smektite zugeordnet werden kann. Die Aufweitung der Zwischenschichten bei Wasserzutritt kann im Extremfall zu einer Auflösung des Kristallverbundes führen /Int59/. In der Bauindustrie werden im wesentlichen folgende drei Bentonitgruppen eingesetzt.

- Calciumbentonit

  Die Smektit-Gruppe ist fast ausschließlich mit Ca^{2+} oder Mg^{2+}-Ionen in den Zwischenschichten belegt.

- Natriumbentonit (natürlicher)

  Die Smektit-Gruppe ist überwiegend mit Na^{2+} -Ionen in den Zwischenschichten belegt. Es können aber auch zusätzlich Ca^{2+} oder Mg^{2+} Ionen in verschiedenen Mengen vorhanden sein.

- Aktivbentonit

  Es handelt sich ursprünglich um einen Calciumbentonit, bei dem die originale Kationenbelegung der Zwischenschichten mittels alkalischer Aktivierung durch Na^{+}-Ionen ausgetauscht wird.

Bei Zutritt von Wasser kommt es zu einem Quellvorgang, der dadurch bewirkt wird, daß Wasser zwischen die Elementarschichten eindringt und ihren Abstand verändern kann. Man unterscheidet dabei zwischen interkristalliner Quellung, bei der die Weitung durch Eindringen von überschüssigem Wasser erfolgt und osmotischer Quellung, die durch Konzentrationsunterschiede zwischen Innenlösung und Außenlösung zustande kommt /Int59/. Wird die Quellung in ihrer Ausdehnung durch die Auflast der Sohlplatte oder den Anpreßdruck der Hinterfüllung behindert, so entsteht infolge des Quelldruckes eine hoch abdichtende Wirkung. Aus dem trockenen Bentonit ist nach Wasseraufnahme eine gelförmige Bentonithaut entstanden, die das Bauwerk sicher umschließt und jede Umläufigkeit verhindert. Bild 16 zeigt das Quellverhalten von Bentonit bei Wasserbeaufschlagung vom trockenen Zustand nach Verlegung über die erste Aktivierung durch Wasserzutritt, nach voller Wasseraufnahme und Verschmelzung des Stoßbereiches und schließlich als selbstheilende Bentonitgelmasse. Der aufgebaute Quelldruck kann mehrere bar erreichen und verhindert maßgeblich weiteres Durchdringen von Wasser. Die Wasserdurchlässigkeit liegt in etwa bei der eines WU-Betons /Ruh84/. Beim Austrocknen entstehen jedoch Schwindrisse, so daß das Austrocknen vermieden werden sollte, da sonst die ursprünglich vorhandene Dichtigkeit unter Umständen nach erneuter Wasserbeaufschlagung nicht voll wiederhergestellt werden kann.

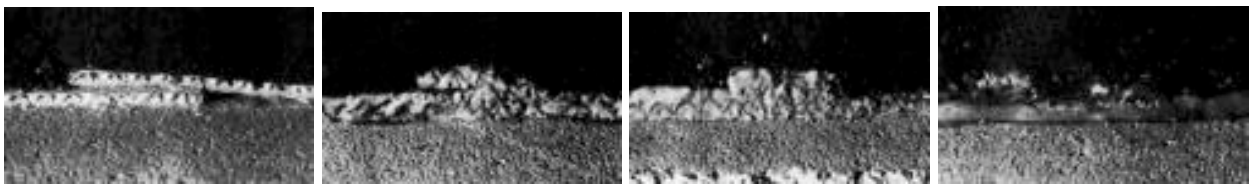


Bild 16: Die 4 Phasen des Quellprozesses in einem Zeitraum von ca. 4 Wochen /Int63/

Abdichtungsschichten aus Natriumbentonit weisen gegenüber den mehr oder weniger elastischen Abdichtungen aus Bitumen- oder Kunststoffabdichtungen einige Vorteile auf, wie z. B. /Ruh84/:

- Fehlstellen aufgrund von Verarbeitungsfehlern werden vom Bentonit durch das Quellvermögen ausgefüllt.
- Auftretende Relativbewegungen können in weiten Bereichen schadlos aufgenommen werden, solange das Austrocknen verhindert wird.
- Schäden treten in unmittelbarer Nähe zur Leckage auf und können gezielt nachgebessert werden.
- Die Hinterläufigkeit von Wasser wird durch die relativ hohen Anpressdrücke weitestgehend verhindert

Die Quellfähigkeit und das Abdichtungsverhalten werden in erster Linie von dem Wasseraufnahmevermögen bestimmt. Nach Abschluss des innerkristallinen Quellvorganges sind sämtliche Poren in Bentonitschichten wassergefüllt, so daß sich der Wassertransport nach Abschluß des Quellvorganges auf Strömungsvorgänge beschränkt. Für die geringen Wasserbewegungen gilt in diesem Falle das Darcysche Filtergesetz.

Der Grad der Wasserundurchlässigkeit hängt neben den reinen Materialkennwerten auch von folgenden Randbedingungen ab /Ruh84/:

- Mit anwachsender Schichtdicke nimmt der Wasserdurchfluß bei gleichbleibender Wasserdruckhöhe ab.
- Bei steigender Wasserdruckhöhe nimmt der Wasserdurchfluß bei gleichbleibender Schichtdicke zu.
- Höhere Anpressdrücke verringern die Wasserdurchlässigkeit.
- Unterschiedliche Salzkonzentrationen im Grundwasser beeinflussen das Quell- und Abdichtungsverhalten.

Ein Einsatz von Betonit kommt grundsätzlich in Frage, wenn auch ein Einsatz von WU-Beton möglich ist. Von daher ist auch zu beachten, daß das von der Bentonitabdichtung durchgelassene Wasser schadlos von der Raumluft des abzudichtenden Bauteils aufgenommen werden kann. Bei Bentonit entfällt im Vergleich zu WU-Beton jedoch die Notwendigkeit der Rißbreitenbeschränkung für das abzudichtende Betonbauteil. Durch die Quelleigenschaften entstehen keine nennenswerte Zwangbeanspruchungen und es werden Rißbreiten bis zu 2 mm überbrückt und sicher abgedichtet. Darunter fallen auch die bei Normalbeton maximal zulässigen Rißbreiten von in der Regel 0,3 - 0,4 mm. Bei größeren Rissen wird das Abdichtungsmaterial bei höheren Drücken (z. B. Grundwasser) in die Risse hineingedrückt. Um einen möglichst gleichmäßigen Anpressdruck zu erreichen, ist vor die Abdichtung eine Schutzschicht, wie bei anderen Abdichtungssystemen auch, anzubringen. Der maximal auftretende Wasserdruck sollte auf 3 bar (30 m Wassersäule) begrenzt werden /Ruh84/.

Im Vergleich zu WU-Beton läßt sich mit Bentonit und Wänden aus Normalbeton eine einfachere Konstruktion mit gleicher Abdichtungswirkung herstellen, da größere Fugenabstände und damit eine geringere Anzahl empfindlicher Fugenkonstruktionen sowie dünnere Bauteilabmessungen möglich sind. Die Einsparung der risseverteilenden Bewehrung hält sich jedoch in etwa im Gleichgewicht mit den Mehrkosten für die Verlegung der Bentonitplatten /Czi21/. Weitere Argumente für die Bentonitabdichtung sind deren Langlebigkeit, Wartungsfreiheit, Unempfindlichkeit gegenüber Ausführungsmängeln und ihr günstiger Preis /Ruh84/.

5 NACHTRÄGLICHE ABDICHTUNG

5.1 Allgemeines

Nachträgliche Abdichtungen von Bauwerken werden erforderlich, wenn die vorhandene Abdichtung ihren Zweck nicht mehr erfüllt. Dies kann auf fehlerhafte Planung, ungeeignete Materialien oder unsachgemäße Ausführung der Abdichtungsarbeiten zurückzuführen sein. Eine nachträgliche Sanierung ist in der Regel auf verschiedene Weisen möglich, allerdings gibt es dazu keine Normen, die ein Vorgehen festlegen. Die Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. hat ein Merkblatt herausgegeben, das auf verschiedene Verfahren und Stoffe zur nachträglichen Bauwerksabdichtung eingeht. Auf dieses Merkblatt und die dort beschriebenen Möglichkeiten, sowie weiterer, dort nicht erfaßter Maßnahmen wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

5.2 Nach WTA-Merkblatt

5.2.1 Allgemeines

Das WTA-Merkblatt „Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile“ /WTA101/ beschreibt die Möglichkeiten von ausschließlich nachträglichen Abdichtungen und deren Detaillösungen. Ausgehend von den unterschiedlichen Wasserbelastungsfällen, die über diejenigen der DIN 18 195 hinausgehen, und der Nutzung werden unterschiedliche Abdichtungskonzepte aufgezeigt. Diese kann man grundlegend einteilen in:

- Abdichtung von außen
- Abdichtung von innen
- Maßnahmen im Bauteil selbst

Um eine geeignete Maßnahme zu wählen, müssen zunächst Untersuchungen angestellt werden, aus denen eine geeignete Methode hervorgeht.

5.2.2 Voruntersuchungen

In den Voruntersuchungen wird der Bauteilzustand hinsichtlich bisheriger Schadensbilder, der Konstruktion und der vorhandenen Abdichtung erfaßt. Der anstehende Baugrund ist ebenfalls zu begutachten. Auf der Einwirkungsseite wird die Wasserbelastung einbezogen. Zusätzlich zu den in DIN 18 195 erfaßten Lastfällen werden im WTA-Merkblatt noch weitere berücksichtigt:

- Feuchtigkeitsaufnahme in Gegenwart hygroskopischer Salze
- Tauwasser
- Havarieschäden
- Mechanische Belastungen
- Belastungsänderungen
- Schädigende Bestandteile im Wasser und Boden

Die ehemalige, gegenwärtige und zukünftige Nutzung muß ebenfalls erfaßt werden um sämtliche Einwirkungen auf die Abdichtung zu berücksichtigen. Die Wärmeschutzverordnung muß eingehalten und die Bildung von schädlichem Tauwasser verhindert werden.

Zur Zustandserfassung werden repräsentative Proben entnommen, welche im Labor u. a. auf die vorhandene Feuchtigkeit oder Salzbeanspruchung untersucht werden.

5.2.3 Abdichtungskonzept

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen sowie wirtschaftliche, technische und denkmalpflegerische Gesichtspunkte führen zu einem Abdichtungskonzept, bei dem Kompromisse in technischer Hinsicht manchmal nötig sind. Ziel sollte es immer sein, eine wannenartige Ausbildung der Abdichtung zu erstellen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über mögliche Maßnahmen bei unterschiedlichen Lastfällen.

Tabelle 1: Mögliche Maßnahmen bei Auftreten unterschiedlicher Lastfälle /WTA101/

Lastfälle	Außenabdichtung		Innenabdichtung		Injektionen	
Bodenfeuchtigkeit	x	(1)	x	-	x	
Nichtdrückendes Wasser auf waagerechte Flächen	x	(2)	x	-	x	
Drückendes Wasser	x	(3) und (4)	x	(3) und (4)	x	(3) und (4)
Feuchtigkeit infolge hygroskopischer Salze	-	-	-	(5)	-	
Tauwasser	-	(6)	-	(6)	-	(6)

(1) Bei wasserdurchlässigen Böden, sonst Dränung gemäss DIN 4095
(2) Dränung gem. DIN 4095; sonst Abdichtung gegen drückendes Wasser
(3) nur bei wasserdichtem Anschluss an die wasserundurchlässige Bodenplatte
(4) die Standsicherheit des Bauteils und des Dichtungsträgers ist nachzuweisen bzw. zu überprüfen
(5) liegt nur eine hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme vor, ist es Stand der Technik, keine Abdictungen, sondern ein WTA-Sanierputzsystem aufzubringen
(6) Wärmedämmung/Dampfsperre je nach Nutzung erforderlich

Generell ist eine Außenabdichtung anzustreben, da auf diese Weise auch der Wandquerschnitt trockengelegt wird. Bei der Innenabdichtung geschieht dies nicht. Es ist jedoch genauso möglich, eine funktionstüchtige Abdichtung mittels einer Innenabdichtung auszuführen. Eine Innenabdichtung kann erforderlich werden, wenn eine vertikale Außenabdichtung technisch und wirtschaftlich nicht vertretbar ist. Die folgenden Abschnitte gehen auf die verschiedenen Abdichtungsformen ein.

5.2.4 Außenabdichtung nach WTA-Merkblatt

5.2.4.1 Allgemeines

Nachträglich kann ein Bauwerk gegen alle drei Lastfälle nach DIN 18 195 abgedichtet werden. Eine Abdichtung des Kellerbodens, an welche die nachträgliche vertikale Abdichtung angeschlossen wird, muß vorhanden sein. Auf die Verträglichkeit der verschiedenen Abdichtungsarten ist ebenfalls Wert zu legen (z. B. Bitumenbahnen und KMB). Grundsätzlich können alle Abdichtungsstoffe nach DIN 18 195 verwendet werden. Zementgebundene flexible Dichtungsschlämmen werden ebenfalls häufig eingesetzt.

5.2.4.2 Vorbereitende Arbeiten

Zunächst werden die abzudichtenden Bauteile freigelegt und gereinigt. Es muß ein geeigneter Untergrund für die Abdichtung geschaffen werden, indem der Untergrund von losen und weiteren haftungsmindernden Bestandteilen befreit wird. Offene Stellen müssen vermauert oder mit geeigneten Mörteln ausgebessert und geebnet werden. Abdichtungen sollen nicht über scharfkantige Ecken geführt werden, so daß Außenecken zu brechen sind und Innenecken mit auf das Abdichtungssystem abgestimmten Hohlkehlen auszuführen sind.

Die Art der vorher vorhandenen Abdichtung muß festgestellt und bei ungenügender Haftung und Unverträglichkeit mit der neuen Abdichtung entfernt werden. Teerhaltige Abdichtungen sind vollständig zu entfernen. Der stärker belastete Übergangsbereich zwischen Fundament und aufgehender Wand ist besonders zu beachten. Dort muß die vorhandene Bitumenabdichtung bis mindestens 25 cm über dem Übergangsbereich entfernt und mit zwei Lagen Dichtungsschlämme beschichtet werden um einen tragfähigen Untergrund für die neue Bitumendichtung zu erhalten.

5.2.4.3 Abdichtungsarbeiten

Für die Verarbeitung der Abdichtungsstoffe sind die jeweiligen Verarbeitungsrichtlinien zu beachten. Bei Anwendung von KMB, bituminösen Flüssigfolien oder selbstklebenden Dichtungsbahnen erfolgt in der Regel eine vorherige Grundierung, während Dichtungsschlämmen nur auf mineralischen Untergründen eingesetzt werden dürfen.

Für Anschlüsse verschiedener Bauteile sowie Bewegungsfugen und Durchdringungen sind in der Regel besondere Konstruktionen erforderlich, da es sich hier um besonders kritische Bereiche handelt.

5.2.4.4 Flankierende Maßnahmen

Flankierende Maßnahmen sind Maßnahmen, welche die Funktionstüchtigkeit der eigentlichen Abdichtung unterstützen oder sicherstellen. Aus diesem Grund ist auch deren Funktion dauerhaft zu sichern.

Dränanlagen nach DIN 4095 /DIN34/ zählen zu den flankierenden Maßnahmen und müssen regelmäßig überwacht werden. Ein Abfließen des gesammelten Wassers kann durch Sichtkontrollen, bzw. bei Pumpensystemen durch ein Signalsystem überprüft werden.

Ein Schutz der eigentlichen Abdichtung sorgt dafür, daß die Abdichtung nicht beschädigt wird. Beim Verfüllen der Baugrube kann es zu punkt- und linienförmigen Belastungen der Abdichtung oder zu einem Mitreißen der Abdichtung durch Füllgutsetzungen kommen. Durch lagenweise Verfüllung läßt sich das Risiko reduzieren, wobei die Schutzschicht eine zusätzliche Sicherheit bietet. Diesen Schutz kann eine Perimeterdämmung bieten. Eine Perimeterdämmung ist eine Wärmedämmung, die auf der erdberührten Seite der Abdichtung angeordnet wird und gleichzeitig auch eine Schutzschicht für die Abdichtung darstellt.

Eine nachträgliche Horizontalabdichtung ist notwendig, um ein Aufsteigen von Feuchtigkeit in den aufgehenden Wänden zu verhindern. Sie wird üblicherweise über Mauerwerksinjektionen vorgenommen, kann aber unter bestimmten Voraussetzungen auch durch mechanische Verfahren hergestellt werden. Auf die nachträgliche Horizontalabdichtung wird noch detaillierter eingegangen.

Ein Spritzwasserschutz wird in der Regel durch Hochführen der Vertikalabdichtung bis mindestens 30 cm über die Geländeoberkante angeordnet.

Zur schnelleren Durchtrocknung durchfeuchteter Räume nach einer erfolgten Abdichtung können diese zwangsgelüftet oder zwangsgetrocknet werden.

5.2.5 Innenabdichtung nach WTA-Merkblatt

5.2.5.1 Allgemeines

Teilweise kann es erforderlich sein, eine Innenabdichtung durchzuführen, wenn z. B. durch Über- oder Nebenbebauung eine Vertikalabdichtung von außen nicht oder nur sehr aufwendig möglich ist. Nachträgliche Innenabdichtungen können die Abdichtungsfunktion in gleichem Maße erfüllen wie Außenabdichtungen und sind auch für die drei Lastfälle der DIN 18 195 anwendbar. Bei hygroskopisch verursachter Feuchtigkeit sind Sanierputzsysteme einzusetzen. Im Gegensatz zur Außenabdichtung bleibt die Kellerwand ständig durchfeuchtet, was aber in der Regel zu keinen Standsicherheitsproblemen führt. Oberhalb der nachträglichen Innenabdichtung sind bedarfsweise Horizontalabdichtungen anzuordnen.

5.2.5.2 Werkstoffe

Unter Beachtung eventuell im Mauerwerk vorhandener Salze sind zur Flächenabdichtung im Wandbereich vorzugsweise

- Dichtungsschlämmen
- WU-Beton in ausreichender Dicke

einzusetzen. Bei einer Salzbelastung kann das Erstarren, Erhärten und die Dauerhaftigkeit zementgebundener Abdichtungssysteme beeinträchtigt werden. Zur Flächenabdichtung im Bodenbereich werden folgende Systeme eingesetzt:

- (sulfatbeständige) Dichtungsschlämmen
- WU-Beton (nicht als statisch konstruktives Bauteil zu betrachten)
- Kalt verarbeitbare Bitumenemulsionen
- Flüssigkunststoffe (beständig gegen Alkalien und rückseitige Durchfeuchtung)
- Dichtungsbahnen

Abdichtungen benötigen im Regelfall eine Schutzschicht gegen mechanische Belastung, verformbare Abdichtungen zusätzlich eine ausreichende Auflast bzw. Verankerung.

5.2.5.3 Vorbereitende Arbeiten

Es muß ein tragfähiger, offenporiger Untergrund hergestellt werden. Mechanische Verfahren wie Strahlen mit festen Strahlmitteln oder Druckwasserstrahlen sind im Gegensatz zu chemischen Mitteln geeignet. Es dürfen keine treibenden oder wasserempfindlichen Stoffe wie Gips oder Holz vorhanden sein. Zur Herstellung einer wannenartigen Abdichtung sind Querwände von den Außenwänden zu trennen. Es können alternativ auch Injektionsabdichtungen eingesetzt werden (Bild 17). Eventuell herzustellende Installationsöffnungen müssen vor dem Aufbringen der Abdichtung erstellt werden.

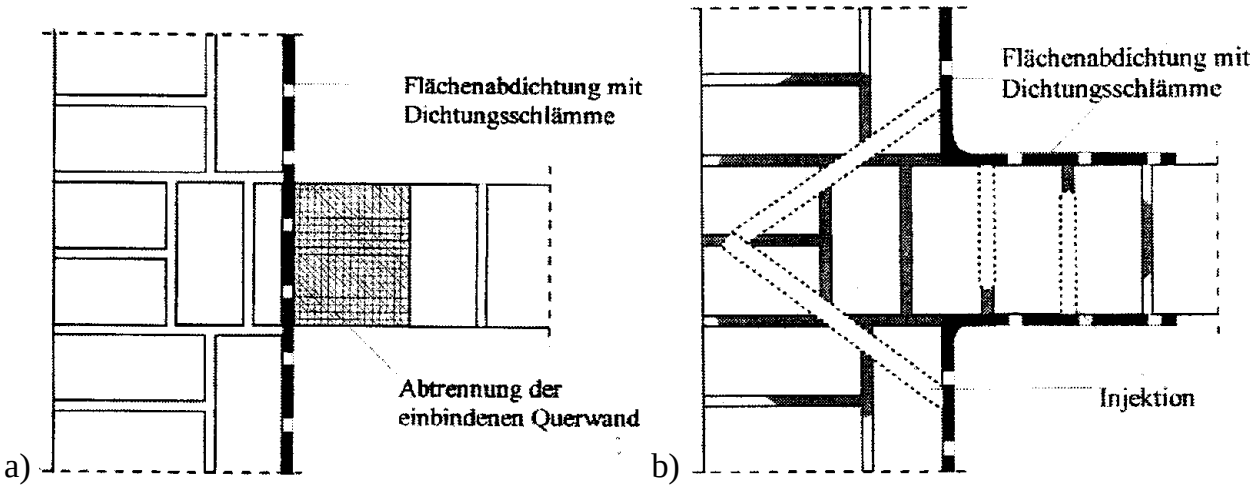


Bild 17: Ausführung der Innenabdichtung im Anschlußbereich Innenwand-Außenwand durch Abtrennen der Innenwand (a) und durch Injektion des Anschlusses (b) /WTA101/

5.2.5.4 Ausführung

Bild 18 zeigt beispielhaft die Ausführung einer nachträglichen Innenabdichtung. Zu erkennen ist die erforderliche Egalisierung des Untergrundes mit einem für das gewählte System geeigneten Mörtel, die einen gleichmäßigen Schichtauftrag ermöglicht.

Im Wandbereich kommen vorwiegend Dichtungschlämmen zum Einsatz. Ecken sind genau wie bei der Außenabdichtung zu brechen, bzw. mit einer Hohlkehle auszubilden. Am Wand-Sohlplattenanschluß und an der horizontalen Sperrschicht wird eine $4 \cdot 4$ cm Nut freigestemmt und mit Dichtungsmörtel verfüllt. Eine Flächenabdichtung erfolgt hier bei Verwendung einer Dichtungsschlämme mindestens zweilagig.

Bei der Bodenflächenabdichtung gelten die gleichen Grundsätze wie bei Wandflächenabdichtung. Abdichtungen mit KMB, Dichtungsbahnen und Flüssigkunststoffen benötigen jedoch im Regelfall einen trockenen Untergrund. Die Bodenabdichtung ist an die vertikale bzw. horizontale Abdichtung anzuschließen.

Für Anschlüsse, Bewegungsfugen und Durchdringungen gilt ebenfalls, daß sie in die Abdichtung mit einzubeziehen sind.

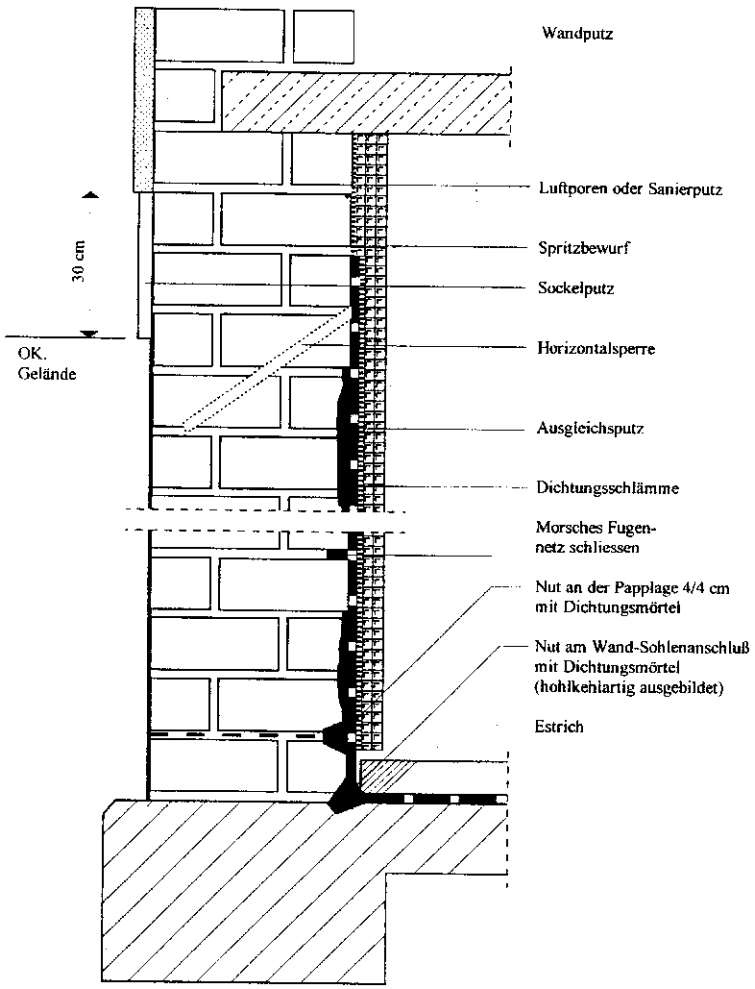


Bild 18: Ausführung einer nachträglichen Innenabdichtung /WTA101/

5.2.5.5 Flankierende Maßnahmen

Es sind nachträgliche Horizontalabdichtungen gegen Kapillarfeuchte mit Hilfe von Injektionen oder mechanische Verfahren anzuordnen.

Ein porenhaltiger Putz mit mindestens 40 Vol.-% Gesamtporosität ist in der Lage durch vorübergehende Speicherung entstehendes Tauwasser zu regulieren. Als Untergrund und Haftbrücke für diesen Putz dient ein Spritzbewurf auf der Dichtungsschlämme.

Bei einer anschließenden Farbgestaltung dürfen diese Schichten die Wasserdampfdiffusion des Putzes nicht beeinträchtigen. Geeignet sind Silikat-, Siliconemulsions- oder Mineralfarben.

Bei einer beschleunigten Trocknung der Bauteile für eine schnellere Nutzung dürfen die Abbindeprozesse der aufgebrachten hydraulisch erhärtenden Systeme nicht beeinträchtigt werden.

5.2.6 Injektionen nach WTA-Merkblatt

5.2.6.1 Allgemeines

Injektionsverfahren gelten für Abdichtungen der drei Lastfälle nach DIN 18 195 /DIN36/, sowie bei kapillar transportierter Feuchtigkeit, bei deren Auftreten das WTA-Merkblatt 4-4-96 „Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchte“ /WTA100/ entsprechende Hinweise gibt. Injektionsverfahren können bei flächigen Abdichtungen der Wände und Bodenplatten und bei partiellen Abdichtungen von Rissen, Hohlstellen usw. eingesetzt werden. Bei der Injektion werden starr oder elastisch aushärtende Injektionsstoffe über Bohrkanäle direkt in das Bauteil oder den das Bauteil umgebenen Erdkörper eingebracht. Die Abdichtungsmasse verteilt sich im Bauteil oder Erdkörper und bildet so eine Dichtschicht.

5.2.6.2 Werkstoffe

Die Voraussetzung für den Einsatz eines Werkstoffes ist, daß dieser keine schädlichen Wechselwirkungen mit dem abzudichtenden Baustoff eingeht. In Frage kommen z. B.:

- Mineralische Stoffe auf Basis von Bentoniten, Silikaten, Zementen
- Kunststoffe auf Basis von feuchtigkeitsverträglichen Acrylharzgelen, Epoxidharzen und Polyurethanharzen

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Einsatzgebiete dieser Injektionsstoffe.

Tabelle 2: Einsatzgebiete für Injektionsmaterialien /WTA101/

Material	Bauwerkszustand		Beanspruchung nach der Injektion		
	Feucht	wasser-führend	Boden-feuchtigkeit	Nichtdrückendes Wasser Drückendes Wasser	Anmerkung
Bentonitt	+	+	+	+	
Silikat	+	+	+	+[3)]	1)
Zement	+	+	+	+[4)]	1)
EP-Harz	±[2)]	+	-	-	1)
PUR-Harz	+	+	+	+	-
Acrylharzgel	+	+	+	+	-

Anmerkung/Erläuterung:
1) keine Verformungsfähigkeit
2) nur feuchteverträgliche Harze
3) nur in Kombination mit Zementen
4) nur in Kombination mit Silikaten

Um eine ausreichende Verteilung des Injektionsstoffes im Bauteil zu erreichen, muß die Viskosität auf den abzudichtenden Baustoff abgestimmt sein. Die Injektion der Materialien erfolgt dann bei den dafür geeigneten Baustoffen. Auf die oben genannten Stoffe wird, mit Ausnahme der Bentonite und Arcylatgele, die gesondert behandelt werden, kurz eingegangen.

- Polyurethan (PUR)

  Polyurethanharze entstehen chemisch durch Polyaddition von Polyolen und Isocyanaten und können weichelastisch bis sehr hart und spröde sein. Tritt Wasser als Reaktionspartner auf, führt dies zu einer Nebenreaktion. Bei dieser Reaktion von Isocyanat und Wasser wird Kohlendioxid freigesetzt, das in das erhärtende Polyurethanharz eingelagert wird und auf diese Weise Poren bildet. Die Kohlendioxidbildung kann durch gezielte Ausnutzung der Reaktion von Isocyanat und Wasser gesteuert werden und Volumenvergrößerungen bis zu 4000 % bei ungehindertem Aufschäumen hervorrufen. Daraus ergeben sich verschiedene Anwendungsgebiete für Polyurethanharze:

  Schnellreaktive, wasserstoppende Polyurethanschäume haben die Aufgabe, drückendes, stark fließendes Wasser zu stoppen. Dies wird durch die kurze Reaktionszeit und eine hohe Volumenvergrößerung ermöglicht. Es entsteht ein feinzelliger Schaum mit dünnwandiger Zellstruktur, die keinen dauerhaften Schutz gegen drückendes Wasser bildet. Diese temporäre Abdichtung ist durch eine dauerhafte Abdichtung zu ergänzen /Gra49/.

Dauerhaft abdichtende, weich-elastische und hart-elastische Polyurethanharze zeichnen sich nur durch eine geringe Volumenvergrößerung aus und dichten dauerhaft gegen drückendes Wasser ab. Je nach zu erwartenden Bewegungen im injizierten Bereich ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Elastizität und Dehnfähigkeit. In Kombination mit den schnellschäumenden PUR-Schäumen lassen sich dauerhafte Abdichtungen gegen drückendes Wasser realisieren /Fix47, Gra49/.

Polyurethane werden i. d. R. als nachträgliche Abdichtung bei Fehlstellen an sonst wasserundurchlässigen Bauwerken eingesetzt, z. B. Weißen Wannen. In Bezug auf die Anwendung ist die ZTV-RISS /Bun12/ anzuwenden /Hes54/. Verarbeitet werden 1K- oder 2K-Anlagen mit festen, vom Hersteller vorgegebenen Mischungsverhältnissen, Viskositäten und Topfzeiten. Eine Beeinflussung der Reaktionszeiten des Materials ist in der Regel mit PUR nicht möglich. Die Viskosität liegt zwischen 200 und 700 mPas, in besonderen Fällen um die 100 mPas. PUR kann bei häufigem Kontakt allergische Reaktionen auslösen /Hes54/.

- Epoxidharze

Epoxidharze werden meist bei Abdichtungen eingesetzt, die kraftschlüssig auszubilden sind, z. B. bei einer kraftschlüssigen Rißinjektion und bei trockenen Untergründen. Bei vorhandener Feuchtigkeit ist der Einsatz jedoch z. T. problematisch /Fix47/.

- Hydro-Silikat-Lösung

Dieses gelbildende, mineralische Spezialprodukt in wässriger Lösung dringt in die Kapillaren mineralischer Baustoffe ein und bewirkt eine Abdichtung gegen Flüssigkeiten und Gase sowie eine Verfestigung des Baukörpers. Die Reaktionsprodukte sind praktisch wasserunlöslich und physiologisch unbedenklich. Die Anwendung erfolgt im Hochdruckinjektionsverfahren. Wegen der hohen Alkalität liegt keine Korrosionsgefahr für den Betonstahl vor /Hei52/.

- Zementsuspensionen

Mit Zementsuspensionen werden z. B. Hohlkörper verfüllt, bevor eine weitere Abdichtung mit anderen Mitteln erfolgt /Hei52, Kab64/. Es können kraftschlüssige Abdichtungen erstellt werden, bei denen die Ausführung auch in feuchte oder wassergefüllte Risse und Hohlräume erfolgen kann. Gegen drückendes oder stark strömendes Wasser sind sie

nur mit geringen Erfolgsaussichten einsetzbar /Gra50, Kab64/. Bodeninjektionen mit Feinstzementen sind ebenfalls möglich und wurden bisher meist zur Herstellung von Baugrubenabdichtungen eingesetzt /Sch90/.

5.2.6.3 Ausführung

Zunächst sind Fehlstellen im abzudichtenden Bauteil zu schließen, um ein Austreten des Injektionsgutes z. B. über morsche Fugen zu vermeiden. Die Lage einer vorhandenen Bewehrung muß ebenfalls erfaßt werden um eine Beschädigung bei der Bohrlochherstellung möglichst auszuschließen. Schützenswerte Bauteile müssen vor Verschmutzungen und Beschädigungen bewahrt werden. Nach der Herstellung der Bohrlöcher mit erschütterungsarmen, auf den Baukörper abgestimmten Bohrgeräten wird die Injektion mit Ein- oder Mehrkomponenten-Injektionsgeräten, die auf den Injektionsstoff abgestimmt sind, ausgeführt.

5.2.6.4 Flächenabdichtung im Bauwerk

Die Abdichtungsebene wird bei dieser Methode im Bauteil selber erstellt. Dazu werden in einem auf das Bauteil abgestimmten Raster Bohrlöcher hergestellt, die etwa 2/3 des Bauteils durchdringen. Der aufgebrachte Injektionsdruck wird ebenfalls in Abhängigkeit des Bauteils festgelegt. Mit diesen Vorgaben entsteht im Baustoffgefüge eine zusammenhängende Abdichtung, wobei eventuelle Fehlstellen mit Nachinjektionen zu beheben sind (Bild 19). Im Anschluß an den Injektionsvorgang werden die Bohrlöcher mit einem schwindarmen und quellfähigen Mörtel verfüllt.

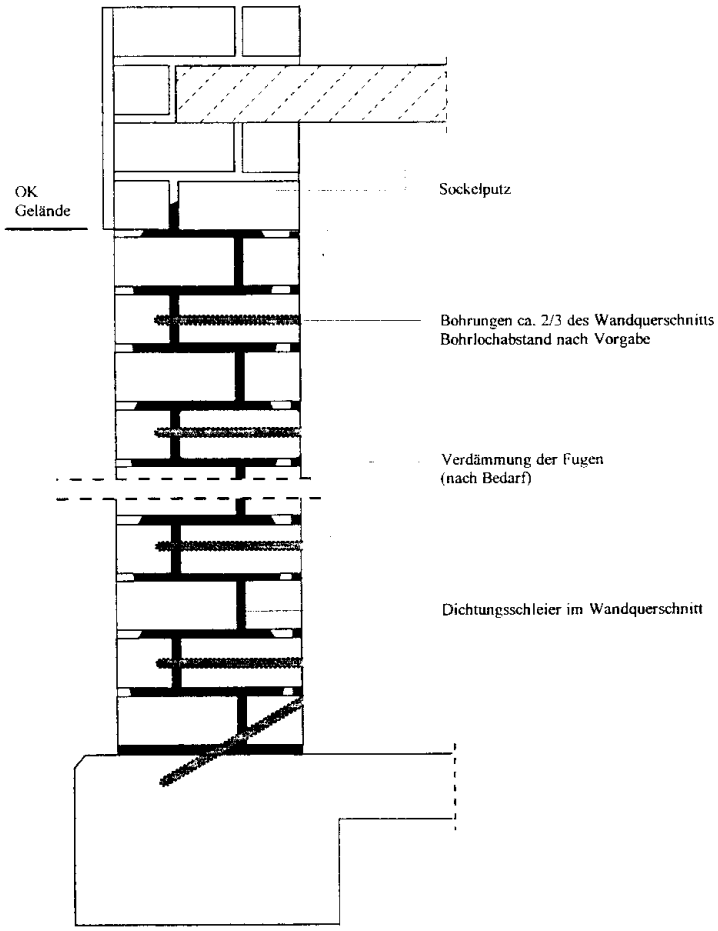


Bild 19: Flächenabdichtung im Bauteil /WTA101/

5.2.6.5 Injektionsdruck

Der aufzubringende Injektionsdruck wird von mehreren Parametern beeinflußt. Baustoffbezogen begrenzt die Festigkeit den maximalen Injektionsdruck. Beton kann in etwa die 3,3fachen Injektionskräfte seiner Druckfestigkeit schadensfrei ertragen, wobei bei feingliedrigen Bauteilen nur die Hälfte des maximalen Druckes angesetzt werden sollte. Eine direkte Übertragung auf Mauerwerk ist wegen des Verbundes zwischen Steinen und Mörtelfuge nicht möglich. Massivbauwerke aus Beton können in etwa Maximaldrücke von 80 bis 160 bar aushalten, bei Mauerwerk können in etwa 5 bis 20 bar angesetzt werden /Fix47/.

Füllgüter aus Gemischen, bestehend aus Flüssigkeiten und Feststoffen, z. B. Zementleim oder –suspensionen, erfordern in der Regel eine Druckbegrenzung auf ca. 0 bis 10 bar. Weiteren Einfluß auf den Injektionsdruck nehmen die Einfüllstutzen, Pumpen und die Druckverluste infolge Transport des Füllgutes bis ins Bauteil /Fix47/.

5.2.6.6 Injektionsschleier im Baugrund

Die Abdichtungsebene kann auch außerhalb des Bauwerks im Baugrund angelegt werden. Dieser wird als Stützgerüst für das Abdichtungsmaterial benutzt. Es werden rasterförmig Bohrlöcher hergestellt, über die das Abdichtungsmaterial in den Boden injiziert wird um dort einen vollflächigen Schleier um das Bauwerk auszubilden. Auf dieses Verfahren wird in Abschnitt 5.6 genauer eingegangen.

5.3 Horizontalabdichtung (Querschnittsabdichtung) nach WTA-Merkblatt

5.3.1 Allgemeines

Eine Horizontalabdichtung ist eine Abdichtung gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk. Sie wird horizontal in die Wand eingebracht und unterbricht dadurch den vertikalen Wassertransport (Bild 20). Durch kapillare Kräfte kann Wasser in den Wänden aufsteigen und zu Feuchteschäden führen. Die Saughöhe und -geschwindigkeit wird hauptsächlich durch den Kapillarradius bestimmt. In grobkapillaren Baustoffen ist die Sauggeschwindigkeit größer als in feinkapillaren Baustoffen. Bei der Saughöhe verhält es sich jedoch umgekehrt. Es liegen Erfahrungswerte für die Porenradien vor, die den Kapillartransport begrenzen. Die Sauggeschwindigkeit kommt bei Porenradien < 0,1 µm zum Erliegen, während bei Radien > 100 µm die Steighöhe gegen Null geht /Rec82/.

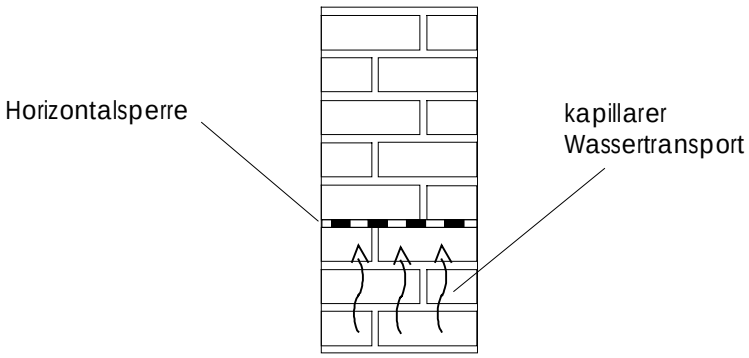


Bild 20: Wirkprinzip einer Horizontalsperre

Die Horizontalsperre wird oberhalb der Druck- und Stauwasserlinie in den Kelleraußenwänden und Kellerinnenwänden angeordnet. In der Regel sollte eine Horizontalabdichtung immer mit einer Vertikalabdichtung kombiniert werden, da außer der kapillaren Feuchtigkeit auch meist noch Feuchtigkeit aus dem anstehenden Erdreich auf das Bauwerk einwirkt. Bei Vorliegen von hygroskopischen Salzen kann eine Horizontalsperre als alleinige Maß-

nahme ebenfalls keinen ausreichenden Trocknungseffekt erzielen, da eine Wasserversorgung auch aus der umgebenden Luft erfolgt. Das WTA-Merkblatt „Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit“ /WTA100/ behandelt die Möglichkeit der horizontalen Abdichtung mit Injektionen. Bei der Injektion wird über in bestimmten Abständen angeordnete Bohrlöcher ein Injektionsmittel eingebracht, das sich im Mauerquerschnitt so verteilen muß, daß eine horizontale Sperrschicht entsteht. Auf weitere ebenfalls verbreitete mechanische Verfahren wird im Anschluß eingegangen.

Neben der kapillaren Feuchtigkeitsaufnahme kann die hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme eine wesentliche Feuchtebelastung darstellen. Das Wasser wird hier aus der Umgebung aufgenommen und zwar umso stärker, je höher die Luftfeuchtigkeit und der Salzgehalt des Mauerwerks ist. Die Salze erhöhen die Ausgleichsfeuchte des Mauerwerks, was dazu führt, daß das salzbelastete Mauerwerk ständig eine höhere Feuchtigkeit besitzt, als das salzfreie Mauerwerk. Die Salze reichern sich mit der Zeit im Mauerwerk an, oder können bereits über die verwendeten Baustoffe im Bauteil vorhanden sein. Salze werden nur in flüssiger Phase transportiert. Bei einer Verdunstung des Wassers bleiben sie im Mauerwerk zurück. Demnach ist die Eindringtiefe für Salze bei häufigen Wechseln zwischen trocken und feucht am größten /Rec82/.

5.3.2 Wirkprinzip

Der Abdichtungseffekt beruht auf verschiedenen Wirkprinzipien. Das Injektionsmaterial dringt in den Baustoff ein und lagert sich in den Kapillarporen an. Dabei sind folgende Wirkprinzipien möglich (Bild 21):

- kapillarverstopfend
- kapillarverengend
- hydrophobierend
- kapillarverengend und hydrophobierend

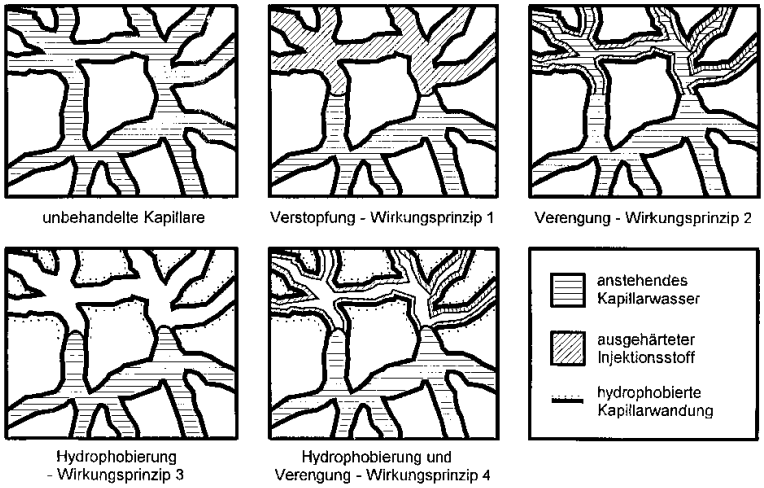


Bild 21: Schematische Darstellung der Wirkungsprinzipien der Feuchtereduzierung /WTA100/

Die kapillare Sauggeschwindigkeit ist abhängig vom Kapillarradius und reduziert sich bei einer Verengung der Poren, so daß der kapillare Durchsatz bei dem Prinzip der Kapillarverengung gegen Null geht. Bei der Hydrophobierung wird der Benetzungswinkel verändert. Ist dieser > 90°, entsteht eine nicht benetzbare Schicht, so daß die Kapillaren vollständig ihre Saugfähigkeit verlieren /Web96/.

Eine völlige Abdichtung der Kapillaren ist nur dann möglich, wenn hohe Wirkstoffkonzentrationen angewendet werden und die Injektion in ein trockenes Porensystem erfolgt, so daß eine vollständige Füllung mit dem Wirkstoff möglich wird /Web96/.

Eventuell vorhandene Klüftigkeiten sind zunächst mit bindemittelhaltigen Suspensionen zu verfüllen, um ein unkontrolliertes Abfließen des eigentlichen Injektionsmittels zu verhindern. Die Injektion kann mit Druck oder drucklos durchgeführt werden.

5.3.3 Injektionsmittel

Die Injektionsmittel müssen sich gut im Baustoff verteilen können und damit eine gute Eindringfähigkeit in feuchtes, salzbelastetes Mauerwerk besitzen. Damit sich eine genügende Verteilung einstellen kann, ist eine ausreichend langsame Reaktionszeit erforderlich. Niedermolekulare Mittel, die beständige, wasserverträgliche Lösungen darstellen, sind besonders geeignet. Die folgenden Injektionsmittel mit dem jeweiligen zugrunde liegenden Wirkungsprinzip sind zur Zeit die wichtigsten /Web94/:

- **Alkalisilikate / Kaliwasserglas (Kapillarverdichtung)**

Heute werden hauptsächlich Kaliwasserglase in stark alkalischer, wässriger Lösung unter Zugabe von Stabilisierungsmittel und anderer Hilfsmittel eingesetzt. Im Mauerwerk kommt es durch die entstehenden Ausscheidungsprodukte (Kieselgel) zu einer Kapillarverengung, die nach dem Trocknungsvorgang teilweise wieder zurückgeht (Schwinden) und weitere Feuchtigkeit durchläßt. Nachteilig wirkt sich die zusätzliche Bildung löslicher Salze aus, die zu einer weiteren Schädigung beitragen kann (Hygroskopizität) /Web94/.

- **Alkalimethylsiliconat (Hydrophobierung)**

Es handelt sich um wasserlösliche Salze, die im Mauerwerk unter Kohlendioxidaufnahme hydrophobierende Produkte bilden. Es entstehen allerdings auch wieder belastende Salze. Zur Entwicklung der vollen Wirksamkeit liegen Erfahrungen vor, nach denen diese Mittel nur in Bauteilen bis zu ca. 50 cm Dicke und einem Durchfeuchtungsgrad von ca. 50 % angewendet werden können, da die Reaktion vom Kohlendioxidzutritt abhängig ist /Web94/.

- **Kombinationsprodukt (Kapillarverdichtung+Hydrophobierung)**

Es erfolgt ein Reaktionsmechanismus, bei dem es zunächst wieder zu einer Abspaltung von Kieselgel und damit zu einer Porenverengung kommt. Nach dem vorübergehenden Austrocknen entfaltet sich die hydrophobierende Wirkung des Alkalimethylsiliconats, so daß der erneute Feuchtigkeitsdurchlass durch das Schwinden des Kieselgels gebremst wird. Die Salzbildung bleibt weiterhin als Nachteil /Web94/.

- **Siliconmikroemulsionen (Hydrophobierung)**

Es handelt sich um eine neue Technologie, bei der eine besonders feinteilige Emulsion spezieller Siliconrohstoffe, die als Tenside wirken, vorliegt. Die Emulsion ist wasserverdünnbar. Es kann eine gute Verteilung im Mauerwerk erreicht werden. Die Tenside bewirken eine Hydrophobierung. Weitere Vorteile sind die Salzfreiheit und die gezielte Aktivierbarkeit mit alkalischen Wirkstoffen /Web94/.

- **Parafine (Kapillarabdichtung)**

Zunächst muß das Mauerwerk mit Heizstäben auf mindestens 80 °C erhitzt und getrocknet werden. Anschließend erfolgt eine drucklose Einbringung des geschmolzenen Paraffins /Web94/.

- **Organische Harze, z. B. PU-Harze (Kapillarverdichtung + Hydrophobierung)**

Es können Epoxidharze, Polyurethanharze, Polyesterharze, Acrylharze oder Kombinationsprodukte eingesetzt werden. Ebenfalls werden Acrylatgele verwendet. Hauptsächlich kommt es zu einer Kapillarverdichtung und bei einigen Systemen auch zu einer Hydrophobierung. Die Anwendung erfolgt in der Regel durch Druckinjektion, wobei die ausreichende Verteilung der feuchteempfindlichen Harze problematisch ist /Web94/.

- **Mikrozementsuspensionen (Hohlraumfüllung)**

Zement- oder Mikrozementsuspensionen werden zur Hohlraumverfüllung unter Druck eingebracht. Dies ermöglicht bei einem hohlraumreichen Mauerwerksaufbau erst die Injektion des eigentlichen Wirkstoffes /Web94/.

5.3.4 Drucklose Injektion

Die Injektionsmittel werden über das Schwerkraftprinzip mittels Vorratsbehälter in die Bohrlöcher eingebracht, oder im Sprühimpulsverfahren, bei dem das Injektionsmittel über spezielle perforierte Infusionsrohre an die Bohrlochwandung gesprüht wird. Die Verteilung der Mittel im Baustoff erfolgt über Kapillarkräfte. Somit werden auch nur die Kapillarporen des Baustoffes erreicht. Am besten sind hierfür niedrigviskose Injektionsmittel geeignet, wie z. B.:

- Silicate
- Silane
- Siliconmikroemulsionen
- Ausreichend erwärmte Paraffine

Der maximale Bohrlochabstand muß in Abhängigkeit von der Saugfähigkeit des Mauerwerks sowie des Feuchtigkeitsgehaltes gewählt werden, um eine vollständige Abdichtung zu erreichen. Erfahrungswerte für den Bohrlochabstand liegen bei 10 bis 12,5 cm. Über die einzusetzende Menge können keine allgemeingültigen Angaben gemacht werden. Erfahrungsgemäß können pro Quadratmeter ca. 20 – 40 Liter Injektionsmittel angesetzt werden /Web96/. Die drucklose Injektion ist jedoch meist nur bei Bauteilen erfolgversprechend, deren Durchfeuchtungsgrad 50 % nicht überschreitet. Bild 22 zeigt die Anordnung der Bohrlöcher nach WTA-Merkblatt /WTA100/.

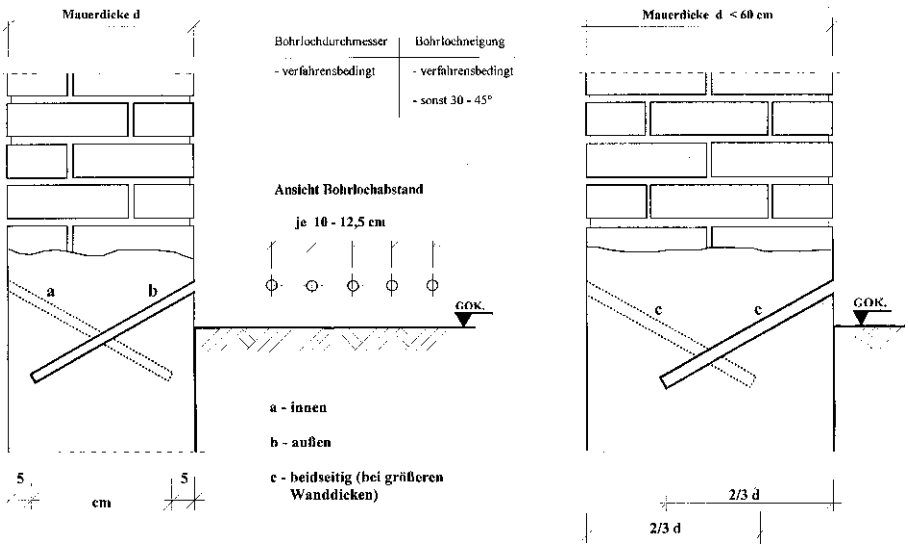


Bild 22: Horizontalsperre mit druckloser Injektion /WTA100/

5.3.5 Druckinjektion

Die Druckinjektion ist besonders bei stark durchfeuchteten Baustoffen geeignet. Über Kapillarkräfte, die bei der drucklosen Injektion für die Materialverteilung sorgen, können nur die Kapillarporen gefüllt werden. Bei einer vorhandenen Feuchtebeanspruchung des Bauteils, die in der Regel auch über Kapillarkräfte erfolgt, wird mit der drucklosen Injektion nur der Anteil dieses Porenraumes erreicht, der nicht bereits mit Wasser gefüllt ist. Mit der Druckinjektion werden jedoch sowohl die durch Kapillarkräfte unerreichbaren als auch die wassergefüllten Poren erfaßt /Web96/.

Die Bohrlöcher werden ein- oder mehrreihig versetzt in auf die Eindringtiefe des Injektionsmaterials abgestimmten Bohrlochabständen angeordnet (Bild 23). Die Injektion sollte mit kontinuierlichem Druck im Niederdruckverfahren < 10 bar erfolgen. Stellt sich kein

ausreichender Druck ein, kann die Ursache in vorhandenen Fehlstellen oder Rissen zu finden sein, die ein unkontrolliertes Abfließen des Injektionsmaterials ermöglichen. In diesem Falle sind die Hohlräume mit einer Zementsuspension zu füllen. Bei gipshaltigem Gestein ist darauf zu achten, das nur Suspensionen verwendet werden, die nicht zur Ettringitbildung neigen.

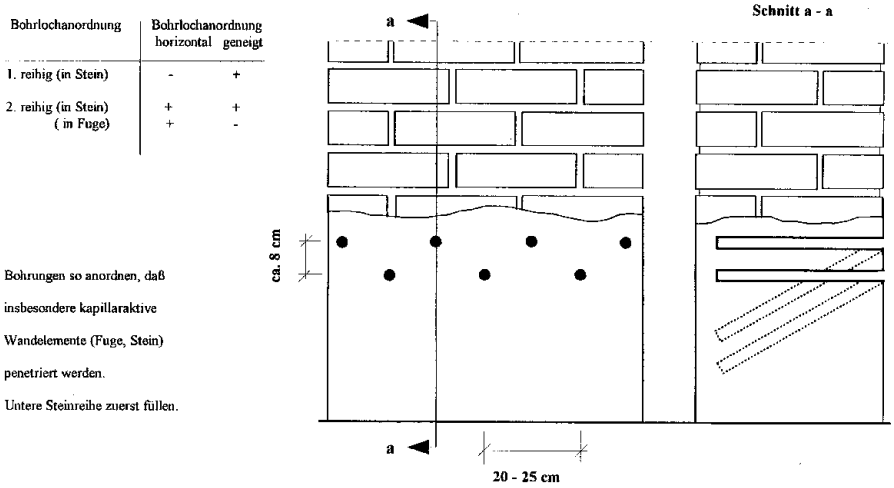


Bild 23: Horizontalsperre mittels Druckinjektion /WTA100/

In den letzten Jahren wurde durch umfangreiche Untersuchungen an Mauerwerk ein Mehrstufeninjektionsverfahren entwickelt. Dabei erfolgt bei Bedarf zunächst eine Injektion mit einem Injektionsmörtel zur Verfüllung von Hohlräumen und anschließend einer Injektion über dieselben Kanäle mit einer Siliconmikroemulsion. Durch die hohe Alkalität der Zementsuspension findet eine sofortige Aktivierung der Siliconmikroemulsion und eine damit einhergehende schnelle Abscheidung der hydrophobierenden Wirkstoffe statt. Wenn nicht mit einem Zementmörtel vorinjiziert wird, kann die Aktivierung über eine maximal um 1 bis 2 Tage nachgeschaltete Injektion mit Silikonaten oder einer Kombination aus Alkalisilicaten und Alkalisilikonaten erfolgen /Kab65, Web96/. Mit diesem Verfahren können auch sehr stark durchfeuchtete Mauerwerke bei einem allerdings hohen technologischen und zeitlichen Aufwand injiziert werden.

Untersuchungen des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen /Sas86/ bei wassergesättigten Ziegeln zeigten für verschiedene Injektionsmittel mit unterschiedlichen Wirkstoffen insgesamt keine ausreichende Wirksamkeit. Eine Ausnahme bildete ein Mittel auf Epoxidharzbasis. Erst nach einer Trocknungsphase waren die meisten Injektionsmitteln in der Lage ein weiteres Aufsteigen der Mauerfeuchtigkeit reduzieren.

5.3.6 Flankierende Maßnahmen

Nach erfolgter Horizontalabdichtung kommt es oberhalb dieser Abdichtung zu einer Austrocknung des Mauerwerks, da von unten keine Feuchtigkeit mehr nachfolgen kann. Bei vorhandenen Salzen kann es durch die Auskristallisation der Salze zu Abplatzungen von Putzschichten oder Anstrichen kommen. Ein Sanierputzsystem gemäß WTA-Merkblatt /WTA102/ kann diese Schäden durch eine Aufnahme und Speicherung der Salze vermeiden. Durch den hohen Gesamtluftgehalt und eine verminderte Kapillarporosität besitzen diese Sanierputzsysteme eine hohe Salzbeständigkeit.

5.4 Mechanische Horizontalabdichtung

Neben der Injektion gibt es verschiedene mechanische Verfahren zur Horizontalabdichtung, die im folgenden kurz erläutert werden /Ple78/. Für diese Verfahren liegen die meisten Erfahrungen bezüglich deren Funktionssicherheit vor /Web97/.

5.4.1 Maueraustauschverfahren

Bei dieser Methode wird das Mauerwerk Stück für Stück aufgestemmt, ausgetauscht und die Horizontalabdichtung eingebaut. Es ist eine optische Kontrolle möglich, allerdings ist der Arbeitsfortschritt nur langsam. Außerdem muß auf die statischen Verhältnisse geachtet werden.

5.4.2 Mauertrennverfahren

Im Unterschied zum Maueraustauschverfahren werden die Steine nicht ausgetauscht. Überlappende Kernbohrungen ermöglichen den Einbau einer Sperrschicht.

5.4.3 Horizontalschnittverfahren – Schwertsägeverfahren

Das Mauerwerk wird wird meistens im Bereich der Mörtelfuge mit einer Schwertsäge abschnittsweise durchtrennt. Anschließend werden in diese Abschnitte mit Mörtel bestrichene Dichtungsschichten eingeschoben. Diese können Platten aus Polyethylen, Polypropylen oder glasfaserverstärkte Kunststoffplatten sein. Die Dichtungsschicht wird mit

Kunststoffplatten verkeilt und nach der Verschließung des Sägeschlitzes mit Zementmörtel erfolgt einer Verpressung über Verpreßhülsen. Es können Mauerwerksdicken bis zu 1,20 m bearbeitet werden, wobei jedoch ein kompakter Mauerwerkskörper vorliegen sollte.

Bei diesem Verfahren kommt es zu hohem Materialverschleiß und hohen Kosten. Das Mauerwerk muß sowohl von außen als auch von innen gut zugänglich sein. Es können auch Kreissägen verwendet werden.

5.4.4 Horizontalschnittverfahren – Seilsägeverfahren

Das Seilsägeverfahren verfolgt das gleiche Prinzip wie das Schwertsägeverfahren. Es wird lediglich eine andere Säge verwendet, mit der theoretisch keine Begrenzung der zu bearbeitenden Mauerwerksdicke mehr zu berücksichtigen ist.

5.4.5 Edelstahleinschlagverfahren

Bei diesem Verfahren werden gewellte Edelstahlbleche in eine durchgehende Lagerfuge eingerammt. Zunächst werden dazu die Lagerfugen mit einer Kettensäge angeschnitten und anschließend die Bleche per Hand in die Schlitze eingelegt. Mit einem pneumatischen Gerät werden die Bleche dann mit bis zu 1500 Schlägen pro Minute eingeschlagen. Es treten starke Erschütterungen und Horizontalbelastungen sowie eine hohe Lärmbelästigung auf. Die Bleche dürfen wegen eventuell vorhandener Salze nicht korrosionsempfindlich sein. Das Verfahren ist nur bei einer durchgängigen horizontalen Lagerfuge anzuwenden.

5.5 Elektrophysikalische Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung

Bei der elektroosmotischen Erscheinung handelt es sich um einen Feuchtetransport in einem porösen Feststoff aufgrund einer von außen angelegten elektrischen Spannung. Bei der Berührung zwischen Flüssigkeit und Substanzteilchen nimmt die eine Teilchenart Elektronen von der anderen auf, so daß sie elektrisch geladen wird (Berührungselektrizität). Im elektrischen Feld wandern dann die Flüssigkeitsteilchen zu dem ihrer Ladung entgegengesetzten Pol. Zur Mauerwerkstrockenlegung wird die Spannung so angelegt, daß die Kapillarkraft überwunden wird und die Flüssigkeit am Aufsteigen im Mauerwerk gehindert wird.

Elektrophysikalische Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung wie die Elektroosmose sind jedoch aus wissenschaftlicher Sicht bisher nicht gezielt anwendbar. Örtliche Voraussetzungen, Grenzbereiche und notwendige Betriebsparameter solcher Anlagen sind noch nicht erforscht /Web97/. Es kann oft nicht eindeutig beurteilt werden, ob der Erfolg einer solchen Trockenlegung durch die Elektroosmose selbst oder durch die flankierenden Maßnahmen wie z. B. einfache Belüftung, Entrümpelung, Abdichtung oder Sickerleitungen erreicht wurde /Lam74, Rec82, Sch87/. Laborversuche an der Technischen Universität Wien deuten an, daß mit der Elektroosmose bestenfalls geringfügige Effekte im Bereich der maximalen kapillaren Steighöhe erzielt werden /Sch87/. Untersuchungen der ETH Zürich im Labor und an ausgewählten Objekten führten ebenfalls zum Ergebnis, daß diese Verfahren wirkungslos sind /Wit98/. Ein in /Web93/ getestetes Verfahren zeigte ebenfalls keine Wirksamkeit. Von einer Anwendung muß derzeit abgeraten werden.

5.6 Baugrundvergelung
5.6.1 Allgemeines

Mit diesem Sonderverfahren können grund- und wasserberührte Außenflächen ganzer Baukörper nachträglich von der Innenseite abgedichtet werden. Bei der Schleierinjektion werden Injektionskanäle in einem den Gegebenheiten angepaßten Raster plaziert, durch die das Injektionsmaterial zwischen den Baukörper und das wasserführende Erdreich injiziert wird. Das Material verteilt sich im Erdreich um die Bohrkanäle, und das ausgehärtete Material bildet eine elastische, druckwasserdichte Membrane, welche das Bauteil vor dem anstehenden Wasser abschirmt und die Rißbereiche überspannt (Bild 24) /Hor56/.

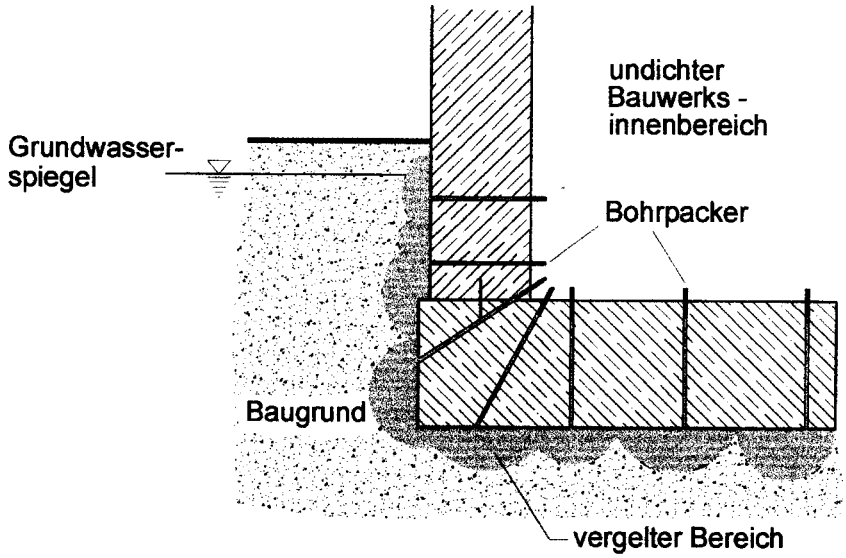


Bild 24: Schema einer Gel-Schleierinjektion /Hor56/

Baugrundinjektionen werden vorteilhaft eingesetzt, wenn andere Methoden nicht möglich oder unwirtschaftlich sind. Gründe für die Wahl von Vergelungsmaßnahmen können z. B. folgende sein /Deu23/:

- Die Kosten der Begleitarbeiten sind unverhältnismäßig hoch.
- Die verkehrsbedingte Sperrung des Instandsetzungsbereiches ist nicht zugelassen.
- Die angrenzende Bebauung oder Nutzung des Instandsetzungsbereiches schließt ein Freilegen der Abdichtung aus.
- Die abzudichtende Fläche ist nicht mehr zugänglich.
- Es wird eine betriebsschonende Bauweise gefordert.

Für die Durchführung von Vergelungsmaßnahmen liegen keine Regelwerke vor. Allerdings wird bei der Deutschen Bahn AG das Verfahren zur Gelinjektion bereits seit 15 bis 20 Jahren eingesetzt. Die dabei gewonnenen Erfahrungen haben zur Aufstellung von Hinweisen für die Planung und Durchführung von Vergelungsmaßnahmen bei der DB AG geführt /Deu23/. Dort werden zu beachtende Grundsätze bei der Planung vorgegeben sowie das Vorgehen bei der Durchführung der Maßnahmen, einschließlich durchzuführender Eignungsprüfung der Materialien, beschrieben. Diese Hinweise sind für Vergelungsmaßnahmen bei der DB AG entworfen worden, können aber auch auf andere Baumaßnahmen übertragen werden /Ase5/.

Für den Erfolg der Injektionsmaßnahmen ist eine gute Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Baugrund, Technologie und Materialeigenschaften erforderlich. Bisher gibt es aber noch keine Nachweispflicht für die Eignung der ausführenden Firmen, außer im Verantwortungsbereich der Deutschen Bahn. Ein Großteil von kompetenten Ausführungsfirmen sind Mitglied der „Fachgemeinschaft für Vergelung von Verkehrsbauwerken“ /Ase5/.

5.6.2 Vorerhebungen

Um einen Überblick über die bauwerksspezifischen Gegebenheiten zu erhalten, sind eine Bauwerks- und Baugrunderkundung durchzuführen. Kernbohrungen im Baukörper geben z. B. Informationen über eventuell vorhandene Hohlräume, die beim Injizieren einen unnötigen Materialverbrauch verursachen. Die Bauwerksnutzung sollte ebenfalls erfaßt werden. Um generell die Injizierbarkeit beurteilen zu können, sind genaue Kenntnisse des direkt am Bauwerk anstehenden Bodens notwendig /Deu23/. Gegebenenfalls können auch Ein-

pressversuche erforderlich werden /Ase5/. Um Fehlschläge zu vermeiden sollten die Vorerhebungen sorgfältig und in ausreichendem Umfang durchgeführt werden. Zu beachten ist, daß es sich bei dem von der Injektion erfaßten Baugrund in der Regel um aufgefülltes Material mit unterschiedlichen Eigenschaften und Verdichtungen handelt und zu dem noch Bauschutt enthalten sein kann. Es können also sehr unterschiedliche Bodenverhältnisse angetroffen werden /Rud83/.

Die Injektionsmaterialien sind auf den Boden abzustimmen, da es sonst bei einem zu durchlässigen Boden zu einem unkontrollierten Abfließen kommen kann. So könnte unter Umständen erst während der Injektionsmaßnahme festgestellt werden, daß der vorhandene Baugrund nicht für die geplante Injektion geeignet ist /Hor56/.

5.6.3 Injektionsstoffe und Eigenschaften

Zur Baugrundvergelung haben sich Acrylatgele in der Vergangenheit bewährt /Ase4, Fix46/. Deren Vorteil ist, daß sie mit wasserähnlicher Konsistenz verarbeitet werden können und somit auch die gleichen Bereiche wie das Wasser erreichen kann. Die Gelbildung (Aushärtung) wird durch die Zugabe geringer Mengen eines Polymerisationsinitiators und eines organischen Beschleunigers regelbar gesteuert /Fix46/. Es handelt sich also um mehrkomponentige Systeme. Das Gel besteht aus einer chemischen Verbindung, die eine Festkörperstruktur besitzt, in die Wasser physikalisch eingebunden ist.

Es werden stabilisierte Gele eingesetzt, bei denen nicht die Gefahr besteht, daß sie sich bei zu großem Wasserandrang auflösen und wirkungslos werden. Es tritt keine Aufweitung der Polymerstruktur durch das angelagerte Wasser auf. Die Stoffbasis solcher Gele sind polymere hydrophile Metacrylate /Ase5/. Die bei der Wasseraufnahme und -abgabe auftretenden Volumenveränderungen können bis zu 40 % betragen /Ase4/. Es quellen dabei lediglich die wasserberührten Schichten des Gels. Ein Wassertransport im Gel findet nicht statt. Außerdem besitzen sie folgende Eigenschaften /Kar68/:

- niedrige Viskosität
- steuerbare Reaktionszeiten
- Elastizität
- Wasserundurchlässigkeit
- Umweltverträglichkeit
- Dauerhaftigkeit

Die Reaktionszeit kann durch unterschiedliche Mischungsverhältnisse der einzelnen Komponenten und Temperatureinfluß gesteuert werden, wodurch eine Anpassung an die bauseitigen Gegebenheiten möglich ist.

Die Umweltverträglichkeit ist wegen des direkten Kontaktes mit dem Grundwasser ebenfalls von Bedeutung. Mittlerweile werden die Acrylatgele jedoch den Anforderungen gerecht. Dies war nicht immer der Fall war, da zum Teil toxische und wassergefährdende Stoffe wie Acrylamid verwendet wurden, die auch noch heute erhältlich sind /Ase5/. Im ausgehärteten Zustand werden keine Stoffe abgegeben, welche die Grundwasserqualität beeinträchtigen. Während der Injektion kann es jedoch vorübergehend zu einer Grundwasserbelastung kommen. Probleme können ebenfalls auftreten, wenn die Dosierung der einzelnen Komponenten nicht im richtigen Verhältnis zueinander erfolgt, so daß die nicht ausreagierten Bestandteile ins Grundwasser gelangen können /Hor56/. Daher ist der Einsatz einer geeigneten Pumpe erforderlich, mit der die Fördermenge sowie der Druck gemessen und geregelt werden kann. Generell sollten nur Produkte verwendet werden, die folgende Nachweise erfüllen /Deu23/:

- Werkszeugnisse nach EN 29 000 über die physiologische Unbedenklichkeit sowie Angaben über die Wassergefährdungsklassen der Einzelkomponenten sowie des angemischten Produktes in der Reaktionsphase bei hoher Verdünnung.
- Nachweis der Unbedenklichkeit für den Einsatz des Gels im Grundwasserbereich gemäß Kunststoff-Trinkwasser Empfehlung des Bundesgesundheitsamtes.
- Prüfzeugnis nach DS 835.9201, Anhang 3 der DB AG.
- DIN Sicherheitsdatenblätter für die vorgesehenen Produkte in der jeweils gültigen Fassung.

Bei Schleierinjektionen sollte zudem Kontakt mit der unteren Wasserbehörde und dem Amt für Umweltschutz aufgenommen werden.

5.6.4 Injektionstechnologie und Materialverhalten

Das abzudichtende Bauteil wird von innen in einem geeigneten Rasterabstand durchbohrt, und über in die Bohrlöcher eingesetzte Packer wird das Injektionsmaterial üblicherweise im Niederdruckverfahren mit Drücken bis zu 6 bar hinter das Bauwerk injiziert /Ase5/. Bei einer Abstimmung des Druckes auf den anstehenden Baugrund kann der Materialeinsatz optimiert werden. Liegt ein zu hoher Injektionsdruck vor, kann es zu einem Aufreißen des Bodens kommen, so daß das Injektionsmaterial sich neue Ausbreitwege sucht. Dies hat einen erhöhten Materialverbrauch zur Folge. Bisher hat es sich jedoch als schwierig erwiesen, anhand von Probeinjektionen und dem gemessenen Druckverlauf bei bestimmtem Materialdurchfluß klare Rückschlüsse auf die Durchlässigkeit des Bodens zu schließen. An der MFPA Leipzig durchgeführte Untersuchungen zur Ausbreitung eines Gelschleier im Baugrund konnten dazu bisher noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. Mit solchen Zusammenhängen könnten aufwendige Baugrunderkundungen reduziert werden /Rud83/.

Die Injektion geschieht in der Regel mit einer 2-Komponenten-Pumpe, so daß die Ausgangsmaterialien erst am Packer vermischt werden und die Reaktion beginnt. Das Gel kann sich aufgrund der Viskosität, die nahe bei der von Wasser liegt, überall dort ausbreiten, wo auch das Wasser hingelangt. Das Material breitet sich im Boden aus und reagiert dort innerhalb weniger Sekunden bis zu mehreren Minuten unter starkem Viskositätsanstieg zu einem Gel aus /Kar68/. Im Baugrund kommt es zu einer Vermischung des Gels mit dem Erdstoff, und bei optimaler Füllung entsteht ein wasserdichtes Gemisch /Hor56/. In den Hinweisen für die Planung und Durchführung für Vergelungsmaßnahmen bei der DB AG /Deu23/ wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k<10^{-9}$ m/s für ein Gel-Sand-Gemisch mit Fuge gefordert. Die dort abgedichteten Bauwerke haben allerdings geringere Anforderungen an die Dichtheit wie beispielsweise bewohnte Räume.

Die Konsistenz im ausgehärteten Zustand kann in Abhängigkeit der eingesetzten Stoffe von weich-plastisch über elastisch bis hart-spröde variieren /Deu23/. In der Regel werden weich-plastische Stoffe angewandt, da durch diese Eigenschaft sichergestellt wird, daß der Gelschleier Bauwerks- und Baugrundbewegungen schadlos aufnehmen kann. Bei einer starren Beschaffenheit der Gelabdichtung wäre die Gefahr einer Rißbildung mit der daraus folgenden Undichtigkeit eine mögliche Folge.

Die Gele bestehen in der Regel aus Feststoff und Wasser. Sie besitzen die Eigenschaft, im ausgehärteten Zustand Wasser aufzunehmen und wieder abzugeben. Die Wasseraufnahme hängt vom Feuchtegehalt des anstehenden Bodens ab, wobei es zu einem Schrumpfen bei Trockenheit und zu einem Quellen bei Wasserandrang kommt. Dadurch verschließen die Gele die Wasserwege für nachfolgendes Wasser. Bis zum Abschluß dieses Quellvorganges, der nur geringe Zeit in Anspruch nimmt, kann Feuchtigkeit in das Bauwerk eindringen und der Eindruck einer nicht funktionierenden Abdichtung entstehen. Bei den üblicherweise im Boden vorliegenden Feuchtigkeitsverhältnissen kann dieser Schrumpf- und Quellvorgang aber vernachlässigt werden /Ase4/.

Eine weit größere Bedeutung kommt einer vollständigen Umhüllung des Bauwerkes zu. Dazu müssen sich die Gelkörper der einzelnen Bohrlöcher überschneiden. Bild 25 zeigt typische Ergebnisse von Gel-Injektionen. Es handelt sich hier um freigelegte Probekörper unterschiedlicher Injektionsmaterialien.

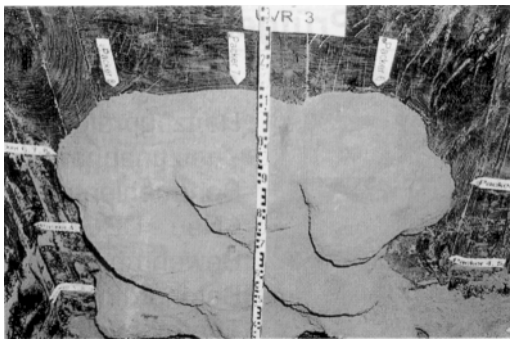
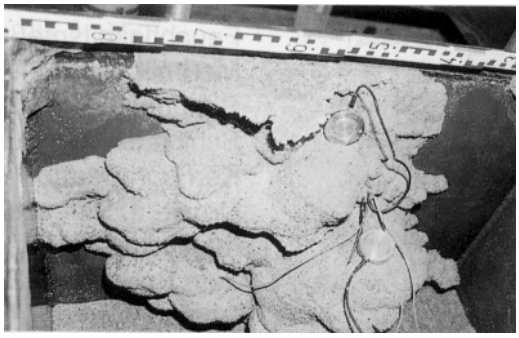
a)  b) 

Bild 25: Sich überschneidende Halbkugeln des Injektionsmaterials (a) und unregelmäßig geformter Injektionskörper bei schnell reagierendem Gel (b) /Hor56/

Die Erhärtungszeit der Gele kann an die vorhandenen Baugrundverhältnisse angepaßt werden. Bei stark durchlässigen Böden ist eine schnelle Erhärtung notwendig, um ein Abfließen des Injektionsmaterials zu verhindern. Bei weniger durchlässigen Böden sind längere Zeiten erforderlich, da sich das Gel sonst nicht ausreichend verteilen kann. Bisher sind die genauen Auswirkungen der Bodenkennwerte auf die Injektion allerdings nur teilweise bekannt /Hor56/.

5.6.5 Einsatzgebiete

Die Schleierinjektion mit Acrylatgel ist anwendbar bei drückendem und nicht drückendem Wasser /Hor56/. Neben der Baugrundvergelung können Acrylatgele als Horizontalsperre und flächige Abdichtung im Bauteil (Mauerwerksinjektion) eingesetzt werden /Kar68/. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Acrylatgele teilweise salzhaltig sind und so den Salzgehalt des Mauerwerks erhöhen können /Hes54/. Wegen ihres Trocknungs- und Quellverhalten sind sie nicht für die Rißverpressung geeignet /Ase4/.

5.7 Weitere Verfahren

5.7.1 Weiße Wanne

Für die nachträgliche Abdichtung gegen drückendes Wasser eignet sich ebenfalls eine Weiße Wanne mit ausreichender Dicke. Sie ist vor allen Dingen vorteilhaft, wenn die vorhandene Bausubstanz nicht in der Lage ist, die aus dem gestiegenen Grundwasser resultierenden Kräfte zu beherrschen. Bei zu dünnen und nicht ausreichend oder auch unbewehrten Bodenplatten kann dies zu einem Aufbrechen der Bodenplatte durch den Druck des anstehenden Wassers führen.

Durch die innenliegende Wanne wird der verfügbare Innenraum verkleinert. Die ursprüngliche Nutzhöhe kann bei Bedarf jedoch erhalten werden, wenn die vorhandene Sohle vor dem Einbau der neuen Bodenplatte aus wasserundurchlässigem Beton vollständig entfernt wird. Für diesen Fall muß die Grundbruchsicherheit im Bauzustand gewährleistet werden /Czi20/.

Reicht das Eigengewicht der nachträglich eingebauten Wanne nicht aus um eine ausreichende Sicherheit gegen Auftrieb zu erhalten, müssen die durch das anstehende Wasser wirkenden Kräfte über Verankerungen in die vorhandenen Wände, Stützen oder Decken geleitet werden. Dies kann z. B. über eine Verdübelung der neu errichteten mit der alten Wand erfolgen, so daß dem Wasser ein größeres Gewicht zur Beherrschung des Auftriebs entgegensteht. Bild 26 zeigt ein Beispiel einer nachträglich eingebauten Weißen Wanne, bei der die alte Sohle zuvor entfernt wurde /Czi20/.

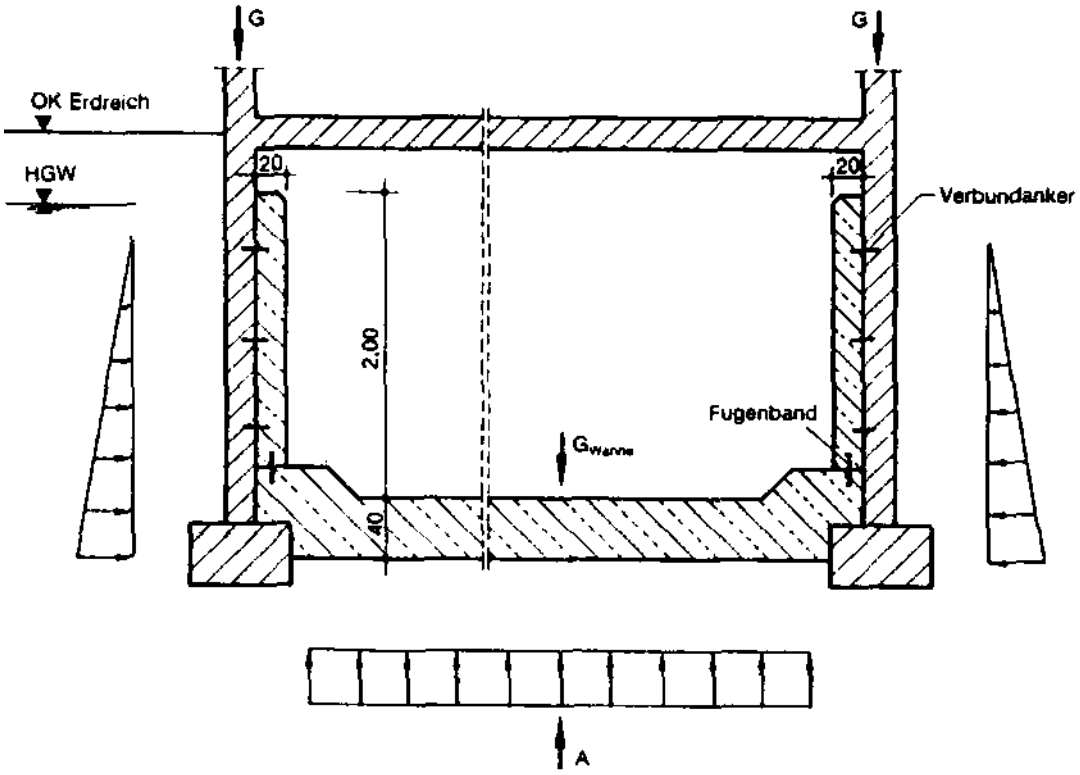


Bild 26: Nachträglich eingebaute Weiße Wanne /Czi20/

5.7.2 SIFCON

Eine nachträgliche Abdichtung ist ebenfalls mit einer innenliegenden Weißen Wanne mit SIFCON (**S**lurry **i**nfiltrated **f**ibre **con**crete) möglich/Ste91/. SIFCON besteht aus einer losen Stahlfaserschüttung, die durch eine hochfließfähige und hochfeste Zementslurry aufgefüllt wird, wobei der Stahlfasergehalt 10 Vol.-% ausmacht. Als Untergrund dient eine bereits vorhandene Betonfläche. Diese Bauweise hat den großen Vorteil, daß sie platzsparend ist, da z. B. ein vorhandener Estrich durch eine SIFCON-Schicht ersetzt werden kann. Eine rißbegrenzende Bewehrung ist nicht notwendig, da aufgrund der hohen Duktilität von SIFCON auch bei größeren Dehnungen keine wasserführenden Risse entstehen. Durch den hohen Stahlfaseranteil und die hohe Fließfähigkeit lassen sich auf sehr sicherem Niveau wasserundurchlässige Betonierfugen herstellen, wenn in der Kontaktfuge des zuvor hergestellten Abschnittes die Zementslurry so ausgewaschen wird, daß die Stahlfasern etwa 10 mm freistehen. Das ermöglicht einen Anschluß der dünnwandigen SIFCON-Ertüchtigung der Bodenplatte an die Wandsockel der Wanne. Lösungen mit SIFCON sind jedoch mit hohen Kosten verbunden /Ste91/.

5.7.3 Edelstahlbleche

Ein weiteres Verfahren zur nachträglichen Mauerwerksabdichtung von außen ist die Abdichtung mit mechanisch in den Boden getriebenen gewellten Edelstahlblechen. Die maximalen Eintriebtiefen liegen bei ca. 2,5(3,5) m. Die einzelnen Bleche werden an den um 180° umgebogenen Längskanten ineinander verzahnt der Reihe nach im Abstand von 1 - 2 cm vom Bauwerk in den Boden getrieben. Ein Bodenaushub entfällt, allerdings muß im Bereich von Anschlußleitungen herkömmlich abgedichtet werden. Eine zusätzliche Horizontalsperre, die von innen nach außen geführt wird, verhindert das Aufsteigen der Feuchtigkeit im Mauerwerk. Für nicht drückendes Wasser kann so das Mauerwerk abgedichtet werden /Lub76/. Die Stöße und der Fußpunkt der Bleche stellen mögliche Schwachpunkte dar.

5.7.4 Erdschlitztechnik

Bei diesem patentierten Verfahren /Bun19/ wird mittels einer Druckluftlanze das Erdreich der Bodengewinnungsklassen 2 bis 5 parallel zu den Fundamenten oder Kellermauern aufgelockert und mit einem groß dimensionierten Druckluftsauger abgesaugt. Das Ergebnis ist ein standfester Erdschlitz mit einer Breite von ca. 15 bis 30 cm, der in eine Tiefe von bis zu 5 m reichen kann. Der Erdaushub wird dabei gegenüber herkömmlichen Verfahren auf rund 10 % reduziert. Es werden auch keine Versorgungsleitungen beschädigt. Anschließend werden in den Erdschlitz Perimeterdämmplatten oder Polystyrolplatten (mit Nut- und Feder sowie Abstandshaltern) eingestellt und der Raum zwischen Mauerwerk und Polystyrolplatten beispielsweise mit einem abdichtenden Polyurethan(PU)-Gel vergossen. Das Gel dringt in Öffnungen und Risse ein und dichtet sie dauerhaft ab. Nach wenigen Minuten verfestigt sich die Masse bis hin zu einer dauerelastischen Abdichtung gegen drückendes Wasser /Hin55/. Bild 27 gibt den Aufbau nach einer erfolgten Abdichtung skizzenhaft wieder.

Das Verfahren wurde bislang durch das Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung München GmbH (IGS) an einem Objekt begutachtet /Int60/, wobei sich herausstellte, daß die Herstellung des Erdschlitzes (in kiesigem Boden mit wenig bindigen Anteilen) tatsächlich weitgehend problemlos funktionierte. Die eigentliche Abdichtung ist ein wenig kritischer zu beurteilen: Problempunkt ist hierbei die systembedingt nicht mögliche Kontrolle des Vergusses des Zwischenraums und damit mögliche Fehler in der Abdichtung. Zwar läßt sich anhand des verbrauchten PU-Gels eine vollflächige Abdichtung theoretisch hochrechnen, ein teilweises Versickern des PU-Gels ist aber nicht auszuschließen. Insofern ist der

Einsatz dieses Verfahrens bei (auch nur zeitweise) drückendem Wasser kaum zu empfehlen, bietet aber bei Bodenfeuchtigkeit als alleinige Durchfeuchtungsursache ausreichenden Schutz.

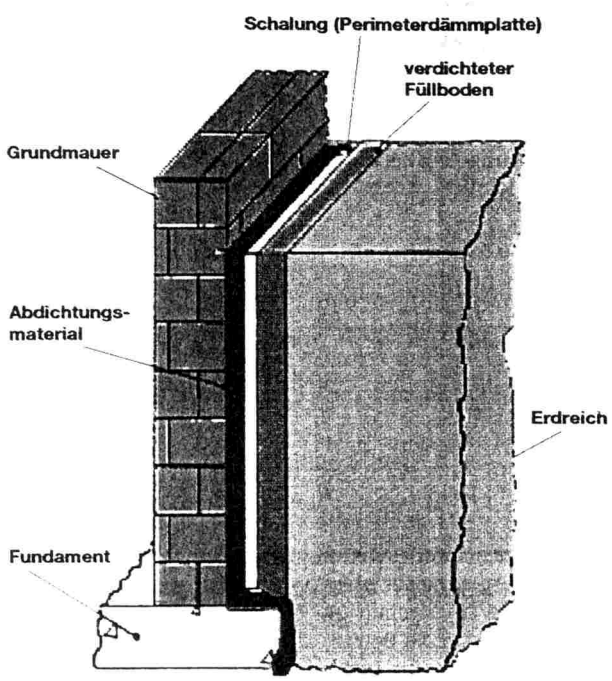


Bild 27: Prinzipskizze der nachträglichen Bauwerksabdichtung mit dem Verfahren der Erdschlitztechnik /Hin55/

5.7.5 Injektions-Vertikalsperre von außen

Ein weiteres Verfahren, das sich noch im Erprobungsstadium befindet /Bun14/, arbeitet ebenfalls ohne Erdaushub. Injektionslanzen werden in den Boden getrieben und beim Ziehen der Lanzen wird Injektionsmaterial mit sehr hohem Druck in den um das Bohrloch anstehenden Boden eingebracht. Durch den hohen Druck kommt es zu einer Verwirbelung des Dichtstoffes und des Bodenmaterials. Je nach vorhandenem Boden, Zusammensetzung des Injektionsmaterials und Injektionsdruck sind unterschiedliche Eindringradien möglich. Üblich sind Größenordnungen zwischen 40 und 70 cm. Die Lanzen können in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten in verschiedenen Winkeln in den Boden eingebracht werden, wodurch unerwartete Barrieren umgangen oder schwierig zu erreichende Bereiche erfaßt werden können. Bei einer sich überschneidenden Anordnung der Injektionssäulen kann eine wasserundurchlässige Schicht um das Bauwerk herum errichtet werden (Bild 28) /Bun14/. Durch eine Ausbildung der Lanzen mit mehreren Rohren in bestimmten Abständen können mehrere Bohrungen in einem Arbeitsgang durchgeführt werden.

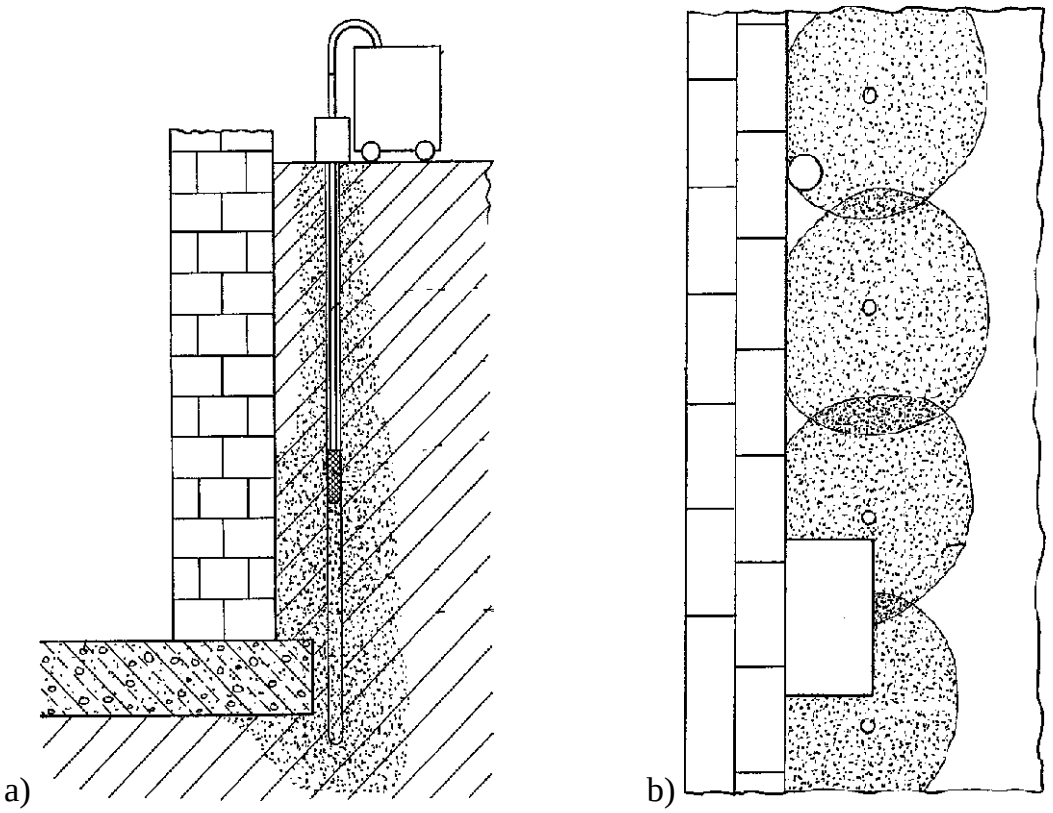


Bild 28: Injektion des Abdichtungsmittels mit einer Injektionslanze (a) und sich überschneidende Injektionskörper in der Draufsicht (b) /Bun14/

Bevorzugtes Abdichtungsmittel sind Montanwachs, ein fossiles Pflanzenwachs aus den Braunkohlewäldern des Tertiärs, welches aus Braunkohle aus dem Tagebau extrahiert wird, sowie Polymersilikate, d. h. Mischungen aus Polymeren und Wasserglas. Mit diesen Stoffen können nachträglich erforderliche Reparaturarbeiten einfach durchgeführt werden, da sich das ältere Dichtmittel mit dem neu injizierten homogen verbindet. Beim Einsatz der Montanwachs-Emulsionen in der Deponieabdichtung konnte die Durchlässigkeit des Bodens auf $k<10^{-10}$ m/s gesenkt werden /Zie103/.

5.7.6 Nachträgliche Wanne von außen

Ein zur Patentierung vorgelegtes Verfahren /Bun13/ zur nachträglichen Abdichtung gegen drückendes Wasser schlägt zunächst eine horizontale Abdichtungsebene vor, die im Pilgerschrittverfahren unter das Bauwerk eingebracht wird. Dazu muß das Bauwerk von außen freigelegt und eine Bodenerkundung vorgenommen werden. Bei dem Abdichtungsgemisch handelt es sich um ein quellfähiges Mineralgemisch in gerade noch einpreßbarer Konsistenz. Aus dem freigelegten Arbeitsraum heraus werden mittels geeigneter Verdrängungswerkzeuge zunächst einzelne Stränge der Abdichtung waagerecht in einem bestimmten Abstand zueinander unter das Bauwerk gepreßt. Anschließend werden die verbliebenen Zwischenräume verfüllt. Die Dichtigkeit soll durch ein bereichsweises Übergreifen der neu hergestellten mit den zuvor hergestellten Strängen gewährleistet werden. Für die Anbindung der vertikalen Abdichtungsschicht wird die horizontale Schicht ausreichend über die Bauwerksaußenmaße hinausgeführt. Die Dichtigkeit des Anschlusses soll über einen speziellen Anschnitt der dann bereits ausreichend ausgehärteten Horizontalschicht erfolgen. Anschließend wird eine Schalung vor das Bauwerk gestellt und mit abdichtendem Material bis mindestens über den zu erwartenden Grundwasserhöchststand verfüllt. Bild 29 gibt einen skizzenhaften Überblick über diese Bauweise.

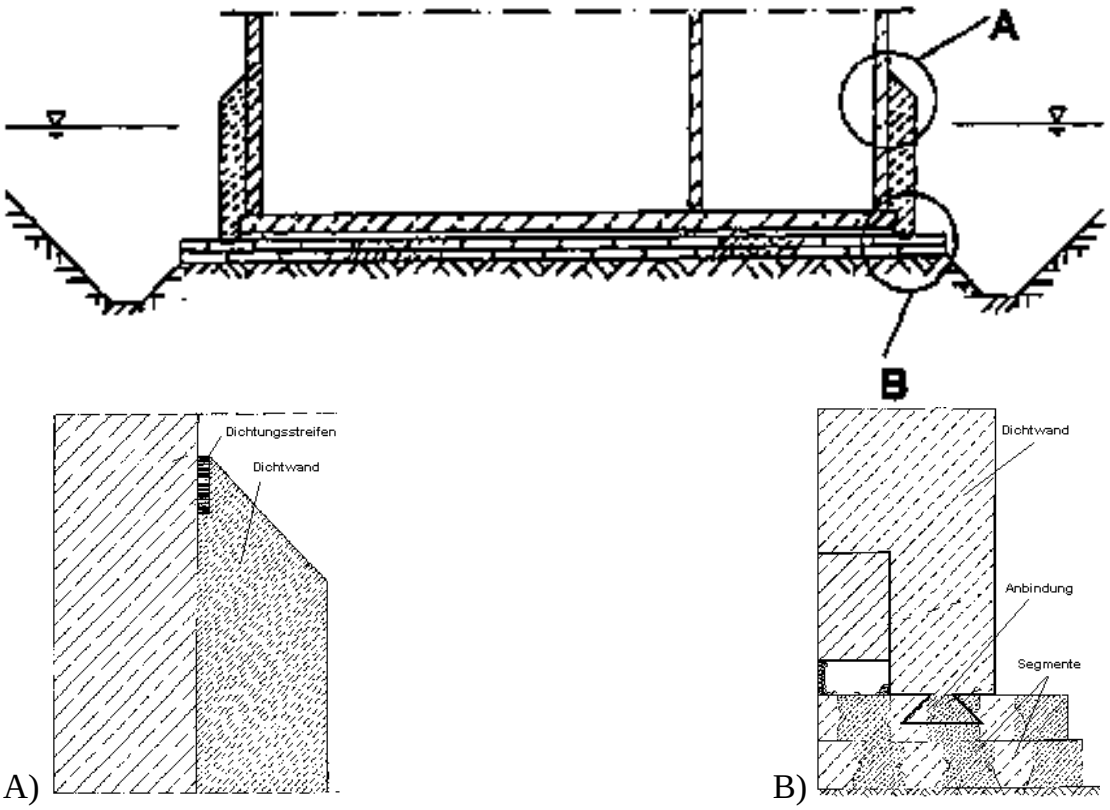


Bild 29: Ausbildung der Außenwanne /Bun13/

5.7.7 Anhebung von Gebäuden

Die bisher beschriebenen Verfahren schirmen das Bauwerk auf verschiedene Art vom anstehenden Grundwasser ab. Ein Verfahren, das bei der Horizontierung schief stehender baulicher Anlagen eingesetzt wird, kann die Möglichkeit bieten, Gebäude anzuheben, und somit die anstehende Belastung durch drückendes Wasser verringern oder beseitigen.

Über im Kellerboden hergestellte Bohrungen werden Einpreßpfähle in den Boden eingebracht. Ebenfalls werden bewehrte Widerlagerpilze verankert und betoniert. Durch eine Lasteinleitung über Hubeinheiten wird das vollständige Bauwerk auf die gewünschte Höhe angehoben. Nach Beendigung dieses Vorgangs wird der Segmentpfahl mit den Widerlagerpilzen zu einem monolythischen Tragsystem ausbetoniert /Int62/. Das Gebäude liegt mit seinem Keller nicht mehr im Grundwasser.

Gleichzeitig erhöhen sich auch die Firsthöhen der angehobenen Häuser, so daß sich das Straßenbild entscheidend verändern kann. Außerdem kann es durch das Anheben der Bauwerke trotz aller Vorsichtsmaßnahmen zu Beschädigungen kommen, wodurch weitere Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich werden können.

5.7.8 Aufgabe des Kellers

Wenn andere Maßnahmen nicht in Betracht kommen, ist eine Aufgabe des Kellers eine letzte Alternative. Für diesen Fall, bei dem auf eine weitere Nutzung des Kellers verzichtet wird, kann eine Verfüllung des Kellers mit einer Dämmermischung erforderlich werden, um die statischen Belastungen durch das anstehende Grundwasser abzufangen. Um ein Aufsteigen von Feuchtigkeit in obere Geschosse zu verhindern, ist bei Bedarf eine Horizontalabdichtung sämtlicher Wände, sowie eine daran anschließende Abdichtung der Kellerdecke beispielsweise mit Dichtungsschlämmen erforderlich.

Vorhandene Installationen im Keller erschweren diese Lösungsmöglichkeit, da sie aus dem Keller entfernt, und an anderer Stelle angelegt werden müssen.

6 GRUNDBAUTECHNISCHE LÖSUNGEN MIT RESTWASSERHALTUNG

6.1 Allgemeines

Ein weiterer Ansatz zur Bauwerksabdichtung kann über grundbautechnische Lösungen erfolgen. Zur Abdichtung von Baugruben gegen Grundwasser werden verschiedene Verfahren eingesetzt, die prinzipiell auch zur nachträglichen Bauwerksabdichtung geeignet sind. Das Bauwerk wird von außen mit einer wannenartigen Abdichtung umschlossen. Diese Abdichtungsformen für Baugruben haben häufig nicht die Dichtheit, die eine Bauwerksabdichtung benötigt, so daß Wasser durch sie hindurchdringt. Dem kann jedoch mit einer Restwasserhaltung begegnet werden, die dieses Wasser ableitet.

Ein Richtwert für die abzupumpenden Wassermengen liegt in etwa 1,5 l/s pro 1000 m² (5,4 m³/h pro 1000 m²) dem Grundwasser ausgesetzter Dichtungsfläche. Dieser Wert ist von den Berliner Behörden als Grenzwert für die zulaufende Restwassermenge in Baugruben in den Neunziger Jahren festgelegt worden /Ohl77/. Erfahrungen haben gezeigt, daß die tatsächliche Dichtheit der Abdichtungen in Abhängigkeit des angewandten Verfahrens geringer war /Bor7/. Außerdem sind bei wannenartigen nachträglichen Bauwerksabdichtungen die Niederschlagsmengen zu beachten, die den Zufluß über die Abdichtungswände deutlich überschreiten können. Diese können auf der nicht versiegelten Grundfläche der Wanne nicht mehr unbeeinflußt im Boden versickert, sondern werden ebenfalls von der Wanne aufgehalten und müssen über Pumpmaßnahmen reguliert werden.

Die zulaufende Wassermenge über die Dichtwände kann wie folgt berechnet werden /Bor7/:

$$q_r = A_{Wanne} \cdot k_{Wanne} \cdot 3600 \cdot \frac{\Delta h}{d} \text{ [m³/h]}$$

mit:

- A_{Wanne} grundwasserberührte Abdichtungsfläche [m²]
- k_{Wanne} Durchlässigkeitsbeiwert der Abdichtung [m/s]
- Δh Wasserdruckdifferenz außerhalb und innerhalb der Wanne [m]
- d Dicke der Abdichtung [m]

Der Hauptanteil des eindringenden Wassers dringt nicht durch die homogenen Bereiche der Dichtungsfläche, sondern durch Fehlstellen der Sohlen und der Anbindung der Sohlen an die vertikalen Dichtungswände /Ohl77/. Unter Druckwasserbelastung führen selbst kleinste Fehlstellen in der Abdichtungsschicht zu einem großen Wasserzulauf, so daß der sorgfältigen Ausführung und Kontrolle eine große Bedeutung zukommt /Bor7/. Die Erfahrungen

bei der Ausführung der Berliner Baugruben in den letzten Jahren haben die Entwicklungen auf diesem Gebiet jedoch vorangetrieben.

Eine Abschätzung für die durch Fehlstellen einströmende Wassermenge wird in /Bor7/ für n ideale gerade und runde Löcher auf 1000 m² Abdichtungsfläche angegeben:

$$q_L = n \cdot 2 \cdot k_B \cdot D \cdot \Delta h \ \text{[m³/h]}$$

mit:

- D Lochdurchmesser
- k_B Durchlässigkeit des Bodens vor und im Loch
- Δh Wasserdruckdifferenz
- n Anzahl der Löcher je 1000 m² Abdichtungsfläche

Nach dieser Formel reicht bei den im Korschenbroicher Gebiet vorliegenden Böden der Unteren Mittelterrasse mit Durchlässigkeiten von im Mittel von $k=2{,}2*10^{-3}$ m/s /Dül44/ und Grundwasserabsenkungen von $\Delta h=2$ m innerhalb der Wanne eine einzige Fehlstelle in der Wanne mit einem Durchmesser von 0,2 m, oder eine entsprechende Anzahl kleinerer Löcher mit der gleichen Fläche aus, um die Restwassermenge von 5,4 m³/h pro 1000 m² grundwasserberührter Abdichtungsfläche zu erreichen.

Die Grundwasserentnahme beschränkt sich im Falle ausreichender Dichtheit hauptsächlich auf den Bereich innerhalb der um das Gebäude gelegten Wanne und führt nicht zu großflächigen Grundwasserabsenkungen. Je nach Dichtigkeit der Abdichtungsmaßnahmen kann es jedoch durch die Restwasserhaltung bei einer nicht vollständig abdichtenden Baugrubensohle zu einem Heranziehen von unterströmendem Grundwasser in die Baugrube hinein kommen. Dieser Effekt steigt mit zunehmender Restwasserhaltungsrate, so daß der Einfluß der Wasserhaltung auch noch in größeren Tiefen unterhalb der Baugrubensohle hydraulisch wirksam sein kann /Ohl77/.

Die folgenden Abschnitte beschreiben verschiedene Verfahren, die bei der Wand- und Sohlenabdichtung von Baugruben eingesetzt werden und deren Einsatz auch auf die nachträgliche Bauwerksabdichtung übertragen werden kann.

6.2 Wandabdichtungen

6.2.1 Allgemeines

Generell kann bei den Wandabdichtungen von Baugruben zwischen stützenden und nichtstützenden Wänden unterschieden werden. Die Stützwirkung ist bei der nachträglichen Bauwerksabdichtung jedoch nicht von Bedeutung, da die Wände beidseitig dauerhaft im Boden eingebracht werden und lediglich die abdichtende Funktion übernehmen. Aus diesem Grund werden die stützenden Wände nur am Rande erwähnt.

Die Wandabdichtungen binden entweder in eine wasserundurchlässige Bodenschicht ein, oder es erfolgt ein künstlicher horizontaler Abschluß durch eine Injektionssohle. Bei Wandabdichtungen, die in eine nahezu wasserundurchlässige Bodenschicht hineinreichen, kann die vorhandene Grundwasserströmung beeinträchtigt werden. Dies kann zur Folge haben, daß der Wasserspiegel auf der vom Grundwasser angeströmten Seite ansteigt und in bebauten Gebieten tiefliegende Keller gefährdet sind. Auf der gegenüberliegenden Seite fällt der Wasserspiegel, wodurch Wasserrechte beeinträchtigt sein können. Um eine möglichst ungehinderte Strömung des Grundwassers aufrecht zu erhalten muß die anströmende Wassermenge gefaßt, die Grundwassersperre überwunden und das Wasser auf der Abstromseite wieder in den Untergrund abgegeben werden. Vertikal- oder Horizontalbrunnenlösungen können diese Aufgabe beispielsweise übernehmen /Sch88/.

6.2.2 Dichtungsschlitzwände

6.2.2.1 Allgemeines

Dichtungsschlitzwände übernehmen vorwiegend abdichtende Funktionen und werden dabei z. B. für folgende Aufgaben eingesetzt /Pul81/:

- Untergrundabdichtung unter Staubauwerken
- Wasserundurchlässige, statisch nicht wirksame Baugrubenumschließungen
- Einschließung von Altlasten

Vor der Herstellung ist eine sorgfältige Bodenuntersuchung erforderlich. Die Herstellung der Wände mit Dicken zwischen 0,4 und 1,0 m erfolgt über Bodenaushub mit speziellen Schlitzwandgreifern mit Arbeitslängen von ca. 3 m, mit denen Tiefen zwischen 100 und 150 m erreicht werden können. Die Wände werden vertikal erstellt und können unter günstigen Umständen mit einer Genauigkeit von 0,5 % hergestellt werden /Pul81/. Die

Herstellung der Dichtungsschlitzwände kann entweder im Einphasen- oder im Zweiphasenverfahren erfolgen (Bild 30).

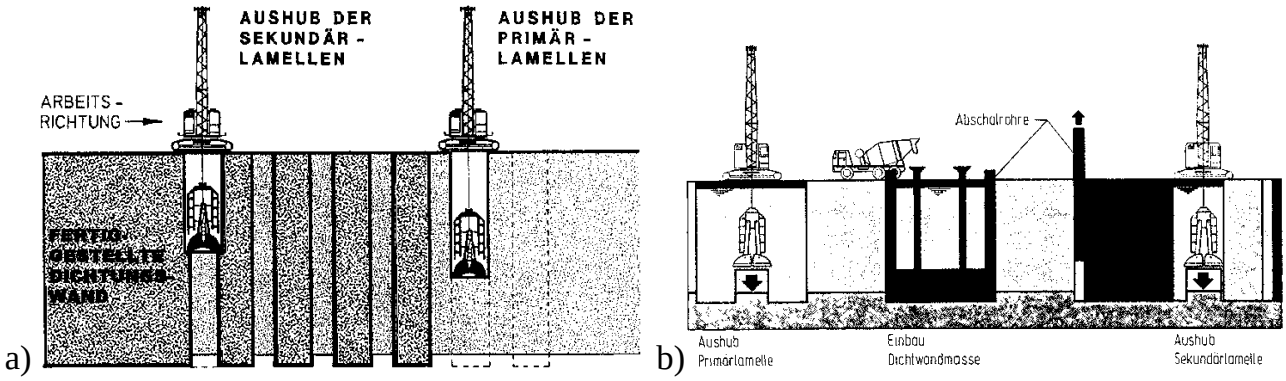


Bild 30: Herstellung einer Dichtungsschlitzwand im Einphasenverfahren (a) und im Zweiphasenverfahren (b) /Pul81/

Die Dichtungsschlitzwand entsteht in einzelnen Abschnitten, die bis zur endgültigen Tiefe ausgehoben werden. Die Länge der einzelnen Abschnitte hängt von der Arbeitslänge des Schlitzwandgreifers und der örtlichen Begebenheiten ab und kann bis zu 10 m betragen. Während des Aushubs wird eine Stützflüssigkeit eingefüllt, die ein Einbrechen der Wandungen verhindert. Im oberen Bereich übernehmen sogenannte Leitwände diese Aufgabe, da der Stützdruck der Flüssigkeit dort noch nicht ausreichend ist (Bild 31). Sie dienen außerdem zur Führung des Schlitzwandgreifers /Pul81/.

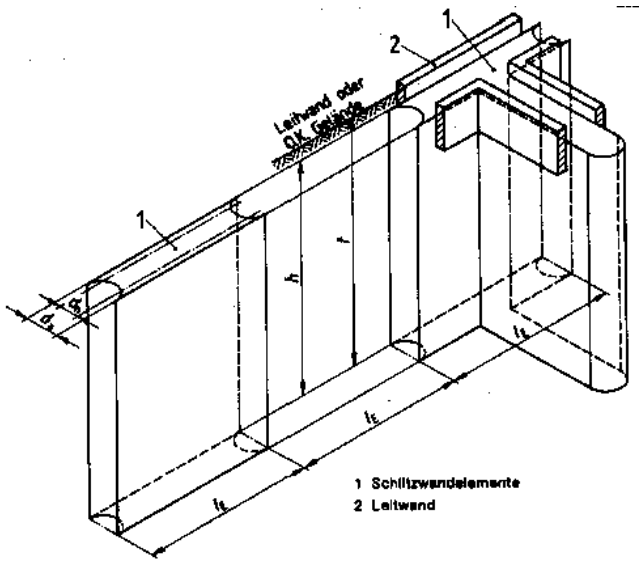


Bild 31: Schlitzwandelemente mit Leitwand /Pul81/

6.2.2.2 Einphasenverfahren

Beim Einphasenverfahren werden zunächst die sog. Primärlamellen ausgehoben. Diese werden mit einer Bentonit-Zementsuspension verfüllt, die auch gleichzeitig die Dichtmasse darstellt. Während der Verarbeitung wird die Suspension ständig bewegt und das durch den Zementz verursachte Ansteifen verhindert. Nach Beendigung des Bodenaushubs erhärtet sie mit der Zeit und nach ca. ein bis drei Tagen kann der Aushub der zwischen den Primärlamellen verbliebenen Erdbereiche erfolgen, der sog. Sekundärlamellen (s. Bild 30 b)). Dabei schneidet der Schlitzwandgreifer die benachbarten, noch relativ weichen Primärlamellen an (Pilgerschrittverfahren), so daß eine praktisch fugenlose Wand entsteht. Da die Dichtmasse mit der Zeit erhärtet, ist mit diesem Verfahren die erreichbare Tiefe begrenzt. Die Herstellung ist auch mit der Schlitzwandfräse möglich und bei geringen Tiefen auch kontinuierlich mit einem Tieflöffelbagger /Pul88/.

Mit den Einphasenmassen können Durchlässigkeitsbeiwerte von $k=5*10^{-8}$ m/s erreicht werden, die von der Zusammensetzung abhängen. Bei Verwendung von Fertigmischungen können die Durchlässigkeiten bis hinab auf $k=10^{-10}$ m/s gesenkt werden. Generell nimmt die Dichtigkeit mit zunehmender Tiefe zu, da dort zunehmend Wasser ausgepreßt wird und eine Anreicherung mit Bodenmaterial erfolgt /Gei48/.

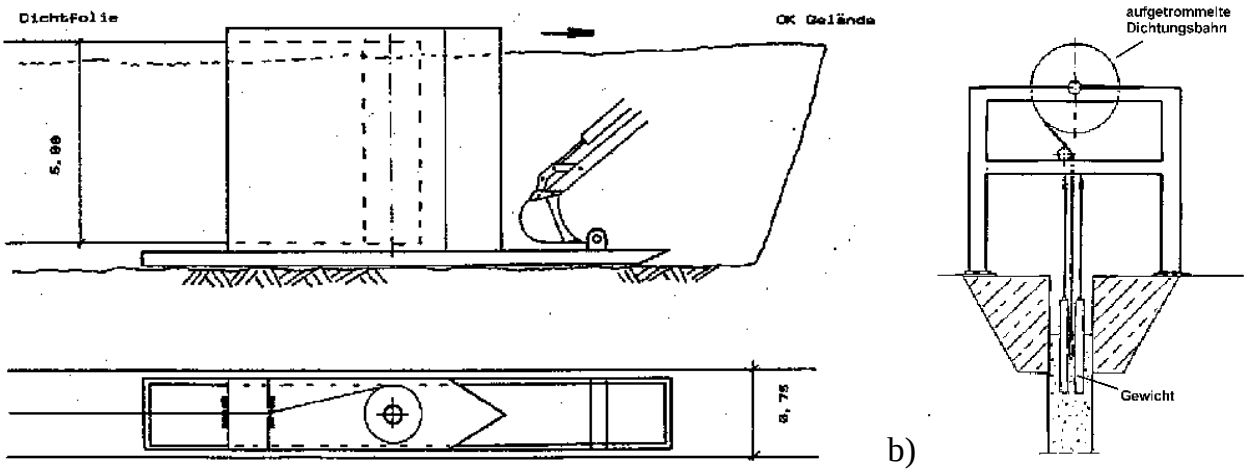
6.2.2.3 Zweiphasenverfahren

Beim Zweiphasenverfahren wird eine Tonsuspension als Stützflüssigkeit verwendet. Zur seitlichen Abgrenzung werden Abschalrohre gesetzt. Nachdem die einzelnen Lamellen bis zur endgültigen Tiefe ausgehoben und gleichzeitig mit der Stützflüssigkeit gefüllt wurden, wird das eigentliche Abdichtungsmaterial im Kontraktorverfahren eingebracht. Dabei kann es sich um zementgebundene Dichtungsmassen handeln, denen Bentonit zugegeben wird, oder um zementfreie Dichtungsmassen. Diese bestehen aus festen Bestandteilen (Sand, Kies, Tonmehl) und zu etwa 10% aus flüssigen Bestandteilen (Wasser, Silane, Wasserglas). Die zementfreien Dichtungsmittel erreichen Durchlässigkeitsbeiwerte in der Größenordnung von $k=10^{-11}$ m/s. Nach dem Abbinden der Stützflüssigkeit werden die Abschalrohre gezogen /Sch88/.

Nachteilig können sich die große Anzahl an Fugen auswirken, deren Folgen auf die Systemdurchlässigkeit schwer abzuschätzen ist. Im Gegensatz zum Einphasenverfahren sind jedoch große Tiefen erreichbar.

6.2.2.4 Kombinierte Verfahren

Schlitzwände können mit Elementen kombiniert werden, die in die noch nicht erhärtete Suspension eingestellt werden und statische oder abdichtende Funktionen übernehmen. Dabei kann es sich um Betonfertigteile oder Spundwandprofile handeln, die sowohl die statische als auch abdichtende Funktion übernehmen können. Eine Methode, die aus der Deponieabdichtung stammt, bedient sich vorwiegend Dichtungsbahnen aus HDPE, die mit unterschiedlichen Vorrichtungen vertikal oder horizontal in den Schlitz eingebracht und untereinander verbunden werden. Diese können nur abdichtende Funktionen übernehmen. Bild 32 a) zeigt skizzenhaft das horizontale Einziehen der Dichtungsbahn von einer Trommel, deren Durchmesser kleiner als die Schlitzdicke ist. Diese Verfahrensweise ist vorwiegend für Schlitzwände geringer Tiefe geeignet, die mit einem Tieflöffelbagger ausgehoben werden /Pul81/. Für Wände mit größeren Tiefen können die Bahnelemente vertikal von einer Rolle eingebracht werden (Bild 32 b)). Die Verbindung der Elemente erfolgt über spezielle Schlösser, die nachträglich auf verschiedene Arten abgedichtet werden. Die erreichbaren Tiefen mit diesem Verfahren liegen in etwa bei 30 m /Pul81/.



a) b)

Bild 32: Horizontales (a) und vertikales (b) Einziehen der Dichtungsbahn von der Trommel /Pul81/

6.2.2.5 Dichtwand mit Entwässerungseinrichtung

Ein neu entwickeltes Verfahren, das in seiner Offenlegungsschrift vorliegt /Bun15/, betrifft eine im Erdreich eingelassene Dichtwand, die insbesondere zur Abdichtung von Deponien vorgesehen ist. Der wesentliche Unterschied zu den bisher beschriebenen Varianten liegt in der Ausbildung der Wand. Diese weist auf der gesamten Länge einen Längszwischenraum auf, in dem eine Entwässerungseinrichtung angeordnet ist. Der Längszwischenraum kann z. B. durch zwei senkrecht in die Dichtwand eingelassene, parallel zueinander stehende Dichtungsbahnen gebildet werden. Je nach Ausbildung werden der Drainagegraben, die Vertikaldrainage und/oder ein Kleinbrunnen nachträglich in den Längszwischenraum eingebracht. Eine solche Dichtwand wird in der Regel mit einer Dicke von 0,6 bis 1,5 m ausgeführt. Zur Erhöhung der Sicherheit und als Kontrollmöglichkeit für die Dichtheit der Wand werden Querschotte in die Dichtwand eingebracht, welche die Wand in einzelne Abschnitte einteilen. Mögliche Fehlstellen können durch Wasserabsenkung im Entwässerungsgraben auf die einzelnen Abschnitte lokalisiert werden. Bild 33 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Dichtwand.

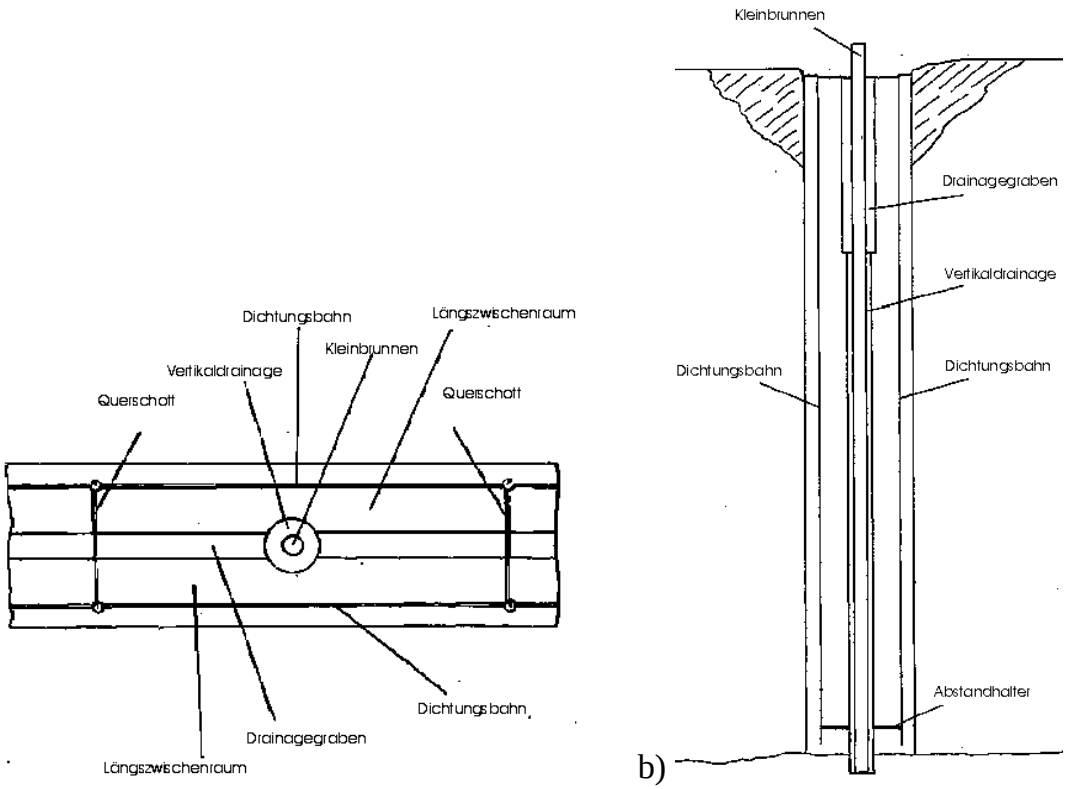


Bild 33: Aufbau der Dichtungswand mit Drainagegraben und Querschotten. a) Draufsicht, b) Querschnitt /Bun15/

Die Entwässerungseinrichtung ermöglicht es, den Wasserstand innerhalb des abzudichtenden Körpers zu regulieren. Die zu bewirtschaftende Wassermenge wird reduziert, da nur noch der Bereich innerhalb der Dichtwand bewirtschaftet werden muß und nicht mehr die gesamte abzudichtende Fläche. Liegt der Wasserstand innerhalb der Dichtwand niedriger als die Wasserstände außerhalb und innerhalb des eingeschlossenen Areals, so entsteht ein Gefälle in Richtung des Längszwischenraumes. Das Wasser fließt somit sowohl von außen, als auch von innen in Richtung des Entwässerungsraumes und wird dort abgesaugt.

Übertragen auf die Bauwerksabdichtung wäre zu prüfen, ob die Durchlässigkeit der inneren Dichtwandschicht ausreichend groß ist, um das durch Regenwasser dort nachsickernde Wasser ausreichend schnell in das Entwässerungssystem abzuführen, damit für das Bauwerk nicht der Lastfall stauendes Sickerwasser auftritt.

6.2.3 Schmalwände

6.2.3.1 Allgemeines

Schmalwände kommen besonders bei Untergrundabdichtungen mit kleinen hydraulischen Druckdifferenzen sowohl für temporäre als auch dauerhafte Aufgaben zur Anwendung:

- Abdichtung von mit wasserdurchlässigem Verbau gesicherten Baugruben
- Dichtwände in oder unter Dämmen oder Deichen
- Grundwasserschutz im Bereich von Industriebetrieben
- Einkapselung von Altlasten

Im Gegensatz zu den Schlitzwänden erfolgt die Herstellung nicht über Bodenaushub, sondern durch Bodenverdrängung (Rammen, Rütteln). Im allgemeinen werden die Schmalwände mit Dicken von 8 bis 10 cm vertikal hergestellt, jedoch hängt die Dicke auch vom Eindringen der Suspension in den Boden ab. Bei den Suspensionen handelt es sich in der Regel um Gemische von Bentonit, Zement, Kalksteinmehl und Wasser.

Übliche Tiefen für Schmalwände liegen zwischen 8 und 20 m, wobei bei größeren Tiefen die Gefahr von Abweichungen aus der Sollage der einzelnen Stiche steigt. Um Fehlstellen möglichst zu vermeiden, müssen Schmalwände mit hohen Anforderungen an die Richtungsgenauigkeit der Bohlenführung hergestellt werden. Bei einer Dicke von 10 cm und einer Tiefe von 20 m darf die maximale Abweichung 0,2 % betragen. Dazu ist eine ständige Kontrolle mit sehr genauen Meßsystemen erforderlich /Sch88/. Der Einsatz von Schmal-

wänden ist in fast allen rammbaren Bodenarten möglich, beschränkt sich jedoch auf die Abdichtungsfunktion.

6.2.3.2 Staffelrammverfahren

Die Ausführung einer Schmalwand kann entweder durch Rammverfahren oder durch Rüttelverfahren erfolgen. Beim Staffelrammverfahren werden zunächst mehrere Profile in den Boden eingerammt und anschließend in der Reihenfolge, in der sie eingerammt wurden wieder herausgezogen. Beim Herausziehen wird gleichzeitig die Dichtwandmasse in den entstehenden Hohlraum verpresst. Die gezogene Bohle wird anschließend vor die zuletzt gerammte gesetzt und eingebracht (Bild 34) /Pul81/.

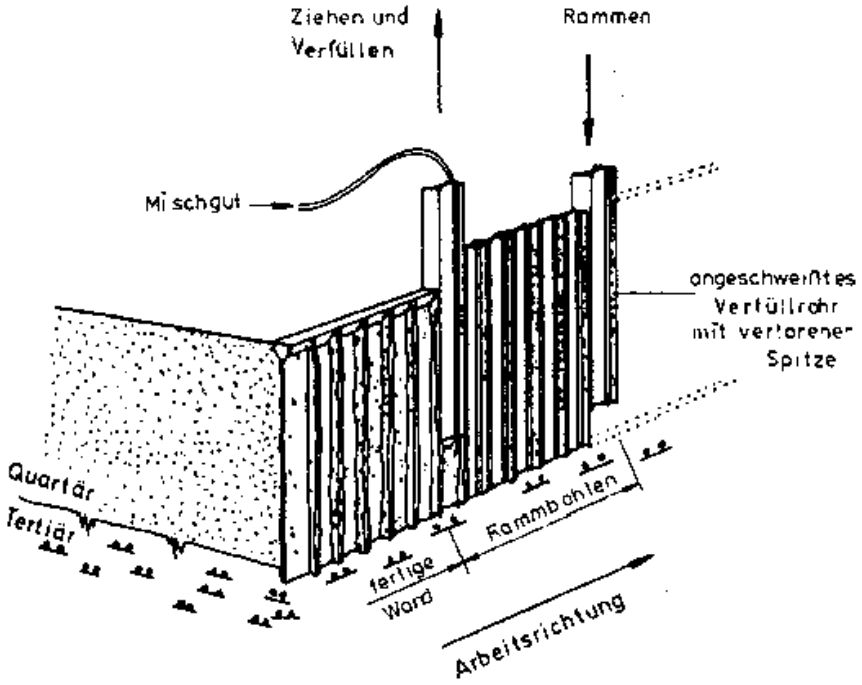


Bild 34: Staffelrammverfahren zur Herstellung einer Schmalwand /Pul81/

6.2.3.3 Rüttelschmalwände

Die zweite, heute häufiger angewandte Möglichkeit ist die Herstellung der Schmalwand mit einem Vertikalrüttler. Ein ca 0,5 m tiefer und breiter Vorlaufgraben dient als optische Wandführung und Vorlaufreservoir für die Schmalwandsuspension. Eine einzelne schwere Rüttelbohle (IPB-Profil mit spezieller Fußausbildung) wird in den Boden eingerüttelt und der beim Ziehen entstehende Hohlraum wird über eine angeschweißte Leitung mit der Dichtmasse verpreßt (Bild 35). Dabei dringt das Material in Abhängigkeit von der anstehenden Bodenart auch in den Boden ein. Durch die Vibration beim Einrütteln kann es bei vibrationsempfindlichen Böden zu einem Zusammenfließen der zuvor hergestellten Stiche kommen. Zu beachten ist auch die Vibrationsgefährdung benachbarter Bebauungen vor allen Dingen beim Anfahren und Abstoppen des Rüttlers, wobei eventuell die Eigenfrequenz des Boden-Gebäude-Rüttlersystems durchfahren wird /Pul81/.

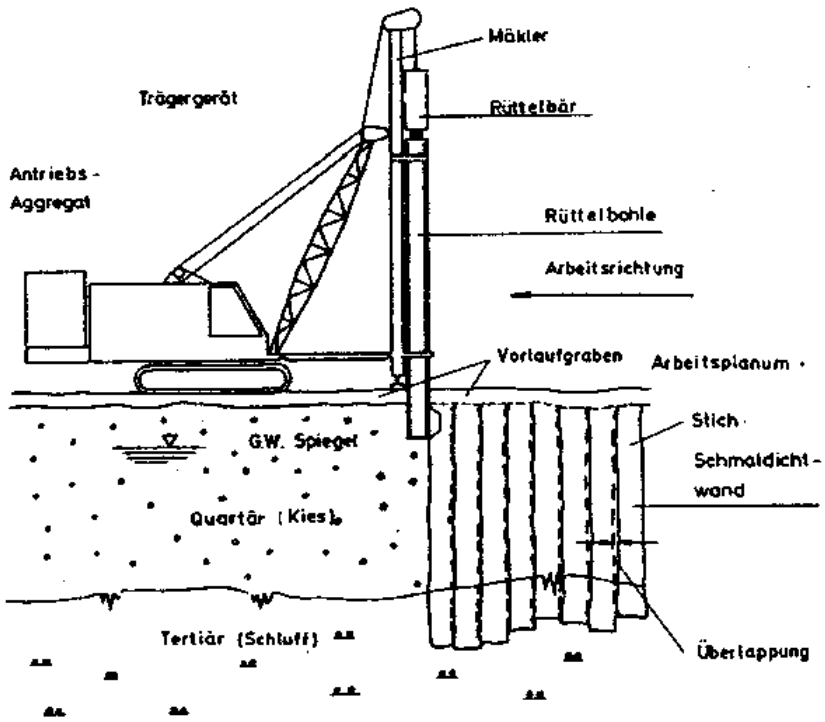


Bild 35: Herstellung einer Rüttelschmalwand mit Vertikalrüttler /Pul81/

Die eingesetzten Schmalwandmassen sind z. B. Gemische aus Wasser, Bentonit oder Tonmehl, Zement mit hohem Hüttensandanteil und Kalksteinmehl. Damit können Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte von $k<10^{-8}$ m/s erreicht werden. Aufgrund von Fehlstellen liegt die Systemdurchlässigkeit bei etwa $k=10^{-7}$ m/s /Pul81/. Die Rüttelschmalwände sind im Vergleich zu anderen Bauarten preiswerter herzustellen /Sch88/.

Untersuchungen zur Systemdurchlässigkeit von Schmalwänden /Kle69/ lieferten das Ergebnis, daß auch bei optimaler Bauausführung Fehlstellen auftreten können, die z. B. durch das ungleichmäßige Verteilen der Suspensionen im Boden verursacht werden können. Unter Beachtung der Bodenkennwerte und der Suspensionsrheologie kann die Ziehgeschwindigkeit der Bohlen so gesteuert werden, daß die Fehlstellen minimiert werden. Außerdem läßt sich auf Grundlage der Bodenuntersuchungen eine zu erwartende Systemdurchlässigkeit des Schmalwandsystems berechnen.

6.2.4 Mixed-in-place Verfahren

In rein rolligen Böden kann mit dem Mixed-in-Place-Verfahren ein wirtschaftlicher Baugrubenverbau sowohl mit als auch ohne statischer Wirkung hergestellt werden. Als Mixed-in-Place wird die Vermischung und Vermörtelung des anstehenden Bodens durch Naßmischung mit Zement- oder Bentonit-Zement-Suspension an Ort und Stelle verstanden. Die in Bild 36 dargestellte Dreifach-Bohrschnecke, bei der sich die drei Schnecken gegenläufig drehen, wird in den Baugrund bis zur Endtiefe eingebracht, wobei durch die Seelenrohre der Schnecken kontinuierlich Zementsuspension zugegeben wird. Beim Ziehen der Schnecken erfolgt eine Homogenisierung und intensive Durchmischung des anstehenden Bodens mit dem Bindemittel. Es ergibt sich so ein im Boden stehendes Scheibenelement von ca. 1,20 m Länge und ca. 0,50 m Dicke. Die anschließenden Lamellen werden mit ca. 0,1 m Überschnitt an die bereits ausgeführte Lamelle im Pilgerschrittverfahren angeschlossen. Die erreichbare Wandtiefe liegt bei etwa 10 m bis 13 m /Pul79/.

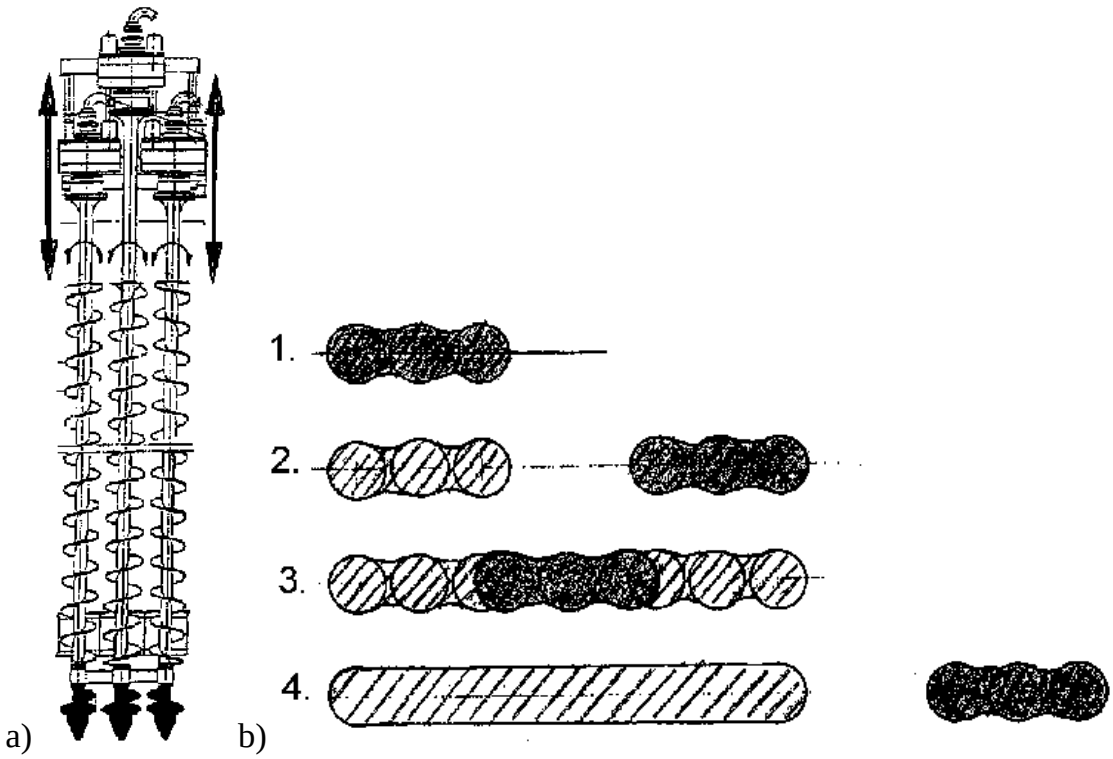


Bild 36: Bohrschnecken (a) und Herstellungsphasen im Pilgerschrittverfahren (b) beim mixed-in-place-Verfahren /Int58/

Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein erschütterungsarmes und preiswertes Verfahren, für die Dichtwandherstellung mit erreichbaren Durchlässigkeitsbeiwerten $k<10^{-8}$ m/s. Der Einsatz stößt in Fels und bei Böden mit größeren Steinen und Blöcken auf seine Grenzen /Int58/.

6.2.5 Abdichtende stützende Wände

Prinzipiell kommen auch noch die Wandarten für die nachträgliche Bauwerksabdichtung in Frage, die neben der abdichtenden Wirkung auch noch statisch belastbar sind. Die statische Belastbarkeit wird allerdings nicht ausgenutzt, da im hier vorliegenden Fall die Wände im Gegensatz zu einer Baugrubensicherung vollständig im Boden verbleiben.

- **Spundwände**

Bei den Spundwänden nach DIN EN 12063 /DIN42/ handelt es sich um miteinander verschlossene, gewellte Stahlprofile, die in den Boden gerammt (Bild 37), gerüttelt oder gepreßt werden. Sie bilden auch in den Verbindungen nahezu wasserdichte Konstruktionen und werden auch als dauerhafte Konstruktionen angewendet, wie z. B. als senkrechte Ufereinfassungen. Beim dauerhaften Einsatz der Spundbohlen ist allerdings die Stahlkorrosion in die Überlegungen miteinbeziehen. Der Korrosionsabtrag im Bereich des Grundwasserspiegels kann ca. 0,03 mm/Jahr betragen /Pul79/. Beim Einrammen der Spundwandprofile muß festgestellt werden, ob bei der anstehenden Bebauung keine Bedenken bezüglich des Einbringvorgangs bestehen.

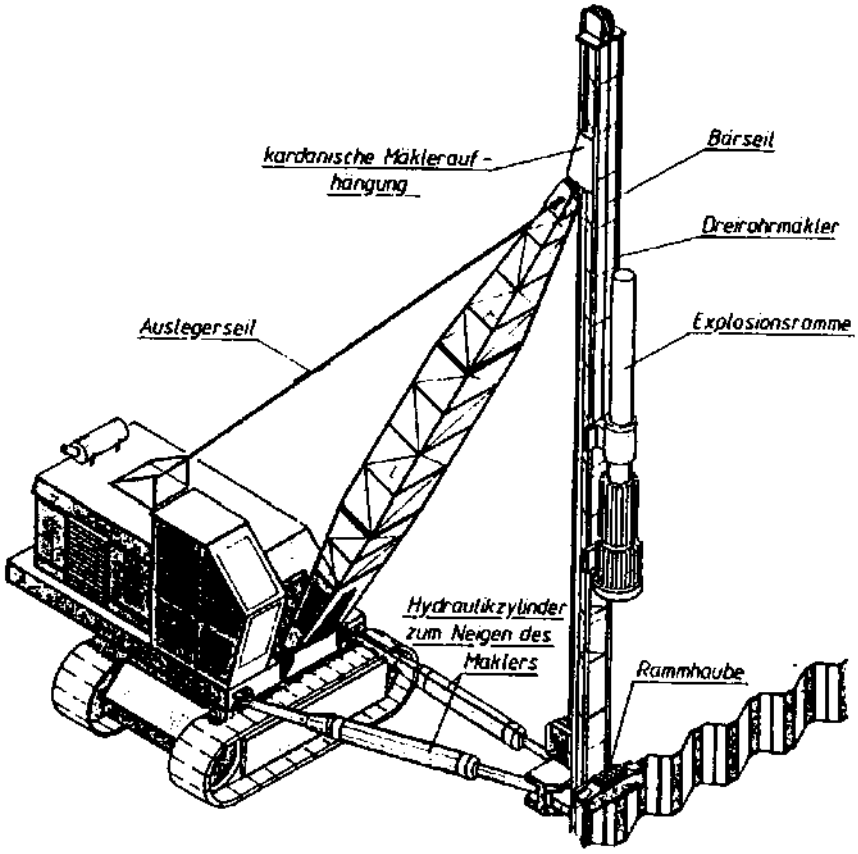


Bild 37: Einbringen der Spundwandprofile /Pul79/

- **Bohrpfahlwände**

Bei der Bohrpfahlwand nach DIN 4014 /DIN32/, bzw. DIN EN 1536 /DIN41/ wird die Wand durch aneinandergereihte Bohrpfähle gebildet. Ein Bohrpfahl entsteht durch die Herstellung eines verrohrten oder unverrohrten Bohrloches, in das im Kontraktorverfahren Beton eingefüllt wird. Bohrpfählwände mit abdichtender Funktion werden überschnitten hergestellt oder mit einer Spritzbetonausfachung. Für den hier betrachteten Fall kommt jedoch nur die überschnittene Bohrpfahlwand in Frage. Dabei wird wie beim Pilgerschrittverfahren vorgegangen, und die im zweiten Arbeitsgang hergestellten Pfähle werden bewehrt (Bild 38).

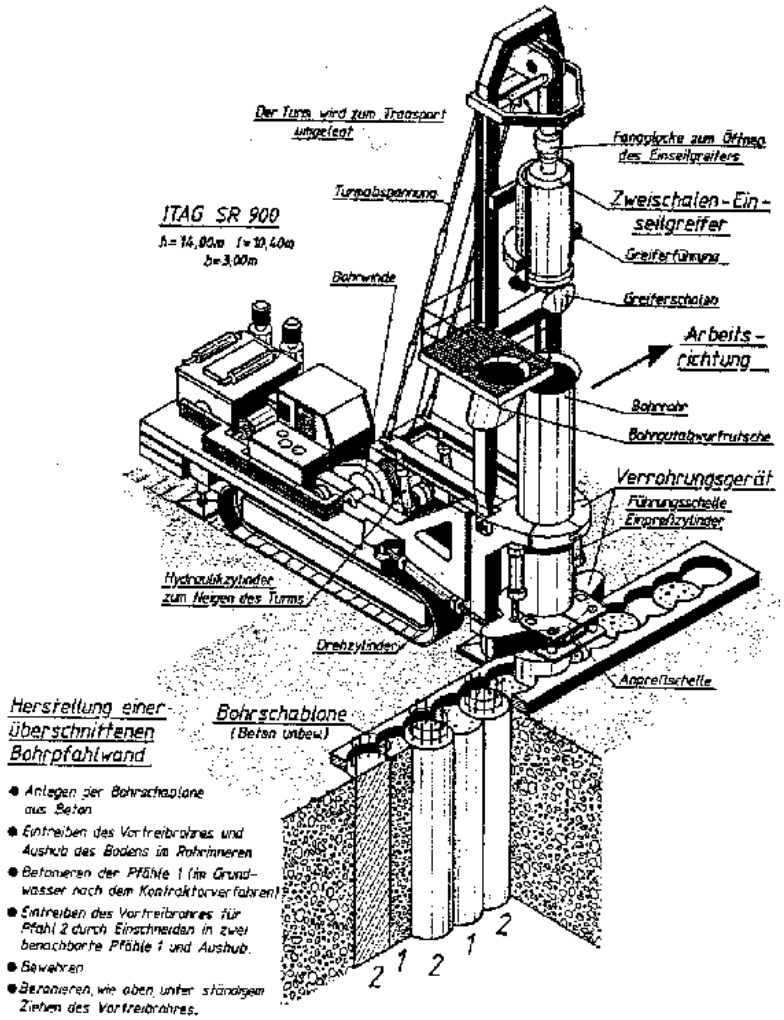


Bild 38: Herstellung einer überschnittenen Bohrpfahlwand /Pul79/

- **Schlitzwände**

Schlitzwände können zusätzlich noch mit Bewehrungselementen versehen werden, was für die hier vorliegende Fälle jedoch nicht erforderlich ist.

6.3 Sohlabdichtung

6.3.1 Allgemeines

Um den Zulauf des Grundwassers von unten in die Baugrube zu minimieren, wird, wenn die Vertikalabdichtung nicht bis in eine weitgehend wasserundurchlässige Bodenschicht geführt werden kann, eine künstliche, weitgehend wasserundurchlässige Schicht geschaffen. Dies ist möglich durch /Pul80/:

- eine Injektion mit Zement (grobporiger Boden) oder Feinstbindemitteln
- eine Injektion mit Weichgel (feinkörnige Böden)
- eine Hochdruckinjektion

Das Einbringen des Injektionsgutes bei den herkömmlichen Injektionen kann auf unterschiedliche Art erfolgen. Beispielhaft wird hier die Injektion mit einem Manschettenrohr beschrieben. Dazu wird zunächst eine Bohrung hergestellt, in die das Manschettenrohr eingestellt wird. Bei dem Manschettenrohr handelt es sich um ein Kunststoffrohr, das in einem Abstand von ca. 30 cm vier einander gegenüberliegende Bohrungen hat. Diese sind mit einer Gummimanschette umschlossen. Der Ringraum zwischen Verrohrung und Manschettenraum wird mit einem Bentonit-Zement-Gemisch verfüllt, das nach der Erhärtung verhindert, daß bei der eigentlichen Injektion das Injektionsmaterial entlang des Manschettenrohres nach oben entweicht. Nach dem Ziehen der Verrohrung wird für den eigentlichen Injektionsvorgang das Injektionsmaterial mit einem doppelten Packer auf einer Länge von ca. 20 cm zusammengedrückt, wodurch sich die Gummimanschette hebt und das erhärtete Zement-Bentonit-Gemisch aufgesprengt wird. Das Injektionsmittel entweicht in den Porenraum des anstehenden Boden. Bild 39 veranschaulicht diesen Vorgang /Pul80/.

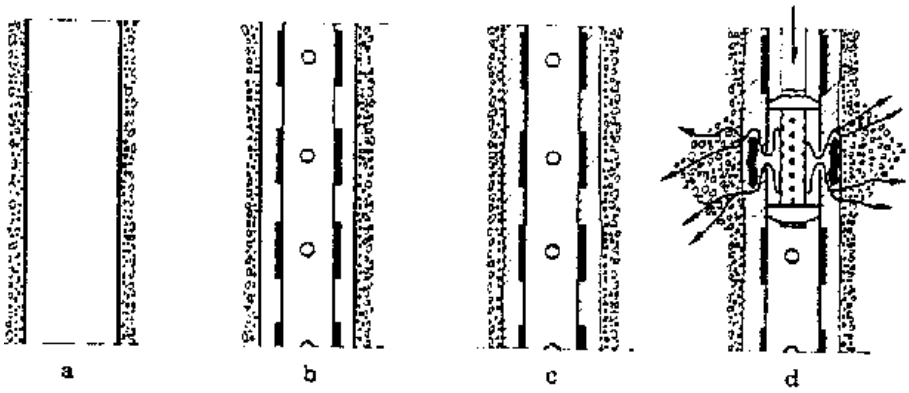


Bild 39: Schemaskizze eines Manschettenrohres mit Doppelpacker /Pul80/
a) verrohrte Bohrung
b) Einführung des Manschettenrohres
c) Einbringen der Bentonit-Zement-Umhüllung und Ziehen der Verrohrung
d) Injektion mittels Doppelpacker

Durch mehrere nebeneinander angeordnete Bohrungen kann auf diese Weise eine zusammenhängende Abdichtungsebene geschaffen werden.

Durch das anstehende Grundwasser ist die Sohlabdichtung einem Auftrieb ausgesetzt, der auf verschiedene Arten beherrscht werden kann. Bei den hochliegenden Sohlen kann dem Auftrieb durch ein ausreichendes Eigengewicht der Sohle oder eine Verankerung der Sohle durch Verpreßanker oder Zugpfähle begegnet werden, bei einer tiefliegenden Injektionssohle durch Nutzung des über der Sohle liegenden Bodengewichtes. Bild 40 zeigt das Prinzip der Auftriebsicherung bei in unterschiedlicher Tiefe angeordneten Dichtsohlen bei der Baugrubenabdichtung. Der Nachweis gegen Auftrieb kann nach DIN 1054 /DIN31/ geführt werden.

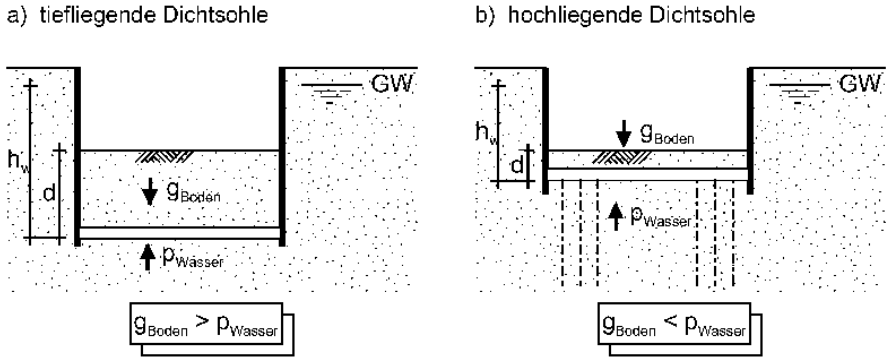


Bild 40: Sicherung gegen Auftrieb bei hoch- und tiefliegenden Dichtsohlen /Zöl104/

6.3.2 Tiefliegende Injektionssohlen

Bei tiefliegenden Injektionssohlen handelt es sich um etwa 1 m dicke Sohlen, die mit Weichgel oder Zementsuspensionen in größerer Tiefe unter der Baugrubensohle angeordnet werden /Pul80/. Es sind keine besonderen Festigkeitseigenschaften notwendig, da eine Verankerung nicht erforderlich ist. Lediglich die Erosionsstabilität muß gewährleistet sein /Ohl77/. Der sich oberhalb der Dichtungssohle befindliche Boden sichert diese gegen Auftrieb.

Bei den angewandten Verfahren handelt es sich im wesentlichen um Poreninjektionsverfahren nach DIN 4093 /DIN33/, bei denen die Suspensionen in den Boden injiziert werden und dabei in den Porenraum des Bodens eindringen. Die eingesetzten Materialien in Abhängigkeit von der Kornverteilung des Bodens sind Zement (Grobsand/Kies), Feinstzement (Mittelsand/Grobsand) oder Weichgel (Fein- bis Grobsand), mit denen die Durchlässigkeit des Bodens auf Werte von $k<10^{-8}$ m/s gesenkt werden kann /Ohl77/. Einen Überblick über die Anwendungsgrenzen der verschiedenen Injektionsmittel gibt Bild 41.

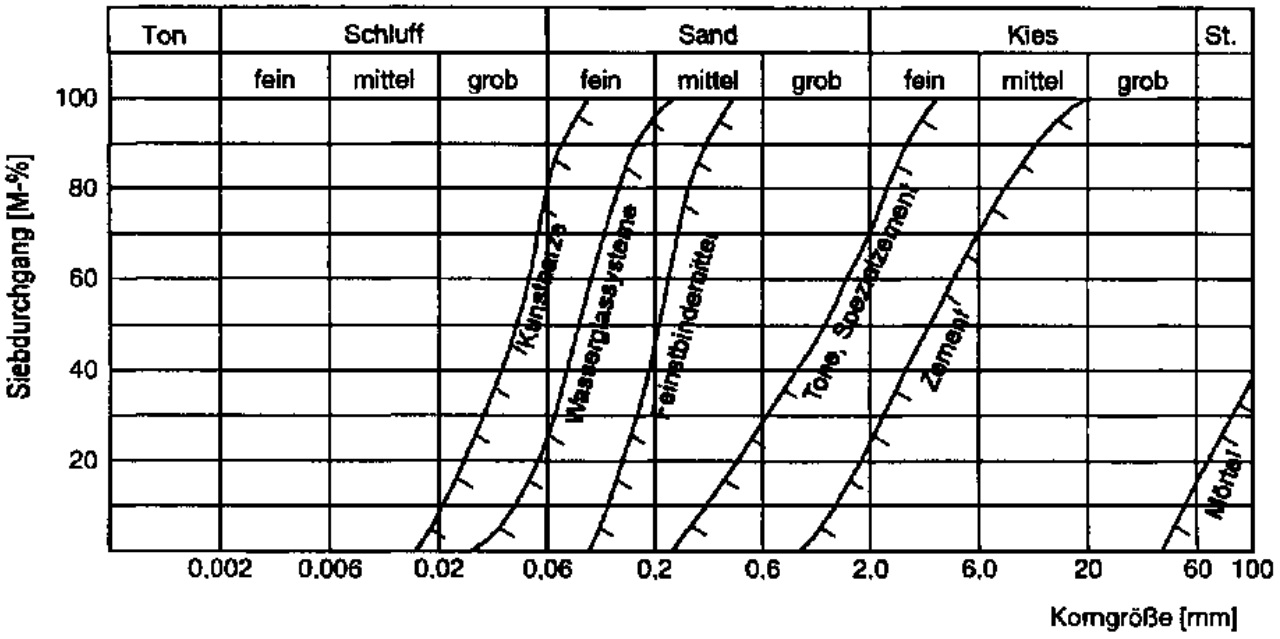


Bild 41: Anwendungsbereiche verschiedener Injektionsmittel /Ohl77/

6.3.2.1 Zement-/Feinstzementsohle

Für Zementinjektionen können die Forderungen zum Versuchsprogramm und Ausführung der DIN 4093 /DIN33/ entnommen werden. Für Feinstzemente liegt ein Merkblatt /Sch89/ vor, das über die Empfehlungen der DIN 4093 hinaus anwendungsspezifische Besonderheiten bei Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln beschreibt und Anwendungshilfen gibt. Bei Feinstzementsohlen gibt es bisher noch Probleme mit der Dichtigkeit /Bor7, Zöl104/, vor allen Dingen bei gröberen Böden, aber zur Zeit sind umfangreiche Untersuchungen auf diesem Gebiet im Gange /Bor7/. Eine weitgehend homogene Ausbreitung des Materials hat sich bisher in der Praxis als schwierig erwiesen, da z. B. unterschiedliche Lagerungsdichten und Kornverteilungen natürlich gelagerter Sandböden die gleichmäßige Verteilung des Injektionsmaterials erschweren /Bor7, Sän85/.

6.3.2.2 Weichgelsohlen

Weichgelsohlen auf Wasserglasbasis werden heute in Verbindung mit anorganischen Härtern zur Baugrubenabdichtung eingesetzt. Über Injektionslanzen werden wässrige Lösungen von z. B. Natronwasserglas und Natriumaluminat in den Baugrund injiziert. Das Gemisch mit Anfangsviskositäten von ca. 5 – 10 mPa·s verdrängt das vorhandene Porenwasser und erstarrt nach einer vorher definierten Reaktionszeit zu einem sehr wasserreichen Hydrogel mit geringer Festigkeit. Wie Bild 41 zu entnehmen ist, sind feinere Böden wie mit den Zement-/Feinstzementsuspensionen injizierbar, wobei die erzielbaren Durchlässigkeitsbeiwerte erfahrungsgemäß in der Größenordnung zwischen $k=10^{-7}$ und $k=10^{-8}$ m/s liegen /Ohl77/. Es liegen Erfahrungen vor, nach denen es bei den Weichgelsohlen nur in wenigen Fällen zu Undichtigkeiten bei Baugruben gekommen ist /Bor7/.

Die Umweltverträglichkeit der Weichgelsohlen wurde vor allen Dingen bei den Baumaßnahmen in Berlin zwischen 1990 und 1995 zum Thema der öffentlichen Diskussion, da in diesem Zeitraum große Mengen an Weichgel direkt in den Porengrundwasserleiter verpreßt wurden. Es erfolgte ein Zulassungsstop für Baumaßnahmen mit Weichgelsohlen, um die Umweltverträglichkeit zu untersuchen /Ohl77/. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, daß die Belastungen räumlich und zeitlich begrenzt waren und die Grundwasserqualität nicht nachhaltig beeinträchtigt wurde. Während und direkt im Anschluß an den Injektionsvorgang tritt eine Verdünnung von Bestandteilen der noch nicht gelierten Weichgelflüssigkeit (Natrium- und Hydroxid-Ionen) auf, die durch die Grundwasserströmung abtransportiert werden können. Dieser Vorgang kommt nach der Aushärtung zum Erliegen und es

erfolgt nur noch ein erheblich geringerer Natriumeintrag. Durch vorhandene Wasserhaltungen der Baugrube wird jedoch der Großteil der Belastungen abgefangen und entfernt, so daß die Wasserhaltung vor allen Dingen im anfänglichen Zeitraum gezielt zur Erfassung des Stoffeintrages eingesetzt werden sollte /Ohl77/. Dadurch kann es jedoch im Bereich der Brunnen zu einer Anreicherung des durch das Grundwasser abtransportierten Materials kommen, wodurch die Durchlässigkeit um die Brunnen herabgesetzt werden kann. Dies kann im Extremfall zu einem Zusetzen der Brunnen führen /Bor7/.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der hier beschriebenen Materialien ist jedoch mit eingeschränkter Wirksamkeit zu rechnen, da es bereits nach ca. einem Jahr zu Schrumpfungen kommen kann, wodurch sich die Durchlässigkeit erhöht und es auch noch zu geringen Freisetzungen von Reaktionsprodukten kommt /Ohl77/. Durch Veränderung der Gelzusammensetzung ist jedoch eine Beeinflussung der Dauerhaftigkeit möglich /Kut73/.

6.3.3 Hochliegende Sohlen

Bei hochliegenden Sohlen reicht das Eigengewicht in der Regel nicht aus, um wirtschaftlich eine ausreichende Sicherheit gegen Auftrieb zu gewährleisten, so daß eine Verankerung der Sohle erforderlich ist. Der Wasserdruck wird über Gewölbe- und Schubspannungen in die Zugpfähle eingeleitet, so daß die hochliegenden Injektionssohlen auch statisch beanspruchbar sein müssen. Bei hochliegenden Sohlen ist die Gefahr eines unkontrollierten Sohlaufbruches in Folge von Fehlstellen größer als bei tiefliegenden Sohlen /Zöl104/.

Geeignete Verfahren für die Herstellung sind das im nächsten Abschnitt beschriebene Düsenstrahlverfahren oder die Ausführung als Unterwasserbetonsohlen, wobei die Unterwasserbetonsohlen aber für die hier betrachteten Probleme nicht weiter von Bedeutung sind.

6.4 Düsenstrahlverfahren (HDI)

6.4.1 Allgemeines

Das Düsenstrahlverfahren wird in Deutschland seit Ende der 70er Jahre angewendet und ist auch unter dem Namen Hochdruckinjektion (HDI) bekannt. Es hat mit der herkömmlichen Baugrundinjektion wenig gemein, denn bei dieser werden im Boden vorhandene Hohlräume mit dem Injektionsmaterial über die natürlich vorhandenen Fließwege verfüllt. Beim Düsenstrahlverfahren hingegen wird das Injektionsmaterial unter hohem Druck in den Baugrund getrieben, wobei der anstehende Boden gelöst und mit dem Injektionsmaterial vermischt

wird. Mit dem Düsenstrahlverfahren lassen sich in Abhängigkeit von der Ausrichtung und Bewegung des Hochdruckstrahls Stäbe, Wände, Scheiben und Säulen in nahezu beliebiger Richtung herstellen. Somit ist der Anschluß zweier Düsenstrahlkörper auch abhängig von der Reihenfolge und den Herstellzeiten. Das Düsenstrahlverfahren kann sowohl für die Sohlabdichtung als auch für die Wandabdichtung, z. B. als Schmalwand, eingesetzt werden /Kut73/.

6.4.2 Grundlagen

Das Prinzip des Düsenstrahlverfahrens läßt sich in vier Teilschritte unterteilen (Bild 42). Zunächst wird mit einem speziellen Bohrgestänge ein Bohrloch bis zur gewünschten Tiefe hergestellt (A). Anschließend wird auf Düsenstrahlbetrieb umgeschaltet und das Injektionsgut wird durch seitlich am Gestänge angebrachte Düsen unter hohem Druck in den Boden gepreßt, wobei das Gestänge gleichzeitig gedreht und gezogen wird (B). Der Suspensionsstrahl löst den Baugrund und vermischt sich mit dem gelösten Gut, wobei überschüssiges Mischgut durch den Ringraum zutage tritt und entsorgt werden muß. Der Rücklauf des überschüssigen Gemisches ist zur Druckregulierung notwendig, und gibt wichtige Hinweise auf die Zusammensetzung und die späteren Eigenschaften des im Entstehen begriffenen Elements. Die Rücklaufsuspension kann aber nicht mehr verwertet, sondern muß entsorgt werden.

Im Boden entsteht durch das Einpressen eine Säule aus Baugrund und Injektionsmaterial (C). Durch Anordnung sich überschneidender Düsenstrahlkörper werden größere zusammenhängende Körper erstellt (D) /Kut73/. Benachbarte Säulen können gedüst werden, wenn die Suspension der Primärsäule noch flüssig oder schon erhärtet ist. Der Hochdruckstahl ist jedoch nicht stark genug, um erhärtete Säulen zu schneiden.

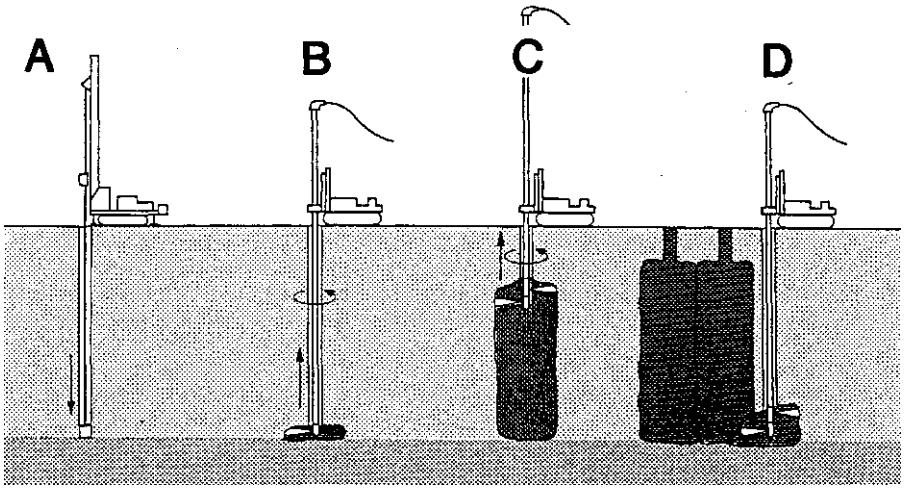


Bild 42: Arbeitsweise bei einer Düsenstrahlinjektion /Kut73/

Um Lücken zwischen den einzelnen Säulen möglichst auszuschließen, sollten die Säulen möglichst gleiche Durchmesser über die gesamte Höhe haben. Bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen über die Höhe kann dies über den Injektionsdruck und die Ziehgeschwindigkeit des Injektionsgestänges gesteuert werden. Auch durch die Tiefe und den sich damit ändernden Erddruck ergeben sich schon notwendige Anpassungen des Injektionsdruckes und der Ziehgeschwindigkeit. Es lassen sich auch dünne Wände herstellen, wenn beim Ziehen das Bohrgestänge nicht gedreht wird.

Zur Steigerung der Sicherheit des Düsenstrahlverfahrens wurden neue Vermessungssysteme entwickelt, die in der Lage sind, die Durchmesser der einzelnen Säulen auch in großer Tiefe zu erfassen. GPS-unterstützte Bohrpunkteinmessungen mit festeingebauten Meßsonden im Bohrgestänge geben Auskunft über die Lage und Höhe der einzelnen Säulen /Sän85/, wobei vor allen Dingen bei tiefliegenden Sohlen die Richtungsgenauigkeit der Bohrungen von besonderer Bedeutung ist. Im Bereich der Meßeinrichtungen sind zur Zeit Entwicklungen in Bearbeitung, welche die geforderten Genauigkeiten erreichen sollen /Sto92/.

Es werden 3 Verfahrensarten angewandt, die unterschiedliche Wirkungsradien haben und sich für unterschiedliche Bodenverhältnisse eignen. Dies ist durch andersartige Bohrgestänge beim Einphasen-, Zweiphasen- und Dreiphasenverfahren bedingt, welche die Suspension auf verschiedene Weise in den Untergrund einbringen. Die Bezeichnungen beruhen auf der Anzahl der eingepreßten Medien (Zementsuspension, Luft, Wasser) /Kut73/.

6.4.3 Einphasenverfahren

Beim Einphasenverfahren wird der Düse über ein Einfachgestänge die Suspension zugeführt und unter hohem Druck in den Boden gepreßt (Bild 43a)). Der Druck kann in Abhängigkeit des anstehenden Bodens und des gewünschten Säulendurchmessers zwischen 250 und 600 bar betragen, da mit der Suspension gleichzeitig der Boden gelöst wird und die Elemente hergestellt werden /Kut73/.

6.4.4 Zweiphasenverfahren

Beim Zweiphasenverfahren wird zur Unterstützung des Lösevorgangs zeitgleich mit der Suspension Druckluft eingepreßt. Die Luft bündelt den Suspensionsstrahl und ermöglicht eine größere Reichweite oder das Lösen festerer Böden. Dieses Verfahren benötigt ein anderes Bohrgestänge, in dem jeweils ein Zulaufkanal für die Suspension und die Druckluft untergebracht sind (Bild 43b)). Die Suspension wird mit dem selben Druck wie beim Einphasenverfahren eingebracht, wobei aber größere Säulendurchmesser erreicht werden können /Kut73/.

6.4.5 Dreiphasenverfahren

Beim Dreiphasenverfahren handelt es sich um ein grundsätzlich anderes Verfahren. Das Lösen des Baugrundes erfolgt nicht mehr mit der Suspension, sondern mit einem durch Luft gebündelten Wasserstrahl. Die Suspensionsdüsen sind unterhalb der Luft- und Wasserdüsen angeordnet, so daß der Löse- und Vermörtelungsvorgang räumlich voneinander getrennt ist, aber trotzdem in einem Arbeitsgang durchgeführt wird (Bild 43c)). Für den Wasserstrahl werden Drücke von 300 bis 600 bar eingesetzt, wodurch der Boden gelöst wird. Für die Suspension sind nur noch Drücke von 15 bis 40 bar erforderlich, da der Lösevorgang nicht mehr mit der Suspension durchgeführt wird.

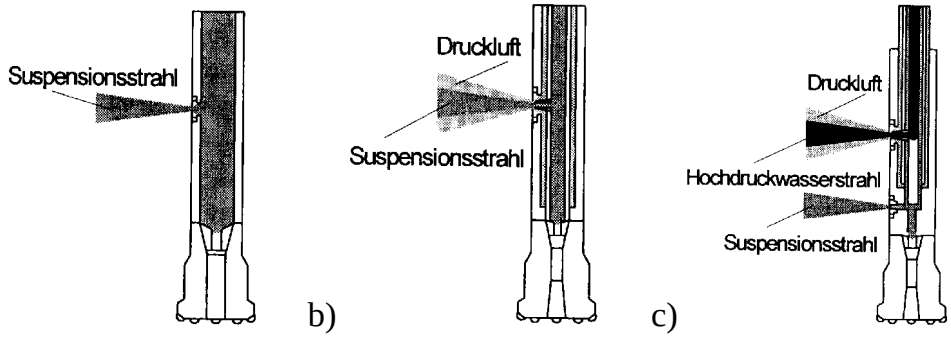


Bild 43: Unterschiedliche Verfahrensarten der Düsenstrahlinjektion: a) Einphasenverfahren, b) Zweiphasenverfahren, c) Dreiphasenverfahren /Sch88/

6.4.6 Suspensionsmaterial und Materialbedarf

Die Suspensionen bestehen meist aus Wasser und Zement, denen auch begrenzte Mengen an Bentonit zugegeben werden können.

Der Materialbedarf beim Düsenstrahlverfahren beträgt bei einem Injektionskörper gleicher Abmessungen im Vergleich zu herkömmlichen Bodeninjektionen in etwa das Doppelte. Dies ist einmal durch den notwendigen Austritt des überschüssigen Materials bedingt, hängt aber auch von der Ziehgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Suspension zu Boden ab. Der Zeitbedarf liegt nur in etwa bei einem Zehntel der Zeit einer konventionellen Injektion /Kut73/.

6.4.7 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich wird durch den Widerstand des Bodens gegen den Lösevorgang und das teilweise oder vollständige Ersetzen des Bodens durch das Injektionsmaterial eingegrenzt. Es liegen Erfahrungswerte vor, nach denen Kies mit mittleren Korndurchmessern von 60 mm eine obere Anwendungsgrenze in grobkörnigem Boden darstellt. Im feinen Boden wird mit dem Düsenstrahlverfahren im Gegensatz zur herkömmlichen Injektion auch nahezu der gesamte Bereich des Schluffes erfaßt /Kut73/. Organische Böden werden jedoch ausgeschlossen /Ohl77/.

Auch bei ordnungsgemäßer Herstellung kann es durch Bodeneinschlüsse zu Undichtigkeiten kommen, die z. B. durch Spritzschatten an Findlingen oder durch in Zwickeln zwischen den einzelnen Säulen eingeschlossene verdichtete Sandkeile verursacht werden können /Sto92/. Zur Verringerung des Risikos solcher wasserdurchlässigen Fehlstellen gibt es jedoch patentierte Möglichkeiten /Bun16/.

Durch das Düsenstrahlverfahren wird der Boden verfestigt und abgedichtet, wodurch sich auch die zwei Hauptanwendungsgebiete ergeben. Für die hier besonders betrachtete Abdichtung ist jedoch auch die Festigkeit der Injektionskörper in gewissen Maße von Bedeutung, da bei zu geringen Festigkeiten die Erosionsgefahr des hergestellten Elementes ansteigt. Die Durchlässigkeit läßt sich auf Werte in der Größenordnung von $k \leq 10^{-8}$ m/s senken und hängt wesentlich von der Bodenart, der Zusammensetzung der Suspension und dem Volumenverhältnis von Suspension zu Boden ab.

Das Düsenstrahlverfahren wird z. B. zu Abdichtungszwecken bei Baugrubensohlen oder der Herstellung von Schmalwänden und Deponieabdichtungen eingesetzt. Da das Verfahren nicht an eine vertikale Ausrichtung der Düsenstrahlelemente gebunden ist, lassen sich beispielsweise auch Hangsicherungen oder Schirminjektionen im Tunnelbau verwirklichen /Kut73/. Ein Vorteil des Düsenstrahlverfahrens im Vergleich zu herkömmlichen Injektionen liegt in dem zeitlichen Aspekt bei der Herstellung. Die Kosten liegen jedoch in der Regel höher als z. B. bei den Weichgelsohlen /Sän85/.

6.4.8 Abgewandeltes Verfahren

Um die Kosten und die Fehleranfälligkeit zu reduzieren, wurde zur Sohlabdichtung ein abgewandeltes Verfahren entwickelt /Bun16/, bei dem ebenfalls rasterförmig angeordnete Bohrlöcher vorgesehen sind und in unterschiedlichen Tiefen durch eine sich drehende Düse ein Dichtmittel in den Boden gepreßt wird. Dabei wird die Düse nicht kontinuierlich nach oben gezogen, sondern verbleibt bei jeder Abdichtungslage auf der entsprechenden Höhe, und das Material wird durch die sich drehende Düse in den Boden gepreßt. Es werden in bestimmten Abständen einzelne Abdichtungsschirme hergestellt, die bei nach unten geneigter Düsenanordnung kegelförmig ausgebildet sind. Die Bohrlöcher werden dazu so angeordnet, das die einzelnen Schirme sich überschneiden und so mehrere zusammenhängende Ebenen entstehen. Durch die schräge Düsenausrichtung überschneiden die einzelnen Schirme jeweils mehrere Ebenen und sorgen für eine gute Dichtwirkung. Um die Reichweite des Düsenstrahles zu erfassen sind Bodenerkundungen, bzw Probeinjektionen erforderlich. Bild 44 zeigt skizzenhaft das Prinzip dieser Verfahrensvariation.

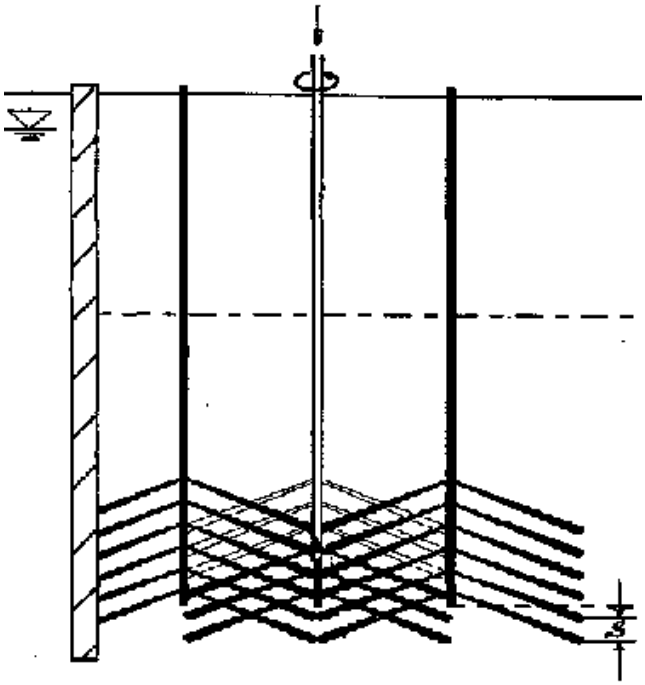


Bild 44: Prinzip bei der schirmartigen Anordnung einzelner sich überschneidender Düsenstrahlebenen zur Sohlabdichtung /Bun16/

6.4.9 Kombination aus Düsenstrahlverfahren und Bodenvereisung

Ein zur Patentierung vorgelegtes Verfahren /Bun17/ beschreibt die Möglichkeit, das Düsenstrahlverfahren mit einer Bodenvereisung zu kombinieren. Mögliche Undichtigkeiten in der Düsenstrahlwand lassen sich durch eine zusätzliche Vereisungsbarriere weitgehend vermeiden. Dazu werden Gefrierlanzen in den noch nicht erhärteten Injektionskörper gesetzt. Darin strömt ein Kältemittel, das dem Boden Wärme entzieht und das Bodenwasser zum Gefrieren bringt. Die Ausbildung des Vereisungskörpers kann dabei gezielt gesteuert werden, indem die Anordnung der Lanzen variiert wird. Bild 45 zeigt mögliche unterschiedliche Körper, die mit diesem kombinierten Verfahren hergestellt werden können.

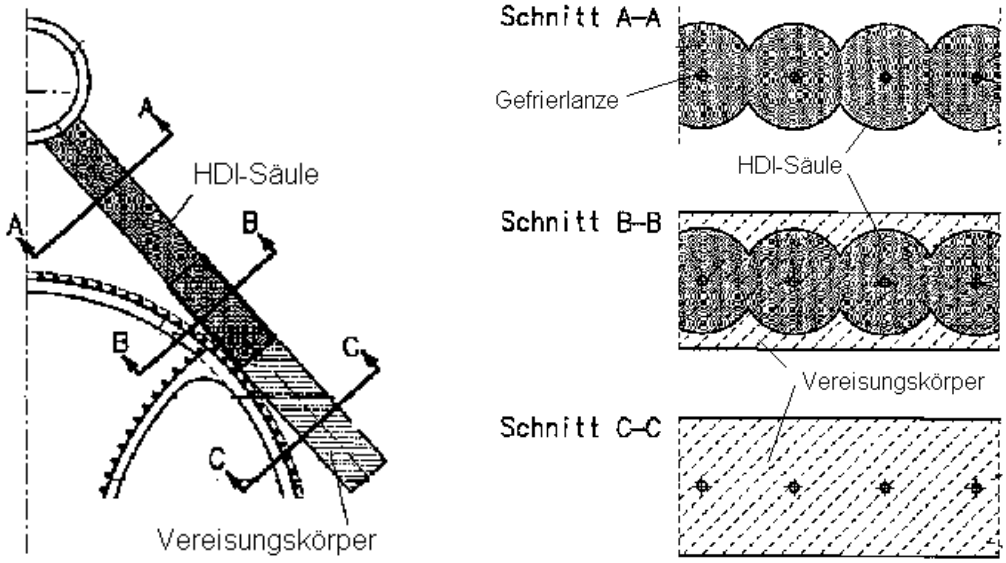


Bild 45: Unterschiedlich ausgebildete Abdichtungskörper beim kombinierten Düsenstrahl- und Vereisungsverfahren /Bun17/

Das Gefrieren des Bodens ist besonders für temporäre Maßnahmen geeignet, da das Kältemittel entweder ständig abgekühlt oder nachgeliefert werden muß. Durch die unterschiedlichen Ausbildungsmöglichkeiten der Dichtungskörper könnten sich aus diesem Verfahren Anwendungsmöglichkeiten ergeben, bei denen die Vereisungsbereiche gezielt in die Wanne eingebaut werden, um diese bei schwankendem Grundwasser abzutauen und wieder zu vereisen. Bei niedrigen Grundwasserständen könnten sie im abgetauten Zustand als Ablauf für versickerndes Regenwasser aus der Dichtungswanne dienen, das sonst eventuell abgepumpt werden müßte. Bei steigenden Grundwasserständen werden diese Bereiche vereist, und die Wanne bildet wieder eine vollständige Abdichtung.

6.5 Verfahren zur Abdichtung von Bodenkörpern

Ein weiteres patentiertes Verfahren /Bun18/ zur großräumigen nachträglichen Abdichtung stammt aus dem Deponiebau. Übertragen auf die Bauwerksabdichtung ließe sich ein Bauwerk oder ganze Bauwerksgruppen vollständig von außen abdichten. Mit einem steuerbaren, ferngelenkten Bohrkopf wird eine Bohrung im Erdreich unterhalb des Bauwerks vorangetrieben und währenddessen ein Dichtstoff durch am Bohrkopf angeordnete Düsen in unterschiedlichen Winkeln in den Boden injiziert. Durch die Injektion entsteht eine flächenartige Abdichtungsebene in der näheren Umgebung des Bohrloches, die bei mehreren benachbart angeordneten Bohrungen zu einer großflächigen Abdichtungsebene ausgeweitet

werden kann. Dazu müssen sich die Injektionsebenen der einzelnen Bohrlöcher überschneiden. Mit Hilfe geeigneter Bohrvorrichtungen kann das Bohrloch mit schrägem Winkel beginnend in den Boden getrieben werden und entsprechend der Bauwerkskonturen oder einem sonstigen gewünschten Verlauf auch in mehreren Ebenen in unterschiedlichem Winkel zueinander das Bauwerk unterfahren (Bild 46).

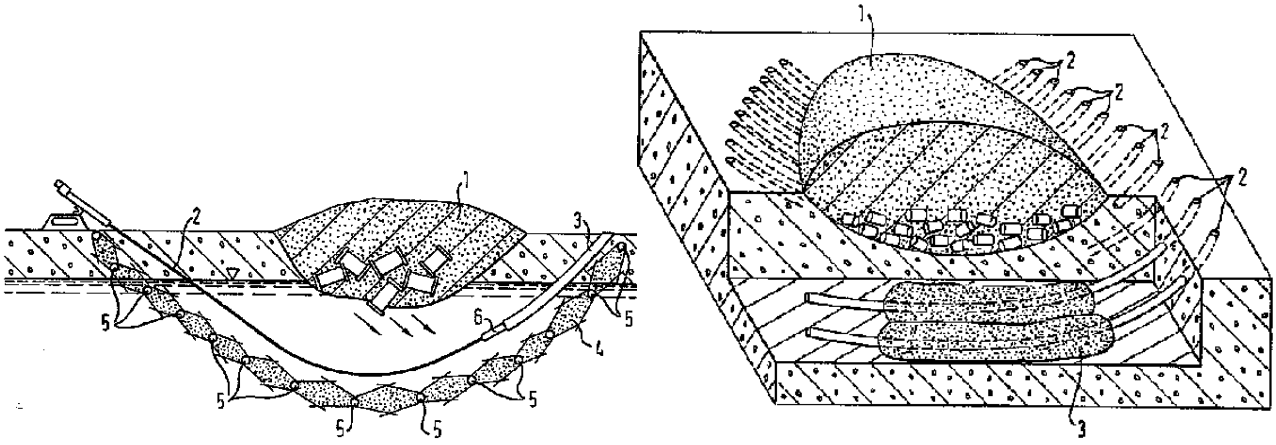


Bild 46: Nachträgliche Deponiebasisabdichtung; 1: Deponiekörper; 2: Bohrungen; 3: geschlossene Sperrschicht; 4: zweite Sperrschicht; 5: parallele, um 90° gedrehte zweite Bohrung; 6: fernlenkbarer Bohrkopf /Bun18/

7 LÖSUNGSANSÄTZE

7.1 Allgemeines

Grundsätzlich muß bei der nachträglichen Bauwerksabdichtung zwischen Bauwerken unterschieden werden, deren Standsicherheit nicht durch das ansteigende Grundwasser gefährdet ist, und solchen, bei denen statische Probleme auftreten, die zu einem Versagen der Bodenplatte führen können. Dies ist das entscheidende Kriterium, das bei der Wahl des Abdichtungssystems von Bedeutung ist.

Im Rahmen der Begehung am 13.11.2001 konnten anhand einiger repräsentativer Objekte bereits große Unterschiede in der Bauweise festgestellt werden. Es liegen Nutzkeller bis hin zu ausgebauten Wohnbereichen mit ungünstigen Voraussetzungen für eine nachträgliche Abdichtung vor. Neben der statischen Fragestellung ergeben sich zusätzliche Probleme aus der Gestaltung einzelner Bauwerke. So führen Garageneinfahrten und Terrassen im Kellerbereich zu einem erheblichen Mehraufwand bei einer nachträglichen Abdichtung. Eine alleinige Differenzierung nur nach den zu erwartenden maximalen Betroffenheiten ist nicht zielführend. Bei den Lösungsansätzen wird daher zwischen Bauwerken unterschieden,

bei denen abdichtungstechnische Maßnahmen alleine ausreichend sind, und solchen, bei denen weitere Aufgaben zu lösen sind.

Für die Einteilung der einzelnen Gebäude in diese Kategorien sind jeweils zusätzliche Informationen über die Objekte erforderlich, für die die vorhandene Bausubstanz erfaßt werden muß. In Verbindung mit den maximal zu erwartenden Grundwasserbelastungen aus der Betroffenheitsanalyse kann eine Zuteilung für jedes Gebäude in eine der beiden Gruppen erfolgen.

7.2 Bauwerke ohne Gefährdung der Standsicherheit

7.2.1 Allgemeines

Bauwerke, die dieser Kategorie zugeordnet werden, können zwar einer Druckwasserbelastung entsprechend DIN 18 195 /DIN36/ ausgesetzt sein, aber die Bauwerkssubstanz ist in der Lage, diese Belastung ohne weitere statisch wirksame Verstärkungen, oder sonstiger konstruktiver Maßnahmen zu ertragen. Die Gebäude dieser Kategorie erfordern rein abdichtungstechnische Maßnahmen.

7.2.2 Mögliche abdichtungstechnische Maßnahmen

Bei den Gebäuden, die in den Betroffenheitsanalysen aufgezählt werden, fehlen i. d. R. ausreichende Schutzmaßnahmen für den dort festgestellten maximalen Wasserstand. Fehlt eine ausreichende Abdichtung der Bodenplatte, ist eine herkömmliche nachträgliche Abdichtung des Gebäudes von außen nicht möglich, da diese Maßnahmen an eine funktionierende Abdichtung der Bodenplatte anschließen müssen /WTA101/. Die nachträgliche Abdichtung der Bodenplatte kann prinzipiell mit folgenden bereits beschriebenen Maßnahmen hergestellt werden /WTA101/:

- Gelschleierinjektion in den Baugrund
- Innenliegende Weiße Wanne
- Innen angeordnete Dichtungsbahnen (Schwarze Wanne)
- Innen angeordnete Dichtungsschlämmen
- Kaltverarbeitbare Bitumenemulsionen
- Flüssigkunststoffe

Bis auf die Gelschleierinjektion handelt es sich um Maßnahmen, deren Abdichtungsebene sich im Bauwerksinneren befindet. Die Bodenplatte bleibt dann weiterhin durchfeuchtet, was bei einer wasserbeständigen Platte in der Regel kein Problem darstellt. Die Abdichtungsstoffe sind einer Wasserbelastung ausgesetzt, die auf deren Haftseite einwirkt. Die Eignung der Abdichtungsstoffe für diese Belastung (i. d. R. Kapillardruck durch kapillares Saugen des Baustoffs der Bodenplatte) muß im Einzelnen nachgewiesen werden. Die oben aufgeführten Verfahren werden alle aus dem Bauwerksinneren ausgeführt, so daß während des Zeitraumes der Bauausführung mit erheblichen Nutzungseinschränkungen zu rechnen ist.

Die Wandabdichtung muß an die aufgebrachte oder bereits vorhandene Bodenabdichtung lückenlos anschließen. In Frage kommen prinzipiell folgende bereits beschriebene Verfahren:

- Standardaußenabdichtung an den freigelegten Außenwänden, die an die Bodenabdichtung angeschlossen wird
- Gelschleierabdichtung im Erdreich
- Innenliegende Weiße Wanne
- Innen angeordnete Dichtungsschlämmen

Bei den Maßnahmen von innen ist zu berücksichtigen, daß die Wandquerschnitte dabei ständig durchfeuchtet bleiben. Bedarfsweise sind Horizontalabdichtungen anzuordnen. Die Kombination der Boden- und Wandabdichtung muß zusammen eine geschlossene Wanne bilden, die den geforderten Abdichtungserfolg gewährleisten kann.

Die neueren Verfahren, wie die in den Abschnitten 5.7.2, 5.7.4, 5.7.5 und 5.7.6 beschriebenen, können grundsätzlich ebenfalls mit in die Überlegungen einbezogen werden, wobei eine Eignung dieser Verfahren für den Einsatz gegen drückendes Wasser und die vorgesehene Anwendung nachgewiesen werden muß.

7.3 Bauwerke mit unzureichender Standsicherheit

7.3.1 Allgemeines

In diese Kategorie fallen sämtliche Bauwerke, die neben der reinen Abdichtungswirkung zusätzlich konstruktive und/oder statisch wirksame Maßnahmen benötigen, um gegen das

drückende Wasser dauerhaft abgedichtet zu werden. Bauwerke, die nach den ermittelten Bemessungswasserständen einem hydrostatischen Druck ausgesetzt sind, für den die Bodenplatte nicht ausreichend bemessen ist, können bei Wasserständen unterhalb des Bemessungswasserstandes zunächst den Eindruck hinterlassen, dicht zu sein. Bei einem weiteren Ansteigen des Grundwassers kann es jedoch zu einem Versagen der Bodenplatte kommen, wenn die Belastung durch das anstehende Grundwasser zu groß geworden ist. Dem Druck des Wassers kann durch eine konstruktive Verstärkung der Bodenplatte begegnet werden. Denkbar sind hier im Prinzip nachträglich eingebrachte Weiße Wannen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dem Wasserdruck ein erhöhtes Gewicht entgegenzusetzen, so daß die Belastungen der Bodenplatte reduziert werden.

Bei einer nachträglichen Abdichtung beispielsweise durch eine Schleierinjektion wird das Bauwerk zwar abgedichtet, jedoch ist die elastische Gelabdichtung statisch nicht in der Lage, die Belastung durch den Wasserdruck aufzunehmen, wenn sie direkt am Baukörper anliegt. Bei Bodenplatten, die nicht für eine Druckwasserbelastung bemessen sind, ist die Gefahr des Versagens der Bodenplatte weiterhin gegeben. Zusätzliches Gegengewicht kann über das Einbinden des anstehenden Bodens in die Abdichtung aufgebracht werden. Dieses Prinzip entspricht dem der tiefliegenden Dichtungssohle und ist in Bild 47 anhand einer Gelschleierabdichtung dargestellt, die zusätzlich zum Bauwerk einen Bodenkörper mit in die Abdichtung einbindet.

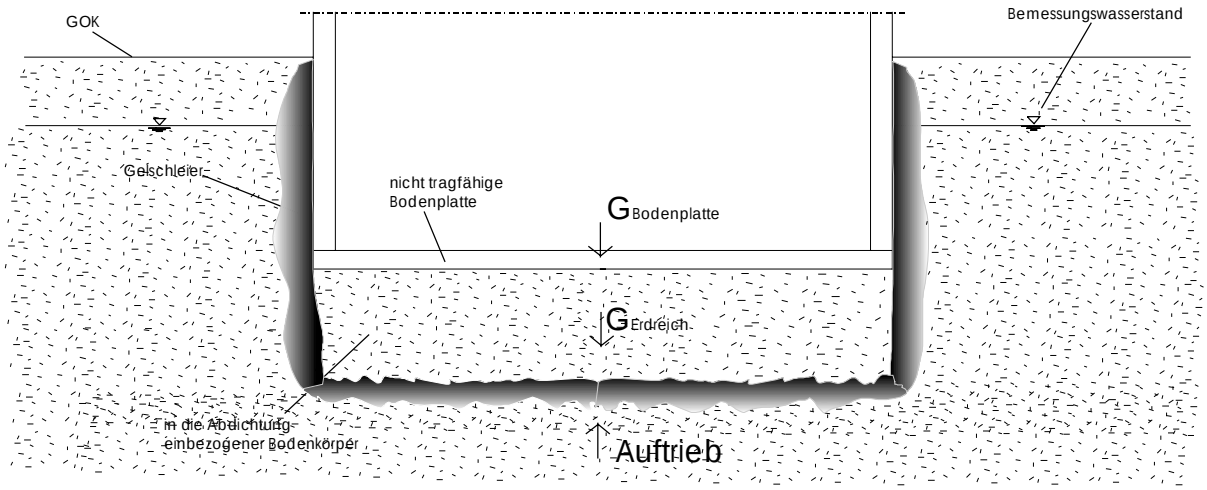


Bild 47: In die Abdichtung einbezogener Bodenkörper zur Verringerung der statischen Belastung der Bodenplatte durch das Grundwasser

Auf diese Weise kann eine Belastung einer nicht ausreichend tragfähigen Bodenplatte durch drückendes Wasser verhindert werden. Die dazu erforderliche Dicke der einzubindenden

Bodenschicht kann so berechnet werden, daß keine statische Belastung der Bodenplatte auftritt. Erfahrungen über den Einsatz einer Schleierabdichtung mit Acrylatgel nicht unmittelbar am Bauwerkskörper liegen bisher nicht in veröffentlichter Form vor, so daß hier noch Entwicklungsbedarf besteht. Gegenüber den Wasserglassystemen, die für die Baugrubenabdichtung eingesetzt werden, bieten die Acrylatgele Vorteile hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Umweltverträglichkeit, bei einem allerdings höheren Preis.

Nachträglich von außen hergestellte Wannen bieten auch die Möglichkeit, mehrere Bauwerke in die Wanne einzubeziehen. Auf diese Weise kann man je nach Anordnung der Gebäude die erforderliche Abdichtungsfläche reduzieren. Bild 48 zeigt eine Draufsicht auf eine prinzipielle Wannenlösung, die vier Einzelbauwerke umfaßt. Zu erkennen ist die für jedes Gebäude zusätzlich erforderliche Dichtwandfläche bei der Ausführung als Einzelmaßnahme. Für eine solche Lösung kommen prinzipiell Gebäude in Frage, deren Bemessungswasserstand neben der erforderlichen abdichtenden Lösung auch eine Lösung statischer Probleme erfordert. Liegen die Gebäude in einer für diese Abdichtungsmöglichkeit günstigen Anordnung, kann das Einfassen dieser Gebäude in eine einzelne Dichtwanne eine Lösung sein. Bei diesen Wannenbauwerken handelt es sich um wesentlich kleinere Bauwerke im Vergleich zu dem modellhaft in /Dül44/ für den Ortsteil Kleinenbroich dargestellte.

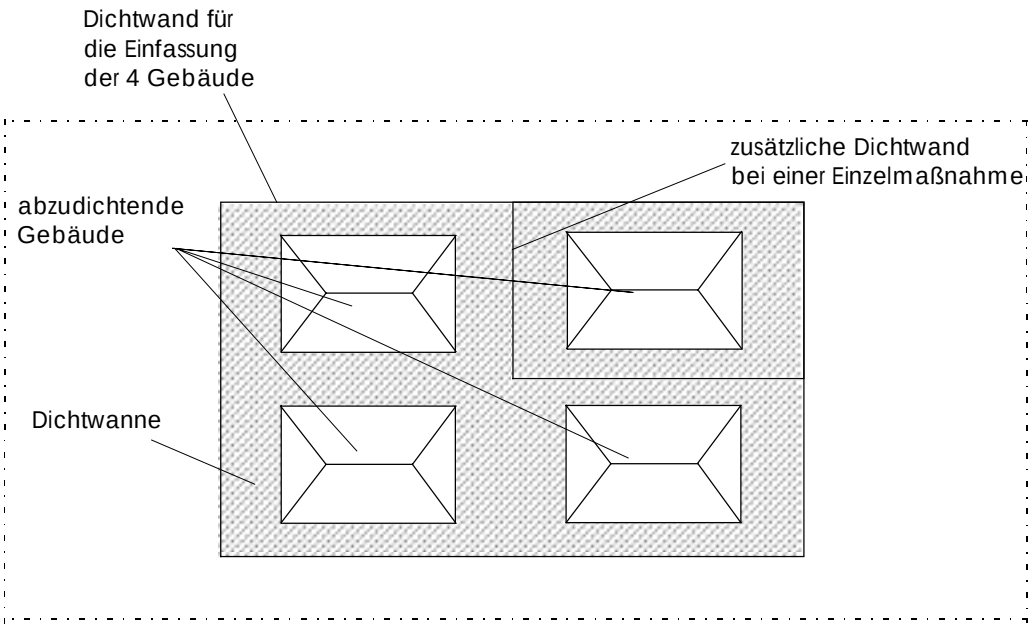


Bild 48 Einfassung mehrerer Bauwerke in eine nachträglich angeordnete Wanne

Durch das Einfassen mehrerer Gebäude in eine Wanne werden zusätzlich auch freie Flächen, die zwischen diesen Gebäuden liegen, wie z. B. Gärten, mit aufgenommen. Über diese Flächen sammeln sich Niederschläge, die in die Wanne versickern und zu einem Anstieg des Wasserstandes in der Wanne führen. Dieser Anteil kann je nach Ausbildung der Wanne einen nicht unerheblichen Anteil an der gesamten abzupumpenden Wassermenge ausmachen. Bei den weiteren Anteilen handelt es sich um den Zustrom durch die Dichtwände und gegebenenfalls über eine abdichtende natürliche Bodenschicht. Die zu bewirtschaftenden Wassermengen sind jedoch wesentlich geringer als bei einer großflächigen Grundwasserabsenkung. Durch die Absenkung innerhalb der Wanne wirkt der Auftrieb nicht mehr auf das Gebäude selbst. Die gesamte Wannenkonstruktion ist jedoch weiterhin dem Auftrieb ausgesetzt, der aber über ein ausreichend großes Gesamtgewicht beherrscht werden kann.

Eine Optimierung bei der Wahl von in einer Wanne einzubeziehender Gebäude ist unbedingt erforderlich um eine möglichst wirtschaftliche Lösung herbeizuführen. In Bild 49 ist skizzenhaft die Einbindung einzelner Gebäude mit Kellern, die vom Grundwasser betroffen sind, in eine Dichtwanne dargestellt.

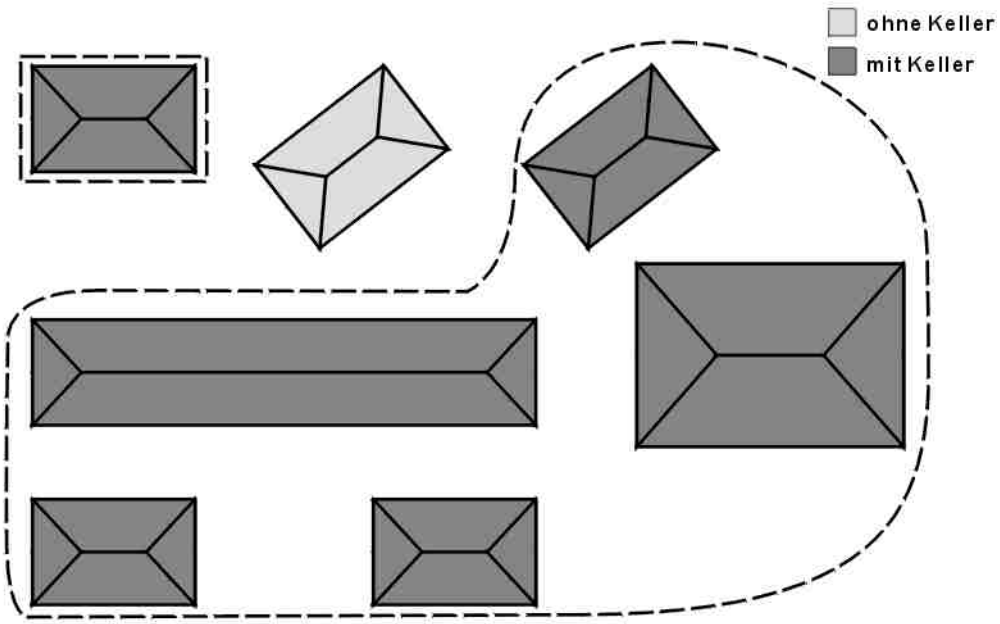


Bild 49: Mögliche Anordnung einer Wanne bei Gebäuden unterschiedlicher Betroffenheit

Die Wannenlösungen lassen sich prinzipiell mit den bereits beschriebenen Maßnahmen zur Baugrubenabdichtung bewerkstelligen, wobei das Einbringen einer nachträglichen künstlich hergestellten Wannensohle aufgrund der bestehenden Bebauung mit größerem Aufwand

verbunden ist wie bei einer Baugrubenabdichtung. Nachfolgend werden Möglichkeiten mit dem Düsenstrahlverfahren sowie mit Dichtungsschlitzwänden kurz erläutert.

7.3.2 Nachträgliche außenliegende Wanne im Düsenstrahlverfahren

Das Düsenstrahlverfahren bietet die Möglichkeit, die Dichtwände geneigt herzustellen, so daß eine zusätzliche Sohlabdichtung entfallen kann. Die schräg angeordneten Düsenstrahlelemente werden von der Seite überschneidend hergestellt und bilden so eine geschlossene Wand. Diese schräge Wand ragt bis unter das Bauwerk und bindet dort in eine ebenfalls schräg hergestellte Wand ein, die von der gegenüberliegenden Seite eingebracht wurde (Bild 50). Die genaue Anordnung läßt sich an die vorhandenen Gegebenheiten anpassen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, mehrere Gebäude (z. B. Doppel- oder Reihenhäuser) in eine Wanne einzubinden, wodurch sich die erforderliche Dichtwandfläche reduziert. Da die Abdichtungsarbeiten vollständig von außen stattfinden, ist im Gegensatz zu den innenliegenden Wannen keine Beeinträchtigung der Wohnraumnutzung während der Baumaßnahmen zu erwarten. Anschlußleitungen der in die Wanne einzuschließenden Gebäude, sowie eventuell erforderliche Querungen von Straßen mit den dort vorhandenen Leitungen müssen in die Planung der Wanne mit einbezogen werden.

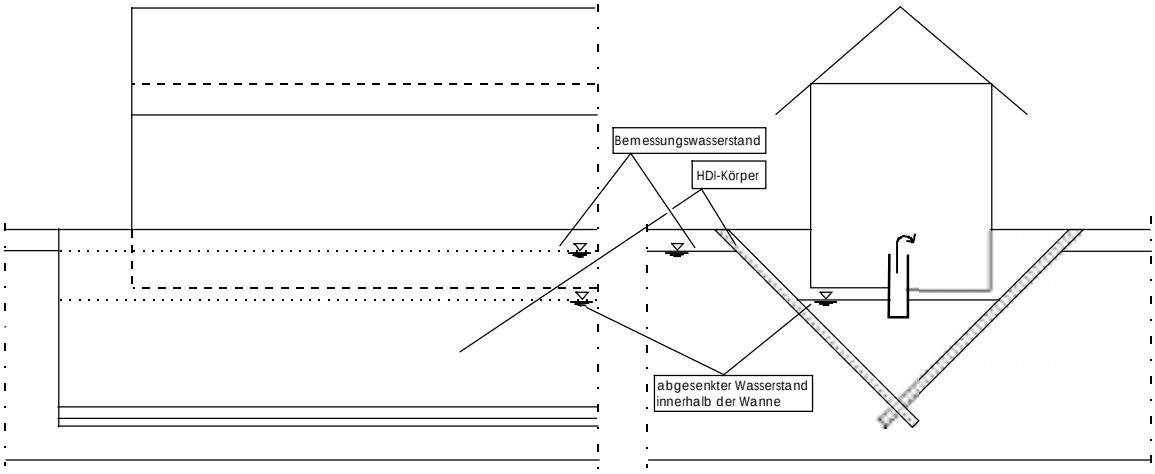


Bild 50: Nachträgliche wannenartige Abdichtung mit dem Düsenstrahlverfahren

7.3.3 Nachträgliche Abdichtung mit Dichtungsschlitzwänden

Mit nachträglich eingebrachten Dichtwänden, die in eine tiefergelegene weitgehend wasserundurchlässige Schicht einbinden, können ebenfalls ganze Bauwerksgruppen eingekapselt werden. Geeignet wären Gebäude mit ähnlichen Betroffenheiten, bei denen auch statische Probleme der Bodenplatte auftreten können, und bei denen die räumlichen Gegebenheiten eine solche Lösung zulassen. Arbeiten aus dem Bauwerksinneren zur Herstellung einer Abdichtungssohle entfallen bei dieser Lösung ebenfalls. Für den Korschenbroicher Raum kämen die schluffigen Feinsande des Oligozän als natürliche Dichtschicht in Frage, deren Durchlässigkeiten in der Größenordnung von $3*10^{-5}$ m/s liegen, und die sich in Tiefen von etwa 30 m befinden /Dül44/. Die Wassermengen, die über diese Bodenschicht in die Wanne eindringen, liegen aufgrund der relativ hohen Durchlässigkeit deutlich über denen, die durch die Dichtungsschlitzwand gelangen. Die hinzukommenden Niederschläge erhöhen wiederum die zu bewirtschaftenden Wassermengen. Besonders wegen der relativ großen Durchlässigkeit der natürlichen Dichtungssohle ist bei dieser Lösung vermutlich mit einer größeren abzupumpenden Wassermenge wie bei der Düsenstrahllösung zu rechnen. Bild 51 erläutert skizzenhaft diesen Lösungsansatz.

Entscheidend bei dieser Lösung ist eine Einleitung der abgepumpten Wassermenge in unmittelbarer Nähe der betrachteten Wanne, um eine Störung der Grundwasserströmung möglichst zu vermeiden.

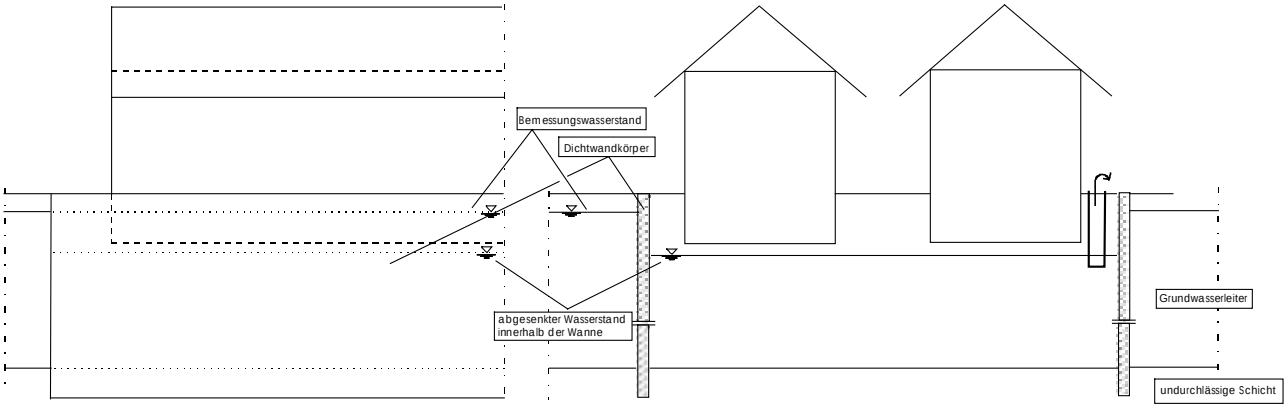


Bild 51: Nachträgliche Abdichtung mit Dichtungsschlitzwänden

7.3.4 Beeinflussung der Grundwasserströmung durch die Dichtungströge

Durch die nachträglich hergestellten Dichtungströge kann es zu einer Beeinflussung der Grundwasserströmung kommen. Die Bauwerke stellen Hindernisse dar, die durch das Grundwasser um- und unterströmt werden. Dadurch kann es auf der oberstromigen Seite zu einem Aufstauen des Grundwasserspiegels kommen und unterstromig zu einer Absenkung. Grundsätzlich können mögliche Beeinträchtigungen mit Strömungsmodellen beurteilt werden /Ohl77/. Für vereinzelt durchgeführte Maßnahmen ist der Einfluß auf die Grundwasserströmung eher als untergeordnet zu betrachten /Ohl77/. Erst bei vielen benachbarten Baumaßnahmen kann es zu möglichen Beeinträchtigungen kommen, die aber bei den im Korschenbroicher Raum vorliegenden Verhältnisse vermutlich eher gering sind. Hierzu müßten die bereits beauftragten Wasser- und Grundbaufachleute Stellung nehmen.

7.4 Kostenansätze

7.4.1 Allgemeines

Zu den Kosten für die einzelnen bautechnischen Lösungen können im allgemeinen nur grobe Spannbreiten angegeben werden. Bei der Vielzahl an Bauwerken mit individueller Gestaltung und Bausubstanz von unterschiedlicher Qualität ist es kaum möglich, allgemeingültige oder pauschale Kostenschätzungen aufzustellen. Es können immer Fälle auftreten, in denen die aufgeführten Spannweiten über- wie auch unterschritten werden. In den folgenden Abschnitten wird für verschiedene Maßnahmen ein Kostenrahmen angegeben, der als grober Anhaltspunkt dienen kann.

7.4.2 Weiße Wanne

Die Weiße Wanne ist bei einer Druckwasserbelastung, für die ein Bauwerk nicht ausgelegt ist, grundsätzlich ein geeignetes Verfahren für die nachträgliche Ertüchtigung. Die zu erwartenden Kosten hängen jedoch in erheblichem Maße von der Ausbildung der Wanne ab. Bei Kellerräumen mit einfacher Gliederung und weitgehend ohne Innenwände, eventuell vorhandener Außentüren, einzubeziehender Fenster und vorhandener Installationen ist ein relativ geringer Aufwand zu betreiben. Ist dies nicht der Fall, können die Aufwendungen überdurchschnittlich ansteigen. Bei komplizierten Konstruktionen steigen die Kosten und auch die Unsicherheiten. Hier muß die Frage gestellt werden, ob die Weiße Wanne in diesen Fällen wirtschaftlich das geeignete Verfahren ist. In jedem Fall ist eine Untersuchung im Einzelfall erforderlich, um in etwa für die einzelnen Bauwerke mögliche Kosten abschätzen

zu können. Allgemeine Abschätzungen sind mit Vorsicht zu betrachten, aber tendenziell kann in etwa der in Bild 52 dargestellte Zusammenhang erwartet werden. Die dort angegebenen Begrenzungen können sowohl unter- als auch überschritten werden.

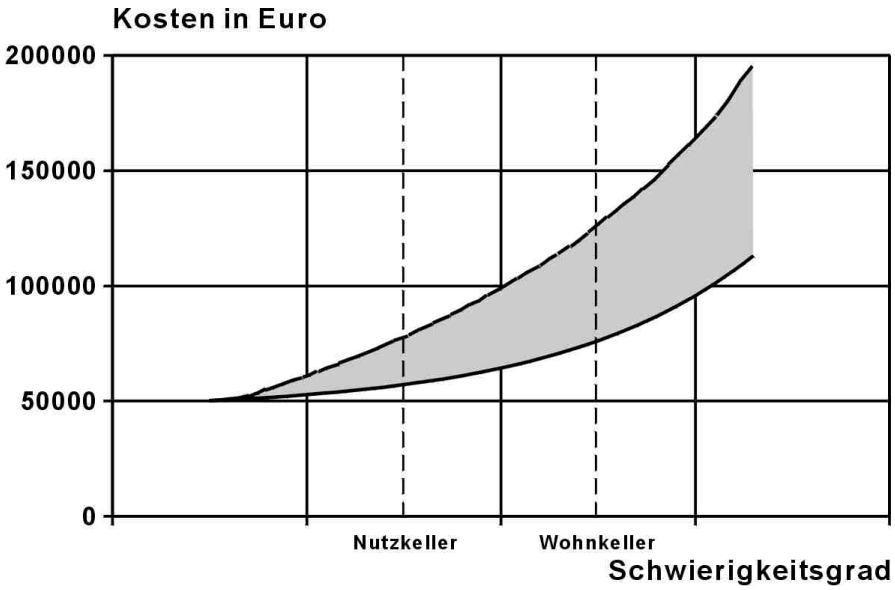


Bild 52: Abschätzung zu erwartender Kosten bei einer Weißen Wanne in Abhängigkeit des Schwierigkeitsgrades der Konstruktion

Bezüglich der Ausbildung der Keller wird unterschieden in:

- Nutzkeller:	einfach	2 bis 3 Einzelräume, hochliegende kleine Fenster, keine Außentür
	mittel	3 bis 4 Einzelräume, Waschraum, Heizungsraum, hochliegende kleine Fenster, keine Außentür
	hochwertig	mehr als vier Einzelräume, komplexe Versorgung des Hauses mit Strom und Gas, Waschraum, normale Fenster, Zugang von außen
- Wohnkeller:	einfach	Hobbyraum, normale Fenster, Zugang von außen, sonst wie hochwertiger Nutzkeller

mittel	Anforderungen an Behaglichkeit (Feuchte und Temperatur), isoliert, sonst wie hochwertiger Nutzkeller
hochwertig	komplexe Einbauten, ggf. Terrasse nach außen, große Fensterfläche, sonst wie hochwertiger Nutzkeller

7.4.3 Spezialtiefbaumaßnahme Düsenstrahlverfahren

Beim Düsenstrahlverfahren gestaltet es sich besonders schwierig, Preise für einzelne Maßnahmen anzugeben, da das Verfahren unter anderem vom vorhandenen Baugrund abhängig ist. Wie bereits beschrieben, besteht die Möglichkeit, mehrere Bauwerke mit in die von außen angelegte Wanne einzubeziehen. Liegen die Gebäude in einer günstigen Anordnung, läßt sich auf diese Weise ein Teil der erforderlichen Abdichtungsfläche einsparen.

Ein Einzelhaus mit den Abmessungen von 10 m · 10 m, das als Einzelmaßnahme abgedichtet wird, benötigt mehr Abdichtungsfläche wie beispielsweise ein einzelnes Haus der gleichen Größe in einer Reihenhausgruppe (Bild 53). Bei einem Einbindewinkel der Dichtwände von 45° und einem senkrechten Abschluß am schmaleren Ende lassen sich bei einer Gruppe von 5 Reihenhäusern dieser Größe, deren Bodenplatte etwa 2,5 unter GOK liegt, beispielsweise etwa 20 % der Abdichtungsfläche pro Haus einsparen.

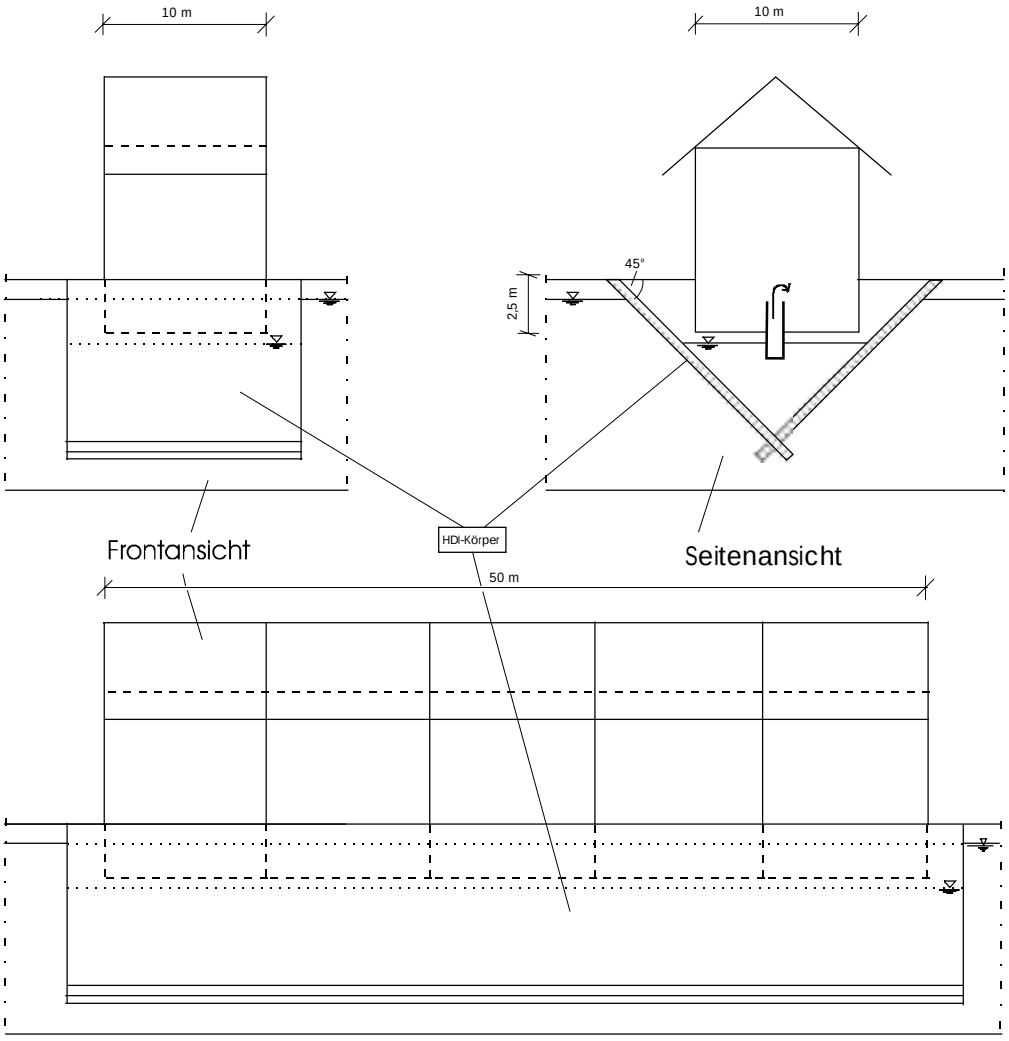


Bild 53: Wannenausbildung im Vergleich zwischen einem Einzelhaus und einer Reihenhausgruppe

Für Reihenhäuser kann der in Bild 54 gezeigte Zusammenhang zwischen Abdichtungsfläche pro Haus bei steigender Hausanzahl in der Wanne angenommen werden. Bei geänderten Abmessungen bleibt diese Tendenz bestehen.

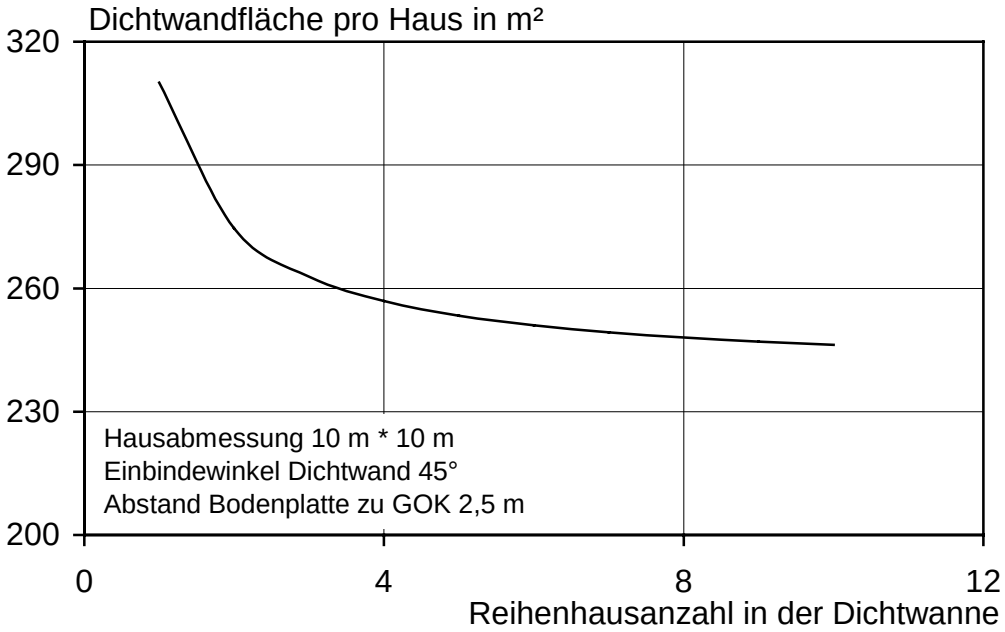


Bild 54: Verringerung der Abdichtungsfläche pro Haus bei Einfassung mehrerer Reihenhäuser in eine Dichtwanne

Die zu erwartenden Kosten werden ähnliche Tendenzen zeigen. Bei einer Preispanne von ungefähr 170 €/m² bis zu 360 €/m² ergeben sich für den hier betrachteten Haustyp mit einer Fläche von 10 m · 10 m bei einer Einzelmaßnahme in etwa Kosten zwischen 53.000,- € und 112.000,- €. Bei Einfassung mehrerer Gebäude in die Wanne können sie sich auf ca. 42.000,- € bis 89.000,- € je Haus reduzieren. Zusätzlich fallen Kosten für die Restwasserhaltung an. Je nach vorhandenen Gegebenheiten müssen unterschiedliche Aufwände für den Wiederaufbau der anliegenden Gartenbebauung oder der Infrastruktur geleistet werden.

Eine Restwasserhaltung leitet das über die Wannenflächen und Niederschläge eindringende Wasser ab. Die durchschnittlichen Regenwassermengen sind im Vergleich zu den Mengen, die durch die Dichtwände gelangen, eher gering.

Die flächendifferenzierte Grundwasserneubildung im Jahresmittel, die von den meteorologischen Verhältnissen, der Bodenart, dem Relief, dem Bewuchs, dem Flurabstand und der Flächennutzung abhängt, bewegt sich im Korschenbroicher Raum zwischen 3,8 und 8,0 l/(s · km²) /Dül44/. Dies entspricht umgerechnet im Mittel etwa zwischen 0,03 und 0,07 m³/d auf einer Grundfläche von 100 m², kann bei einzelnen Regenereignissen aber deutlich ansteigen.

Über die Dichtwanne ergeben sich bei einem angenommenen Durchlässigkeitsbeiwert der Wanne von $k=10^{-7}$ m/s und einer Grundwasserabsenkung innerhalb der Wanne von 2 m ungefähre Zuflußmengen pro Haus, wie in Bild 55 dargestellt.

Die Absenkung in Höhe von 2 m würde Gebäude mit einer Betroffenheit von ca. 2 m von einer statischen Belastung durch das Wasser befreien. Dazu muß zunächst das Wasser innerhalb der Wanne auf dieses Niveau abgesenkt werden. Es entsteht ein hydraulisches Gefälle, wodurch Wasser von außen in die Wanne eindringt. Bei geringeren Absenkungen innerhalb der Wanne strömt auch weniger Wasser zu. Diese Wassermengen sind in Bild 55 dargestellt und können mit kleineren „Hauspumpen“, die zusätzlich noch die Regenwassermengen bewältigen können, gefördert werden.

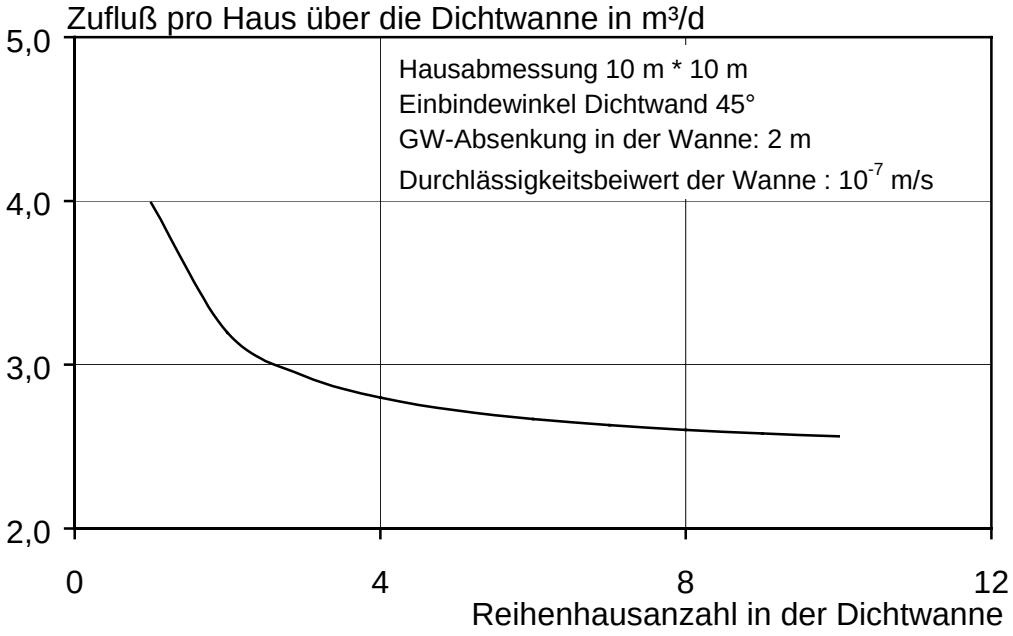


Bild 55: Abschätzung der über die Dichtwanne eindringenden Restwassermengen

Mit dem Düsenstrahlverfahren ist prinzipell auch das Umschließen größerer Bauwerksgruppen, wie in Bild 49 beschrieben, denkbar. Aufgrund der großen Abmessungen müßten die Düsenstrahlelemente vermutlich eher vertikal in den Boden eingebracht werden und einen horizontalen Abschluß erhalten. Das in Abschnitt 6.5 beschriebene Verfahren zur Abdichtung von Bodenkörpern könnte eine Alternative sein, mit dem das Problem der relativ durchlässigen natürlichen Einbindeschicht für die vertikalen Dichtwände umgangen werden könnte.

7.5 Neue Konzepte

In den vorangegangenen Kapiteln wurde sowohl der Stand der Technik zum Thema Abdichtung von Bauwerken aufgezeigt als auch Maßnahmen im Konzept vorgeschlagen, mit denen man die Probleme der Stadt Korschenbroich bezüglich des ansteigenden Wasserspiegels bautechnisch lösen kann. Aufgrund der derzeitigen Informationen ist eine detaillierte Ausarbeitung projektbezogen noch nicht sinnvoll und machbar.

Grundsätzlich allerdings wird unterschieden zwischen Bauwerken, die

- extrem selten mit statisch nicht relevantem Wasserdruck,
- häufiger mit statisch nicht relevantem Wasserdruck,
- mit statisch relevantem Wasserdruck

beaufschlagt werden. Für die ersten beiden Fälle kommen Abdichtungsmaßnahmen in Betracht, die in Abschnitt 7.2 bereits aufgeführt wurden. Je nach Bausubstanz sollte die gewählte Maßnahme jedoch auf das Bauwerk abgestimmt werden. Es wird daher im nächsten Schritt versucht, bestimmte Bauweisen entsprechenden Abdichtungsmaßnahmen zuzuordnen.

Hinsichtlich des letzten Falls gibt es mit Ausnahme des nachträglichen Einbaus einer Weißen Wanne nach dem derzeitigen Stand der Technik keine Methode, die eine Abdichtung des Bauwerks ermöglicht. Lediglich die Herstellung von Wannen mit den beschriebenen Spezialtiefbaulösungen können derzeit herangezogen werden. Es sind allerdings Lösungen denkbar, deren Ausführbarkeit jedoch bislang nicht überprüft wurde. Derzeit wird an einem Entwicklungspaket zur Beantragung an das Forschungsministerium gearbeitet, um gemeinsam mit der Industrie sinnvolle und für die Immobilienbesitzer finanzierbare Konzepte zur individuellen Abdichtung einzelner Objekte bis zur Praxisreife zu entwickeln.

8 FINANZIERUNGSMÖGLICHKEIT MIT DEM B.O.T.-MODELL

Die immer wieder geäußerte Kritik, Instandsetzungsmaßnahmen in Form von nachträglichen Abdichtungen wären bzgl. der Gewährleistung dahingehend ein Problem, daß der Wasserzutritt möglicherweise erst nach Ablauf dieser Gewährleistung auftreten könnte, ist natürlich grundsätzlich berechtigt. Dieses Problem hat aber weniger mit einer nachträg-

lichen Abdichtung zu tun, sondern vielmehr mit der Gewährleistung beispielsweise gemäß VOB. Im Bauwesen ist es durchaus häufiger möglich, daß die tatsächliche Beanspruchung des Bauwerks erst zu einem viel späteren Zeitpunkt nach Ablauf der Gewährleistung auftritt. Mit Ausnahme des verdeckten Mangels (Arglist oder schlechte Organisation) bietet die VOB keine Verlängerung der Gewährleistung. In besonders schwierigen Fällen hat sich daher die vor Beauftragung festgelegte Verlängerung der Gewährleistungsfrist bewährt.

Im vorliegenden Fall der Stadt Korschenbroich kommen nun mehrere unabhängige Problemkreise zusammen.

- Die betroffenen Immobilienbesitzer sind aufgrund der derzeit ungeklärten rechtlichen Situation nur bedingt bereit, größere Investitionen zur Abdichtung selbst aufzubringen.

- Aufgrund des derzeitigen Wertverlustes der Immobilie müßte bei einer Eigenfinanzierung durch den Immobilienbesitzer eine entsprechende Finanzierungsmöglichkeit von externer Seite geschaffen werden.

- Nicht in allen Stadtbereichen besteht akuter Handlungsbedarf. Es kann noch Jahre bis Jahrzehnte dauern, bis der Wasseranstieg diverse Gebäude gefährdet. Damit besteht insbesondere bei den vorgeschlagenen Instandsetzungsmaßnahmen das Problem der Gewährleistungsfrist. Gerade bei Maßnahmen des Spezialtiefbaus ist trotz sorgfältiger Arbeit nicht auszuschließen, daß die Abdichtung von Beginn an in dem gewollten Umfang nicht funktioniert. Damit läge das Risiko beim Investor, der die Arbeiten aber nicht selbst ausgeführt hat.

Eine grundsätzliche Möglichkeit zur Lösung des Problems besteht in der Anwendung neuer Finanzierungsmodelle, wie z. B. dem BOT-Modell (Build–Operate–Transfer). Das ausführende Unternehmen für die Abdichtungsarbeiten tritt dabei nicht nur als Baufirma, sondern auch als Betreiber über einen vorher festgelegten Zeitraum auf. Nach Ablauf des Zeitraums wird die ausgeführte Leistung mit dem entsprechenden Restwert verkauft. In der Vergangenheit wurden diverse Projekte sowohl des Wohnungsbaus wie auch von Infrastrukturmaßnahmen erfolgreich abgewickelt. Im vorliegenden Fall würde die Finanzierung wie folgt aussehen:

- Das Unternehmen wird für die gesamte Abdichtungsmaßnahme im Bereich der Stadt Korschenbroich beauftragt und führt diese gemäß den Vorgaben der Vorschriften einschließlich der Infrastruktur für mögliche Wasserhaltungsmaßnahmen durch.

- Betrieb, Wartung und Instandhaltung der Abdichtungsmaßnahme und der Wasserhaltung finanziert das Unternehmen über beispielsweise einen Zeitraum von 20 Jahren. Eine mögliche Finanzierung könnte z. B. über monatliche Gebühren erfolgen.

- Nach Ablauf dieses Zeitraums übergibt das Unternehmen die gesamte Maßnahme entweder an die Stadt Korschenbroich oder gegebenenfalls auch eine von den Immobilienbesitzern getragene Gesellschaft.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, daß die gesamten Investitionskosten von dem Unternehmen getragen und finanziert werden, und damit die Beteiligten den Gesamtbetrag nicht auf einmal aufbringen müssen.

9 LITERATUR

/Alf1/ Alfes, Ch.: Bauen mit der Elementwand im drückenden Wasser. In: Beton 52 (2002), Nr. 1, S. 22-27

/Arb2/ Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.; Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.; Bundesverband Porenbetonindustrie e.V; Deutsche Bauchemie e.V.; Deutscher Holz- und Bautenschutzverband e.V.: Richtlinie für die Planung und Ausführung erdberührter Bauteile mit flexiblen Dichtungsschlämmen. (01.99) Frankfurt : Deutsche Bauchemie, 1999

/Arb3/ Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.; Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.; Bundesverband Porenbetonindustrie e.V; Deutsche Bauchemie e.V.; Deutscher Holz- und Bautenschutzverband e.V.; Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e.V.; Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V.; Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks e.V. : Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen -erdberührte Bauteile- (Ausg 11/2001)

/Ase4/ Asendorf, K.: Richtig abdichten im Tiefbau mit Polymerwerkstoffen und durch Baugrundvergelungen. Frankfurt : ibh.- In: Bauchemie Themen (1997), Nr. 3, S. 13-15

/Ase5/ Asendorf, K.: Die nachträgliche Abdichtung von Bauwerken durch Injektion von Acrylatgelen in den Baugrund: Erfahrungen - Chancen - Risiken. Düsseldorf : Verlag Bau und Technik, 1999. - In: Betonbau in Forschung und Praxis : Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. György Ivanyi, S. 419-425

/Bed6/ Beddoe, R. ; Springenschmid, R.: Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Nr. 4, S. 158-166

/Bor7/ Borchert, K.-M.: Dichtigkeit von Baugruben bei unterschiedlichen Sohlenkonstruktionen – Lehren aus Schadensfällen. Düsseldorf : VDI, 1999. - In VDI-Berichte 1436: Tiefe Baugruben : Neue Erkenntnisse und Erfahrungen bei ungewöhnlichen Baumaßnahmen, Tagung Berlin, 17. und 18. März 1999

/Bre8/ Breitbach, M.: Planung und Ausführung der Bauwerksabdichtung im erdberührten Bereich - Bauschäden erkennen, beseitigen, vorbeugen. Darmstadt : Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V., 1999. - In: IBK Bau-Fachtagung in Berlin (1999), Nr. 245, Bauwerksabdichtung und Feuchteschutz aktuell, S. 4/1-4/19

/Bre9/ Breitenbücher, R. ; Kern, R.: Weiße Wanne - Praktikable Bauweise im Grundwasser. Düsseldorf : Verlag Bau und Technik, 1999. - In: Betonbau in Forschung und Praxis : Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. György Ivanyi, S. 171-175

/Bra10/ Braun, E. ; Hilmer, K.: Abdichtungen mit Bitumen gegen zeitweise aufstauendes Sickerwasser (DIN 18 195-6 Ausgabe August 2000) dargestellt am Beispiel eines Pilotprojektes. In: Mauerwerk 4 (2000), Nr. 5, S. 185-193

/Bun11/ Bundesminister für Verkehr ; Deutsche Bundesbahn ; ZTV-K 96: ZTV-K 96 - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten. Dortmund : Verkehrsblatt, 1996

/Bun12/ Bundesminister für Verkehr ; ZTV-Riss 93: ZTV-Riss 93 - Zusätzliche technische Vertragsbedindungen und Richtlinien für das Füllen von Rissen in Betonteilen. (Mit TL FG-EP TPFG-EP Ausgabe 1993 ; TL FG-PUR TP FG-PUR Ausgabe 1993). Dortmund : Verkehrsblatt 1993

/Bun13/ Bundesrepublik Deutschland ; Deutsches Patentamt ; Offenlegungsschrift: Bezeichnung : Verfahren zur nachträglichen horizontalen und vertikalen Abdichtung von Bauwerken gegen drückendes Wasser. (Erfinder: Axt, Alexander, Cottbus. München : Deutsches Patentamt, 2001. – Offenlegungsschrift: DE 100 30 595 A 1, Aktenzeichen: 100 30 595.4 ; Anmeldetag: 21.6.2000 Offenlegungstag: 3.1.2002 ; Anmelder: Axt, Alexander, Cottbus

/Bun14/ Bundesrepublik Deutschland ; Deutsches Patentamt ; Offenlegungsschrift: Bezeichnung: Verfahren und Vorrichtung zur Trockenlegung von durchfeuchteten Wänden und erdberührten Bauteilen. Berlin : Deutsches Patentamt, 1996.- Offenlegungsschrift: DE 195 04 489 A 1 ; Aktenzeichen: 195 04 489.4 ; Anmeldetag: 10.02.95 ; Offenlegungstag: 22.08.96 ; Anmelder: FlowTex Technologie-Import von Kabelverlegemaschinen GmbH, 76275 Ettlingen (Erfinder: Bayer, Hans-Joachim ; Ziegeldorf, Siegried)

/Bun15/ Bundesrepublik Deutschland ; Deutsches Patentamt ; Offenlegungsschrift: Bezeichnung : Dichtwand. (Erfinder: Horn, Wolfgang, Duisburg; Hauke, Dirk, Heiden. München : Deutsches Patentamt, 2001. - Offenlegungsschrift DE 199 53 264 A 1, Aktenzeichen: 199 53 264 .8 ; Anmeldetag: 5.11.1999 ; Offenlegungstag: 7.6.2001 ; Anmelder: Bilfinger + Berger, Mannheim

/Bun16/ Bundesrepublik Deutschland ; Deutsches Patentamt ; Offenlegungsschrift: Bezeichnung : Verfahren zur Herstellung einer wassersperrenden Sohle im Erdreich. München : Deutsches Patentamt, 2001. - Offenlegungsschrift: DE 199 44 821 A 1, Aktenzeichen: 199 44 821.3 ; Anmeldetag: 18.9.1999 Offenlegungstag: 22.3.2001 ; Anmelder: Franki Grundbau GmbH, Neuss

/Bun17/ Bundesrepublik Deutschland ; Deutsches Patentamt ; Offenlegungsschrift: Bezeichnung : Kombination aus HDI-Verfahren und Bodenvereisung zur Herstellung von Dichtwänden. (Erfinder : Gläser, E., Aichwald, Roth., Leinenfeld-Echterdingen.) München : Deutsches Patentamt, 2001. – Offenlegungsschrift DE 199 53 819 A 1, Aktenzeichen: 199 53 819.0 ; Anmeldetag: 9.11.1999 ; Offenlegungstag: 10.05.2001 ; Anmelder: Ed. Züblin AG, Stuttgart

/Bun18/ Bundesrepublik Deutschland ; Deutsches Patentamt ; Patentschrift: Bezeichnung : Verfahren zur Abdichtung von Bodenkörpern und Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens. (Erfinder: Kleiser, Klaus, et al) München : Deutsches Patentamt, 1999. - Patentschrift: DE 43 35 290 C 2, Aktenzeichen: P 43 35 290.1-42 ; Anmeldetag: 15.10.1993 ; Offenlegungstag: 6.4.1995 ; Patenterteilung: 11.3.1999; Anmelder: FlowTex, Ettlingen

/Bun19/ Bundesrepublik Deutschland ; Deutsches Patentamt ; Patentschrift: Bezeichnung : Verfahren zur Herstellung einer äußeren Vertikalsperre an Bauwerken. (Erfinder : Rindfleisch, H.-J.). München : Deutsches Patentamt, 2001. – Patentschrift DE 199 44 626 C 1 Aktenzeichen : 199 44 629.6-25 ; Anmeldetag: 17.09.99 ; Patent am 17.05.01 ; Anmelder: Groundworker-Verwertungs- und Verwaltungs GmbH, Berlin

/Czi20/ Cziesielski, E. ; Ruhnau, R.: Tiefkeller im Grundwasser : Nachträgliche wasserdruckhaltende innenliegende Wanne aus wasserundurchlässigem Beton.

Stuttgart : Forum-Verlag, 1986. - In: Bauschäden Sammlung : Sachverhalt-Ursachen-Sanierung. Band 6, S. 138-141

/Czi21/ Cziesielski, E.: Feuchtetransport durch Bauteile aus WU-Beton und konstruktive Folgerungen. Berlin : Technische Universität Berlin. - In: Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau (1993), Nr. 16, S. 121-156

/Deu22/ Deutsche Bundesbahn; Technisches Regelwerk: Vorschrift für die Abdichtung von Ingenieurbauwerken (AIB). DS 835 Ausg. 06.90. Frankfurt : Zentrale Hauptverwaltung der Deutschen Bundesbahn, 1990

/Deu23/ Deutsche Bahn ; DB 835.9201: Abdichtung Ingenieurbauwerke : Hinweise für die Planung und Durchführung von Vergelungsmaßnahmen bei der DB AG. München : DB Netz AG Zentrale, 1999

/Deu24/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: DafStb-Richtlinie Wasserundurchlässiger Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie), Entwurf Februar 2002

/Deu25/ Deutscher Beton-Verein ; DBV ; DBV Merkblattsammlung: Merkblatt Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton (Fassung Juni 1996). Wiesbaden : Deutscher Beton-Verein, 1997. - In: Merkblattsammlung Merkblätter, Sachstandberichte

/DIB26/ DIBt; Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik; Prüfgrundsätze; PG-KMB: Anmerkungen zu den Prüfgrundsätzen für die Erteilung von allgemeines bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen für die normalentflammbare, kunststoffmodizierte Bitumendickbeschichtungen für Bauwerksabdichtungen. In: Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik 32 (2001), Nr. 5, S. 162

/DIN27/ DIN 1045 07.88. Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung

/DIN28/ DIN 1045-2 07.01. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton-Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (07/2001)

/DIN29/ DIN 1048-5 06.91. Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper

/DIN30/ DIN 1053: Mauerwerk
Teil 1 11.96. Berechnung und Ausführung
Teil 2 11.96. Mauerwerksfestigkeitsklassen aufgrund von Eignungsprüfungen
Teil 3 02.90. Mauerwerk; Bewehrtes Mauerwerk; Berechnung und Ausführung
Teil 4 09.78. Mauerwerk; Bauten aus Ziegelfertigbauteilen

/DIN31/ DIN 1054 11.76. Baugrund; Zulässige Belastung des Baugrundes

/DIN32/ DIN 4014 03.90. Bohrpfähle; Herstellung, Bemessung und Tragverhalten; März 1990

/DIN33/ DIN 4093 09.87. Baugrund; Einpressen in den Untergrund; Planung, Ausführung und Prüfung

/DIN34/ DIN 4095 06.90. Dränung zum Schutz baulicher Anlagen; Planung, Bemessung, Ausführung

/DIN35/ DIN 18 130-1 05.98. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts; Teil 1: Laborversuche

/DIN36/ DIN 18 195: Bauwerksabdichtung
Teil 1 08.00. Grundsätze, Definitionen; Zuordnung der Abdichtung
Teil 2 08.00. Stoffe
Teil 3 08.00. Anforderungen an den Untergrund und Verarbeitung der Stoffe
Teil 4 08.00. Abdichtung gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung
Teil 5 08.00. Abdichtung gegen nichtdrückendes Wasser auf Deckenflächen und in Naßräumen, Bemessung und Ausführung
Teil 6 08.00. Abdichtung gegen von außen drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser, Bemessung und Ausführung
Teil 7 06.89. Abdichtung gegen von innen drückendes Wasser, Bemessung und Ausführung
Teil 8 08.83. Abdichtungen über Bewegungsfugen
Teil 9 12.86. Durchdringungen, Übergänge, Abschlüsse
Teil 10 08.83. Schutzschichten und Schutzmaßnahmen

/DIN37/ DIN 18 331 12.00. VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen, Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Beton und Stahlbetonarbeiten

/DIN38/ DIN 18 550: Putz
Teil 1 01.85. Begriffe und Anforderungen
Teil 2 01.85. Putze aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Ausführung
Teil 3 03.91. Wärmedämmputzsysteme aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln und expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlag
Teil 4 08.93. Leichtputze; Ausführung

/DIN39/ DIN 52 617 05.87. Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen

/DIN40/ DIN EN 206-1 07.01. Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

/DIN41/ DIN EN 1536 06.99. Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Bohrpfähle, Ausgabe: 1999-06

/DIN42/ DIN EN 12 063 05.99. Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Spundwandkonstruktionen, Ausgabe: 1999-05

/DIN43/ DIN EN 12 390-8 02.01. Prüfung von Festbeton – Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck

/Dül44/ Düllmann, H. ; Krings, S.: Grundwasserproblematik im Stadtgebiet Korschenbroich – Konzeptvorschläge für langfristige Lösungen zur Abwendung von Gebäudeschäden. Aachen : Geotechnisches Büro, 2001. – Gutachten Nr. 00.157

/Ebe45/ Ebeling, K.: Bauen mit Ortbeton im drückenden Grundwasser. In: Beton 51 (2001), Nr. 12, S. 662-664, S. 666-667

/Fix46/ Fix, W. ; Hesselle de M. ; Düttmann, M.: Bauwerksabdichtung mit Gelschleiern. In: Bautenschutz Bausanierung 17 (1994), Nr. 1, S. 45-47

/Fix47/ Fix, W. ; Fiedrich, A.: Betoninstandsetzung : Problemlöser: Injektionstechnik. In: Baugewerbe 77 (1997), Nr. 21, S. 22-24, S. 26-28

/Gei48/ Geil, M.: Entwicklung und Eigenschaften von Dichtwandmassen und deren Überwachung in der Praxis. Quelle unbekannt

/Gra49/ Graeve, H. ; Riecks, B.: Abdichtende Injektionen mit neuen Werkstoffen. Darmstadt : Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V., 1996. - In: IBK-Bau-Fachtagung (1996), Nr. 208, Betonschutz und -instandsetzung Rißsanierung. Neue DAfStb-Richtlinie und Vereinbarungen, Lösungskonzepte, S. 13/1-13/8

/Gra50/ Graeve, H.: Abdichtende Injektionen. Düsseldorf : Verlag Bau und Technik, 1999. - In: Betonbau in Forschung und Praxis : Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. György Ivanyi, S. 407-411

/Gun51/ Gunia, K.: Bitumenabdichtung: Bauprodukt oder Bauart? Tabelle 4.9 DIN 18 195-2 und Anforderungen der LBO. In: Sachverständige 27 (2000), Nr. 1/2, S. 10-16

/Hei52/ Heiden, P.: Injektionsverfahren : Doppelt dicht - gegen Radon und Wasser. In: Bautenschutz und Bausanierung 20 (1997), Nr. 1, S. 22-25

/Hei53/ Heising, W.: Schwarz und Weiß gesellt sich gern : Bitumendickbeschichtungen erweisen sich bei Weißen Wannen als sinnvolle Ergänzung. In: Baugewerbe 81 (2000), Nr. 6, S. 16-18, S. 21-26

/Hes54/ Hesselle de, J.: Erfahrungen über Bauwerksabdichtung mittels Acrylat-Vergelung. Darmstadt : Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V., 1999. - In: IBK Bau-Fachtagung in Berlin (1999), Nr. 245, Bauwerksabdichtung und Feuchteschutz aktuell, S. 6/1-6/4

/Hin55/ Hinrichs, B.: Druckluft statt Bagger : Erdschlitztechnik. In: Baugewerbe 81 (2000), Nr. 15-16, S. 18, S. 21-23

/Hor56/ Hornig, U. ; Rudolph, M.: Schleierhaft? Erste gesicherte Erkenntnis zur nachträglichen Abdichtung mit Acrylat-Gel-Injektion. In: Bautenschutz Bausanierung 23 (2000), Nr. 3, S. 38-43

/Ind57/ Industrieverband Bauchemie und Holzschutzmittel ; ibh ; Deutsche Bauchemie: Merkblatt Bauwerksabdichtungen mit zementgebundenen starren und flexiblen Dichtungsschlämmen. (03.92) Frankfurt : Industrieverband Bauchemie und Holzschutzmittel e.V., 1992

/Int58/ Internetquelle: http://www.bauer.de/ (08.05.2002)

/Int59/ Internetquelle: http://www.bentonit.de/ (08.05.2002)

/Int60/ Internetquelle: http://www.igs-muenchen.de/ (08.05.2002)

/Int61/ Internetquelle: http://www.kmb-ausbildung.de/ (08.05.2002)

/Int62/ Internetquelle: http://www.mobatec.de (29.07.02)

/Int63/ Internetquelle: http://teuchert-dichte-bauwerke.de/Produkte/Flachenabdichtung/Braune_Wanne/braune_wanne.html (08.05.2002)

/Kab64/ Kabrede, H.-A.: Abdichtung : Nachträgliche Maßnahmen für innen und außen. In: Bautenschutz und Bausanierung 20 (1997), Nr. 3, S. 17-18, S. 20-21

/Kab65/ Kabrede, H.-A. ; Baupraxis und Dokumentation: Injizieren, Verpressen und Verfüllen von Beton und Mauerwerk. Der Praktiker- Leitfaden bei abdichtenden, elastischen und kraftschlüssigen Injektionen. Renningen-Malmsheim : expert. - In: Baupraxis und Dokumentation (1998), Nr. 13

/Kam66/ Kamphausen, P.-A.: Bitumendickbeschichtungen zwischen Dichtung und Wahrheit, Behauptung und Beweis. In: Sachverständige 26 (1999), Nr. 1/2, S. 9-15

/Kam67/ Kamphausen, P.-A.: "Stand der Technik" oder "anerkannte Regeln der Technik"? Beispielsfall: Bauwerksabdichtungen nach der neuen DIN 18 195. Stuttgart : IRB. - In: Bauschäden Sammlung : Sachverhalt - Ursachen - Sanierung (2001), Nr. 13, S. 8-13

/Kar68/ Karl, W.: Dauerhafte Abdichtung von Bauwerken mit Hilfe der Vergelungstechnologie. Frankfurt : Deutsche Bauchemie, 2001. - In: 1. Bauchemie Fachtage Leipzig, 26. Oktober 2001, 5 Seiten

/Kle69/ Kleist, F.: Die Systemdurchlässigkeit von Schmalwänden, 1999. Internetquelle: http://www.wb.bv.tum.de/ : (08.05.2002)

/Klo70/ Klopfer, H.: Bauwerksabdichtung mit Flüssigkunststoffen. Darmstadt : Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V., 1999. - In: IBK Bau-Fachtagung in Berlin (1999), Nr. 245, Bauwerksabdichtung und Feuchteschutz aktuell, S. 2/1-2/5

/Koh71/ Kohls, A.: Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen von Dickbeschichtungen. In: Arconis 4 (1999), Nr. 3, S. 18-21

/Kop72/ Kopf, I.: Bauwerksabdichtung mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen. Internetquelle: http://www.deutsche-bauchemie.de/6publika/502/502_04.htm (08.05.2002)

/Kut73/ Kutzner, Ch.: Injektionen im Baugrund. Stuttgart : Enke, 1991

/Lam74/ Lamers, R.: "Elektronische Wundermittel" und andere Exotika zur Beseitigung von Mauerfeuchte. Braunschweig : Vieweg, 2001. - In: Aachener Bausachverständigentage, Nachbessern Instandsetzen Modernisieren : Probleme im Baubestand. Rechtsfragen für den Baupraktiker (Oswald, R. (Ed.)), S. 111-116

/Loh75/ Lohmeyer, G.: Weiße Wanne, einfach und sicher: Konstruktion und Ausführung von Kellern und Becken aus Beton ohne besondere Dichtungsschicht. 5., neu bearb. und erw. Aufl. - Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2000

/Lub76/ Lubinski, F.: Mechanische Feuchtigkeitssperre horizontal und vertikal. In: Bautenschutz und Bausanierung 19 (1996), Nr. 4, S. 42-43

/Ohl77/ Ohlenbusch, R.: Numerische Modellrechnungen zur Ausbreitung von Inhaltsstoffen aus Weichgelinjektionssohlen. Karlsruhe, Technische Universität, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, Diss., 2000

/Ple78/ Pleyers, E.: Sanierung von durchfeuchteten Bauteilen. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 2, Diplomarbeit, 1994

/Pul79/ Pulsfort, M. ; Walz, B.: Skript zur Vorlesung Grundbau 1, Teil A. Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal - Lehr- und Forschungsgebiet Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik (2000)

/Pul80/ Pulsfort, M. ; Walz, B.: Skript zur Vorlesung Grundbau 2. Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal - Lehr- und Forschungsgebiet Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik (2002)

/Pul81/ Pulsfort, M. ; Walz, B.: Skript zur Vorlesung Spezialgrundbau, Teil A – Schlitzwandbauweise. Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal - Lehr- und Forschungsgebiet Unterirdisches Bauen, Grundbau und Bodenmechanik (2000)

/Rec82/ Rechsteiner, A. ; Wolfseher, R.: Das Sägeschnittverfahren als Horizontalabdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit - Sanierungsbeispiel Schulhaus Heinrich Bosshard. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 4 (1998), Nr. 1, S. 3-20

/Rud83/ Rudolph, M. ; Hornig, U.: Experimentelle Untersuchungen zur Ausbreitung des Gelschleiers im Baugrund. Leipzig : Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Leipzig. - In: Leipzig Annual Civil Engineering Report (1999), Nr. 4, S. 481-494

/Ruh84/ Ruhnau, R.: Abdichtung von Neubauten mit Bentonit. In: Arconis 4 (1999), Nr. 4, S. 46-48

/Sän85/ Sänger, C.: Neuere Entwicklungen für horizontale Baugrubenabdichtungen mit rückverankerter Düsenstrahlsohle. Düsseldorf : VDI, 1999. - In: VDI Berichte 1436: Tiefe Baugruben: Neue Erkenntnisse und Erfahrungen bei ungewöhnlichen Baumaßnahmen, Tagung Berlin, 17. und 18. März 1999, S. 147-157

/Sas86/ Sasse, H.R. ; Pleyers, G.: Reduzierung von Mauerwerksfeuchte – Untersuchung und Entwicklung chemischer Bohrlochinjektionsverfahren als wirksame Horizontalsperre für den nachträglichen Einbau in Ziegelmauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 1997. - Forschungsbericht Nr. F 496

/Sch87/ Scherpke, G. ; Schneider, U.: Elektroosmose – Ein Vergleich theoretischer Ergebnisse mit experimentellen Resultaten. Berlin : BAM, MFPA, DGZfP, 1999. In: Feuchtetag ´99: Umwelt, Meßverfahren, Anwendungen. Berlin, 7./8. Oktober 1999

/Sch88/ Schmidt, H.G. ; Seitz, J.: Grundbau – Sonderdruck aus dem Beton-Kalender 1998. Berlin : Ernst & Sohn, 1998

/Sch89/ Schubert, A. et al.: Vorläufiges Merkblatt für Einpreßarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein. In Bautechnik 70 (1993), Nr. 9, S. 550-560

/Sch90/ Schulze, B. ; Kuehling, G. ; Tax, M.: Neue Zusatzmittel für feststoffreiche Feinstzement-Suspensionen. In: Bauingenieure 67 (1992), Nr. 11, S. 499-504

/Ste91/ Steege, E.-H.: Weiße Wanne - Nachträglich mit SIFCON realisiert. In: VDB Information (2001), Nr. 87, S. 5

/Sto92/ Stocker, M.: Zum Stand der Technik der Hochdruckinjektion unter besonderer Berücksichtigung der Berliner Erfahrungen. Düsseldorf : VDI, 1999. - In: VDI-Berichte 1436: Tiefe Baugruben : Neue Erkenntnisse und Erfahrungen bei ungewöhnlichen Baumaßnahmen, Tagung Berlin, 17. und 18. März 1999, S. 187-203

/Web93/ Weber, H.: Neueste Forschungsergebnisse zum feuchte- und salzbelasteten Mauerwerk. In: Bausanierung 6 (1995), Nr. 6, S. 55-59

/Web94/ Weber, H.: Nachträgliche Horizontalabdichtung - Stand der Technik. Neustadt/Weinstraße : Forum Bauwerkserhaltung e.V., FBE, 1999. - In: Fachkongress Forum Bauwerksabdichtung, 5. und 6. Mai 1999 in Fulda, 28 Seiten

/Web95/ Weber, H.: Richtlinien und Normen : Abdichtung von Gebäuden, Teil 1. In: Bausubstanz 16 (2000), Nr. 4, S. 23-27

/Web96/ Weber, H.: Injektionsverfahren gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit, Teil 5 (letzter Teil der Serie). In: Bausubstanz 16 (2000), Nr. 9, S. 48-53

/Web97/ Weber, J.: Stand der Technik?! Elektroosmotische Trockenlegungsverfahren – eine ingenieurmäßige Betrachtung. In: Bautenschutz und Bausanierung 24 (2001), Nr. 3, S. 30-31

/Wit98/ Wittmann, F.H.: Über unwirksame Verfahren gegen aufsteigende Feuchtigkeit. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1 (1995), Nr. 4, S. 329-335

/Wol99/ Wolf, H.-D.: Ende offen : Unverändert zeitgemäß: Bauwerksabdichtung mit Dichtungsschlämmen. In: Bautenschutz und Bausanierung 24 (2001), Nr. 8, S. 36-40

/WTA100/ WTA: WTA-Merkblatt 4-4-96. Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit. Baierbrunn : Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

/WTA101/ WTA: WTA-Merkblatt 4-6-98/D. Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile. Zürich : Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

/WTA102/ WTA: Merkblatt 2-2-91. Sanierputzsysteme

/Zie103/ Ziegeldorf, S. ; Bayer, H. ; Kleiser, K.: Die nachträgliche Kellerabdichtung - Stand der Technik und Ausblick. Berlin : BAM, MFPA, DGZfP, 1995. - In: Feuchtigkeit in Mauerwerk : Feuchtetag'95 : Messen - Berechnen – Trockenlegen. Berlin, 29. September 1995. Vorträge und Plakatberichte, S. 112-122

/Zöl104/ Zöller, R. ; Heil, H.: Ausführungsrisiken tiefliegender und hochliegender HDI-Sohlen. In: Vorträge zum 7. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Tagungsband, Darmstadt 2000