

Industrielle Fertigung von Stampflehm

In den USA hat Stampflehm in den letzten Jahren vor allem durch eine wachsende Aufmerksamkeit für nachhaltiges und ökologisches Bauen einen außergewöhnlichen Schub erfahren. Die Vorteile einer Wandkonstruktion, welche dafür geeignet ist aus lokalen, unbehandelten Baustoffen ein thermisch funktionierendes Wandbausystem zu erschaffen ist unübersehbar: Geringe Transportkosten, Energieeinsparung, reduzierter CO₂ Eintrag, das Fehlen toxischer Chemikalien, aufwandarm und dauerhaft. Ein Nachteil ist nur, dass Stampflehm traditionell sehr arbeitsintensiv ist. Wenn die Stundensätze hoch sind, kann das Endprodukt teurer sein als andere Wandsysteme, die aus vorgefertigten Komponenten bestehen. Dies schreckt vor der Nutzung der „freien“ Erde ab. Die üblicherweise angewendeten Bauweisen wie Fachwerk und Betonbau sind entwickelt worden, um die Baukosten zu reduzieren, wobei diese allerdings die Kosten für Vorfertigung und Transport erhöhen.

Es kann gut sein, dass in der Zukunft, wenn Öl und Transportkosten stetig weiter steigen, ein System, welches Vor-Ort Material wie Rohlehm verwendet, attraktiver und kostengünstiger wird. Die Herausforderung den CO₂-Eintrag zu reduzieren besteht in der Möglichkeit einer Verbindung mit modernen Techniken, welche den Arbeitsaufwand senken. Durch die Neuentwicklung der Konstruktionswerkzeuge und -methoden kann der Stampflehmprozess merklich beschleunigt und somit die Bauzeit und der Arbeitsaufwand verringert werden. Die Verringerung der Bauzeit hat nicht nur Auswirkungen auf die Baukosten des Wandsystems, sondern hat auch höhere Gewinnanteile der Baufirma und geringere Ausgaben der Bauherren zur Folge. Außerdem kann Stampflehm durch die Nutzung verbesserter Konstruktionswerkzeuge mittlerweile Qualitätsstandards erreichen, welche für Ingenieure und Bauämter lange Zeit problematisch waren.

Grundsätzlich gibt es vier Schwerpunktfelder zum Erreichen der Reduzierung der Baustellenkosten um 50% und mehr: Schalung, Mischung, Transport und Einbringung oder Verdichtung.

Schalung

Die originale kalifornische Form, in der Mitte der 1970er Jahre entwickelt, besteht aus einer ganzen Holzschalung mit breiten Brettern für die Aussteifung und starken Bolzen oder Rohrklammern, um die Bretter und die Enden zu stützen. Die Vorteile die-

ser Form sind geringe Investitionskosten, kurze Aufbauzeiten, das Fehlen von Spannankern die das Stampfen behindern würden und ein eingebautes Gerüst. Das aus dieser einzelnen Form entstehende Wandsystem bestand aus einer Reihe an den Seiten miteinander verbundenen vertikaler Blöcke, mit einem Ringbalken aus Holz oder Beton als oberer Abschluss.

Mit steigender Popularität wurde der Stampflehm auch bei Baubehörden mit größerer Aufmerksamkeit betrachtet, die nun begannen durchgehende horizontale Bewehrung in den Wänden vorzuschreiben. Dies erforderte die gleichzeitige Fertigung viel größerer Wandabschnitte. Das dabei entstehende Formsysteem arbeitete weiter mit den breiten Brettern als Aussteifung und Gerüst und wurde gleichfalls Stück für Stück aufgesetzt. Der Vorteil war, dass die Wände schneller errichtet, der Betonringbalken in dieselbe Form direkt auf die Lehmwände gegossen werden konnte und dem Architekten ein größerer Gestaltungsspielraum eingeräumt wurde. Der Nachteil war, dass die Baufirma größere Anfangsinvestitionen in Schalungselemente tätigen musste, welche zwischen den Bauprojekten transportiert und andernorts gelagert werden mussten.

Der nächste Schritt im Entwicklungsprozess war, den Aufwand zum Auf- und Abbau der Schalung für jeden einzelnen Wandabschnitt zu reduzieren. Die Lösung bestand darin große Schalungsabschnitte vorzufertigen, anstelle der stückweisen Errichtung an der Wand. Diese Wandabschnitte wurden dann mit Hilfe eines kleinen transportablen Kranes in Position gebracht. Durch diese Methode konnten geschoßhohe Wandelemente, normalerweise 16 oder 20 Fuß (5 bis 6 Meter) lang, in einem Bruchteil der Zeit, die bei früheren Methoden benötigt wurde, bewegt und umgesetzt werden. Die Kosten für die Kranmiete wurden durch die Einsparung von Arbeitsaufwand mehr als ausgeglichen.

Mischung

Traditionell wurden Stampflehmwände nur aus dem vor Ort vorhandenen Boden gebaut. Diese Abhängigkeit von lokalen Böden begrenzte die geografischen Gebiete, in denen diese Baumethode erfolgreich angewendet werden konnte. Einer der Gründe, die dazu führten, dass Stampflehm in den letzten Jahrzehnten weitere Verbreitung fand, ist die heutige Möglichkeit große Materialmengen auf eine Baustelle zu liefern. Dieses an-

David Easton

Rammed Earth Works, Napa CA, USA

The industrialisation of monolithic earth walling for First World applications

In the United States, rammed earth construction has experienced an extraordinary surge in popularity within the last few years, due in large part to the growing commitment towards sustainable and green building practices. The advantages of a wall system that is designed to convert local, unprocessed aggregates into thermally responsive structural walls are undeniable: low transportation costs, energy conservation, reduced carbon footprint, absence of toxic chemicals, affordability and durability. The disadvantage is that the rammed earth method has traditionally been extremely labor intensive. When hourly wages are high the cost of the finished product can be more expensive than other wall systems that rely on manufactured components; this despite the use of “free” earth. The more commonly used construction systems, such as wood framing and concrete block, have been designed to reduce on-site labor costs, thereby offsetting the costs of processing and delivery.

It is likely that in the future, as fuel and transportation costs continue to rise, a system that utilizes on-site material such as raw earth will become more attractive and more price-competitive. The challenge is to couple this opportunity for a reduced carbon footprint with improved technologies that can decrease the labor component. By re-designing the construction tools and methods, the rammed earth process can be significantly speeded up, thereby reducing on-site time and labor. A reduction in labor hours not only affects the total cost of the wall system, but also affords the contractor higher profit margins and the owner lower financing expenses. Finally, by utilizing more sophisticated construction equipment than in previous eras, rammed earth can address quality control issues that have long plagued engineers and building officials.

There are basically four areas of concentration in the goal of reducing on-site labor by 50% or more: formwork, mixing, delivery, and placement or compaction.

Formwork

The original California form, developed in the mid 1970's, utilized full plywood sheets, wide planks for stiffening, and strong bolts or pipe clamps to support both the planks and the end shutoffs. The advantages of this form were low initial cost, short assembly/disassembly time, absence of form ties for free rammer movement, and built-in scaffolding. The wall system result-

ing from this single form was actually a series of vertical blocks, keyed together at their sides and tied together at their tops with a concrete or wood bond beam.

As rammed earth gained in popularity, it came under closer scrutiny by building inspectors who began to insist on continuous horizontal reinforcing steel in the walls. This necessitated forming much larger sections of wall at one time. The form system that evolved continued to rely on the wide planks as stiffeners and scaffolding, and was still assembled piece by piece. The advantages were that walls could be built faster, the concrete bond beam could be poured into the same form, directly on top of the earth walls, and it allowed greater design flexibility for the architect. The disadvantage was that the contractor needed to make a larger capital investment in forming components that had to be trucked and stored off-site between projects.

The next step in the evolutionary process was to reduce the labor required to assemble and disassemble the formwork for each section of wall. The solution was to construct large sections of formwork on layout tables rather than piece by piece at the wall; then to position each section in place using a small portable crane. With this method, full-height wall sections, typically 16 or 20 feet (5 to 6 metres) in length could be moved and re-set in a fraction of the time spent using previous methods. Crane rental costs were more than offset by labor savings.

Mixing

Traditionally rammed earth walls were constructed solely from soils available on site. This dependence on local soil limited the geographic areas where the method could be used successfully. One of the reasons that rammed earth has become more widely used in recent decades is that it is now feasible to import bulk materials to the job site. These imported materials can be sand, gravel, or clay to be used as amendments to the local soil to increase strength or reduce shrinkage. In some cases it is most economical to import all of the material instead of using the local soil, depending on costs and hauling distances.

Combining ingredients, including water and stabilizer, requires that the soil mixture be proportioned and blended. The simplest tools for this use are shovels, buckets, and bags. The disadvantage is that this set of tools also demands the greatest number



gelieferte Material kann Sand, Kies oder Lehm sein, als Beimischungen zu den lokalen Erden verwendet, um die Festigkeit zu erhöhen oder das Schwinden zu reduzieren. In einigen Fällen ist es am wirtschaftlichsten, alle Baustoffe zu liefern, statt nur lokal verfügbare Erden zu verwenden. Dies hängt von den Kosten und Lieferentfernungen ab.

Beimischungsanteile wie Wasser und Stabilisatoren erfordern, dass der Lehmbaustoff mit einfachen Werkzeugen und Hilfsmitteln wie Schaufeln, Eimer und Säcke proportioniert und gemischt wird. Von Nachteil ist, dass diese Auswahl von Werkzeugen auch die längste Arbeitszeit dafür in Anspruch nimmt. Eine etwas schnellere Methode ist die Verwendung von Schaufeln für die Proportionierung zusammen mit einem kleinen Garten-Rotor-Mixer für das Mischen. Noch schneller ist ein kleiner Frontlader-Traktor, der beides kann: Abmessen und Mischen, wobei Wasser nach Bedarf durch einen Gartenschlauch zugeführt wird. Das Mischen durch den Frontlader kann noch effizienter und gründlicher mit einem an dessen Rückseite angebrachten Pflug erfolgen.

Die schnellste und geeignetste Ausrüstung ist die transportable Volumen-Mischmaschine, die für die Betonindustrie entwickelt wurde. Dieser Maschinentyp kann exakt zwei verschiedene Zuschläge, wie trockenen Zement, flüssige Zusätze und Wasser proportionieren. Der größte Vorteil dieser Maschine ist, neben dem Durchsatz, die Kontinuität und Konstanz des Endproduktes.

Dies entspricht dem von Seiten der Ingenieure und Bauaufsicht an die Qualitätskontrolle erhobenen grundlegenden Anspruch.

Jede der verschiedenen Mischmöglichkeiten, von der Schaufel und dem Sack bis zum Traktor und der Mischmaschine, bedeutet einen unterschiedlichen Kapitaleinsatz. Die Produktionsrate ist, mehr oder weniger, direkt proportional zu den Gerätekosten. Je komplexer das System ist, desto schneller kann die Mischung aufbereitet werden. Allerdings variieren die Operationskosten für das Gerät pro m³ nicht, sondern nur die Mann-Stunden.

Transport

Ein entscheidender Anteil des Zeitaufwandes beim Bau von Stampflehmwänden fällt auf den Transport der aufbereiteten Mischung vom Mischplatz in die Wandschalung. Die einfachste und kostengünstigste Methode, aber auch die langsamste, ist das Einbringen des Materials von Hand in Eimern, Tragesäcken oder Schubkarren.

Ein Frontlader kann den Transport mit Eimern um das Zehnfache beschleunigen. Der Lehm kann entweder direkt in die Schalung eingebracht werden oder herausgeschaufelt werden, um eine besser kontrolliertes Einbringen zu gewährleisten. Eine Arbeitsebene entlang der Wandoberkante kann die Effizienz erhöhen, da sie dem Frontlader ein schnelleres Hin- und Herfahren zwischen Mischplatz und Wand erlaubt.

- 1 einzelne Form
Single form
- 3 vom Kran zu setzende Form
Crane-set form

- 2 durchgehende Holzform
Continuous wooden form
- 4 Mischen mit Schaufeln
Mixing with shovels



of man-hours to accomplish the task. A slightly faster method utilizes shovels for proportioning and a small garden roto-tiller for blending. Faster still is a small front-loading tractor, which can both proportion and blend, with water added as needed with a garden hose. Tractor mixing can be made more efficient and more thorough with a tiller mounted on the back.

The fastest and most accurate equipment is the portable, volumetric mixing machine developed for the concrete industry. This type of machine can accurately proportion two different aggregates, dry cement, a liquid admixture, and water. The biggest advantage to the volumetric mixer, in addition to production rate, is the consistency and uniformity of the finished product. This directly addresses the primary quality control concern of engineers and inspectors.

Each of the different mixing options, from shovels and buckets to tractors and volumetric mixers, represents a different capital investment. The rate of production is more or less directly proportional to the cost of the equipment. The more complex the system, the faster the mix can be prepared. However, the cost to operate the equipment per cubic yard does not vary, only the man-hours.

Delivery

A significant portion of the time investment in constructing a rammed earth wall is devoted to conveying the prepared soil

mix from the mixing area into the wall form. Although slow, the simplest and least costly method is moving material by hand in buckets, backpacks, or wheelbarrows.

A front-loading tractor can speed up delivery over buckets by a factor of ten. Soil can either be dumped directly into the formwork or shoveled out for more controlled placement. A platform built along the wall top can increase efficiency by allowing the tractor to make quicker round trips from the mix pile to the wall.

Adding a forklift with soil hopper to the equipment package increases the efficiency even further. The forklift can deliver material while the tractor continues mixing. Soil is shoveled off of the hopper into the wall form. Multiple hoppers facilitate continuous delivery. For sites with difficult access, portable cranes and soil "buckets" can be substituted for a forklift.

The most direct and continuous delivery system is a telescoping, articulated conveyor belt, capable of dropping prepared soil directly into the formwork. Conveyor belts allow for continuous delivery and eliminate the shovelers.

Compaction

The overall quality of a rammed earth wall is due in equal parts to the consistency of the mix design and the thoroughness of compaction. Compactive effort, or force, is a combination of the

5 Mischen mit Traktorschaukel
Mixing with tractor bucket

7 Füllen der Schalung mit Blechschalen in Brasilien
Cans filling form in Brazil

6 ein Traktor lädt Erde in die Mischmaschine
Tractor loading soil into mixing machine

8 Schaufeln aus dem Frontlader
Shoveling out of tractor bucket



Die zusätzliche Verwendung eines Gabelstaplers mit Füllbehälter erhöht die Effizienz noch mehr. Der Gabelstapler kann das Material transportieren, während der Traktor weiter mischt. Der Lehm wird aus dem Füllbehälter in die Wandschalung eingeschaufelt.

Mehrere Behälter gewährleisten einen kontinuierlichen Transport. Auf Baustellen mit schwierigem Zugang können transportable Kräne und Erd-„Container“ den Gabelstapler ersetzen.

Das direkteste und kontinuierlichste Transportsystem ist ein Teleskop-Transportband, welches in der Lage ist, die aufbereitete Lehm-Mischung direkt in die Schalung einzubringen. Transportbänder erlauben einen ununterbrochenen Transport und erübrigen den Einsatz von Schaufeln.

Verdichtung

Die Gesamtqualität des Stampflehms ist zu gleichen Teilen auf die Zusammensetzung der Mischung und die Gründlichkeit der Verdichtung zurückzuführen. Verdichtungsaufwand oder Verdichtungskraft sind eine Kombination aus dem Gewicht des Stampfers und der Anzahl der Schläge pro Hub. Auch wenn Handstampfer die maximale Verdichtung erzeugen können, wird Stampflehm heute aufgrund der Arbeitskosten nahezu überall unter Verwendung von Druckluftstampfern produziert. Diese gibt es in einer großen Auswahl verschiedener Gewichte und Stoßgeschwindigkeiten.

Um eine maximale Effizienz beim Wandaufbau zu erreichen, sollte die Zahl der Stampfer anhand der Geschwindigkeit des Transportsystems gewählt werden.

Zusammenfassung der Möglichkeiten der Ausstattung der Stampflehmausrüstung

Grundsätzlich bestimmen zwei Faktoren die Entscheidung darüber, welche Ausrüstung für den Stampflehmbau gewählt wird: Der Stundenlohn und der Bauablaufplan. Es hat sich gezeigt, dass der Wandaufbau direkt proportional zum Kapitalinvestment für die Ausrüstung (oder die Mietkosten) ist. Wenn die Stundenlöhne niedrig sind, ist es ökonomischer den Kapitaleinsatz für das Equipment zu minimieren und langsamer zu arbeiten. Mit jeder Stufe der Erhöhung der Lohnkosten kann ein zusätzliches Ausrüstungsgerät ergänzt werden, um die totalen Mann-Stunden zu reduzieren. Das Ziel ist das Erreichen einer optimalen Balance zwischen Ausrüstungskosten und Arbeitskosten.

Der zweite Faktor, der die Entscheidung wieviel Ausrüstungsgerät eingesetzt werden soll beeinflusst, ist der Arbeitsablauf. Wie dargestellt wurde, erhöht sich die Rate des Wandaufbaus mit der Verfeinerung der Mittel und Methoden. Mit anderen Worten: die Gesamtarbeitszeit verringert sich, wenn die Komplexität des Systems sich erhöht. Es gibt drei finanzielle Vorteile das Projekt in kürzerer Zeit durchzuführen: Verringerung der Baukosten-Darlehenszinsen für den Bauherren, Verringerung der Reise- und Tageskosten für die Bauleute und mit der Verkürzung

left top and bottom Das Schaufeln aus dem Behälter eines Gabelstaplers
Shoveling off of forklift hoppers



weight of the ramming tool and the total number of blows on any given lift. Although hand rammers can achieve maximum density, due to the cost of labor, nearly all rammed earth today is built using pneumatically powered backfill tampers. These are available in a range of weights and speeds.

To achieve maximum efficiency for wall building, the number of rammers should be chosen based on the speed of the delivery system.

Summary of rammed earth equipment options

There are basically two factors that will govern the decision of what equipment package to employ in the construction of rammed earth walls: hourly labor rates and work schedule. Experience has shown that wall production is roughly proportional to the capital investment in equipment (or the rental rates). When labor rates are low it is more economical to minimize the equipment investment and work at a slower pace. With each incremental increase in labor rates, an additional piece of equipment can be used to reduce total man-hours. The goal is to achieve the optimum balance between equipment costs and labor costs.

The second factor affecting the decision of how much equipment to use is the schedule of work. As has been illustrated, the rate of wall production increases with the sophistication of the means and methods. In other words, the total time on the

job decreases as the complexity of the system increases. There are three financial advantages to completing the project in a shorter period of time: reduced construction loan interest to the owner, reduced travel and per diem expenses for the crew, and by reducing the total time on each job, the wall-building contractor can complete more projects within any given year or construction season. At an assumed profit margin of 15%, increasing total construction volume increases net profit.

Current evolution in rammed earth

In an effort to make rammed earth construction cost competitive with other masonry wall systems in use today, such as cast-in-place concrete or grouted concrete block, the goal is to maximize the speed of construction. At the present time, the most efficient iteration for building rammed earth walls seems to be through the use of manufactured forming components, assembled in large sections and set in place with small cranes. Soil mixtures are proportioned and blended in volumetric mix trucks and delivered directly into the formwork in measured lifts with articulated conveyors belts. The number of operators on ramming tools varies between six and ten. This complement of men and equipment can complete in the neighborhood of 500 square feet of 18" thick wall ($\approx 45 \text{ m}^2$ with a wall thickness of 45 cm) per shift.

top Handverdichtung, zwei Druckluftstamper, mehrere Stamper in einer Holzform
Hand ramming, two pneumatic rammers, multiple rammers in wooden form

bottom PISE Werkzeuge, Spritzen und Abziehen
PISE equipment, shooting and finishing



der Gesamtzeit der Arbeiten die Möglichkeit für die Baufirma innerhalb eines Jahres oder einer Bausaison mehrere Bauprojekte zu realisieren. Bei einer geschätzten Gewinnrate von 15 % führt ein erhöhtes Gesamtbauvolumen auch zu erhöhtem Nettogewinn.

Die aktuelle Entwicklung im Stampflehbau

Um die Kosten für den Stampflehbau zum herkömmlichen Mauerwerksbau, wie Ortbeton oder vermauerte Betonsteine wettbewerbsfähig zu machen, ist das Ziel eine Maximierung der Baugeschwindigkeit. Gegenwärtig scheint der effizienteste Schritt zur Herstellung von Stampflehmwänden die Verwendung von vorgefertigten Schalungselementen zu sein, die zu großen Abschnitten verbunden und mit einem kleinen Kran in Position gesetzt werden. Die Lehmmischung wird in Transportmischfahrzeugen proportioniert, abgemischt und mit beweglichen Förderbändern direkt in die Schalung in definierten Füllhöhen eingebracht. Die Zahl der benötigten Bauarbeiter an den Stampfwerkzeugen variiert zwischen sechs und zehn. Diese Kombination von Arbeitern und Ausrüstung kann in einer Schicht etwa 500 ft² einer 18-Zoll starken Wand errichten (ca. 45 m² bei 45 cm Wandstärke).

Die PISE-Bauweise

In den späten 1980er Jahren wurde es durch die Bestrebungen der Bauherren und Architekten, größere und komplexere Wandsysteme zu bauen, notwendig, alternative Methoden der Beförderung und Einbringung stabilisierten Lehms zu entwickeln.

Das Produzieren des damals immer noch auf dem Boden gemischten und mit der Schaufel transportierten Stampflehms war einfach zu langsam, um sich mit anderen, üblicheren Mauerwerkssystemen zu messen. Zusätzlich wurde bei Ingenieuren und Baubehörden die Qualitätskontrolle ständig in Frage gestellt. Ungleichmäßige Abmischung, undosierte Flüssigkeitszufuhr und unreguliertes Mischen riefen die größten Bedenken hervor.

Um gleichzeitig die Bedingungen der Qualitätskontrolle und eine Flexibilität der Schalungselemente zu erreichen, adaptierte der Autor Werkzeuge und Techniken der Spritzbetonindustrie zu einem völlig neuen System zur Errichtung von monolithischen stabilisierten Lehmwänden.

Die PISE (pneumatically impacted stabilized earth) – Bauweise basierte auf der Verwendung eines Druckluftkompressors, um



mit hohem Druck den trockenen Lehm-Zement-Mix durch einen flexiblen Gummischlauch von der Mischmaschine bis zum Einbringungsort zu transportieren. Am Austrittsende verbindet eine Mischdüse Wasser und das Lehmgemisch zur passenden Konsistenz für die Einbringung und Hydratation. Die Mischung wird von der Düse mit entsprechender Energie gesprüht, sodass sie sofort die nötige Konsistenz zum Tragen des Eigengewichts erlangt. So kann das Material gegen eine einseitige Schalung gespritzt werden. Die Schalungsarbeit reduziert sich um die Hälfte. Normalerweise kann eine Fünf-Mann-Truppe mit der richtigen Ausrüstung 30-40 cubic yards (23-30 m³) in einer Tagesschicht ausführen.

Die prinzipiellen Vorteile der PISE-Technik gegenüber der traditionellen Stampflehmethode sind die Einfachheit der Schalung und die höhere Produktionsgeschwindigkeit. Die für die PISE-Technik benötigte Ausrüstung erfordert eine höhere Kapitalinvestition, als die für den bisherigen Stampflehbau, wobei die Kraftstoffkosten von der Größe des Druckluftkompressors abhängen. Das Ausbildungsniveau der Arbeiter muss ebenso höher sein, was weitere Kosten erzeugt. Der Lehm muss sorgfältiger ausgewählt werden, um Schwindrisse zu vermeiden, und der Zementgehalt ist normalerweise höher, als bei stabilisiertem Stampflehm. Die letztendliche Entscheidung, welche Technik zu nutzen ist, sollte auf einer Kombination der Faktoren Gebäudekomplexität, Zugang zur Baustelle, Verfügbarkeit des Lehms, Bauzeitplanung und auf ästhetischen Präferenzen basieren.

Zusammenfassung

Monolithische Lehmwände spielen eine bedeutende Rolle in der Zukunft des nachhaltigen Entwerfens. Unbehandelte mineralische Erde ist ein reichlich vorhandenes, lokales, natürliches und recyclingfähiges Baumaterial. Bis heute wurde die Verwendung von Stampflehm durch beschwerliche und uneinheitliche Methoden begrenzt. Es ist die Hoffnung des Autors, dass diese alte und ehrwürdige Technik durch verbesserte Werkzeuge und Verfahren ihren rechtmäßigen Platz in der Zukunft der modernen Bauweisen einnimmt.



The PISE option

In the late 1980's, driven by client and architect demands for building taller, more complex wall systems, it became necessary to explore alternative methods of conveying and placing stabilized earth.

Rammed earth, still dependent at this time on ground mixing and shovel delivery, was simply too slow to compete with other, more familiar masonry wall systems. In addition, quality control was always in question by the engineers and building officials. Inconsistent proportioning, un-metered hydration, and un-regulated mixing were the three areas of concern.

To address simultaneously the issues of quality control and flexibility of placement, the author adapted the tools and techniques of the gunite industry to a completely new system for building monolithic stabilized earth walls.

The PISE (pneumatically impacted stabilized earth) process utilizes a high pressure, high volume air compressor to move a dry soil/cement mixture through a flexible rubber hose from the mixing machine to the point of placement. At the discharge end, a blending nozzle combines water and the soil mixture to the proper consistency for placement and hydration. The mixture is projected from the nozzle with sufficient force that it immediately attains a consistency sufficient to support its own weight. This allows for placement of the material against a single sided form, thus reducing formwork expense by half. Typically, a five man crew with the proper equipment, can place and finish between 30 and 40 cubic yards (23-30 m³) in one day's shift.

The principal advantages of PISE over traditional rammed earth are the simplicity of the formwork and the speed of production. The capital investment in equipment required to build PISE walls is greater than that for rammed earth, as are the fuel costs due to the size of the air compressor. The skill level of the workmen must also be higher, thus affecting wage rates. Soil must be more carefully selected to avoid shrinkage cracks, and cement content is typically higher than for stabilized rammed earth. The ultimate decision of which process to use should be based on a combination of factors: building complexity, site access, soil availability, construction time line, and aesthetic preference.

Conclusion

Monolithic earth walls have an important role to play in the future of sustainable design. Raw mineral soil is an abundant, local, natural, and recyclable building material. Up to this time

the use of rammed earth has been limited by cumbersome and inconsistent methods. It is the author's hope that by improving tools and procedures, this ancient and venerable method will assume its rightful place for the future of modern construction.