

GALLÉ LEYDI

TRAGENDES
LEHMSTEINMAUERWERK
IM WOHNUNGSBAU IN MAKO,
SENEGAL

Masterarbeit

Alexander Dürr
Matrikel-Nr.: 0479687

Prof. Dipl.-Ing. Eike Roswag-Klinge
Prof. Dr.-Ing. Kerstin Wolff

Technische Universität Berlin
Fachgebiet: Natural Building Lab
Studiengang: Architektur M. Sc.
Fakultät VI Planen Bauen Umwelt

Mai bis Oktober 2025

Inhalt

4	I. Einführung
5	II. Mensch + Zement Urbanisierung in Westafrika
8	III. Mako, Senegal Ort - Wohnpraxis - Baukultur
10	Mako
11	Geologie
12	Klima
13	Dichte
14	Städtebau
16	Typologie
19	Nutzung
20	Nutzer:innen
21	Fallstudie
27	Baustoffe
30	Bautechniken
41	Infrastruktur
42	Raumklima
46	IV. Westafrikanische Bauwende These
48	V. Konstruktive Ansätze Lehm - Mauerwerk - Bauteile
49	Baukonstruktive Anforderungen
50	Herstellung CEB
54	Tragendes Lehmsteinmauerwerk
56	Gründung + Sockel
59	Geschossdecke
63	Dach
67	VI. Gallé Leydi Exemplarischer Entwurf
78	VII. Auswertung Ressourcen - Baukosten
79	Ressourcenverbrauch
82	Baukosten
84	VII. Fazit
86	Anhang
87	Statische Bemessung
94	Literatur + Quellen
94	Danksagung



Vernekulare Rundhütten vor neu errichteter Planstadt, Medina-Sabodala, Senegal, 2025

I. EINLEITUNG

gallé (Pulaar: Haus, Zuhause)

leydi (Pulaar: Erde, Welt)

Gallé Leydi befasst sich mit ressourcenschonenden, klimagerechten Baukonstruktionen aus Naturbaustoffen für niedriggeschossigen Wohnungsbau im ländlichen Westafrika – einer Region, in der die rasant voranschreitende Urbanisierung auf universelle Betonarchitektur setzt und ortsbezogene Lösungen fehlen. Ich betrachte das Thema in meiner Masterarbeit am Beispiel der Gemeinde Mako im Senegal.

Ausgehend von der These, dass tragendes Mauerwerk aus gepressten Lehmsteinen (Compressed Earth Block, kurz CEB) eine Schlüsselrolle in der ökologischen Transformation der lokalen Bauwirtschaft spielen kann, untersuche ich die Herstellung von CEB und ihre Anwendung im örtlichen Kontext. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung baukonstruktiver Lösungen für Gründung, Geschosdecken und Dächer. Dies mündet in der Anwendung in einem exemplarischen, fiktiven Entwurf.

Die Masterarbeit begann mit einem zweimonatigen Aufenthalt in Mako, in dem ich die lokale Baukultur und Wohnpraxis dokumentierte, die Verfügbarkeit von Baustoffen prüfte, Lehmerden analysierte und Prototypen gepresster Lehmsteine herstellte. Der theoretische Teil der Arbeit entstand anschließend an der TU Berlin.

Mit Mako verbindet mich mein langjähriges Engagement im Architekturkollektiv Studio Suddo Neuve, einer Kooperation zwischen dem deutschen Verein Project Mako e.V. und der senegalesischen Baufirma NiokoBâti G.I.E. Studio Suddo Neuve begleitet seit 2017 die architektonische Entwicklung in Mako und hat praktische Erfahrung im Bauen mit stabilisierten Lehmsteinen (Compressed Stabilized Earth Block, kurz CSEB). Die vorliegende Masterarbeit baut auf den von Studio Suddo Neuve erarbeiteten Grundlagen auf und versteht sich als Fortführung der Publikation „Back to Earth“ des Kollektivs. Sie hat forschenden Charakter und ist kein Design-Build-Projekt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen die zukünftige Arbeit von Studio Suddo Neuve bereichern.

Die Herausforderungen durch wachsende Bebauung sind in weiten Teilen Westafrikas ähnlich. Die hier entwickelten Alternativen und Lösungsansätze sind daher übertragbar und haben Relevanz über Mako hinaus. Diese Arbeit versteht sich als Beitrag zu einer nachhaltigen Baupraxis in der gesamten Region.

II. MENSCH + ZEMENT

URBANISIERUNG
IN WESTAFRIKA

Der Bausektor verursacht weltweit 37% der Treibhausgasemissionen und 36% des Energiebedarfs.⁽¹⁾ Zu Recht fordern immer mehr Akteur:innen eine radikale Bauwende: Abriss verhindern, Neubau vermeiden. Die großen architektonischen Herausforderungen der Zukunft liegen in Europa im Bauen im Bestand, in Umnutzung und Nachverdichtung. Im globalen Süden stellt die voranschreitende Urbanisierung jedoch völlig andere Anforderungen: Bis 2050 werden zusätzlich 2,5 Milliarden Menschen in Städten leben – vor allem in Asien und Afrika. In Afrika südlich der Sahara existieren diese Städte oftmals noch nicht, rund 80% der benötigten Gebäude müssen erst noch gebaut werden.⁽¹⁾ Geschieht dies wie bisher mit Beton, Stahl und Aluminium, sind die Umweltfolgen verheerend.

In Westafrika, dem Kontext dieser Masterarbeit, wird sich die Bevölkerung voraussichtlich verdoppeln: von heute 440 Millionen auf 800 Millionen Menschen im Jahr 2050.⁽²⁾ Mit der Westafrikanischen Moderne nach der Unabhängigkeit vieler Staaten in den 1960er Jahren erreichten die industriellen Baumaterialien ihre Popularität. Die Urbanisierung und „Zementisierung“ erfasste über die Jahrzehnte auch den ländlichen Raum. Selbst eingeschossige Einfamilienhäuser entstehen heute vorwiegend aus Beton und Wellblech – zum großen Teil aus importierten Baustoffen. Traditionelle Bauweisen mit lokal verfügbaren, weniger energie- und kostenintensiven Materialien wie Lehm geraten zunehmend in Vergessenheit. Der jährliche Zementverbrauch in Westafrika liegt heute bei 145 kg pro Kopf – deutlich unter dem internationalen Durchschnitt von 549 kg. Dennoch steigt der Konsum stetig, selbst in Zeiten wirtschaftlicher Stagnation. Auffallend ist, dass ein großer Teil des Zementverbrauchs durch niedriggeschossigen, privaten Wohnungsbau verursacht wird, und nicht etwa durch Infrastrukturbauten. Hochrechnungen zufolge wird sich der Verbrauch bis 2050 auf 470 kg pro Kopf erhöhen. Die Zementherstellung würde dann Emissionen von 305 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr verursachen.⁽³⁾ Um die Erderwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen, müssen weltweit jährlich etwa 10 Gigatonnen CO₂ aus der Atmosphäre entnommen werden. Allein die westafrikanische Zementindustrie würde in diesem Szenario 2,6% des weltweiten Budgets zunichtemachen.⁽⁴⁾ Diese Aussichten sind alarmierend.

Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum in Westafrika zeugen von lebendiger Entwicklung. Die Urbanisierung ländlicher Regionen ist eine logische Konsequenz, die Errichtung adäquater Behausungen notwendig. Die Nachfrage nach höheren Wohn- und Baustandards ist absolut nachvollziehbar. Doch diese Entwicklung stößt an planetare Grenzen. Wie kann sich der Wohnungsbau in Westafrika wandeln, um zukunftsfähig zu sein?

(1) Misselwitz, Philipp 2022. Die Kraft des globalen Netzwerks. Die Architekt Nr. 4, 27.

(2) Studio Suddo Neue 2025. Back to Earth - Urbanization without Depletion. Berlin: Jovis, 19.

(3) ebd., 21.

(4) ebd., 22.

Westafrika heute

440 Mio. Menschen

145 kg Zement pro Kopf und Jahr

Prognose 2050

800 Mio. Menschen

470 kg Zement pro Kopf und Jahr

305 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr



Entladen einer Zement-Lieferung in Mako, 2025



Architektur aus der Ära der Westafrikanischen Moderne, Place de l'Indépendance, Dakar, Senegal, 2022

III.
MAKO
SENEGAL

ORT
WOHNPRAXIS
BAUKULTUR



Blick von einem Dach auf die „Route Nationale 7“ in Mako, 2025

MAKO

12.851095°N, 12.354737°W
85m ü. M.

6 km²

2983 Menschen ⁽¹⁾

Mako ist eine rund 6 km² umfassende Ortschaft im Südosten Senegals, in der Region Kédougou, etwa 700 km von der Hauptstadt Dakar entfernt. Geprägt durch seine Lage am Fluss Gambia, an einer wichtigen Verkehrsader und in unmittelbarer Nähe zum Nationalpark Niokolo Koba, nimmt Mako eine bedeutende Rolle in dieser strukturschwachen Region ein.

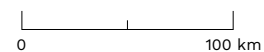
Heute leben 2983 Menschen in Mako, überwiegend den Volksgruppen Pulaar-Fulbe, Malinke und Bassari zugehörig. Gesprochen wird neben den lokalen Sprachen Wolof und Französisch.

Die Gegend ist traditionell landwirtschaftlich geprägt. Ein weiterer wichtiger Wirtschaftszweig sind Restaurants, Werkstätten und Geschäfte für den LKW-Fernverkehr entlang der Route Nationale 7. Stark verändert hat sich der Ort seit 2016 durch die Eröffnung einer industriellen Goldmine im Tagebau. Der „Goldrausch“ schuf Arbeitsplätze, Zuzug und Infrastruktur – viele Familien begannen, neue, größere Wohnhäuser aus Beton zu errichten. Bei einem Spaziergang durch Mako heute sieht man kaum ein Grundstück ohne Baustelle.

(1) Rechercher. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD) du Sénégal. <https://www.ansd.sn/search/recherche> [Stand 2025-07-9].



GEOLOGIE



Die geologische Karte des Senegals zeigt die vorherrschenden Gesteinsschichten unterhalb der Pedosphäre. Große Teile des Landesinneren sind durch jüngere, aus Ablagerungen entstandene Schichten charakterisiert – zwischen 66 Millionen Jahren und heute. In Mako, in der Nio-kolo-Koba-Region, dominieren jedoch alte Gesteine aus der Zeit von 2500 bis 514 Millionen Jahren. Die Landschaft ist hügelig und steinig, während andere Teile des Senegals flach und sandig sind. Durch die Verwitterung der Gesteine über lange Zeiträume im tropischen Klima entstehen die Laterit-, Lehm- und Sandvorkommen, welche die lokale Baukultur maßgeblich prägen: Laterit und Lehm im vernakulären Lehm- und Ziegelbau, Laterit im Straßenbau und Sand im modernen Betonbau.

Känozoikum (66 Mio. Jahre bis heute)

- Alluviale Ablagerungen
- Sandablagerungen
- Vulkanite
- Marine Sedimente
- Kontinentale Sedimente

Mesozoikum (252–66 Mio. Jahre)

- Metamorphe Gesteine

Paläozoikum – Neoproterozoikum (1000–252 Mio. Jahre)

- Allochthone suprakrustale Gesteine
- Parautochthone Gesteine der Mali- und Batapa-Gruppen
- Beckensedimente der Youkounkoun-Gruppe

Proterozoikum (2500–541 Mio. Jahre)

- Östlicher kalk-alkalischer Magmatitkomplex der Nikolo-Koba-Gruppe
- Westlicher kalk-alkalischer Magmatitkomplex der Koulountou-Gruppe
- Riffazies der kontinentalen Ränder (Guinguangruppe)
- Ophiolithische Schuppen der Termesse-Gruppe
- Tonsteine und Sandsteine des Madina-Kouta-Beckens
- Granite, Gneise, Migmatite des Kédougou-Fensters (Birimum-System)

Quelle: Schlüter, Thomas 2008. Geological Atlas of Africa. Heidelberg: Springer-Verlag, 213.

KLIMA

In der Region Kédougou herrschen extreme klimatische Bedingungen mit starker Sonneneinstrahlung und einer durchschnittlichen Temperatur von rund 33 °C im April. Charakteristisch ist der halbjährliche Rhythmus von Trocken- und Regenzeit.

Die verschiedenen Jahreszeiten erfordern gegensätzliche bioklimatische Strategien zur Temperierung von Gebäuden. Während der Regenzeit ist das Klima heiß und feucht, mit nahezu gleichbleibenden Temperaturen tags und nachts. Hier sind Verschattung und dauerhafte natürliche Belüftung entscheidend. In den Monaten Dezember und Januar ist es trocken und sonnig, tagsüber heiß und nachts kühl – jetzt kommt es auf die thermische Masse der Baukonstruktion an: Dicke, massive Wände halten die Innenräume tagsüber kühl und geben nachts gespeicherte Wärme ab. Eine besondere Herausforderung stellt die heiße und trockene Zeit von Februar bis April dar, in der es nachts kaum noch abkühlt. Hier ist eine Kombination

aus Verschattung, Belüftung und Phasenverschiebung durch thermische Masse notwendig.⁽¹⁾

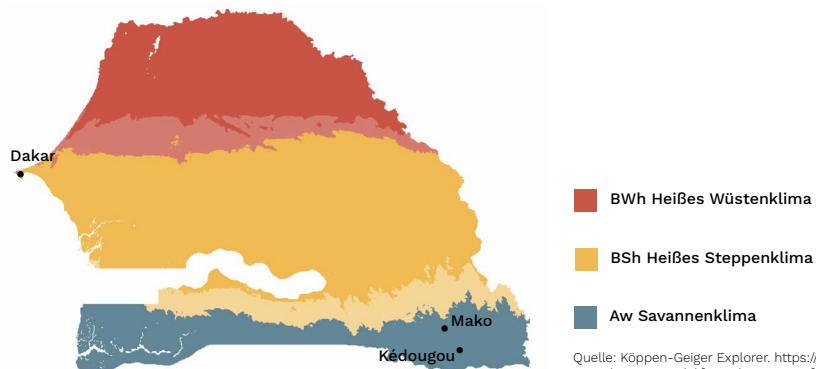
Die Nähe zum Äquator bestimmt den Sonnenverlauf in der Region: Die Sonne steht steil und hat während der Wintermonate ihren Zenit im Süden, im Sommer jedoch im Norden. Die Dämmerungsphase ist sehr kurz.

Auswirkungen des globalen Klimawandels sind in Mako bereits heute spürbar: stärkere Niederschläge während der Regenzeit, länger anhaltende extreme Hitze kurz vor der Regenzeit, versiegende Brunnen. Die Grafik unten zeigt die Verschiebung der Klimazonen gen Süden: Während Mako heute noch im Bereich der Savannenklimate liegt, wird sich die Region bis 2070 dem heißen Steppenklimate annähern. Die Architektur muss sich für diese Veränderungen wappnen.

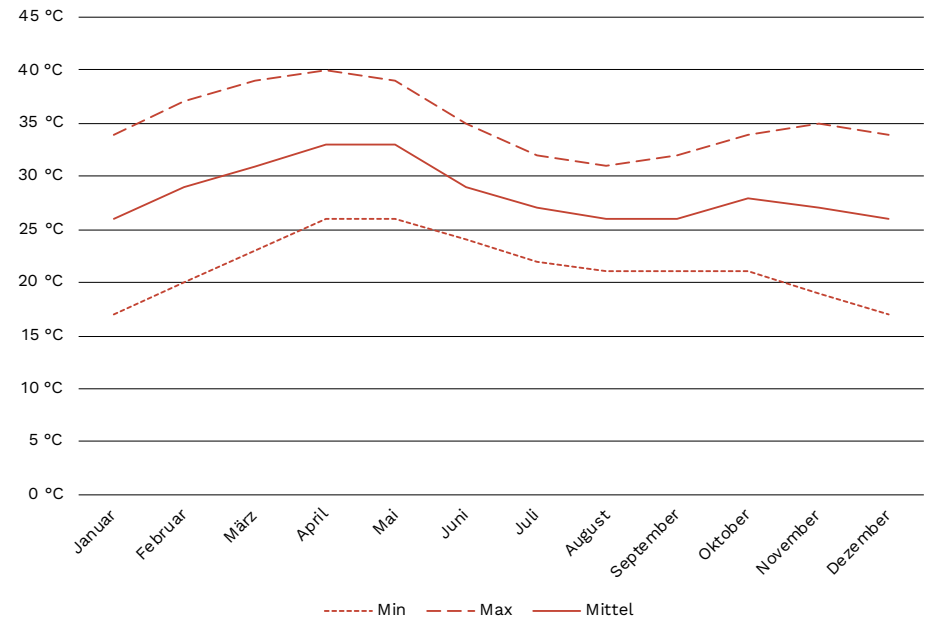
⁽¹⁾ Denizart, Marion 2025. TOOLBOX Stratégies bioclimatiques adaptées aux climats. Acted, Zero Exclusion Carbon Poverty, 14-30.

Klimazonen Senegal

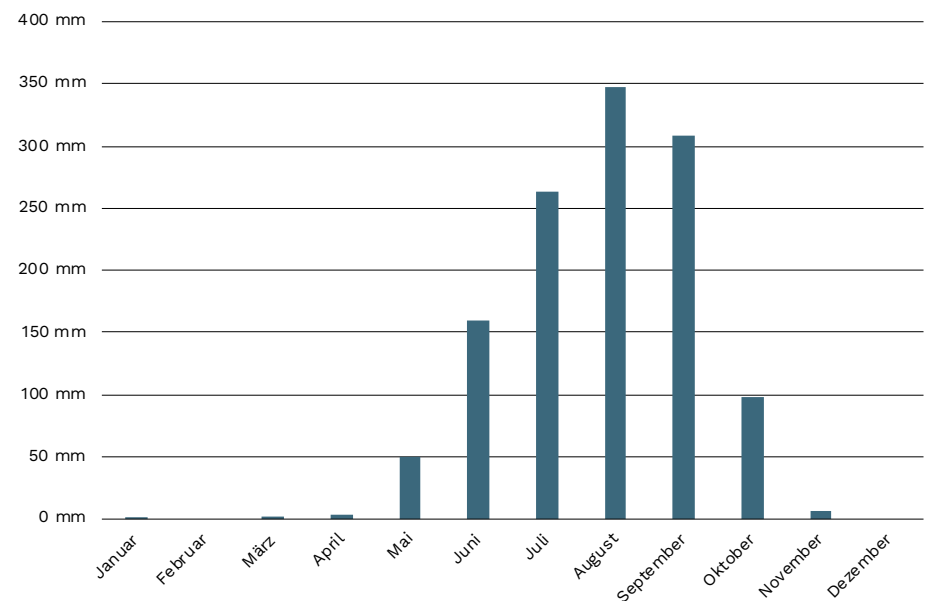
2020 - 2070: Verlagerung nach Süden



Temperatur Region Kédougou

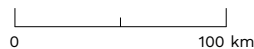
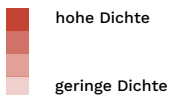
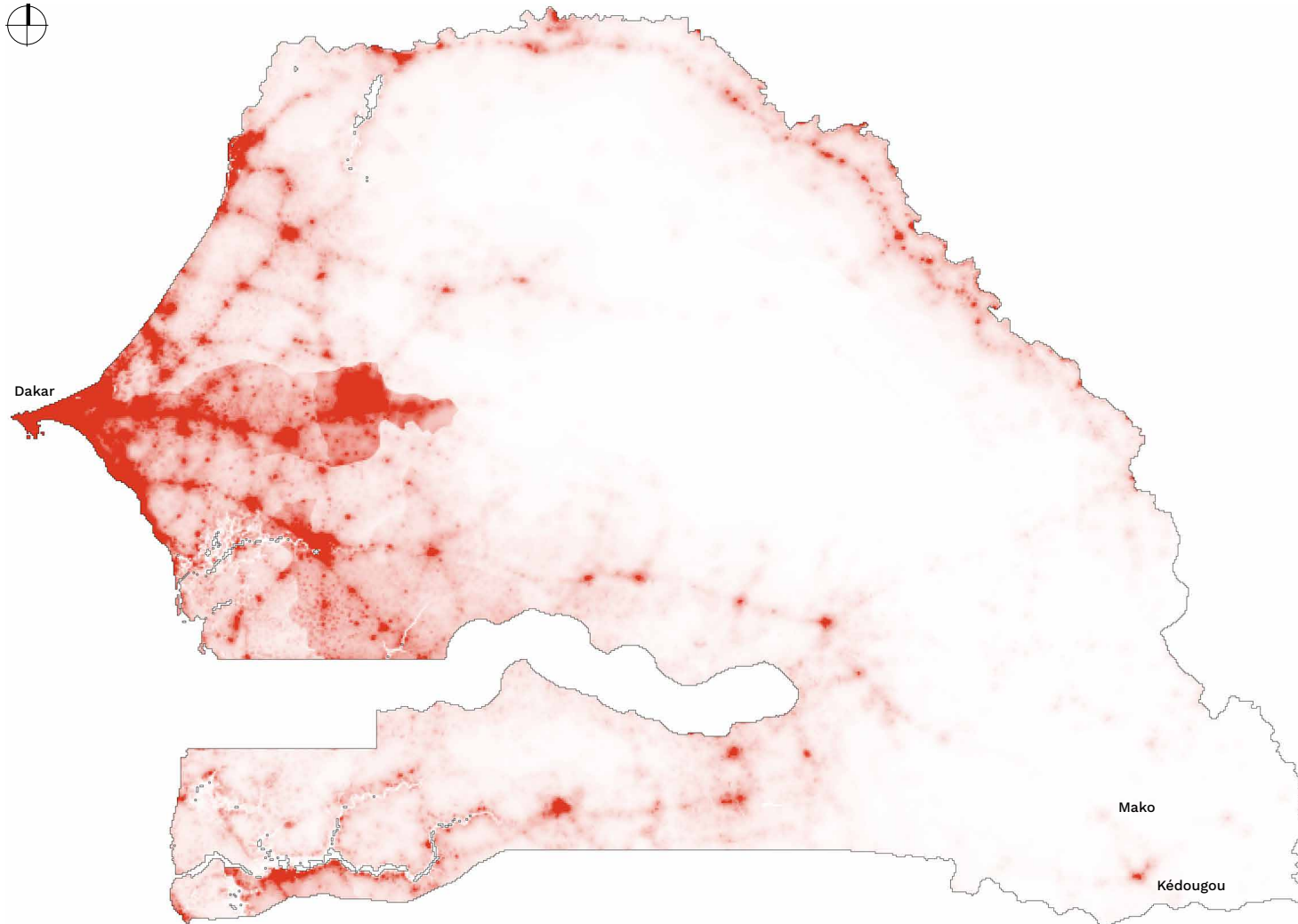


Niederschlag Region Kédougou



Quelle: Wetterarchiv Kédougou, meteoblue. https://www.meteoblue.com/de/wetter/historyclimate/weatherarchive/k%c3%a9dougou_senegal_2250647 [Stand 2025-08-4].

DICHTE



Quelle: WorldPop (www.worldpop.org - School of Geography and Environmental Science, University of Southampton; Department of Geography and Geosciences, University of Louisville; Département de Géographie, Université de Namur) and Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University (2018), Global High Resolution Population Denominators Project - Funded by The Bill and Melinda Gates Foundation (OPP1134076). <https://dx.doi.org/10.5258/SOTON/WP00675>

Senegal

90 Menschen / km² ⁽¹⁾

Dakar

16.000 Menschen / km² ⁽¹⁾

Mako

500 Menschen / km²

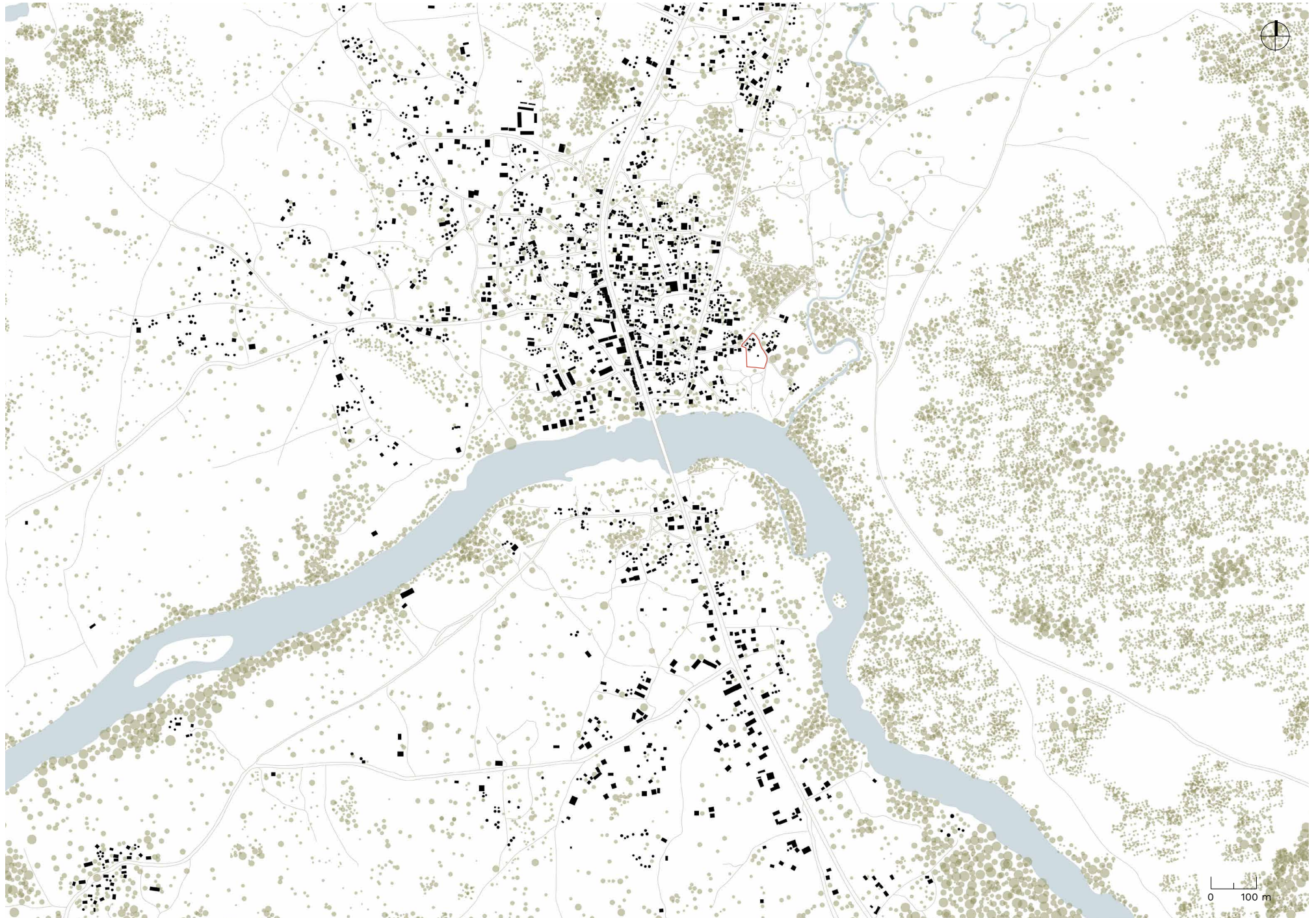
Wusterwitz, Brandenburg (DE)

120 Menschen / km² ⁽²⁾

Senegal ist ein bevölkerungsreiches Land, wobei sich die Bevölkerungsdichte in der Region rund um die Hauptstadt und an der Küste konzentriert. Dort ist auch der Anteil an versiegelter Fläche am größten. Die Karte zur Bevölkerungsdichte links macht deutlich, dass Siedlungen vor allem in der Metropolregion, entlang von Flüssen und Verkehrsrouten wachsen. Die Stadt Kédougou sticht im sonst weniger urbanisierten Südosten markant hervor, auch Mako ist zu erkennen. Trotz seiner eher traditionell dörflichen Struktur leben in Mako etwa 500 Menschen pro Quadratkilometer. Zum Vergleich: Wusterwitz im deutschen Brandenburg hat eine ähnliche Einwohnerzahl wie Mako und ist ebenso ein kompakter, zusammenhängender Ort – die Dichte beträgt jedoch nur 120 Menschen pro Quadratkilometer.⁽²⁾

⁽¹⁾ Rechercher, Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD) du Sénégal. <https://www.ansd.sn/search/recherche> [Stand 2025-07-9].

⁽²⁾ Wusterwitz, Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wusterwitz&oldid=257228315> [Stand 2025-07-9].



Übersichtskarte von Mako, Grundstück Fallstudie/Entwurf rot markiert



STÄDTEBAU

Mako befindet sich im rasanten Wandel von einem Rundhütten-Dorf hin zu einer verdichteten Stadt – exemplarisch für viele ländliche Orte mit starkem Bevölkerungswachstum in der Sahelzone. Der Wandel geschieht organisch, hauptsächlich durch privaten Wohnungsbau und ohne jegliches Zutun von Planer:innen.

Das Zentrum von Mako liegt nördlich, neuere Ortsteile südlich des Gambias und an den Rändern des Ortes. Der Ort wird durch eine Fernverkehrsstraße mittig durchschnitten, eine einzige Brücke führt über den Fluss. Aktuell dominieren eingeschossige, freistehende Wohngebäude und vereinzelte traditionelle Rundhütten. Entlang der Hauptstraße entstand innerhalb der letzten zehn Jahre eine neue Typologie: zweigeschossige Stadthäuser mit Gewerbeflächen im Erdgeschoss.

Mako wächst in die Fläche. Die Urbanisierung bringt gesellschaftliche Chancen, hat allerdings städtebauliche Konsequenzen: Zersiedelung, Flächenverbrauch, Versiegelung und die Zerstörung von Feldern und Natur. Die lokale Verwaltung beginnt derzeit mit der Einführung eines Grundstückskatasters und verpflichtender Baugenehmigungen zu reagieren – städtebauliche Visionen für die Zukunft fehlen jedoch.

-  Rundhütten
-  1 Geschoss
-  2 Geschosse
-  3 Geschosse
-  Wasserturm

TYPOLOGIE

Anhand der Wohnbauten in Mako lässt sich eine spannende typologische Entwicklung ablesen: Früher bildeten mehrere runde Ein-Raum-Häuser mit kegelförmigen Dächern, „Souddou“ genannt, im Kreis gruppiert um einen schattenspendenden Mangobaum, den Hof einer Großfamilie. Eine Hütte war für den Familienvater vorgesehen, jeweils eine für jede Ehefrau, eine für die Kinder, weitere für Großeltern, Lebensmittelvorrat und Tierhaltung. Toilette und Dusche befanden sich außerhalb.

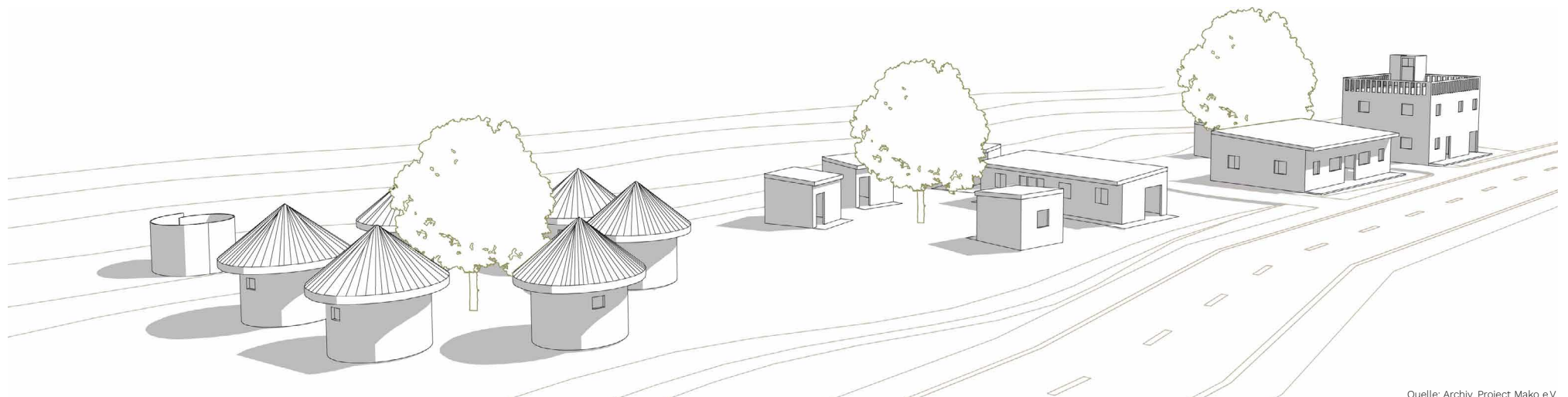
Im nächsten Schritt variierten die Ein-Raum-Häuser: Runde Grundrisse wichen rechteckigen, Dachformen wandelten sich zu Walmdächern und Pultdächern. Diese Bauformen dienen oft auch als Kaufläden, Werkstätten oder anderes.

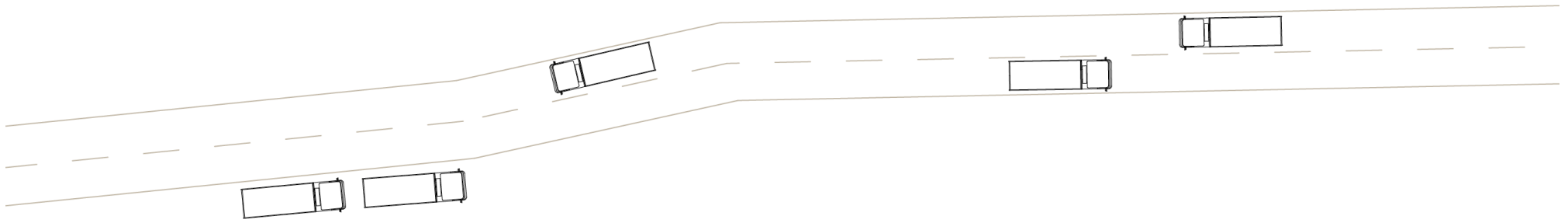
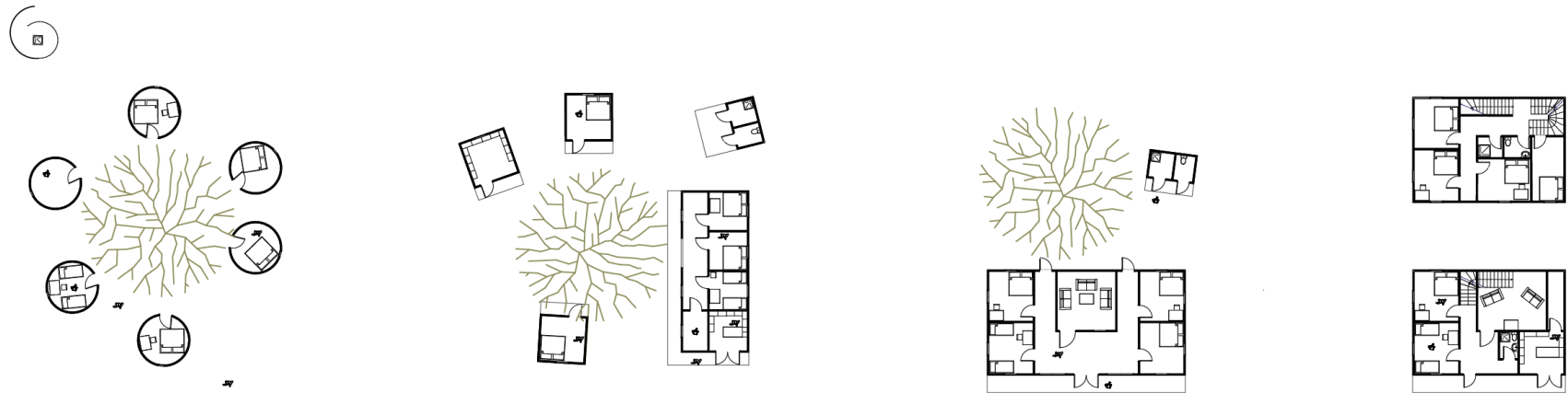
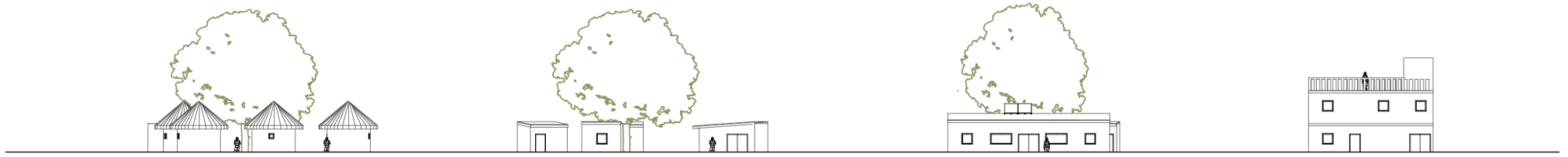
Einen wichtigen Einschnitt markiert der Übergang zu Gebäuderiegeln mit mehreren Schlafzimmern entlang eines Flurs, der zugleich als Terrasse genutzt wird. Diese Typologie findet sich hauptsächlich mit Pultdächern, vereinzelt bereits mit begehbaren Flachdächern und der Möglichkeit zur Aufstockung.

Der heute angestrebte Wohnstandard ist ein freistehendes Familienhaus mit interner Erschließung, innenliegenden En-Suite-Badezimmern und einem Wohnzimmer mit opulenten Sitzmöbeln – dem „Salon“. Hier ändert sich auch die Zonierung des Grundstücks: Das Gebäude steht mittig, die bebaute Fläche überwiegt die Freifläche. Gemeinschaftsbereiche verlagern sich vom Hof auf Terrassen vor dem Hauseingang und in den Innenraum.

Viele Grundstücke in Mako sind heute mit einer Ansammlung von Häusern aller Typologien sowie zahlreichen Abwandlungen und Fusionen bebaut. Während die Rundhütten traditionell nach jeder Regenzeit repariert wurden, ist diese Kultur der Instandhaltung heute weitgehend verloren gegangen. Ein typischer Hof besteht oft aus einem verfallenen Gebäude, Bestandsgebäuden unterschiedlichen Alters und Zustands in Nutzung und einem Neubau in Errichtung.

Entlang der Hauptstraße in Mako entsteht vermehrt eine zweigeschossige Stadthaus-Typologie mit Gewerbe im Erdgeschoss und Mietwohnungen darüber. Ein Blick in die Nachbarstadt Kédougou zeigt kommende Entwicklungen: Einfamilienhäuser werden größer, zweigeschossig und zu Hofhäusern – Grundstücke sind komplett bebaut. Außerdem entsteht Geschosswohnungsbau. Diese Apartmenthäuser werden hauptsächlich vermietet. Ortsansässige Familien pflegen die Tradition, dass die Kinder auf dem eigenen Land bauen und alle gemeinsam einen Hof bewirtschaften und bewohnen.







Rundhütte



Ein-Raum-Haus



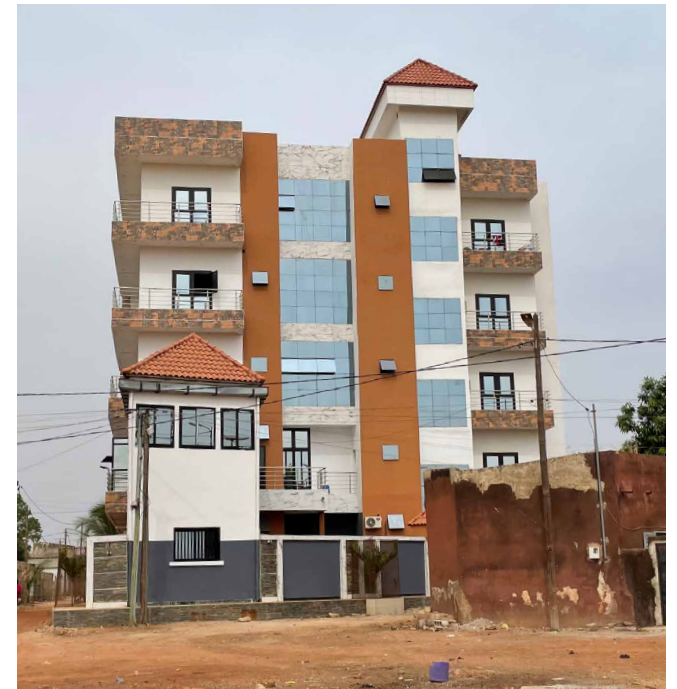
Freistehendes Wohnhaus mit geneigtem Blechdach



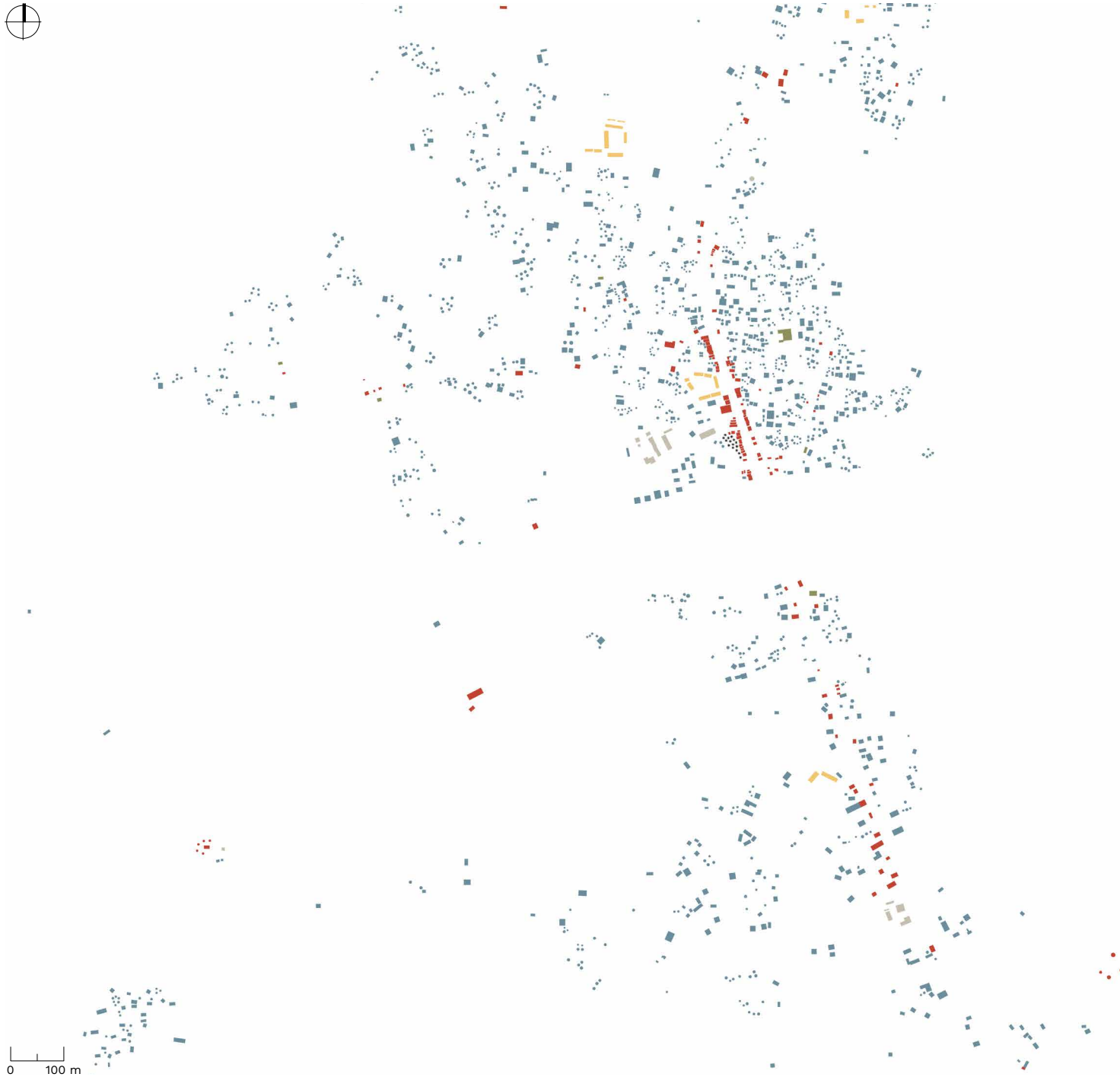
Freistehendes Wohnhaus mit begehbarem Flachdach



Zweigeschossiges Stadthaus mit Gewerbe im EG



Nachbarstadt Kédougou: Geschosswohnungsbau



NUTZUNG

Wohnen ist die primäre Nutzung der gebauten Umwelt in Mako. Jeder Ortsteil hat eine kleine Boutique für den täglichen Bedarf, die gewerblichen Nutzungen konzentrieren sich jedoch entlang der Route Nationale 7: Restaurants, Lebensmittel-, Elektronik- und Bekleidungsgeschäfte, Baustoffhandel, Schlossereien. Gewerbe und Einzelhandel sind stark auf den LKW-Verkehr ausgerichtet – so gibt es zwei Tankstellen und zahlreiche Werkstätten sowie Reifenhandel.

Jeden Samstag findet ein zentraler Markt statt. Es gibt eine große Moschee im Zentrum und weitere kleine Moscheen, eine Gesundheitsstation und eine Polizeiwache. Die kommunale Verwaltung ist hauptsächlich im Nachbarort Tomboronkoto und in Kédougou angesiedelt. Drei Grundschulen und eine weiterführende Schule befinden sich in Mako sowie einige Fußballfelder. Etwas außerhalb liegen drei sogenannte Campements für Touristen, wobei nur eines davon regelmäßig Besucher:innen empfängt.

Durch die geplante Eröffnung weiterer Goldminen in der Umgebung ist weiterhin mit Zuzug zu rechnen. Künftig werden Hotels und Mietwohnungen eine größere Rolle in Mako spielen.

-  Wohnen
-  Gewerbe
-  Administration, Gesundheit
-  Schulen
-  Moscheen
-  Markt

NUTZER:INNEN

Senegal

Jährliches Bevölkerungswachstum

2,4 % ⁽¹⁾

Geburten

4,3 pro Frau ⁽¹⁾

Durchschnittsalter

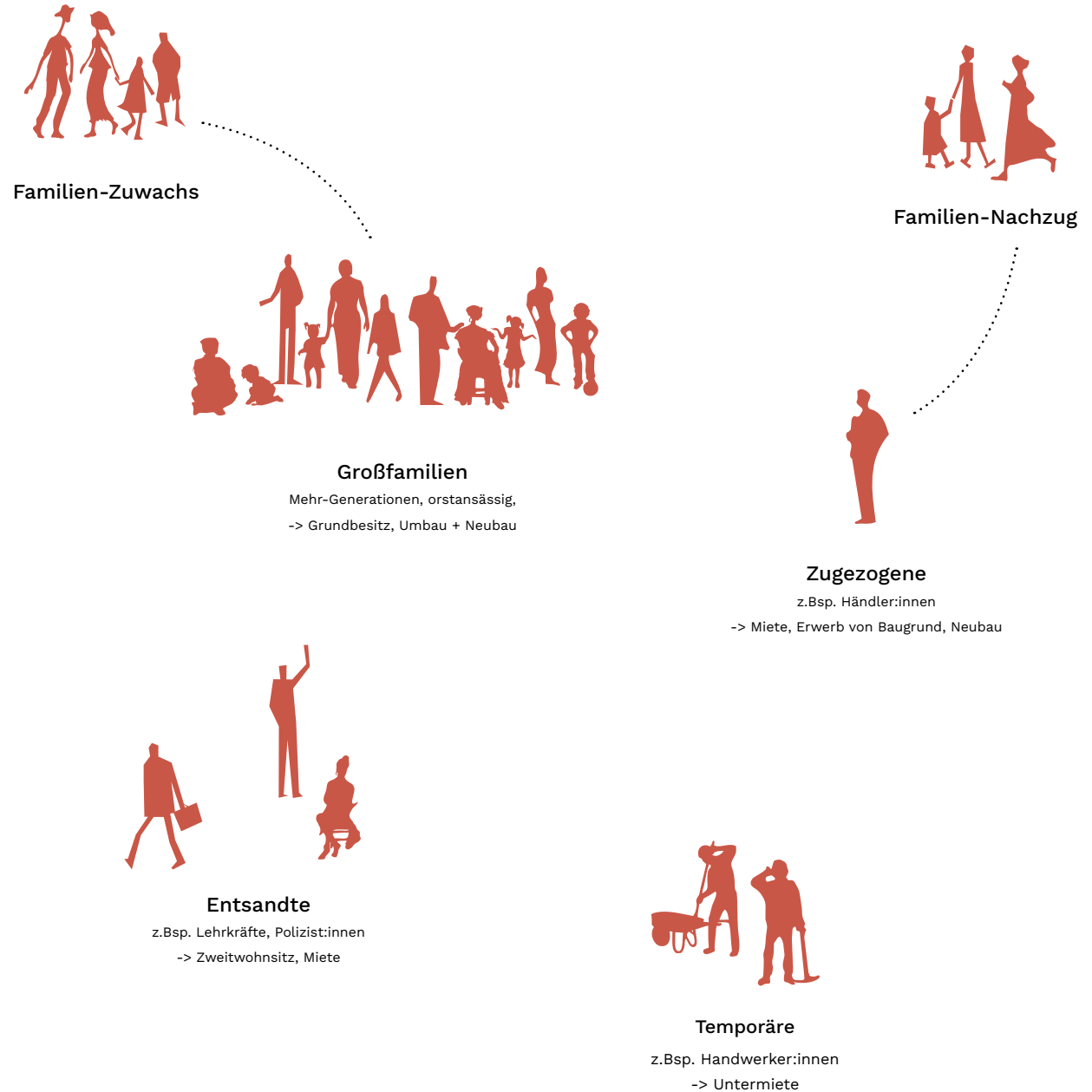
23,6 Jahre ⁽¹⁾

Durchschnittl. Haushaltsgröße

8,6 Personen (Polygamie) ⁽²⁾

Religionszugehörigkeit zum Islam

90 %



⁽¹⁾ World Bank Data360. <https://data360.worldbank.org/en/search> [Stand 2025-07-9].

⁽²⁾ Demographics - Table - Global Data Lab. <https://globaldatalab.org/demographics/table/hhsize/SEN/?levels=1&years=2023> [Stand 2025-07-10].

FALLSTUDIE

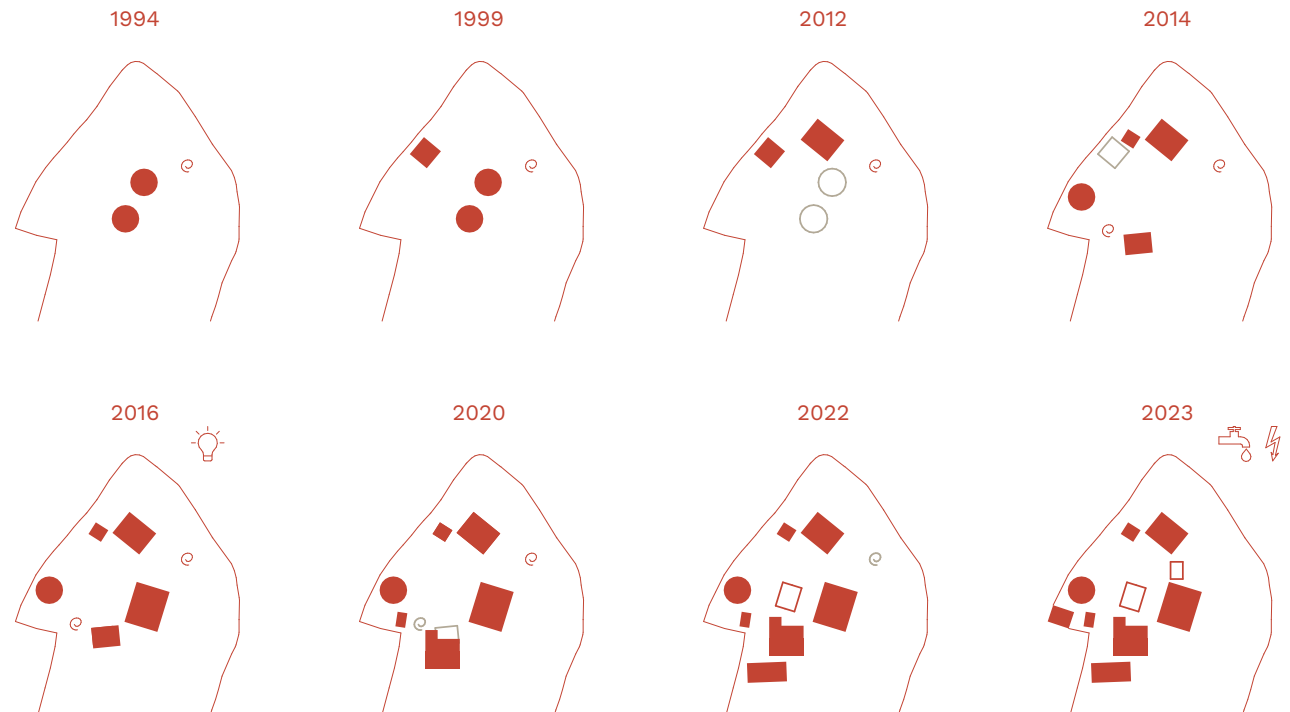
Die Familie von Marly Diallo wohnt am Rande des Ortskerns von Mako, wenige Schritte vom Fluss entfernt, dicht an dicht mit ihren Nachbar:innen, umgeben von alten Mangobäumen, Maisfeldern und Wäldern.

Marly arbeitet im Gesundheitswesen und in der Entwicklungsarbeit. Sie engagiert sich als Ansprechperson, Vermittlerin und Übersetzerin in ihrem Ortsteil. Marlys Familie ist Fulani, in der Nachbarschaft wohnen viele Malinke. Marly hat 8 Kinder und 5 Enkelkinder. Zwei ihrer Söhne leben in Deutschland.

Das Land stammt aus der Familie von Marlys Ehemann. Das junge Paar lebte zunächst auf dem Hof der Schwiegereltern, bis es 1994 auszog und auf den angrenzenden Feldern einen eigenen Hof gründete. Alles begann mit lediglich zwei Rundhütten und einer Latrine. Zur Hochzeit des ältesten Sohnes bauten sie eine rechteckige Hütte, 2012 wurde das erste Haus mit mehreren Zimmern errichtet. Von da an wurde kontinuierlich investiert und gebaut, im Jahr 2020 wurde erstmals eine überdachte Anlage mit Dusche und Toilette und Abwassertank errichtet. Im Jahr 2023 wurde das Grundstück an die Strom- und Wasserversorgung angeschlossen.

Die bauliche Entwicklung dieses Zuhauses steht sinnbildlich für die bauliche Entwicklung Makos.

Bauliche Entwicklung



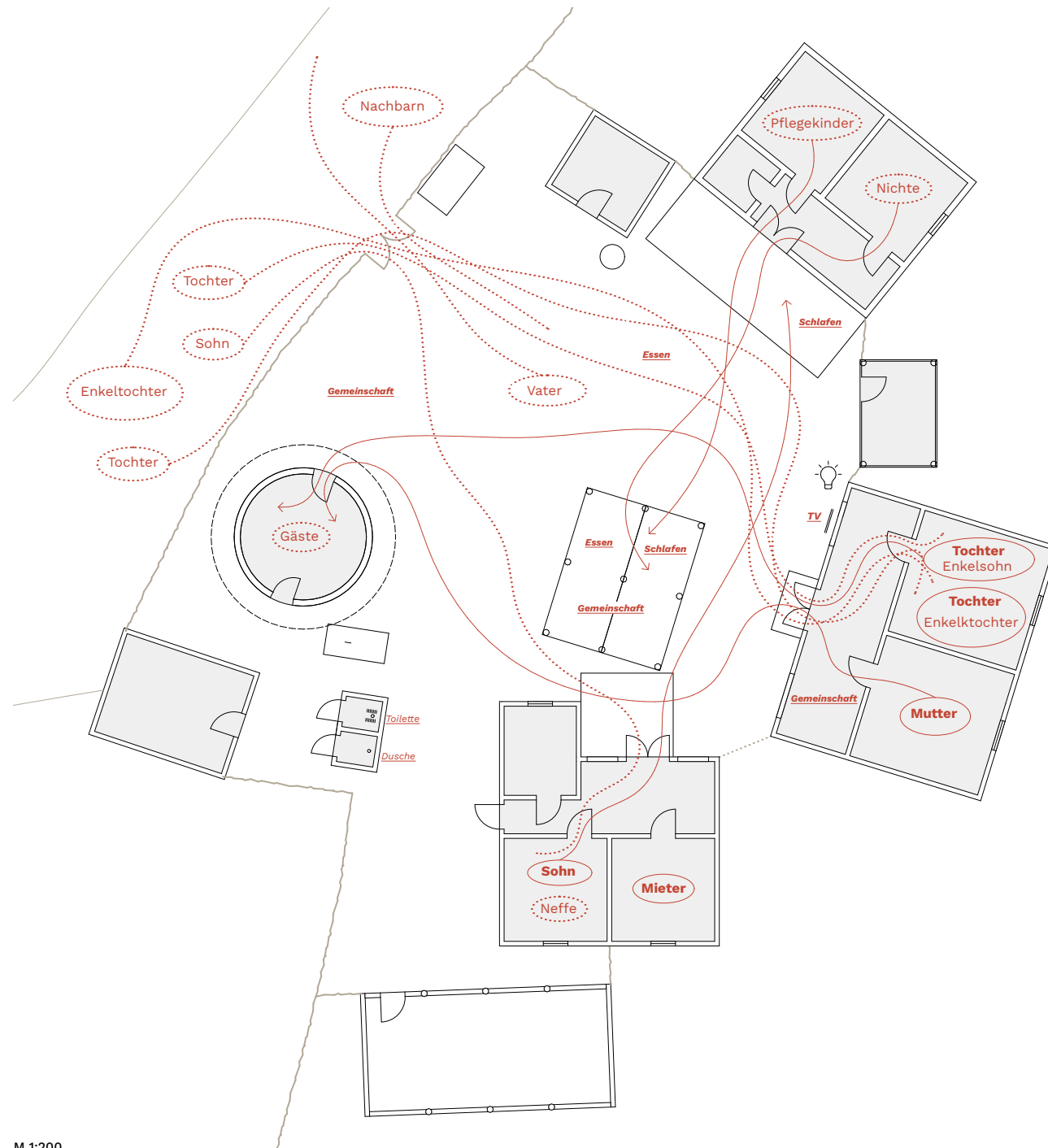
Wohnen

Wohnen in Mako gestaltet sich dynamisch. Räume werden flexibel und in zeitlicher Überlagerung genutzt, die Belegung von Zimmern wird regelmäßig an neue Bedarfe angepasst und ändert sich mit den Jahreszeiten. Kinder aus Familien in Mako wachsen oft zeitweise bei verwandten Familien in anderen Orten auf, dafür werden deren Kinder nach Mako geholt. Trotz flächeneffizienter Grundrisse ergibt sich so eine äußerst effiziente Raumausnutzung.

Die Anzahl der Bewohner:innen auf Marlys Hof variiert zwischen etwa 5 und 17 Personen. Der Grundriss rechts illustriert eine Momentaufnahme im März 2025. Einige Kinder und Enkelkinder wohnen fest zuhause, andere kommen nur während der Schulferien zu Besuch. Marly nimmt immer wieder Pflegekinder auf, regelmäßig kommt Besuch oder Verwandte wohnen zeitweise bei ihr. Ein Zimmer ist an einen im Ort stationierten Polizisten vermietet. Der Familienvater betreibt ein Campement außerhalb Makos – er wohnt nicht auf dem Hof.

Geschlossene Räume dienen vorwiegend zum Schlafen und zum staubfreien Verstauen von Kleidung und persönlichen Gegenständen. Flächen des Aufenthalts und der Begegnung sind besonders offene, überdachte Bereiche – sie schützen in der Regenzeit vor Regen und in der Trockenzeit vor Sonne, sie sind gut belüftet und zugänglich. Gleichzeitig sind den Bewohner:innen Zäune, Türen und abschließbare Bereiche sehr wichtig, in erster Linie um Tiere fernzuhalten und Wertsachen zu sichern.

Das Zusammenleben zeichnet sich durch einen starken Gemeinsinn aus, Rückzugsorte gibt es kaum. Treffpunkt ist der Hof in der Mitte, wo gemeinsam gegessen oder Tee getrunken wird.



M 1:200



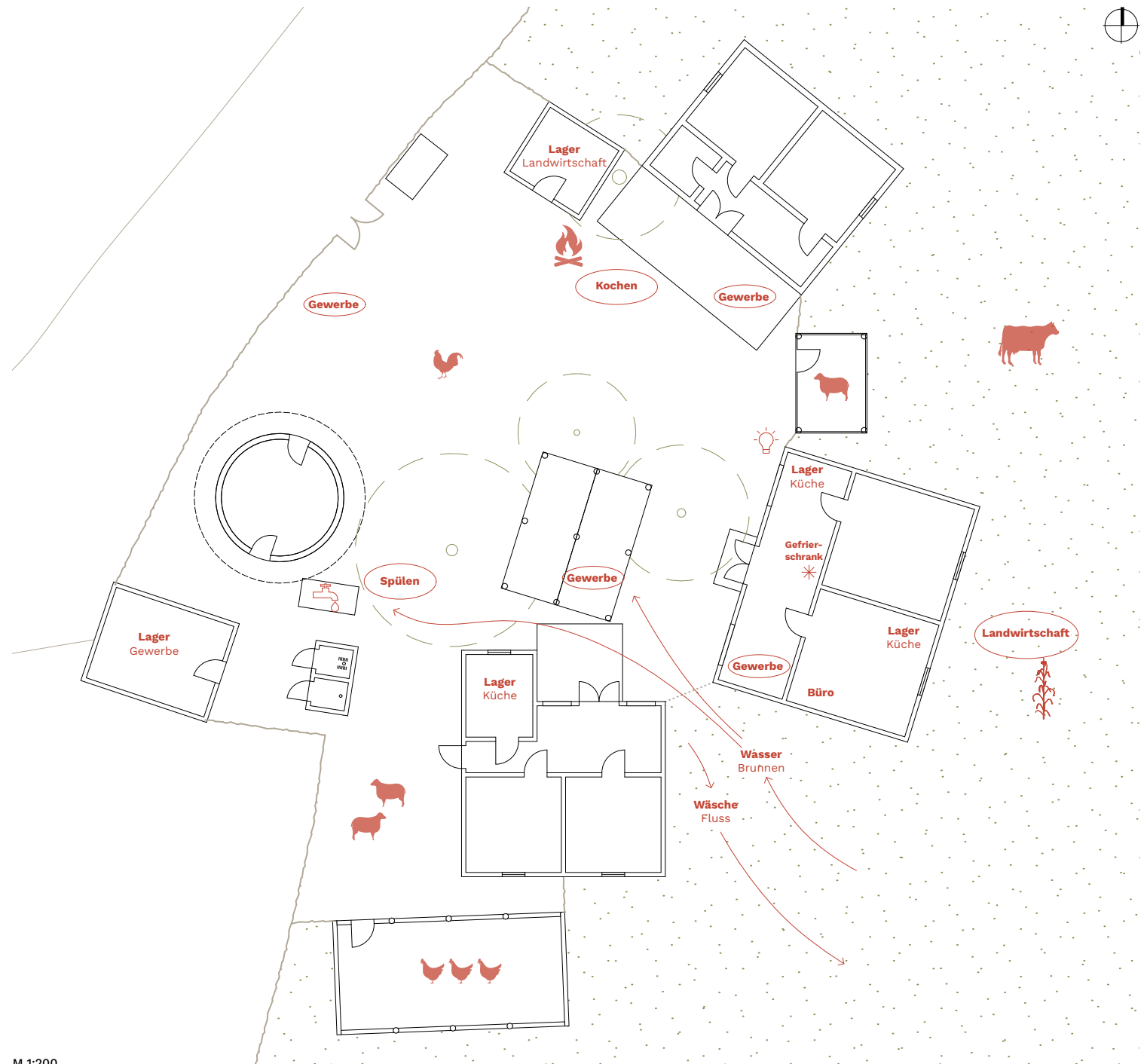
Hauswirtschaft

In und um Marlys Häuser herum findet parallel eine weitere Nutzungsebene statt: Hauswirtschaft, Landwirtschaft und Kleingewerbe.

Kochen, Abwasch, die Herstellung von Lebensmitteln für den Verkauf, die Kinderbetreuung sowie der Kosmetiksalon ereignen sich im Hof und in den Erschließungsflächen der Gebäude. Nutztierhaltung kommt hinzu. Hinter den Häusern befinden sich Acker und Kuhweide, durch die der tägliche Weg zum Brunnen führt. Außerdem gibt es eine Masthähnchenfarm.

Gekocht wird im Freien auf Holzfeuer, Kohle und Gas. Seit dem Anschluss an das Stromnetz ist das Betreiben von Gefrierschränken und die Beleuchtung des gesamten Geländes in den Abendstunden möglich, was neue Wirtschaftszweige eröffnete. Da fließendes Wasser aus dem Wasserhahn teuer ist, wird es vorwiegend als Trinkwasser genutzt. Wäsche wird von Hand am Fluss gewaschen und auf dem Zaun getrocknet.

Der Haushalt ist vertikal organisiert: Die Bodenebene ist für alle, auch die Tiere, zugänglich. Von der Sitzebene werden Tiere vertrieben, sie kann jedoch nicht unbeaufsichtigt bleiben. Auf halber Stehhöhe werden Gegenstände wie Besteck verstaut, an die Kleinkinder nicht herankommen, ältere Kinder, die im Haushalt mithelfen, aber schon. Auf niedrigen Dächern werden Dinge gelagert, die selten gebraucht werden oder auf die nur die Erwachsenen Zugriff haben sollen, zum Beispiel Taschenlampen. Die höchste Ebene ist der Mutter vorbehalten – das Geschirr für besondere Anlässe kommt in den Schrank hinter der abschließbaren Schlafzimmertür.



Materialität

Die Rundhütte besteht aus tragendem Mauerwerk aus Lehmsteinen (Adobe) mit Zementputz, einem Dachstuhl aus Bambus mit Schilfgrasdeckung und Türen aus Kanthölzern und Wellblech. Das ältere Wohnhaus ist eine ähnliche Adobe-Konstruktion mit einer Dachunterkonstruktion aus Palmholz, gedeckt mit Wellblech. Die neueren Gebäude bestehen aus Stahlbetonskeletten mit Ausfachungen aus Beton-Hohlblocksteinen, Fenster und Türen sind aus Stahl mit Lamellen und ohne Verglasung. Wandflächen sind teilweise gestrichen, Fußböden teilweise gefliest, ansonsten Sichtestrich. Ställe und Nebengebäude sind einfache Konstruktionen aus Baumstämmen, Bambus und Plastikfolie.

Das Dach der Rundhütte ist nicht mehr ganz dicht, weshalb sie während der Regenzeit unbeliebt ist. In den heißesten Monaten jedoch versammelt sich oft die gesamte Familie in der Rundhütte, da die Temperaturen unter den Wellblechdächern unerträglich werden. Gerne wird auch draußen im Hof übernachtet, auf einer betonierten Sitzgelegenheit, die zugleich als Arbeitsfläche oder gemeinschaftliches Bett dient.

Bei der neuesten Baumaßnahme wurde der gesamte Hof zubetoniert, teils mit Fliesenbelag. Nun ist der Hof besser sauber zu halten, allerdings kann Wasser nicht mehr versickern. Da es keine Spülbecken gibt, wird Brauchwasser auf dem Boden entleert und sammelt sich an denselben Tiefpunkten – dauerhaft feuchte Ecken entstehen. Moskitos auch während der Trockenzeit sind die Folge.

Nicht nur die gesamte typologische Entwicklung des Wohnungsbaus ist in Marlys Hof repräsentiert, sondern auch die gängige Palette an Baustoffen und Bautechniken.





Innenhof der Fallstudio, Mako, 2025

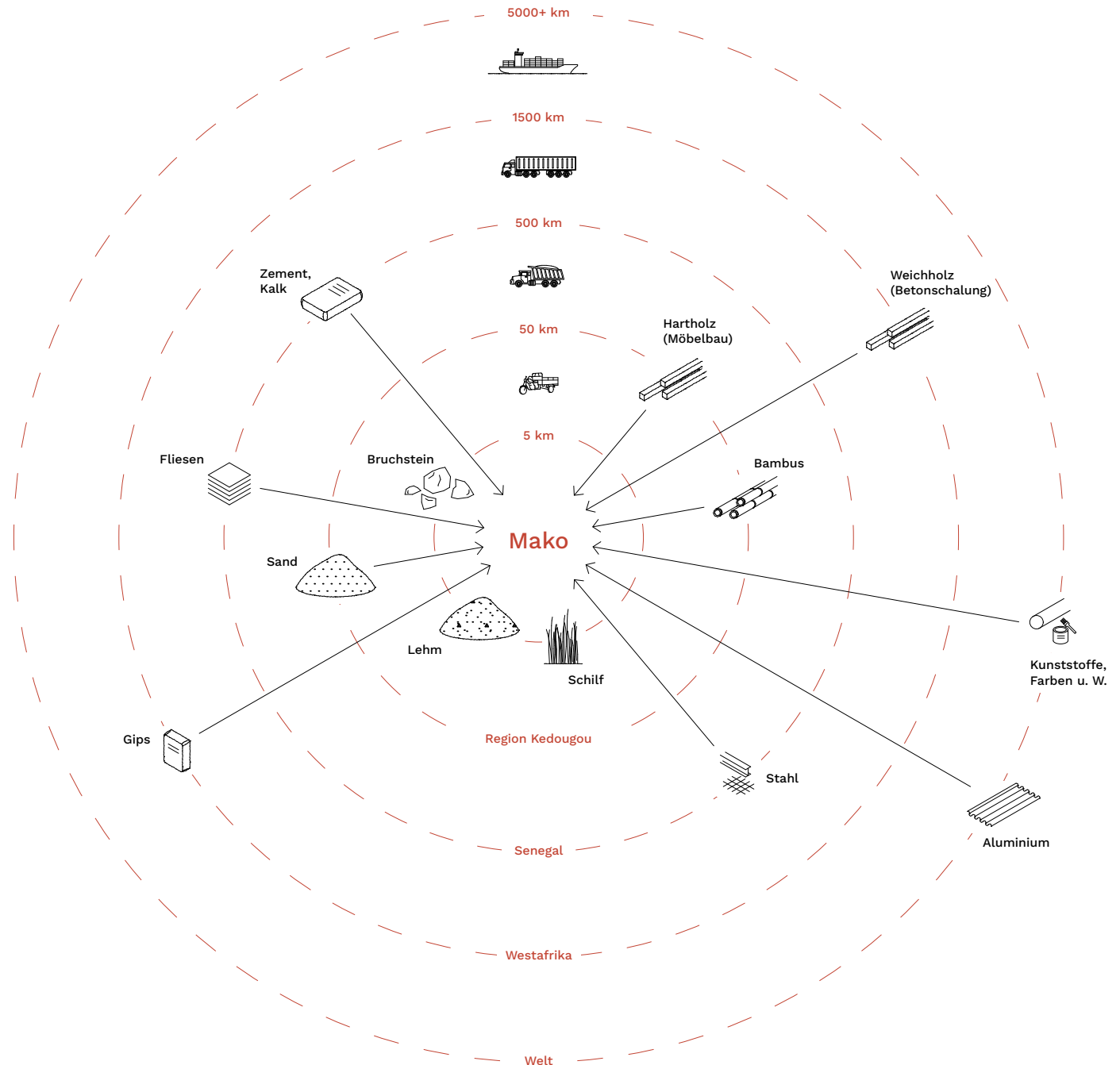
BAUSTOFFE

Die Materialien in Makos Baukultur lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen: lokale und importierte Baustoffe.

Zu den lokalen Baustoffen zählen Naturstein, Lehm, Sand, Bambus, Schilf und Holz. Das Vorkommen von Naturstein beschränkt sich auf Geröll und Flusssteine, es gibt keinen Steinbruch. Die Verfügbarkeit von Lehm, Bambus und Schilf ist gut, während die natürlichen Sandvorkommen bereits zu weiten Teilen abgebaut sind. Holz ist in einer Savannenlandschaft als Baustoff rar, die wenigen buschartigen Wälder sind bereits stark ausgebeutet, das Fällen ist streng reguliert. Außerdem gibt es keine Sägewerke.

Importierte Produkte sind in erster Linie Zement, Stahlprofile und Bleche. Hinzu kommen Fliesen, Gips, Kunststoffe, Lacke, Sanitärprodukte und Weiteres. Senegal hat eine große Zementindustrie und auch Stahlwerke, deren Kapazität allerdings nicht ausreicht, sodass zusätzlich aus Übersee importiert wird. Fliesen werden auch im Senegal produziert. Relativ unbekannt ist Kalk als Bauprodukt, es gibt jedoch einen Hersteller an der Küste. Konstruktionsholz wird aus anderen westafrikanischen Ländern und aus Europa importiert.

Die Transportwege unterscheiden sich dabei erheblich: Lokale Baumaterialien werden manuell abgebaut und legen etwa 50 Kilometer zurück. Ihre Herstellung verursacht geringe Umweltkosten. Zement- und Stahlherstellung sind jedoch besonders energieintensiv, hinzu kommt der Transport. Bei der Herstellung von einer Tonne Zement werden Treibhausgase im Äquivalent von 813 kg CO₂ emittiert.⁽¹⁾



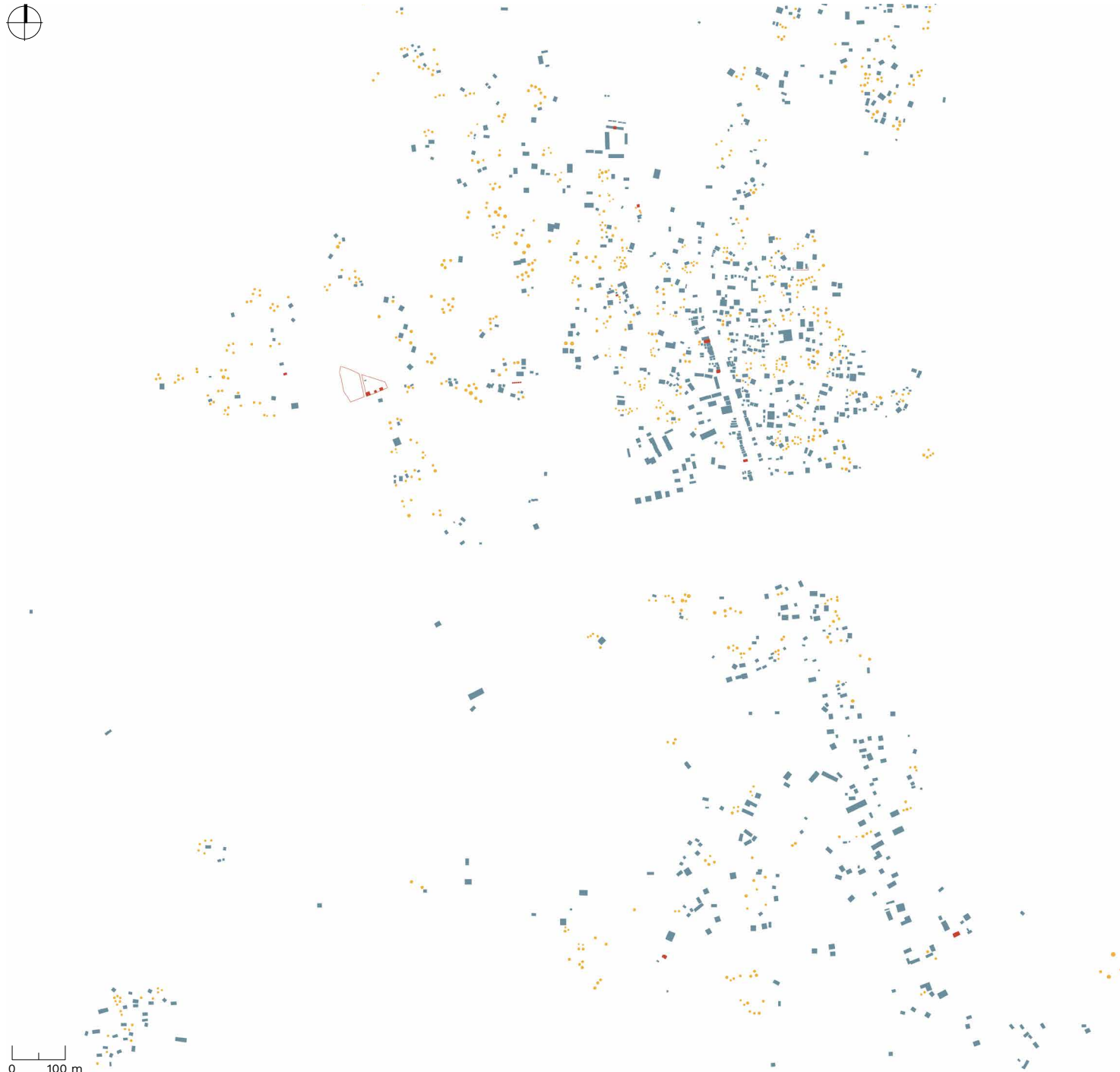
⁽¹⁾ Studio Suddo Neuve 2025. Back to Earth - Urbanization without Depletion. Berlin: Jovis, 21.



Materialpalette



Abbau von natürlichen Sandvorkommen, ca. 20 km von Mako entfernt, 2025



BAUTECHNIKEN

Die Karte zeigt, dass der Betonbau zur vorherrschenden Bauweise in Mako geworden ist. Traditionelle Lehmbauten sind noch präsent, machen aber deutlich weniger der bebauten Fläche aus. Die Betrachtung ist etwas vereinfacht, da manche der rechteckigen Gebäude ebenfalls Lehmbauten sind, nur nicht als solche erkennbar. Rot markiert sind Bauwerke aus gepressten, mit Zement stabilisierten Lehmsteinen (CSEB). Diese Bautechnik ist ein erster Gegentrend, eine ökologischere Alternative zum Betonbau. Sie wurde in der Region maßgeblich durch die Arbeit von Studio Suddo Neue bekannt gemacht und von lokalen Akteur:innen weitergeführt.

Bauprozesse verlaufen in Mako abschnittsweise, oft über mehrere Jahre, und dienen nicht selten als Form der Geldanlage. Bauherr:innen kaufen zunächst Sand und Zement und beauftragen Maurer:innen, um Betonsteine herzustellen. Diese werden auf dem Grundstück zwischengelagert. Sobald ausreichend Kapital zur Verfügung steht, wird in Bewehrungsstahl investiert, um mit dem eigentlichen Bau zu beginnen. Maurer:innen übernehmen in der Regel die Funktion von Generalunternehmer:innen – sie sind für Planung und Ausführung verantwortlich und koordinieren die weiteren Gewerke. Tragwerke werden nicht rechnerisch bemessen, sondern nach Erfahrungswerten der Baumeister:innen dimensioniert und ausgeführt.

- Lehmbauten
- Betonbauten (teilweise Lehmbau, zementverputzt)
- Bauwerke aus CSEB

0 100 m



Bambus-Handel unter Mango-Baum, Tenkoto



Herstellung von Bambus-Matten für Zäune, Mako



Herstellung von Bambus-Möbeln, Tenkoto



First eines Kegeldaches von Innen

Leichtbau mit Bambus

Bambus ist ein weit verbreitetes Baumaterial in Mako und Umgebung. Er findet im Bau von Zäunen, Möbeln und Dächern Verwendung. Die Stangen werden ganz oder aufgespalten zu Hälften und Leisten verbaut. Verbindungen werden aus Draht oder dünnen Bambusbändern realisiert. Auch Rundhütten bestehen manchmal komplett aus einer Bambuskonstruktion. Für Schlafräume wird das Flechtwerk anschließend mit Lehm verschlossen, bei Lagerräumen bleibt es offen und durchlässig. Bambus kommt häufig im Selbstbau zum Einsatz. Geflochtene Matten werden in Standardmaßen seriell produziert und verkauft.

Bambusstangen sind in Mako nur in relativ dünnen Durchmessern von bis zu 3,5 cm erhältlich. Das liegt daran, dass der Bambus jährlich geerntet wird und nur eine Regenzeit lang wachsen kann. Größere Tragwerke aus Bambus zu bauen ist daher kaum möglich.

Eine weitere Herausforderung beim Bauen mit Bambus ist die Dauerhaftigkeit. Die Stangen werden von Schädlingen und Pilzen befallen und müssen nach etwa drei Jahren erneuert werden. In Mako wird Bambus unbehandelt verbaut, Methoden zur Konservierung sind nicht bekannt. International haben sich Techniken wie ein Tauchbad in Borsäure etabliert.⁽¹⁾ Für dünne Stangen in großer Stückzahl scheint der Aufwand jedoch unverhältnismäßig.

Bambus ist ein regionaler, nachwachsender Baustoff mit langer Tradition in Makos Baukultur. Sein Einsatz bleibt allerdings auf leichte, austauschbare Bauteile beschränkt.

(1) Minke, Gernot 2016. Building with Bamboo. Basel: Birkhäuser.



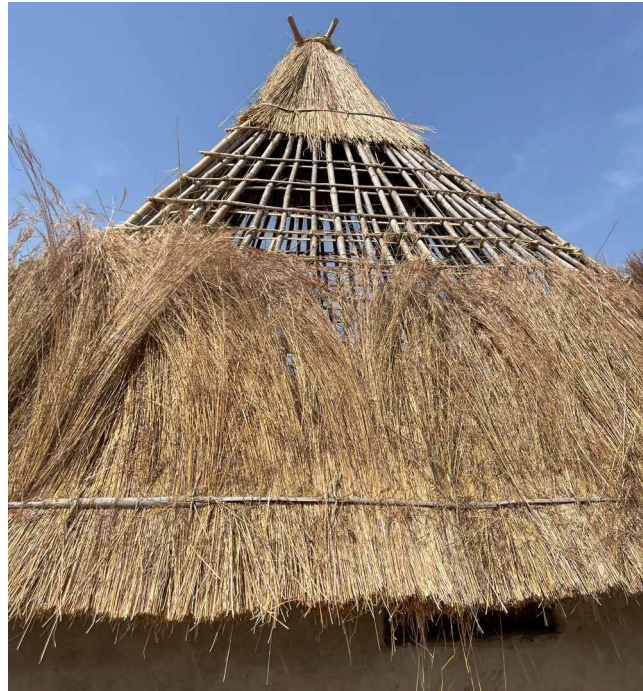
Rundhütte aus Bambus-Flechtwerk im Bau, Niemenike

Dacheindeckungen aus Schilf

Dächer wurden in Mako früher mit Schilfgras gedeckt, heute wird dieses meist durch Wellblech ersetzt. Das Schilfgras wächst wild während der Regenzeit, stirbt während der Trockenzeit ab und wird dann manuell geerntet. Es ist kostengünstig und flächendeckend verfügbar. Die Dächer sind luftdurchlässig und sorgen für ein gutes Innenraumklima. Der Nachteil von Schilf als Dachdeckung ist, dass es regelmäßig erneuert werden muss.

Natursteinmauerwerk

Bauten aus Naturstein bilden eher eine Ausnahme in der Region. Eine ausgeprägte handwerkliche Tradition im Bruchsteinmauerwerk gibt es nicht. Auf dem Baugrundstück gesammelte Steine, meist Granit oder Laterit, werden gerne für Fundamente und als Zuschlag im Beton verwendet. Im Bild ist eine Rundhütte im Bau zu sehen, bei der Natursteine mit Zementmörtel zu einer Mauer aufgeschichtet wurden.



Eindecken eines Daches, Niemenike



Rundhütte aus Naturstein im Bau, Niemenike



Schilfgras, Mako



Möbelbau aus regionalem Hartholz



Kanthölzer als Tragwerk für Dächer



Schreinerei in Kédougou

Holzverarbeitung

Schreinerei ist ein wichtiges und traditionsreiches Handwerk in Mako. Schreinereien mit maschineller Ausstattung sind ausschließlich in der Nachbarstadt Kédougou zu finden. Sie haben sich auf den Bau von Möbeln und Türen spezialisiert. Auf der Baustelle spielt Holz eine kleinere Rolle, da es in dieser waldarmen Region rar und teuer ist.

Lokale Harthölzer werden in naheliegenden Wäldern geschlagen. Stämme werden mit der Kettensäge in Bohlen geschnitten, diese dann in der Werkstatt abgerichtet und auf Dicke gehobelt. Sägewerke gibt es nicht. Verbreitete Holzarten sind Wenge (*Millettia laurentii* De Wild., Fabaceae) und westafrikanische Mahagoniarten (zum Beispiel *Khaya senegalensis*). Die Forstwirtschaft ist streng reguliert, zum Fällen von Bäumen werden Lizenzen vergeben. Die Baumbestände stehen durch das Sammeln von Feuerholz und illegalen Holzschlag unter Stress.

Im modernen Baugewerbe in Mako sind Schreiner:innen für den Bau von Dächern zuständig. Als Tragkonstruktion kommen mit der Machete behauene Kanthölzer aus Palmen oder sägeraue Kanthölzer aus Hartholz zum Einsatz. Die Querschnitte der Balken sind meist quadratisch und relativ klein, ca. 8x8 cm ist gängig. Für Betonschalungen sind sägeraue Bretter aus Hartholz erhältlich.

Im Baustoffhandel in Kédougou findet sich außerdem importiertes Weichholz wie Fichte aus Europa und Samba (*Abachi*, *Triplochiton scleroxylon* K. Schum., Sterculiaceae) aus der Elfenbeinküste. Dieses ist maßhaltiger, da es in industriellen Sägewerken verarbeitet wird. Eingesetzt wird das importierte Konstruktionsvollholz vor allem als Betonschalung bei größeren Bauaufgaben.

Traditioneller Lehmbau

Lehmbau war lange Zeit die dominierende Bauweise in der Region. In der Gesellschaft hat sich über Jahrzehnte ein enorm wertvoller Wissens- und Erfahrungsschatz gesammelt, der immer mehr verloren zu gehen droht. Auch wenn Lehmbau heute in Mako nicht den gleichen Status wie der Betonbau genießt, wird er dennoch weiterhin praktiziert. Während die Rundhütten früher im Selbstbau errichtet wurden, werden heute Maurer:innen mit den Bauaufgaben betraut. Inzwischen ist es schwieriger, in Mako eine Expert:in für Lehmbau zu finden als für Betonbau. Im März 2025 waren hier Baumeister:innen aus Guinea auf Lehmbaustellen tätig.

Verschiedene Lehmbautechniken sind in Mako anzutreffen:

„**Wattle and Daub**“: Eine Mischung aus Lehm und Schilf wird auf ein Flechtwerk aufgetragen.

„**Wellerbau**“: Lehm wird von Hand zu einer tragenden Wand aufgeschichtet.

„**Adobe**“: Luftgetrocknete Lehmsteine, mit Schilf- oder Lianenfasern armiert, ermöglichen tragendes Mauerwerk.

Als Ausgangsmaterial dient meist entweder eine „Basalt“ genannte Lehmerde oder eine rötliche Lehmerde namens „Laterit“. „Basalt“ eignet sich für „Wattle and Daub“ und „Adobe“, „Laterit“ für „Wellerbau“ und „Adobe“.

Mit den traditionellen Lehmbautechniken können ausschließlich eingeschossige Bauwerke realisiert werden. Fußböden wurden traditionell als Stampflehmböden aus einer Mischung aus Lehm, Termitenhügel und Kuhdung ausgeführt. Innenwände hat man mit Lehmputz aus helleren Erden verputzt. Als Witterungsschutz für die Außenwände diente ein großer Dachüberstand und ein Lehmputz aus derselben Mischung wie der Fußboden.

Nach jeder Regenzeit wurden die Lehmbauten renoviert. Diese Instandhaltungskultur wird heute nicht mehr praktiziert. Stattdessen wird versucht, Lehmbauten durch das Aufbringen von Zementputz witterungsbeständiger zu machen. Der Putz blättert jedoch aufgrund fehlender mechanischer Verzahnung schnell ab. Im Lehmmauerwerk kommt heute oft Zementmörtel statt Lehmmörtel zum Einsatz. Lehmbauten in Mako sind nicht immer als solche erkennbar – oft wird bewusst die Ästhetik der Betonbauten angestrebt.



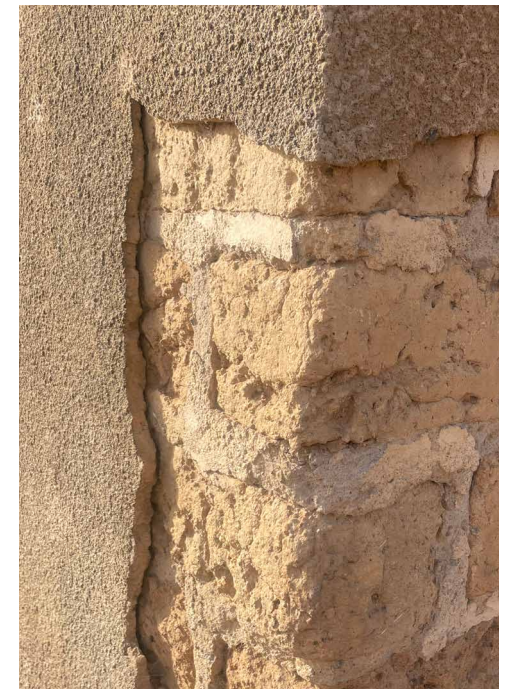
Wellerbau



„Wattle and daub“



Gewerbeeinheit aus Adobe, verputzt und gestrichen



Zementputz auf Mauerwerk aus Adobe



Mauerwerk aus Adobe, Baustelle in Mako, 2025



Wohnhaus in Betonbauweise, Neubaugebiet in Kédougou, 2025

Betonbau

Bei den Betonbauten in Mako handelt es sich um Skelettbauten mit Ausfachung. Die Wände werden aus Beton-Hohlblocksteinen im Läuferverband gemauert, anschließend werden die Stahlbeton-Stützen ausgegossen. Fundamente und Ringbalken bestehen aus Stahlbeton, die Stürze sind meist als durchgehender Ringbalken ausgeführt. Während die Hohlblocksteine in größeren Städten geliefert werden, erfolgt ihre Herstellung in Mako oft von Hand auf der Baustelle.

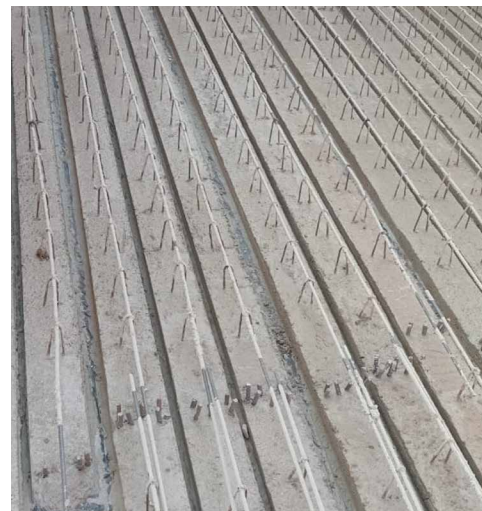
Verbreitet sind leichte, ungedämmte Blechdächer. Flachdächer und Geschossdecken von mehrgeschossigen Häusern bestehen dagegen aus Beton. Massive Stahlbetondecken sind wegen ihres hohen Bedarfs an Schalbrettern selten; häufiger kommen Einhängedecken zum Einsatz: Zwischen vorgefertigte Stahlbetonträger werden Beton-Deckensteine eingehängt, nach dem Ausgießen der Träger und dem Aufbringen eines Beton-Estrichs bildet die Decke einen Verbund.

Sind die Rohbauarbeiten abgeschlossen, werden die Wände verputzt und Fußböden aus Beton gegossen. Anstriche und Fliesen sind beliebt, doch viele Hausbesitzer:innen lassen ihre Gebäude aus Kostengründen im Rohbau-Zustand.

Diese Bauweise ist in Senegal und vielen anderen Ländern weit verbreitet. Sie ist skalierbar, ermöglicht das mehrgeschossige Bauen und trägt zur schnellen Schaffung neuen Wohnraums bei. Die Kehrseite sind der hohe Ressourcenverbrauch und die Verdrängung des traditionellen Handwerks. Die Kosten für Zement und Bewehrungsstahl machen das Bauen für viele Familien zudem kaum bezahlbar; so stieg der Preis für einen 50-kg-Sack Zement in Mako von etwa 5,30 € im Jahr 2020 auf 6,80 € in 2025.



Herstellung von Beton-Hohlblocksteinen



Vorfertigung von Stahlbetonträgern



Einhängedecke mit Deckensteinen aus Beton

Metallbau

Der Metallbau ist in der Region stark vertreten – in Mako und Kédougou reihen sich Schlossereien aneinander. Hauptsächlich werden Türen und Fenster aus Stahl gefertigt. Fenster bestehen typischerweise aus einem Gitter als Einbruchschutz und Öffnungsflügeln mit verstellbaren Lamellen zur Verschattung sowie als Sicht- und Windschutz. Wünschen Bauherr:innen verglaste Öffnungselemente, wird auf ein System aus Alu-Steckprofilen zurückgegriffen. Von Vordächern bis zu Spindeltreppen ist fast alles als Schlosserarbeit realisierbar. Metallbau gehört jedoch zu den kostenintensiven Gewerken.



Typisches Lamellen-Fenster in Schlosserei in Kédougou



Typischer Stahl-Tür in Schlosserei in Kédougou



Verglaste Terrassentür aus Alu-Steckprofilen



Außenliegende Spindeltreppe an einem Wohngebäude in Mako



Restaurant / Laden, 2019



Demonstrationsgebäude „Suddo Neue“, 2019



Ein-Raum-Haus, 2020



Lager / Laden, 2020



Wohnhaus, 2020



Klassenzimmer, 2021



Reallabor, 2022



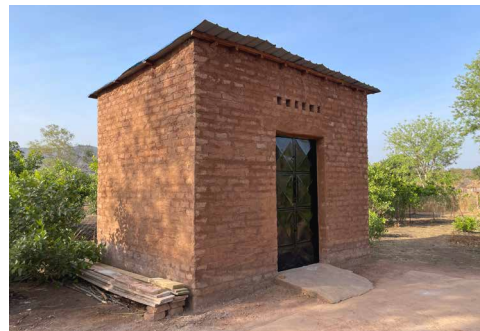
Wohnhaus, 2022



Büro, 2023



Grundstückseinfassung, 2024



Atelier, 2024



Villa, 2025

Bauen mit CSEB

CSEB steht für „Compressed Stabilized Earth Block“ und meint Lehmsteine, die mit einer Steinpresse gepresst und mit etwa 6 % Zement stabilisiert wurden. Diese Technik verbindet die Vorteile des traditionellen Lehmbaus und des Betonbaus: CSEB lassen sich standardisiert fertigen, eignen sich für tragendes, mehrgeschossiges Mauerwerk und bieten im Gegensatz zu Hohlblocksteinen mehr thermische Masse. Durch die Stabilisierung soll der Lehm witterungsbeständig und feuchteunempfindlich werden, gleichzeitig reduziert sich der Zementverbrauch gegenüber Beton. Das Bauen mit CSEB gilt als ökologische und soziale Revolution zurück zum Naturbaustoff Lehm und wurde von namhaften Architekt:innen wie Francis Kéré bekannt gemacht.

In Mako wurde der Baustoff von Studio Suddo Neue erforscht und in die Bauwirtschaft eingeführt. Ausgehend von einem Demonstrationsgebäude im Jahr 2019 entstanden diverse Folgebauten von verschiedenen Bauherr:innen und Handwerker:innen. Als flächendeckende Alternative zu Betonsteinen konnten sich CSEB bisher jedoch nicht durchsetzen. Gründe sind mangelnde Akzeptanz, fehlendes Fachwissen zur Ausführung und die schwierigere Handhabung bei Transport und Lagerung.

Kritisch betrachtet handelt es sich bei CSEB nicht um einen reinen Lehmbaustoff, sondern um Magerbeton. Durch das Abbinden des Zements gehen die feuchteregulierenden Eigenschaften des Lehms verloren, und die Wiederverwendbarkeit ist stark eingeschränkt. CSEB sind ein wichtiger erster Schritt weg vom reinen Betonbau, haben durch ihren Zementanteil jedoch eine schlechtere Ökobilanz als reine Lehmstoffe.

Attika ①



2020:
Mauerabschluss
verputzt, ohne Gefälle



2022:
Schäden am
Putz, Schäden
am Mauerwerk,
Algenbildung



2022:
Attika-Abdeckung aus
Stahlblech lackiert
-> 2025:
intakt

Entwässerung ②



2020:
Flachdach im Gefälle
mit Estrich, Attika-
Entwässerung, ohne
Abdichtung, kein
Notüberlauf



2023:
Abflussleistung
zu gering,
Feuchteschäden in
Decke und Attika



2024:
Zweiter Auslauf,
Notentwässerung,
-> 2025:
Feuchteschäden
reduziert

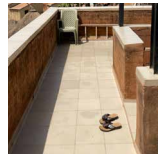
Flachdach ③



2020:
Flachdach mit Estrich,
Gefälle zu einer Seite,
keine Abdichtung,
Entwässerung über
Speier

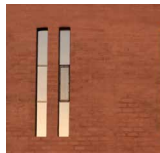


2023:
Abflussleistung zu
gering, Wassereintrich
in Decke



2024:
Gefälle zu 4 Seiten,
Fliesen-Belag
-> 2025:
Fläche intakt, Ausläufe
undicht

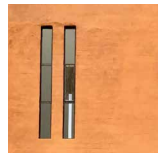
Fassade ④



2020:
Sichtmauerwerk,
kein Dachüberstand /
Attikaabdeckung, keine
Tropfkanten

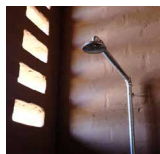


2022:
Verwitterung, Schäden
an Mörtelfugen,
Algenbildung



2022:
Instandsetzung,
Attikaabdeckung
-> 2025:
Attika intakt, Fassade
verwittert

Feuchtraum (Dusche) ⑤

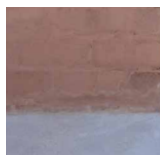


2020:
Sichtmauerwerk,
Sockel Stahlbeton,
Zement-Estrich als
Bodenbelag



2025:
Ablagerungen an
Wänden, Feuchte-
Schäden oberhalb des
Sockels

Sockel ⑥



2020:
Mauerwerk auf
Stahlbeton-
Fundament, ohne
Feuchtigkeitssperre



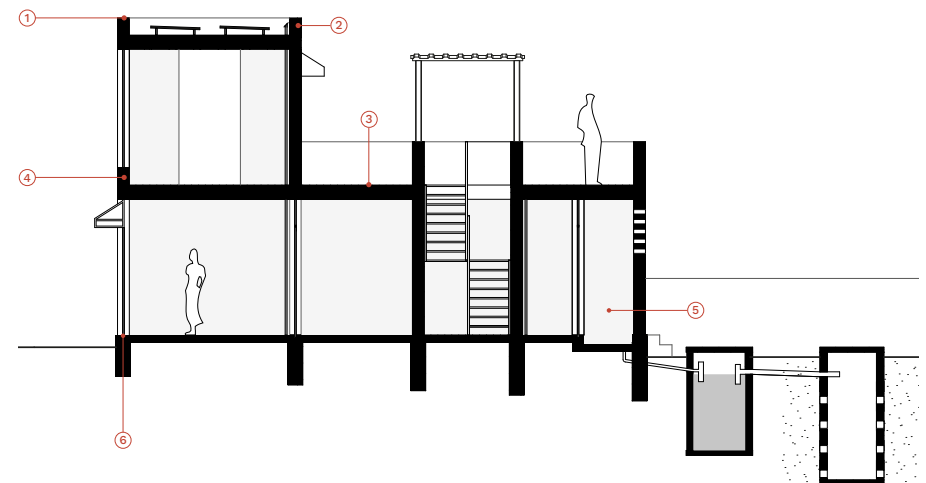
2025:
Feuchteschäden im
Sockelbereich innen

Instandhaltung von CSEB-Gebäuden

Der Instandhaltung von Gebäuden aus CSEB-Mauerwerk soll hier etwas Aufmerksamkeit gewidmet werden, denn die Erfahrung von Studio Suddo Neue zeigt, dass CSEB nicht so dauerhaft und wartungsarm sind wie Betonsteine. Die Idee hinter dem Bauen mit CSEB verspricht, durch den Austausch eines einzelnen Baustoffs in der konventionellen Bauwirtschaft zu intervenieren und den Baustoff Lehm konkurrenzfähig zu machen, indem er ähnlich witterungsbeständige und tragfähige Bauteile hervorbringt wie Beton. Dieses Versprechen wurde jedoch nicht eingelöst.

Die Dokumentation zeigt konstruktive Details des Referenzgebäudes „Suddo Neue“ und betrachtet Ausführung, Schäden und Reparatur. „Suddo Neue“, ein zweigeschossiges Stadthaus an der Hauptstraße von Mako, ist im Stil der benachbarten Betonbauten konzipiert, jedoch in tragendem Mauerwerk aus CSEB ausgeführt. Es wird deutlich, dass die exponierte Fassade des CSEB-Sichtmauerwerks bereits nach zwei Jahren durch Regen beschädigt ist: Erosion und Algenbildung treten auf. Auch das Mauerwerk im Sockelbereich ist durch aufsteigende Feuchtigkeit angegriffen. Weitere Probleme sind undichte Flachdächer und eine unzureichende Entwässerung der Dachflächen.

Aus diesen Beobachtungen lässt sich der Schluss ziehen, dass es nicht zielführend ist, lediglich einen Baustoff auszutauschen. Stattdessen sollten Architektur und Baukonstruktion als Ganzes neu gedacht werden.



Längsschnitt durch Demonstrationsgebäude

Quelle: Archiv, Project Mako e.V.

INFRASTRUKTUR

Die Infrastruktur in Mako ist nicht das Thema dieser Masterarbeit, soll aber zum besseren Verständnis der Wohn- und Baukultur vor Ort kurz umrissen werden.

Wasser

Überall im Dorf gibt es Schachtbrunnen, die meist von mehreren Familien gemeinsam genutzt werden. Zusätzlich gibt es einige Brunnen mit Handpumpen auf öffentlichen Plätzen. Ein zentraler Brunnen mit Wasserturm versorgt über ein Leitungsnetz entlang größerer Straßen immer mehr Haushalte mit fließendem Wasser.

Sanitär

Lange waren Latrinen außerhalb der Wohnhäuser üblich: Ein Loch wurde gegraben und mit einem spiralförmigen Bambuszaun als Sichtschutz versehen. War das Loch voll, wurde ein neues gegraben. Durch die immer dichtere Bebauung ist dieses Konzept aus hygienischen Gründen nicht mehr praktikabel. Inzwischen sind gemauerte, unterirdische Tanks zur Aufnahme des Abwassers aus Toiletten üblich. Diese Tanks können mit einem speziellen Tanklastwagen entleert werden, was aber aus Kostengründen oft vermieden wird. Wahrscheinlich sind die Tanks selten ganz dicht. Studio Suddo Neuve hat eine Alternative aus einem Klärbecken und einer Sickergrube erprobt. Mako verfügt weder über eine Kanalisation noch sind entsprechende Pläne vorhanden.

Kochen

In Mako wird draußen auf dem Boden gekocht, wobei Feuerholz, Kohle und Gasflaschen als Energiequelle dienen. Der Abwasch erfolgt in Plastik-Wannen. Ein Raum wird nur zum Lagern von Lebensmitteln benötigt. In Wohnhäusern in Kédougou entstehen dagegen immer mehr innen liegende Küchen mit Arbeitsflächen, Herd und Spüle.

Elektrizität

Die Stromversorgung in Mako beruhte lange auf dezentralen Photovoltaikanlagen und 12-Volt-Installationen für Beleuchtung und das Laden von Handys. Dieselgeneratoren wurden nur zum Betreiben von Maschinen im Handwerk eingesetzt. Im Jahr 2023 kam der Anschluss an das Stromnetz, was erhebliche Veränderungen brachte: Es gibt nun Straßenbeleuchtung, private Haushalte betreiben Kühlschränke, Klimaanlagen werden immer beliebter. Der Strom wird aktuell aus Mali bezogen, zukünftig soll ein neues Wasserkraftwerk in der Nähe von Mako die Energie liefern.



Koch-Situation in einem Hof in Mako

RAUMKLIMA

Versuchsgebäude:

1. Lehm + Schilf



Lage: **freistehend**

Orientierung: **Norden**

Geschosse: **1**

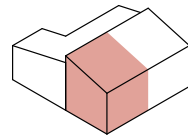
Raumvolumen: **30,2 m³**

Belüftung: **Tür, Dach**

Wände:
Lehm/Holz, „Wattle & Daub“

Dach:
Kegeldach, Bambus-Unterkonstruktion mit Schilf-Deckung

2. Beton + Blech



Lage: **freistehend**

Orientierung: **Süden**

Geschosse: **1**

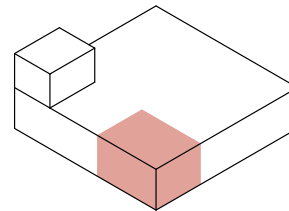
Raumvolumen: **40,5 m³**

Belüftung: **Tür, Fenster**

Wände:
Stahlbetonskelet mit Beton-Hohlsteinen

Dach:
Pulldach, Holz-Dachstuhl mit Wellblech-Deckung, ungedämmt

3. Beton + Beton



Lage: **freistehend**

Orientierung: **Osten**

Geschosse: **1**

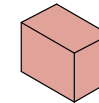
Raumvolumen: **57,0 m³**

Belüftung: **Tür, Fenster**

Wände:
Stahlbetonskelet mit Beton-Hohlsteinen

Dach:
Flachdach, Stahlbeton-Träger mit Beton-Hohlsteinen

5. CSEB + Blech + Lehm



Lage: **freistehend**

Orientierung: **Nord-West**

Geschosse: **1**

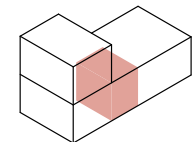
Raumvolumen: **47,6 m³**

Belüftung:
Tür, Fenster, Belüftungsschlitze

Wände: **Mauerwerk aus CSEB**

Dach:
Pulldach, Holz- Bambus-Dachstuhl mit Trapezblech-Deckung, Dämmung 10 cm aus Stroh-Leichtlehm

5. CSEB + CSEB



Lage:
2-seitig angrenzende Bebauung

Orientierung: **Osten**

Geschosse: **2**

Raumvolumen: **18,9 m³**

Belüftung: **Tür**

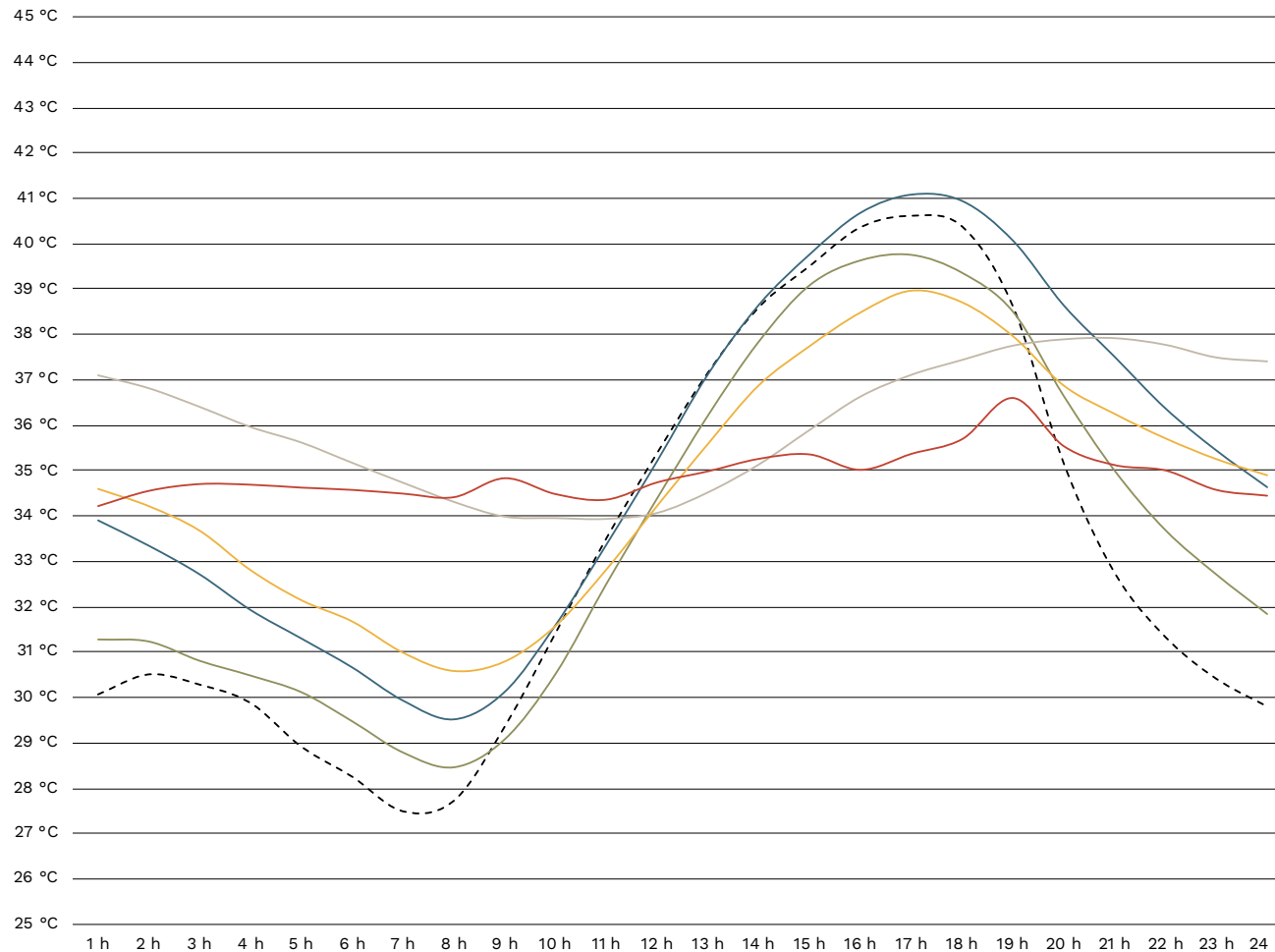
Wände: **Mauerwerk aus CSEB**

Decke / Dach:
Stahlbeton-Träger mit CSEB-Deckensteinen

Temperatur

Um die Problematik der zu hohen Raumtemperaturen der Betonbauten in Mako zu verdeutlichen, wurden im Rahmen dieser Masterarbeit Aufzeichnungen durchgeführt. Als Versuchsgebäude dienten eine Lehmhütte, ein Betonhaus mit Blechdach, ein Betonhaus mit massivem Flachdach, ein Gebäude aus CSEB mit gedämmtem Blechdach und ein CSEB-Bauwerk mit massiven Decken. Dargestellt ist der Temperaturverlauf über einen Tag in jeweils einem Raum während der heißesten Jahreszeit. Anzumerken ist, dass die betrachteten Räume unterschiedlich groß sind und sich auch in anderen Kriterien als der Materialität unterscheiden.

Die Rundhütte aus Lehm mit Schilfdach schneidet am besten ab. Sie folgt der Kurve der Außentemperatur, kühlt nachts herunter und heizt sich tagsüber auf, bleibt jedoch kühler als die Außentemperatur. Das Betonhaus mit Blechdach hat das schlechteste Raumklima: zu fast jeder Tageszeit ist es hier heißer als draußen. Interessant sind die Gebäude mit massiven Decken: Dank ihrer thermischen Masse wird die Temperaturkurve abgeflacht, allerdings fehlt die Nachtauskühlung aufgrund mangelnder Belüftung. Die CSEB-Gebäude schlagen sich besser als die Betonbauten, bieten mit 34,7 °C und 34,9 °C im Mittel aber alles andere als ein angenehmes Raumklima. Die ideale Kurve wäre flach und am unteren Ende der Y-Achse angesiedelt. In der Praxis gilt es, zwischen möglichst gleichbleibenden und möglichst niedrigen Temperaturen abzuwägen.



Gemessen in den Wochen vom 21.3. bis 28.3. und 1.4. bis 7.4. im Jahr 2025. Mako, Senegal. Dargestellt sind die gemittelten Werte für einen exemplarischen Tag.

----- Außen (Schatten)

Mittelwert: 33,2 °C
Minimum: 27,5 °C
Maximum: 40,6 °C

————— 1. Lehm + Schilf

Mittelwert: 33,6 °C
Minimum: 28,5 °C
Maximum: 39,8 °C

————— 2. Beton + Blech

Mittelwert: 35,2 °C
Minimum: 29,5 °C
Maximum: 41,1 °C

————— 3. Beton + Beton

Mittelwert: 36,0 °C
Minimum: 33,9 °C
Maximum: 37,9 °C

————— 4. CSEB + Blech

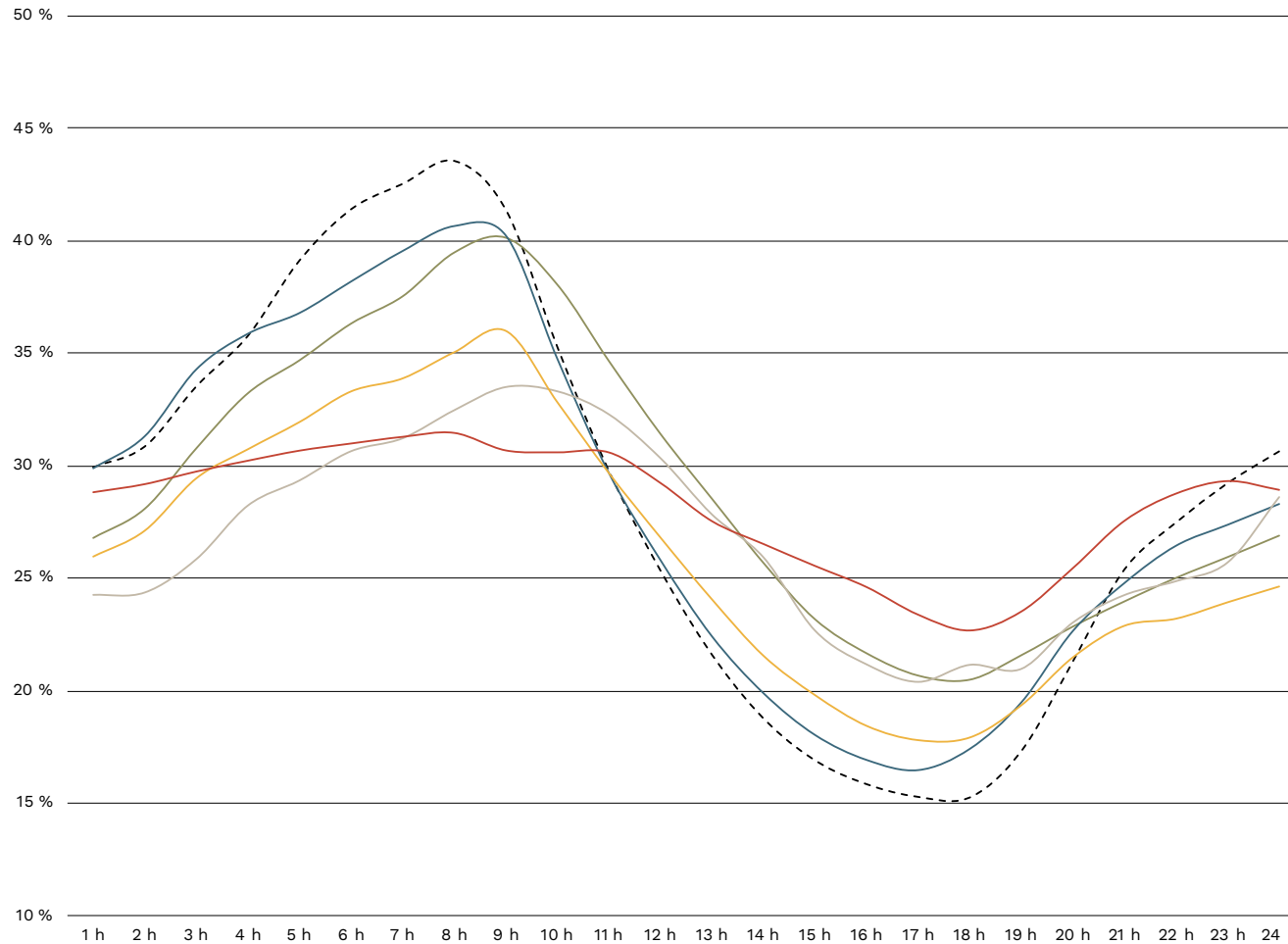
Mittelwert: 34,7 °C
Minimum: 30,6 °C
Maximum: 39,0 °C

————— 5. CSEB + CSEB

Mittelwert: 34,9 °C
Minimum: 34,2 °C
Maximum: 36,6 °C

Relative Luftfeuchtigkeit

Die Messkurven zur relativen Luftfeuchtigkeit verlaufen erwartungsgemäß entgegengesetzt zu den Temperaturkurven, denn kühle Luft kann besser Feuchtigkeit aufnehmen als warme Luft. Bemerkenswert ist die Rundhütte, denn sie schafft es am effektivsten, die Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit zu verzögern und auszugleichen. Dies ist klar auf die feuchteregulierenden Eigenschaften des Lehms zurückzuführen. In einem so trockenen Klima ist das enorm wichtig, denn die relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen hat starken Einfluss auf die Gesundheit der Bewohner:innen.



Gemessen in den Wochen vom 21.3. bis 28.3. und 1.4. bis 7.4. im Jahr 2025. Mako, Senegal. Dargestellt sind die gemittelten Werte für einen exemplarischen Tag.

Außen

Mittelwert: 28,5 %
Minimum: 15,3 %
Maximum: 43,6 %

—————

1. Lehm + Schilf

Mittelwert: 29,1 %
Minimum: 20,5 %
Maximum: 40,1 %

—————

2. Beton + Blech

Mittelwert: 28,2 %
Minimum: 16,5 %
Maximum: 40,7 %

—————

3. Beton + Beton

Mittelwert: 26,8 %
Minimum: 20,4 %
Maximum: 33,5 %

—————

4. CSEB + Blech

Mittelwert: 26,2 %
Minimum: 17,8 %
Maximum: 36,0 %

—————

5. CSEB + CSEB

Mittelwert: 28,2 %
Minimum: 22,7 %
Maximum: 31,5 %



Mehrgeschossiger, verdichteter Wohnungsbau, Medina-Sabodala, 2025

IV. WESTAFRIKANISCHE BAUWENDE

KONZEPT

BAUWENDE JETZT!

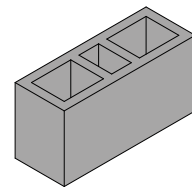
Eine umweltgerechte und sozial nachhaltige Bauwende ist in Mako elementar, um Urbanisierung innerhalb planetarer Grenzen zu ermöglichen. Um die Flächenausdehnung des Ortes zu verlangsamen, bedarf es eines Wandels hin zu mehrgeschossigem Wohnungsbau. Die Architektur muss auf zeitgenössische Wohnbedarfe reagieren und gleichzeitig den Ressourcenverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen des Bauwesens drastisch senken. In der Rückbesinnung auf lokal verfügbare Naturbaustoffe und dem Anknüpfen an die gewachsene Baukultur liegt die Chance für einen ortsbezogenen, klimagerechten Wohnungsbau. Gelingen kann die Bauwende nur, wenn alternative architektonische Konzepte auch kostengünstiger als etablierte Betonbauten zu realisieren sind.

~~CSEB~~

Der Baustoff Lehm spielt für die Bauwende in einer holzarmen Region eine zentrale Rolle. Das Pressen von Lehm zu Steinen verwandelt das traditionelle Material in ein vielseitig einsetzbares, maßhaltiges, modernes Bauprodukt – die erhöhte Druckfestigkeit von gepressten Lehmsteinen erlaubt ihren Einsatz in tragenden, mehrgeschossigen Konstruktionen. Der Schlüssel liegt jedoch nicht in der Stabilisierung mit Zement, sondern in der Bindekraft des Lehms: Aus CSEB werden CEB, gepresste Lehmsteine ohne Zement. CEB bewahren die guten raumklimatischen Eigenschaften von Lehm und sind uneingeschränkt recycelbar. Studio Suddo Neue hat ermittelt, dass die durch die Herstellung in Mako verursachten Treibhausgasemissionen von CEB um 99% geringer sind als die der Betonsteine, die Materialkosten reduzieren sich um 79%.⁽¹⁾ Makos bestehende Infrastruktur zur Herstellung von CSEB erlaubt eine einfache Umstellung auf CEB.

TRAGENDES LEHMSTEINMAUERWERK

Die Anwendung von CEB in tragendem Mauerwerk bringt neue Herausforderungen mit sich: Lehmbau benötigt vollständigen Witterungsschutz, auf Zug beanspruchte Bauteile können nur schwer aus Lehmbaustoffen ausgeführt werden. Was bedeutet dies für den Entwurf und für die Baukonstruktion? Wie können anschließende Bauteile wie Fundamente, Decken und Dächer hergestellt werden? Lässt sich auch hier der Einsatz von Beton und Stahl reduzieren? Welche Raumqualität und Ästhetik charakterisiert Wohnungsbau aus tragendem Lehmsteinmauerwerk in Mako?



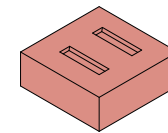
Betonstein

Umweltkosten

515 kg CO₂-eq./m³

Materialkosten

35,- €/m³



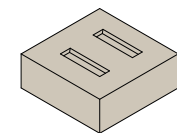
CSEB

Umweltkosten

161 kg CO₂-eq./m³

Materialkosten

13,- €/m³



CEB

Umweltkosten

8 kg CO₂-eq./m³

Materialkosten

7,- €/m³ ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Studio Suddo Neue 2025. Back to Earth - Urbanization without Depletion. Berlin: Jovis, 19.

V.
KONSTRUKTIVE
ANSÄTZE

LEHM
MAUERWERK
BAUTEILE

ANFORDERUNGEN

Zukunftsgerechter Wohnungsbau in Mako erfordert zweigeschossige Bauwerke. Typische Raumgrößen führen zu Decken mit einer Spannweite von etwa 4m in eine Richtung. Raumhöhen sollte aus klimatischen Gründen nicht zu niedrig geplant werden, für die baukonstruktiven Betrachtungen soll hier eine Mindesthöhe von 2,70m Lichte festgelegt werden.

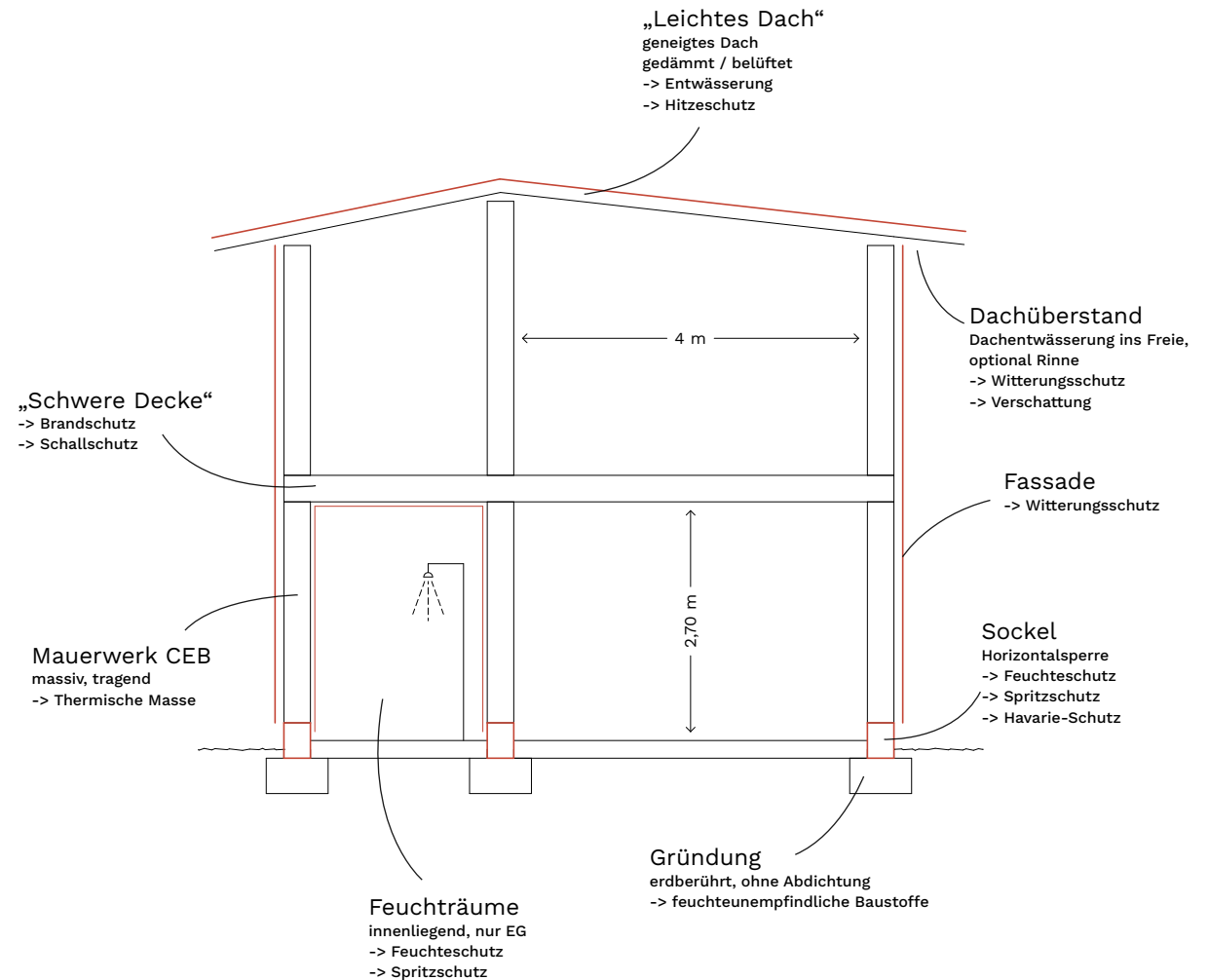
Beim Entwerfen mit tragenden Mauerwerk aus CEB gilt es den Konstruktiven Witterungsschutz zu berücksichtigen, da Lehm ein stark feuchteempfindlicher Baustoff ist; dringt Wasser ein, kann das Mauerwerk statisch versagen. Notwendig sind die Ausbildung eines Sockels und ausreichender Witterungsschutz für die Fassaden.

Gallé Leydi setzt auf das Prinzip einer „schweren“ Geschossdecke und einer „leichten“ Dachkonstruktion. Das Tragwerk der Geschossdecke sollte aus mineralischen Baustoffen bestehen, um im Brandfall ausreichend lange standsicher zu sein, eine gewisse Masse ist für den Schallschutz wünschenswert. Dachkonstruktionen können hingegen schlank und aus biobasierten Baustoffen realisiert werden, die Herausforderung liegt hier im Hitzeschutz.

Um die Baukonstruktion einfach zu halten und Abdichtungs-Problematiken zu vermeiden, empfiehlt es sich, geneigte Dächer statt Flachdächer zu planen. Die Entwässerung ins Freie ist in Makos Architektur üblich und wird auch für diesen Entwurf vorausgesetzt. Eine Entwässerung mittels Rinnen und Fallrohre ist optional.

Innen liegende Badezimmer gelten in Mako inzwischen als erstrebenswerter Standard, sie sollten auch im Lehm-bau ermöglicht werden. Wird die Anordnung von Feuchträumen auf das Erdgeschoss beschränkt, vereinfacht das die Konstruktion erheblich. Im Obergeschoss kann dann auf den Havarieschutz des Lehmsteinmauerwerks verzichtet werden.

Die eingeschränkte Verfügbarkeit industrieller Bauprodukte und die handwerkliche Praxis in Mako führen zu einfachen, wartungsarmen Baukonstruktionen.



HERSTELLUNG CEB



Lehmgrube in Mako Ssou



Hand-Test



Flaschen-Test



Keks-Test

Bodenanalyse

Lehm besteht aus Ton, Schluff, Sand und Kies. Der Ton, das Material mit der feinsten Körnung, wird durch die Aufnahme von Wasser aktiviert und bindet beim Trocknen – die Grundlage sämtlicher Lehm- baustoffe. Wichtig ist zunächst, dass das Ausgangsmaterial frei von organischen Bestandteilen ist und eine gewisse Bindekraft vorhanden ist. Vereinfacht gilt: Je höher der Tonanteil, desto stärker die Bindekraft. Für gepresste Lehmsteine eignet sich ein toniger (10-25% Massenanteil Ton), stark sandiger (55-75% Massenanteil Sand) Lehm.⁽¹⁾

Um Makos Böden kennenzulernen, wurden verschiedene Lehmgruben ausfindig gemacht, Proben entnommen und Feldtests durchgeführt. Untersucht wurden Laterit (A) aus einer verlassenen Grube des Straßenbaus, eine Erde, die auch für die Herstellung von CSEB verwendet wird; ein Boden aus einem Tagebau für die Fliesenindustrie (B); sowie verschiedene Proben einer vor Ort „Basalt“ genannten Lehmerde aus einer traditionellen Lehmgrube sowie dem Werkhof von Studio Suddo Neuve (C, D, E).

Die Beobachtungen zu den Feldtests lassen darauf schließen, dass Boden A (Laterit) zwar einen hohen Tonanteil aufweist, die Bindekraft jedoch verhältnismäßig gering ist. Boden C („Basalt“) hat eine extrem starke Bindekraft und somit großes Potenzial für den Lehm- bau. Beide Erden können zunächst als geeignet für die Herstellung von CEB eingestuft werden, wobei der „Basalt“ vermutlich zu „fett“ ist. Probe B hat einen zu hohen Schluffanteil und bindet schlecht, D und E sind nicht flächendeckend verfügbar bzw. beinhalten zu viel organisches Material – sie wurden deshalb nicht weiter betrachtet.

(1) Gäth, Christian & Kretschmann, Micha 2023. Gepresste Lehmsteine. Master Thesis. Technische Universität Berlin, Berlin, 40.

A. Latérite



B. Weiße Erde



C. „Basalt“



D. „Basalt“



E. „Basalt“



Herkunft					
Standort	Verlassener Tagebau aus dem Straßenbau, unterhalb des Mutterbodens	Tagebau für Herstellung von Fliesen, Verlorenes vom LKW am Straßenrand	Traditionelle Lehmgrube in Mako, unterhalb des Mutterbodens	Traditionelle Lehmgrube in Mako, oberflächlich	Werkhof Studio Suddo Neuve, oberflächlich, verlassener Termitenhügel
Verfügbarkeit	sehr gute Verfügbarkeit, auch an weiteren Standorten	(noch) nicht öffentlich verfügbar	gute Verfügbarkeit	Verfügbarkeit unklar	Verfügbarkeit beschränkt
Hand-Test (fein gesiebt)					
Humus-Geruch	keiner bis gering	keiner	gering	gering	gering
Modellierbarkeit	schwierig bis ausreichend	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Konsistenz nass	ölilig bis sandig	sandig	sehr ölig	ölilig und sandig	sehr ölig
Abwaschen	einfach	einfach	schwierig	schwierig	schwierig
Farbspuren	mittel	wenig	wenig	viel	viel
Auswertung	hoher Tongehalt, hoher Schluff-Gehalt, mäßige Bindekraft	hoher Sand-Anteil, mäßige Bindekraft	hoher Tongehalt, hoher Schluff-Gehalt, gute Bindekraft, Humus vorhanden	hoher Tongehalt, Schluff, gute Bindekraft, Humus vorhanden	hoher Tongehalt, gute Bindekraft, Humus vorhanden
Flaschentest nach 30 Minuten (grob gesiebt 10mm)					
Anteil Sand / Kies ca.	56%	29%	26%	19%	33%
Anteil Lehm / Schluff ca.	44%	71%	74%	81%	67%
Auswertung	Lehm/Schluff 20% - 50% -> ok	Lehm/Schluff >50% -> hoch	Lehm/Schluff >50% -> hoch	Lehm/Schluff >50% -> hoch	Lehm/Schluff >50% -> hoch
Zigarren-Test (fein gesiebt)					
Durchschnittl. Länge [cm]	6,2	8,5	29,8	27,5	21,2
Auswertung	> 5 cm ok	> 5 cm ok	> 15 cm zu hoher Tongehalt	> 15 cm zu hoher Tongehalt	> 15 cm zu hoher Tongehalt
Keks-Test (fein gesiebt)					
Schwindmaß [mm]	3	1	2	3	4
Zerbrechen	einfach	zerbrösel	nicht möglich	nicht möglich	einfach
Rissbildung	keine	keine	keine	gering	stark
Auswertung	guter sandiger Lehm	zu hoher Sand/Schluff-Anteil	hoher Tongehalt	sehr hoher Tongehalt	sehr hoher Tongehalt
Miniatur-Lehmsteine (mit Hammer verdichtet, grob gesiebt 10mm)					
Festigkeit	ausreichend	unzureichend	gut	sehr gut	ausreichend
Schwund	keiner	keiner	gering	gering	gering
Rissbildung	keine	keine	gering	gering	vorhanden
Kanten	bröselig	sehr bröselig	fest	sehr fest	bröselig
Organische Bestandteile	nein	nein	nein	nein	sichtbar
Auswertung	vielversprechend	nicht geeignet, zu geringe Bindekraft	vielversprechend	vielversprechend	nicht geeignet, organische Bestandteile

Prototypen

Auf die Bodenanalyse folgte die Herstellung von CEB. Es wurden vier verschiedene Mischungen getestet: Sowohl Laterite als auch „Basalt“ wurden jeweils pur zu Steinen verarbeitet (I, II). Der hohe Tonanteil von „Basalt“ wurde in einer dritten Mischung (III) durch die Zugabe von Sand reduziert („abgemagert“). In einer vierten Variante (IV) wurde Laterite durch das Beimischen von „Basalt“ angereichert, um die Bindekraft zu erhöhen. Alle Mischungen wurden gemauert und am folgenden Tag mithilfe einer manuellen Steinpresse mit einer Verdichtung von etwa 40% zu Prototypen gepresst. Anschließend trockneten diese zwei Wochen lang an der Luft.

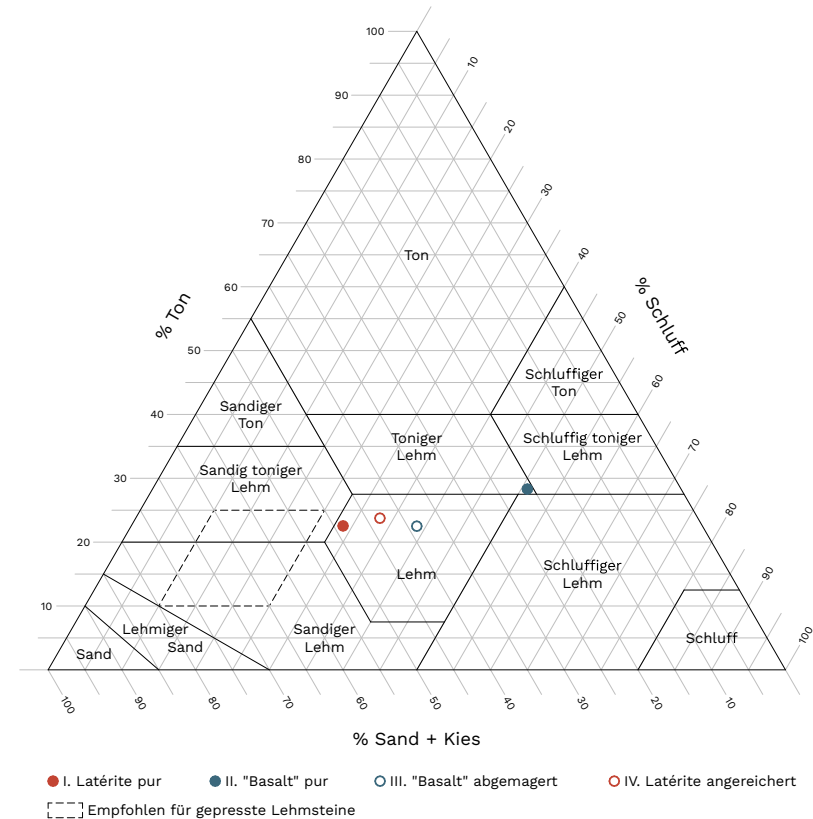
Eine spätere Texturanalyse im Labor in Berlin ergab einen hohen Tongehalt von 22% in Laterite (A) und einen sehr hohen Tongehalt von 29% im „Basalt“ (B). Das nebenstehende Bodendreieck zeigt, dass beide Lehmerden außerhalb des empfohlenen Bereichs liegen; auch die getesteten Mischungen erreichten diesen Bereich nicht. Besonders ungünstig ist dabei der hohe Schluffanteil im „Basalt“ (B).

Auswertung

Aus allen vier Mischungen ließen sich CEB herstellen. Die Kombination aus Laterite und „Basalt“ (IV) erwies sich jedoch aufgrund von Klumpenbildung als inhomogen. Das beste Ergebnis zeigte die Mischung aus „Basalt“ und Sand (III): Sie ließ sich einfach verarbeiten, hatte stabile Kanten und zeigte keine Risse. Die Steine aus reinem „Basalt“ (II) bildeten aufgrund des hohen Tongehalts Haarrisse. In einem an die Tauchprüfung nach DIN 18945 angelehnten Test waren die Prototypen aus „Basalt“ (II, III) deutlich wasserresistenter als jene aus Laterite (I, IV).

Gepresste Lehmsteine für tragendes Mauerwerk müssen gemäß DIN 18945 eine Druckfestigkeit von mindestens 2,5 N/mm² (Druckfestigkeitsklasse 2) erreichen. Die „Basalt“-Prototypen II und III bestanden den Druckfestigkeitstest an der Hydraulikpresse und erreichten sogar die Druckfestigkeitsklassen 4 bzw. 3. **Damit ist nachgewiesen, dass sich mit Lehmerde aus Mako und der dort vorhandenen Infrastruktur CEB für tragendes Mauerwerk herstellen lassen.**

Mischungsverhältnisse und Herstellungsverfahren bieten weiterhin Optimierungspotenzial. Es ist zudem wahrscheinlich, dass durch weitere Experimente auch tragfähige CEB aus Laterite hergestellt werden können.



Mauken



Pressen

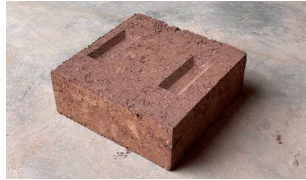


Trocknen



Druckfestigkeits-Test

I. Latérite pur



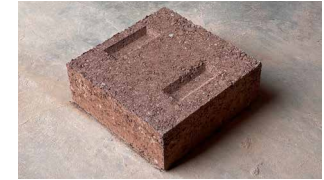
II. „Basalt“ pur



III. „Basalt“ abgemagert



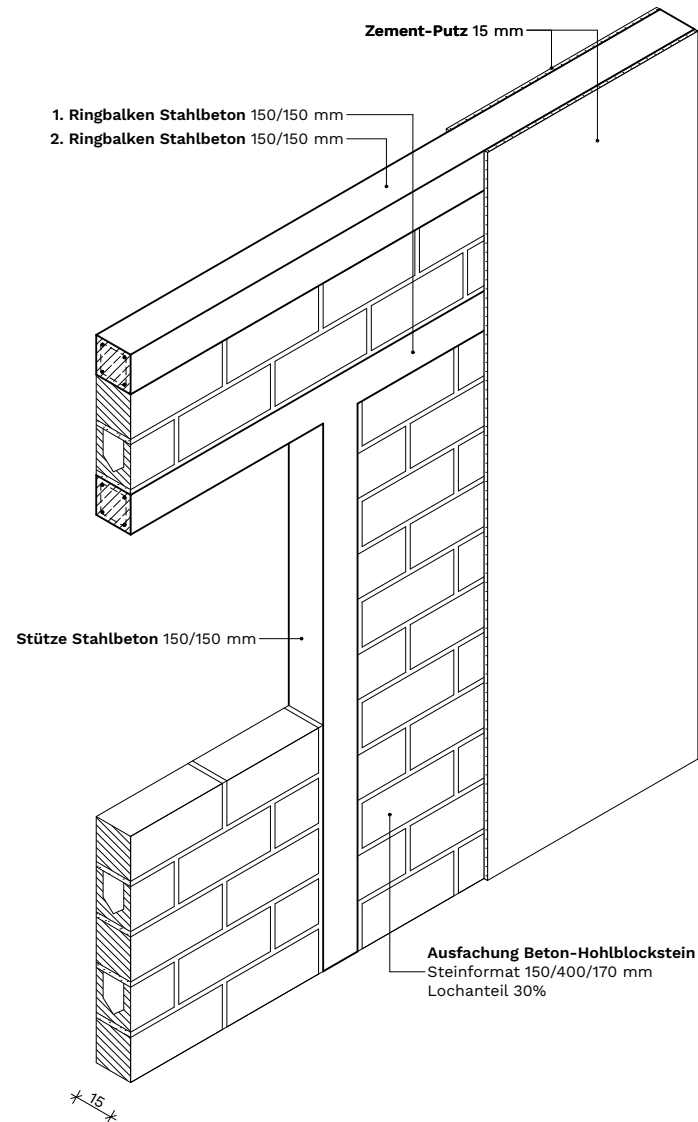
IV. Latérite angereichert



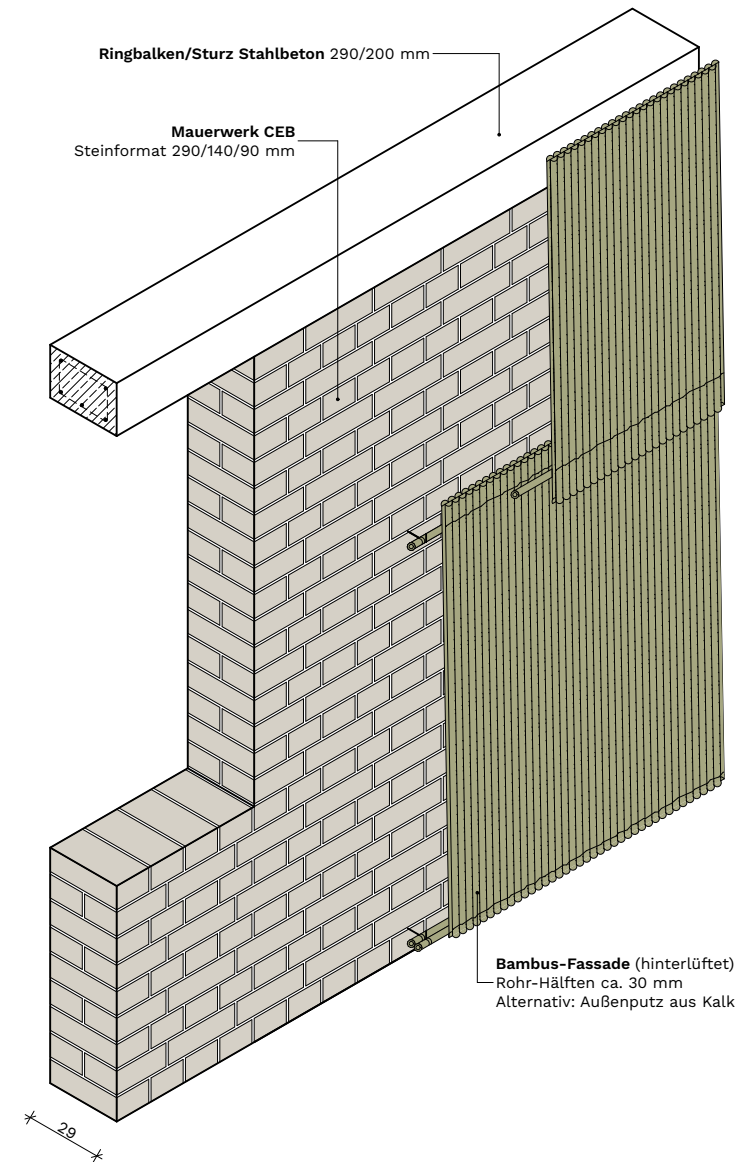
Mischung (24h gemaukt)				
A. Latérite	100%	0%	0%	70%
C. Basalt Mako Ssou	0%	100%	70%	30%
Sand	0%	0%	30%	0%
Verarbeitung				
Eigenschaften	homogene Mischung, leicht zu verarbeiten, leicht zu pressen	bildet Klumpen, schwer zu mauken, schwer zu pressen, klebrig	bildet Klumpen, Mischung nicht homogen, gut zu mauken, gut zu pressen	bildet Klumpen, Mischung nicht homogen, gut zu mauken, gut zu pressen
Sichtprüfung				
Format LxBxH [mm]	240x240x90	240x240x90	240x240x90	240x240x90
Risse	nein	ja	nein	nein
Kanten	mäßig	gut	gut	bröselig
Schwund	nein	nein	nein	nein
Verdichtung				
Füllmenge [cm ³]	8500	9600	9300	8600
Volumen Stein [cm ³]	5184	5184	5184	5184
Verdichtung	39%	46%	44%	40%
Feuchtigkeit				
Gewicht feucht [kg]	11,50	10,70	11,00	11,00
Gewicht trocken [kg]	9,65	9,41	9,92	9,57
Gewichtsverlust	16%	12%	10%	13%
Rohdichte				
Rohdichte [kg/m ³]	1861	1815	1914	1847
Rohdichteklasse	2,0	2,0	2,0	2,0
Mindestanforderung erfüllt	ja	ja	ja	ja
Druckfestigkeitstest (je 1/4 Stein, 1 Versuch)				
Testergebnis Bruchlast in t	3,5	7,5	7	3
Fläche Stein [mm ²]	13225	13225	13225	13225
Formfaktor (h=75-100 mm)	0,9	0,9	0,9	0,9
Druckfestigkeit [N/mm ²]	2,3	5,0	4,7	2,0
Druckfestigkeitsklasse	<2	4	3	<2
Mindestanforderung erfüllt	nein	ja	ja	nein
Wasser-Test (2 Versuche)				
Massenverlust im Mittel	16%	5%	11%	24%
Anwendungsklasse	II	I	II	III

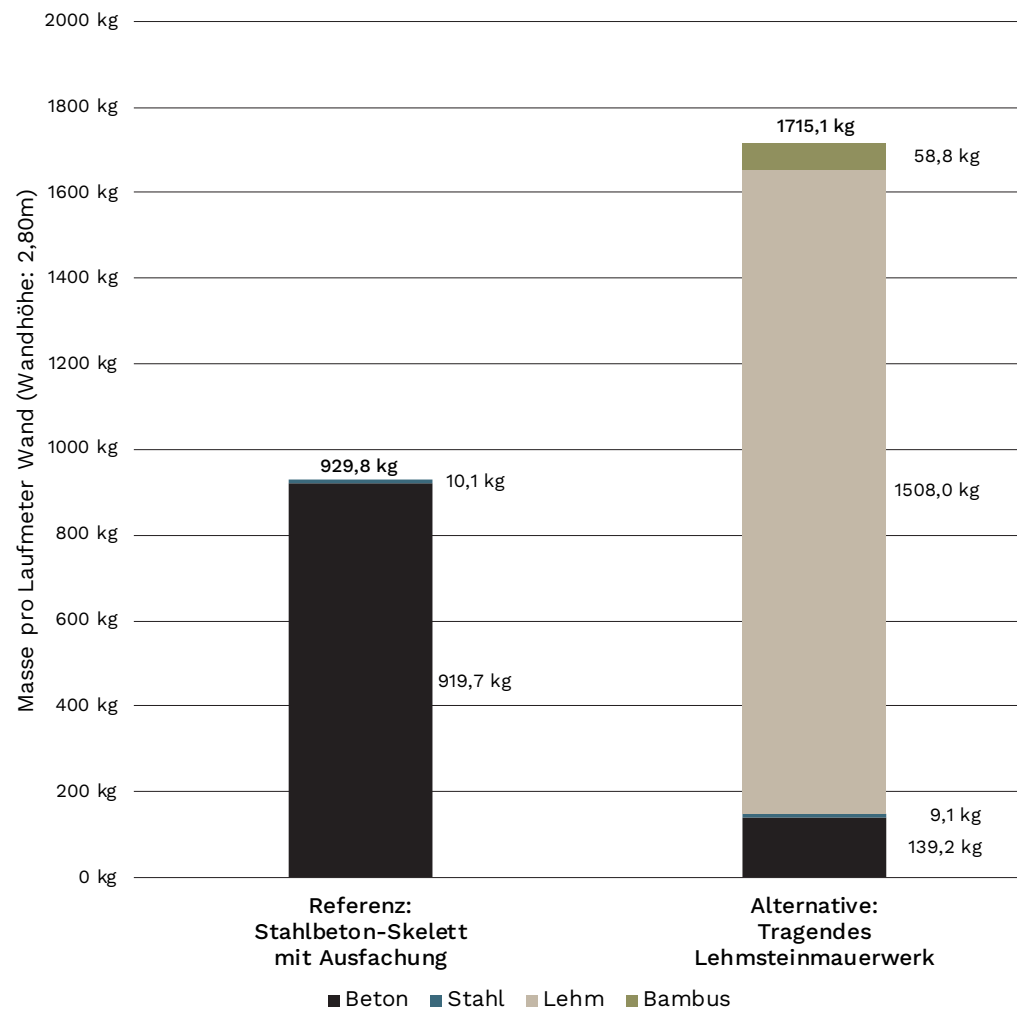
TRAGENDES LEHMSTEINMAUERWERK

Referenz: Stahlbeton-Skelett mit Ausfachung



Alternative: Tragendes Lehmsteinmauerwerk





Betrachtet wird der Materialbedarf als Masse pro 1 Laufmeter Außenwand, bei einer Wandhöhe von 2,8m. Berechnungsgrundlage sind exemplarische Wandsegmente von jeweils 2,5m Länge, inklusive Ringanker, Stütze, Fassade und Putz (siehe Detail-Zeichnungen). Der Stahlanteil in Stützen und Ringanker wird mit 2% des Volumens angenommen. „Lehm“ steht hier für die gesamten Lehmprodukte im Bauteil, eventuell sind manche davon mit Sand abgemagert.

Wände

Die Referenz zeigt die in Mako verbreitete Wandkonstruktion mit Stahlbeton-Skelett und Ausfachung aus Beton-Hohlblocksteinen. Lehmsteinmauerwerk kann hingegen tragend ausgeführt werden. Zusätzliche Stützen sind nicht erforderlich, sofern ausreichend Querwände angeordnet werden und genügend Wandfläche zwischen den Öffnungen vorhanden ist. Die Aussteifung übernehmen Deckenscheiben oder ein durchlaufender Ringanker über allen Wänden.

Das Steinformat von 29 × 14 × 9 cm lässt sich mit der Steinpresse von Studio Suddo Neue herstellen und ergibt im Blockverband eine Wandstärke von 29 cm. Damit wird ein Kompromiss geschaffen zwischen der in DIN 18940 geforderten Mindestwandstärke von 24 cm bei einer Wandhöhe von 3 m und der für eine thermische Phasenverschiebung über einen Tag empfohlenen Wandstärke von 40 cm. ⁽¹⁾ Ein statischer Nachweis wurde für eine zweigeschossige Außenwand geführt (siehe Statische Bemessung im Anhang).

Zum Schutz vor Regen eignet sich eine vorgehängte, hinterlüftete Bambus-Fassade oder ein Außenputz aus Kalk. Im Innenbereich kann die Wand als Sichtmauerwerk erscheinen oder mit Lehmputz verkleidet werden. Werden Öffnungen bis unter den Ringbalken geführt und dieser ausreichend bewehrt, werden keine zusätzlichen Stürze benötigt.

Einsparpotenzial:

85 % Beton

9 % Stahl

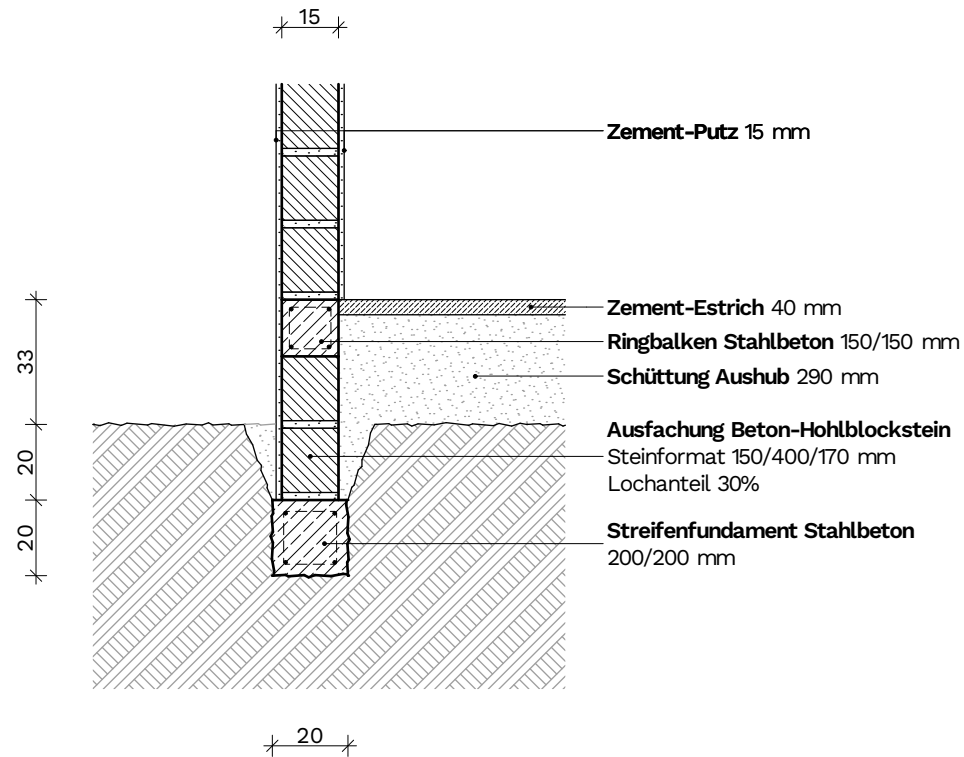
Ressourcenverbrauch

Durch den Einsatz von CEB können die bislang verwendeten Beton-Hohlblocksteine vollständig ersetzt werden. Stützen und Stürze entfallen, lediglich der Querschnitt des Ringbalkens vergrößert sich. Aufgrund der erhöhten thermischen Masse sorgt die massive Wand für ein besseres Raumklima. Wände aus tragendem Lehmsteinmauerwerk benötigen 85% weniger Beton und 9% weniger Bewehrungsstahl als die Referenz, was ein bemerkenswertes Einsparungspotenzial birgt.

Im Kontext von Mako gelten insbesondere der für Beton benötigte Zement und der Bewehrungsstahl als Material mit der schlechtesten Ökobilanz und den höchsten Kosten, während lokale Baustoffe kurze Lieferketten aufweisen und mit geringem Energieaufwand hergestellt werden. Auf eine detaillierte Lebenszyklusanalyse wird aufgrund unzureichender Datengrundlage verzichtet; der Vergleich des Materialeinsatzes wird als aussagekräftig erachtet.

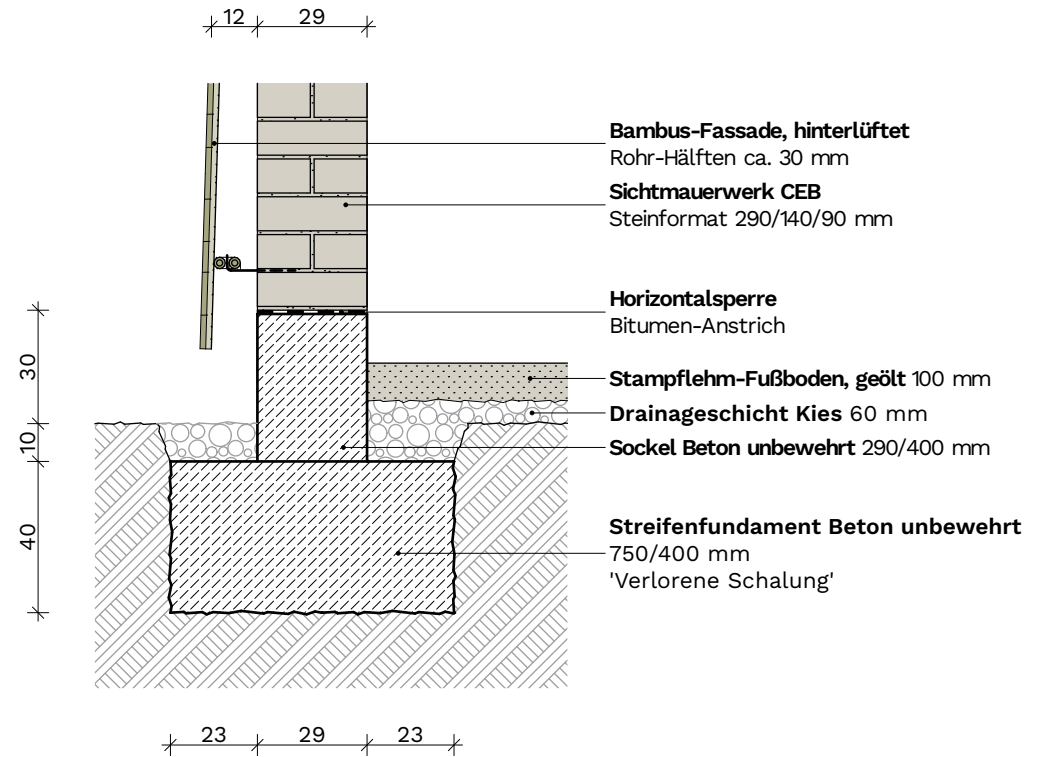
⁽¹⁾ Denizart, Marion 2025. TOOLBOX Stratégies bioclimatiques adaptées aux climats. Acted, Zero Exclusion Carbon Poverty, 27.

GRÜNDUNG + SOCKEL



Referenz: Stahlbeton

Im Betonbau in Mako werden die Lasten des Bauwerks über ein Tragwerk aus Stahlbeton-Stützen auf Streifenfundamente aus Stahlbeton in den Baugrund eingeleitet. Die Fundamente sind in der Regel vergleichsweise schlank ausgeführt und nicht besonders tief eingebunden. Bodengutachten zur Tragfähigkeit des Baugrunds sowie statische Bemessungen der Bauteile oder Bewehrungspläne liegen in der Regel nicht vor. Frostgefahr besteht in Mako nicht.

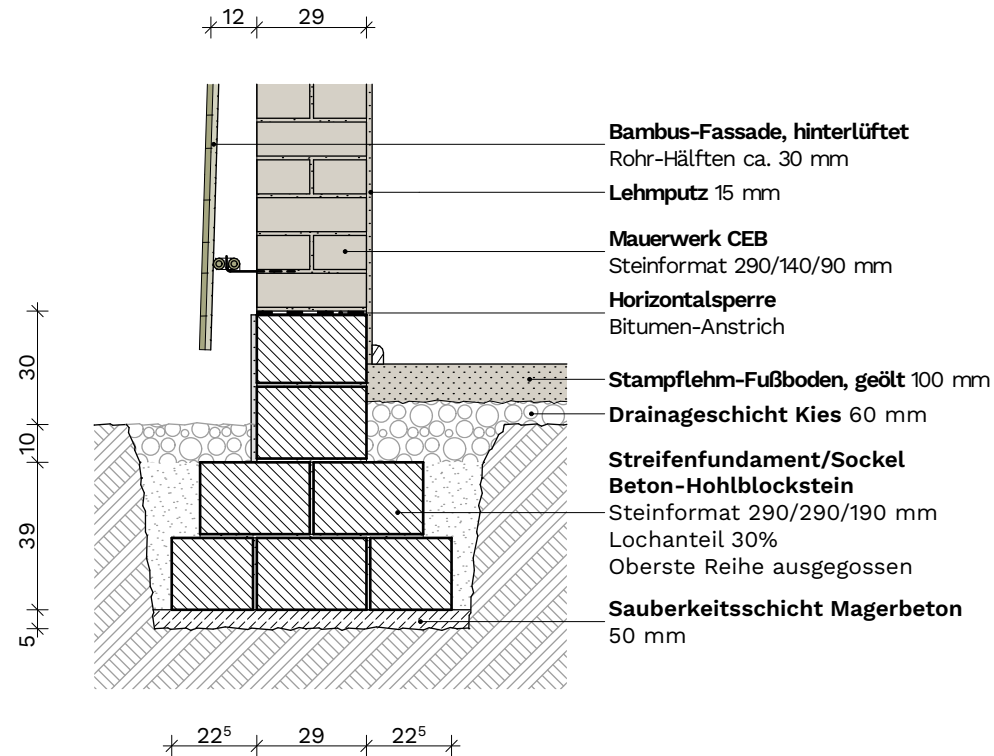


Variante A: Beton unbewehrt

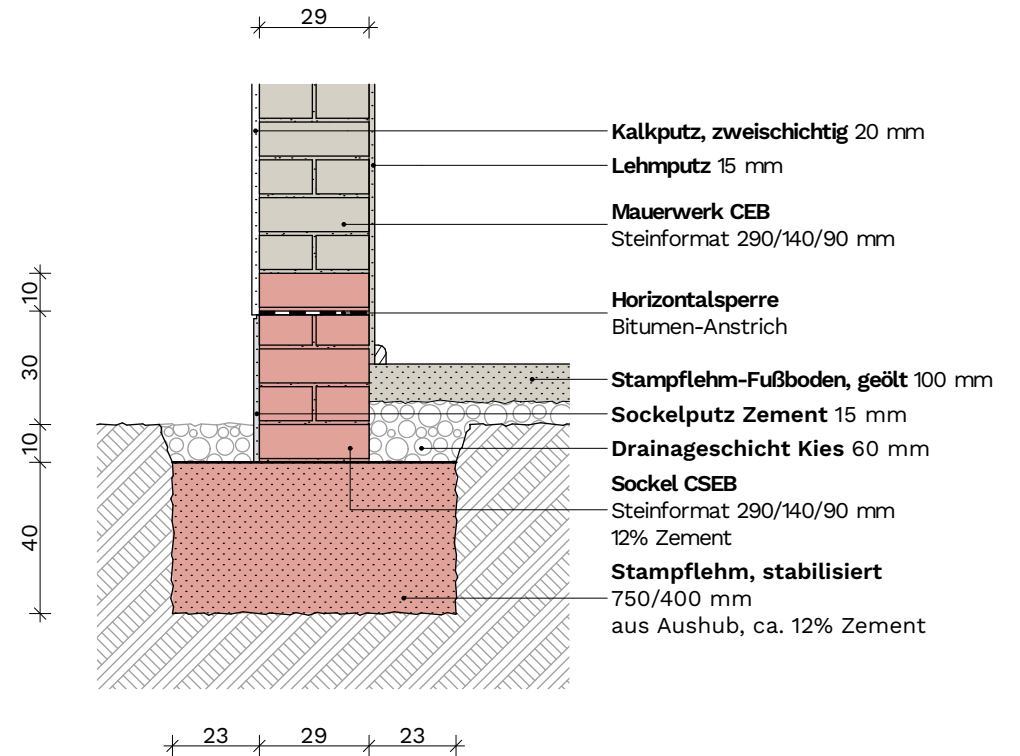
Tragende Wände aus CEB erzeugen Linienlasten, die über Streifenfundamente aus unbewehrtem Ortbeton abgeführt werden können. Für Außenwände von zweigeschossigen Wohnbauten ergeben sich Fundamente mit einem Querschnitt von 75 x 40 cm (siehe statische Bemessung im Anhang). Zusätzlich ist ein Sockel bis 30 cm über Geländeoberkante erforderlich, der vor Spritzwasser und im Havariefall schützt. Eine Abdichtung oberhalb des Sockels verhindert das Aufsteigen von Feuchtigkeit in das Mauerwerk. Fundament, Sockel und Fußbodenaufbau sind als erdberührte Bauteile ohne Abdichtung geplant. Der Witterungsschutz erfolgt über eine vorgehängte Fassade, die bis unterhalb des Mauerwerks ausgeführt werden sollte.

M 1:20

Variante B: Beton-Hohlblockstein



Variante B: CSEB



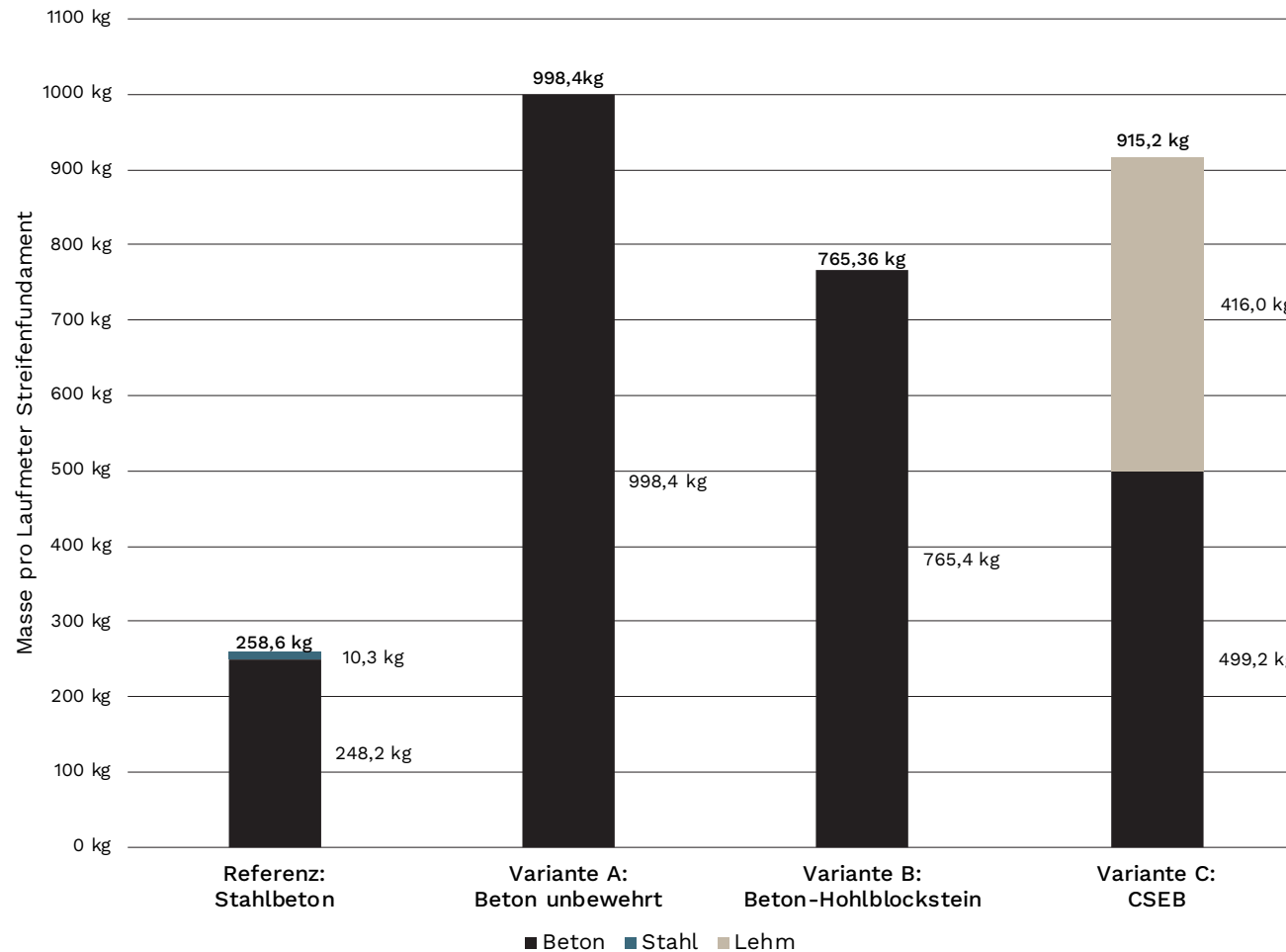
Variante B: Beton-Hohlblockstein

Um den enormen Bedarf an Beton für das gegossene Streifenfundament zu reduzieren, wurde eine gemauerte Alternative aus Beton-Hohlblocksteinen entwickelt. Die Steine können bauseits in beliebigen Formaten hergestellt und somit an das aufgehende Mauerwerk angepasst werden. Es wird angenommen, dass Beton-Hohlblocksteine mit einem Lochanteil von nur 30% eine höhere Druckfestigkeit als CEB erreichen und daher für Fundamente geeignet sind. Ein großer Vorteil dieser Variante ist, dass keine Betonschalung erforderlich ist und die Fundamentgeometrie an den Kräfteverlauf angepasst werden kann.

Variante C: CSEB

Eine weitere potenzielle Alternative stellt stabilisierter Lehm dar. Die von Studio Suddo Neue praktizierte Stabilisierung mit 6% Zement reicht erfahrungsgemäß nicht aus, um das Material ausreichend feuchteresistent zu machen, weshalb hier von einer Stabilisierung mit mindestens 10% Zement ausgegangen wird. Ein Streifenfundament aus stabilisiertem Stampflehm mit verllorener Schalung nutzt ressourcenschonend den anfallenden Erdaushub und bildet eine plane Fläche, auf der ein Sockel aus CSEB gemauert wird. Wird die Außenwand verputzt, sollte die erste Lage des Mauerwerks oberhalb der Horizontalsperre ebenfalls in CSEB ausgeführt werden, da an der Fassade herunterlaufendes Wasser am Übergang zum Sockel eindringen könnte.

M 1:20



Betrachtet wird der Materialbedarf als Masse pro 1 Laufmeter Streifenfundament. Berechnungsgrundlage sind exemplarische Streifenfundamente von jeweils 2,5m Länge (siehe Detail-Zeichnungen). Bei "Referenz: Stahlbeton" sind der Ringbalken und 1 Stütze mit berücksichtigt. Der Stahlanteil in Stützen und Ringanker wird mit 2% des Volumens angenommen. Um den Materialbedarf von "Variante C: CSEB" besser vergleichen zu können, wird das stabilisierte Lehmsteinmauerwerk sowie der stabilisierte Stampflehm zur Hälfte als Beton und zur Hälfte als Lehm gerechnet. Das entspricht einem Zement-Anteil von 10% des Volumens.

Mehraufwand

Varianta A: Beton unbewehrt

302 % Beton

Varianta B: Beton-Hohlblockstein

208 % Beton

Varianta C: CSEB

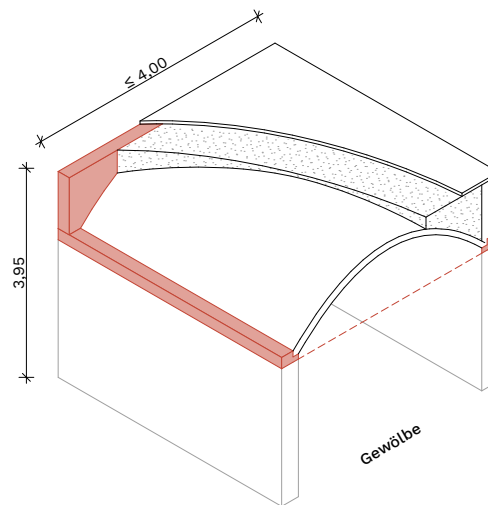
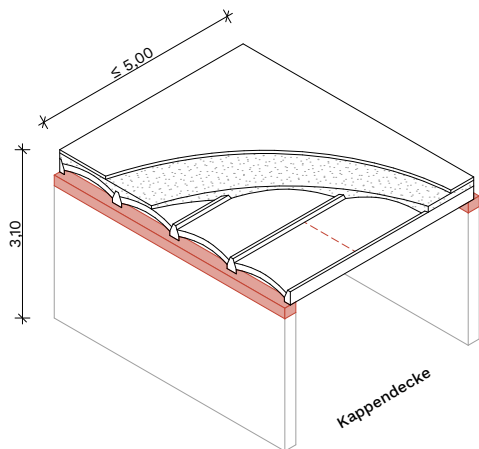
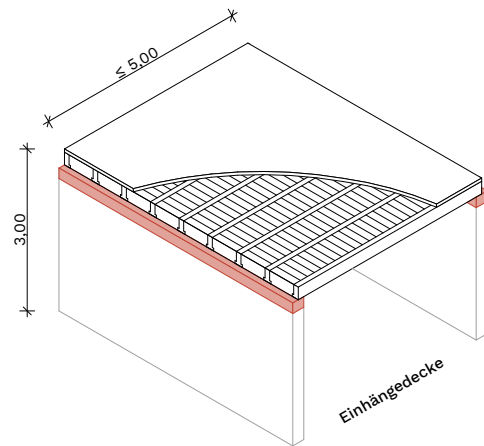
101 % Beton

100 % Lehm

Ressourcenverbrauch

Das hohe Eigengewicht und die größeren Wandstärken des Lehmsteinmauerwerks erfordern größer dimensionierte Fundamente als im konventionellen Betonbau in Mako. Zudem ist die Ausbildung eines Sockels notwendig. In diesem Bereich sind keine Materialeinsparungen möglich, da eine gute Gründung für die Langlebigkeit von Lehmbauten fundamental ist. Variante A benötigt dreimal mehr Beton als die Referenz, allerdings entfällt der Bewehrungsstahl vollständig. Durch Hohlräume kann bei Variante B der Betonbedarf etwas reduziert werden, und bei Variante C werden Teile des Betons durch Lehm ersetzt. Wichtig ist, den Ressourcenverbrauch des gesamten Bauwerks zu betrachten, da der Mehraufwand im Bereich der Gründung durch Einsparungen an anderer Stelle ausgeglichen werden kann.

GESCHOSSDECKE



Geschossdecken stellen eine besondere Herausforderung dar, da sie Zugbelastungen ausgesetzt sind. Lehmbaumstoffe können im Allgemeinen gut Druckkräfte ableiten, jedoch kaum Zugkräfte aufnehmen. In Regionen mit knappem Bauholz wird daher häufig auf Stahlbetondecken zurückgegriffen. Gibt es Alternativen?

In Makos Baukultur ist die Eihängedecke verbreitet. Sie besteht aus Trägern und eingehängten Deckensteinen, überzeugt durch geringe Aufbauhöhen und einfache Herstellung. Spannweiten bis etwa 5 m zwischen zwei Wänden sind realisierbar. Größere Spannweiten erfordern zusätzliche Unterzüge und eventuell Stützen im Raum.

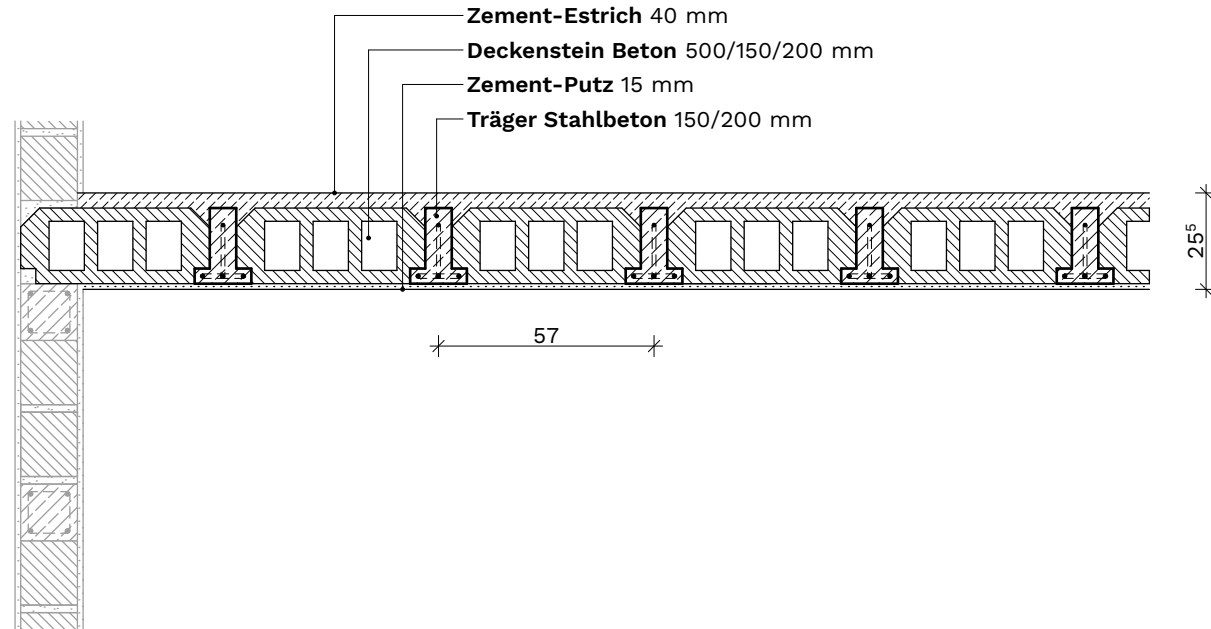
Kappendecken kommen mit weniger Trägern aus, da zwischen ihnen Segmentbögen aus Mauerwerk gebildet werden. So sind größere Achsabstände möglich, und es entsteht eine interessante Optik. Spannweiten bis etwa 5 m gelten als praktikabel. In den äußeren Feldern sind Zugseile nötig, um Schubkräfte aufzunehmen. Kappendecken sind in Mako bislang unbekannt.

Eine Geschossdecke aus Mauerwerk lässt sich nur als Gewölbe bauen - architektonisch interessant, aber aufwendig. Gewölbe sind am effizientesten, wenn sie parabelförmig sind, da die Stützlinie dann im Mauerwerk verläuft und vorwiegend Druckkräfte wirken. Das nubische Gewölbe ist eine einfache Bauweise, bei der zuerst eine Giebelwand errichtet wird und dann ein Tonnengewölbe anschließt; ein Leererüst ist nicht nötig. Diese Technik könnte in Mako interessant sein. Gewölbe verursachen große Geschosshöhen und starke Horizontalkräfte, die durch Ringbalken, dicke Wände und Zugseile abgefangen werden müssen. Die Spannweite sollte deshalb 4 m nicht überschreiten. Maurer in Mako haben bisher keine Erfahrung mit Gewölben.

Alle drei Konstruktionsarten spannen in nur eine Richtung. Sie bilden statisch keine Scheiben, zur Aussteifung ist deshalb ein Ringbalken über alle Wände notwendig.

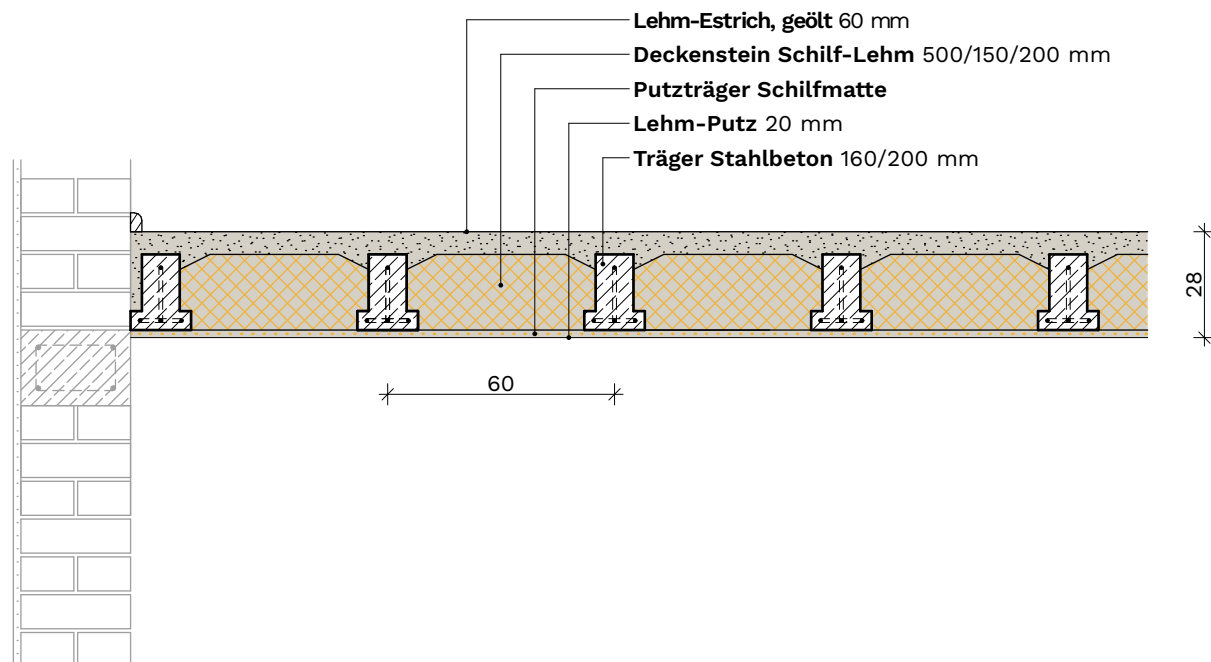
Referenz: Einhängedecke Betonstein

Als Referenz dient eine typische Geschossdecke aus Stahlbetonträgern und eingehängten Deckensteinen aus Beton mit Hohlräumen. Die Dimensionierung der Elemente beruht auf Erfahrungswerten eines in der Region bekannten Maurers. Deckensteine und Träger werden von Hand auf der Baustelle hergestellt. Um die Träger ohne Kran heben zu können, werden sie zunächst nur teilweise ausgegossen. Nach der Montage der Träger auf dem Ringanker und dem Einhängen der Deckensteine erfolgt das restliche Ausgießen mit Beton sowie das Aufbringen eines Estrichs, der zugleich als Bodenbelag dient. Eine effiziente, standardisierte Technik, die gegenüber einer massiven Stahlbetondecke bereits sehr materialsparend ist.



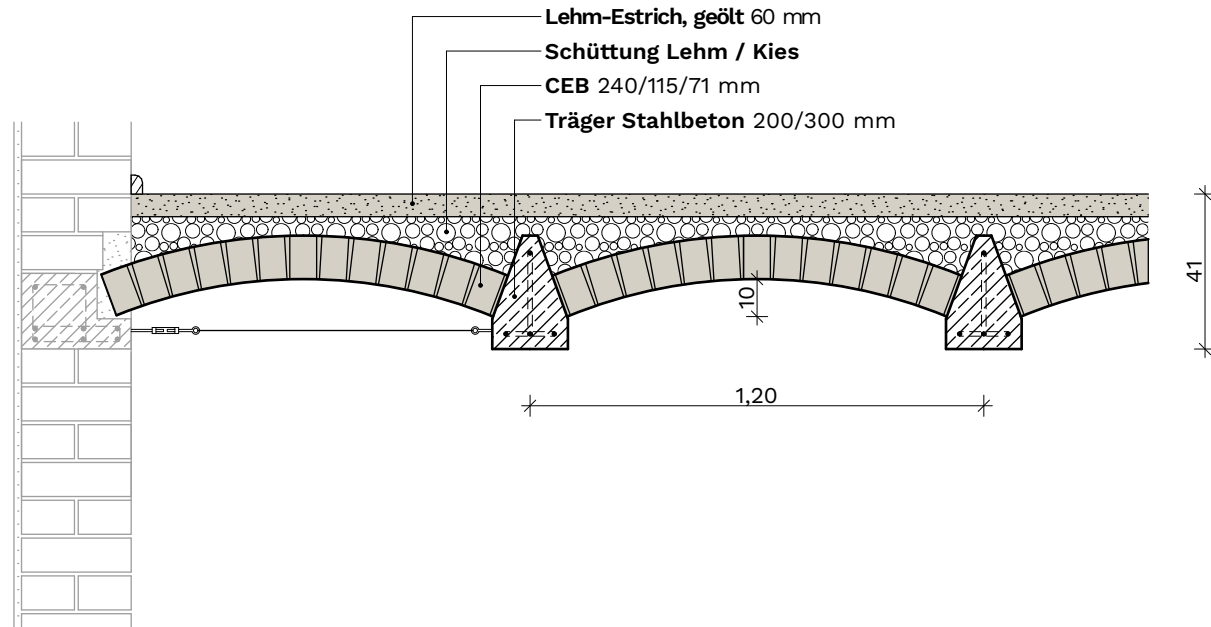
Variante A: Einhängedecke Schilf-Lehm-Stein

Es bietet sich an, an die etablierten Verfahren der senegalesischen Handwerker:innen anzuknüpfen und das Prinzip der Einhängedecke weiterzudenken. Das Bauunternehmen Elementerre an der senegalesischen Küste produziert Deckensteine aus einer Schilf-Lehm-Mischung und hat diese bereits in Bauvorhaben erprobt. Durch die Bewehrung mit Schilf können die Lehmsteine Zugkräfte aufnehmen. Schilf-Lehm-Deckensteine lassen sich in Mako einfach herstellen und die Betonsteine ersetzen. Statt eines Zementestrichs wird hier ein Lehmestrich vorgeschlagen. Für eine Decke mit 4 m Spannweite sind Stahlbetonträger mit einem Querschnitt von 10×20 cm und einer Zugbewehrung aus 3 Stäben mit jeweils 10mm Durchmesser ausreichend (siehe statische Bemessung im Anhang).



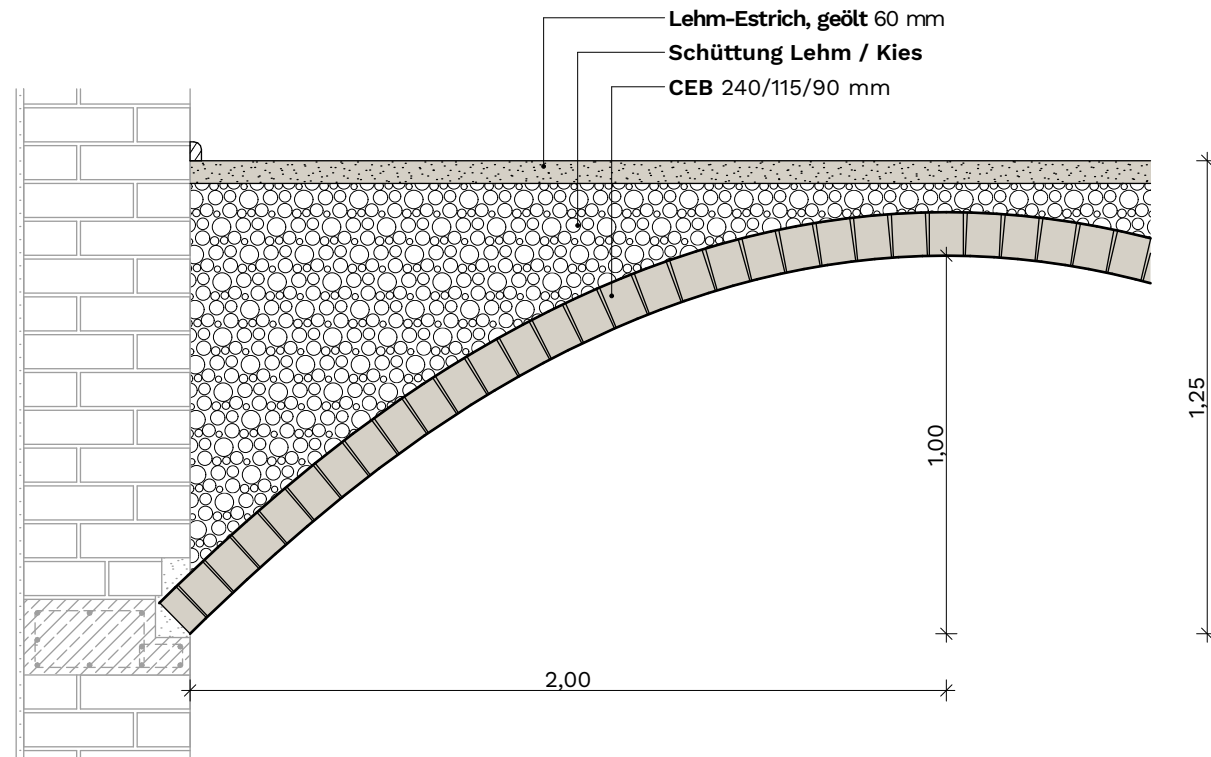
Variante B: Kappendecke CEB

Kappendecken haben sich in der westlichen Ziegelarchitektur im 19. Jahrhundert etabliert. Erste Versuche an Universitäten zeigen heute, dass sich auch mit gepressten Lehmsteinen Kappendecken herstellen lassen. Kappendecken bieten die Chance, CEB auch in Deckenkonstruktionen tragend einzusetzen und Betonelemente zu ersetzen. Das Mauern von Bögen und Gewölben ist jedoch sehr anspruchsvoll. Für das nebenstehende Detail wurde als konservativer Ansatz ein Achsabstand von 1,20 m gewählt – mit Ziegeln sind auch größere Achsabstände üblich. Bei einer Spannweite von 4 m ergeben sich Stahlbetonträger mit einer statisch relevanten Höhe von 30 cm und einer Zugbewehrung aus drei 12-mm-Armierisen (siehe statische Bemessung im Anhang).



Variante C: Gewölbe CEB

Mithilfe von gemauerten Gewölben lässt sich im Bereich der Geschossdecken gänzlich auf den Einsatz von Stahlbeton verzichten. Gewölbe aus Naturstein und Ziegeln haben eine lange Tradition. Im nordafrikanischen Raum finden sich auch Beispiele aus Lehmsteinen (Adobe). Gewölbe aus gepressten Lehmsteinen (CEB) sollten möglich sein, da CEB eine höhere Druckfestigkeit als Adobe erreichen können. Forschung dazu gibt es bislang jedoch wenig. Die Dimensionierung der hier vorgeschlagenen Konstruktion eines nubischen Gewölbes aus CEB orientiert sich an gebauten Beispielen: dem Forschungsprojekt „Sudu“ der äthiopischen Hochschule EiABC sowie der Architektur von Hassan Fathy.



Einsparpotenziale

Variante A: Einhängedecke Schilf-Lehm-Stein

81 % Beton

34 % Stahl

Variante B: Kappendecke CEB

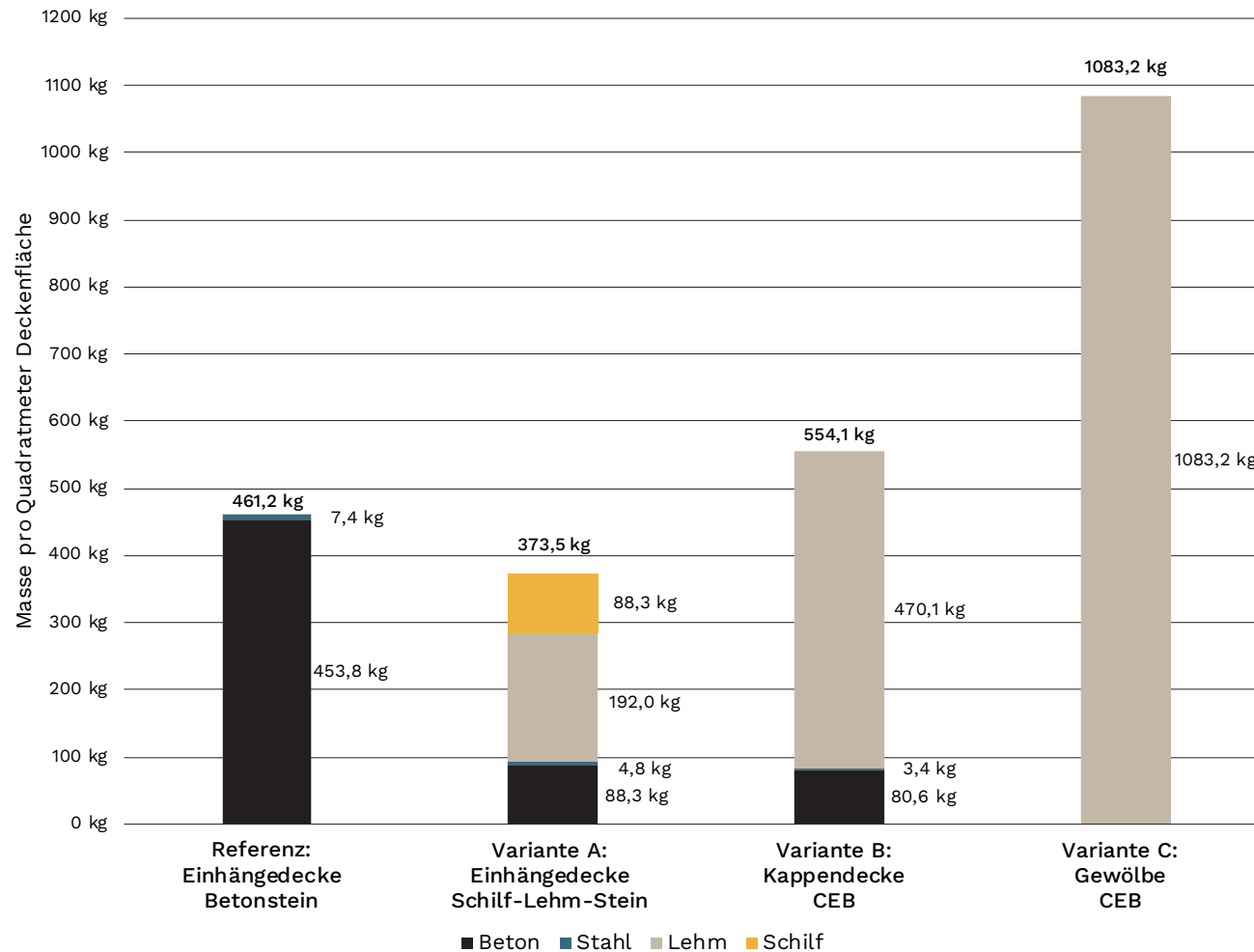
82 % Beton

45 % Stahl

Variante C: Gewölbe CEB

100 % Beton

100 % Stahl

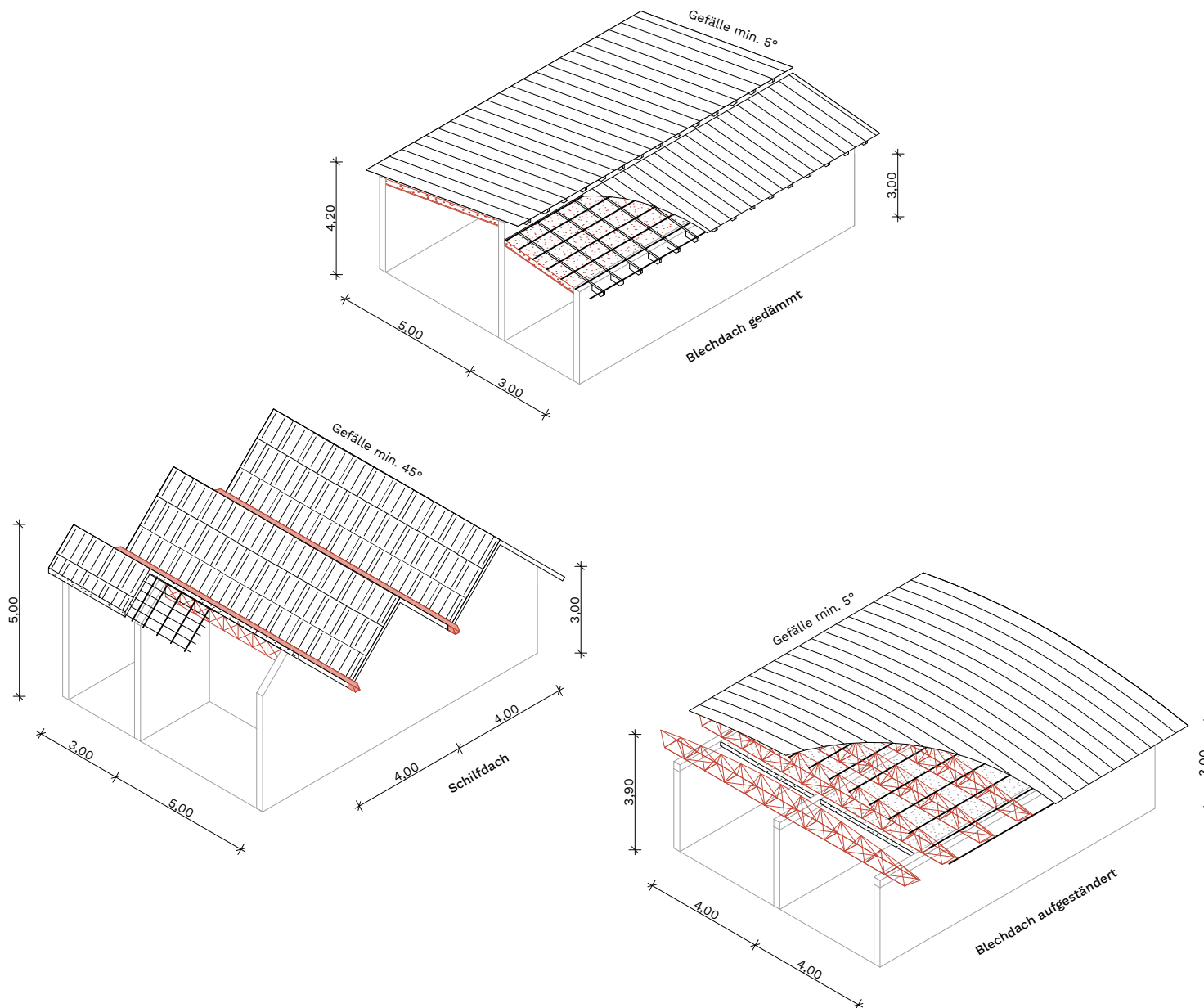


Betrachtet wird der Materialbedarf als Masse pro 1 Quadratmeter Deckenfläche. Berechnungsgrundlage sind exemplarische Decken von jeweils 4x5m (20m²), inklusive Fußbodenaufbau und unterseitigem Putz (siehe Detail-Zeichnungen). Die Stahlbetonträger sowie das Gewölbe spannen entlang der kurzen Richtung von 4m. Der Stahlanteil in den Trägern ist auf Grundlage der statischen Bemessung überschlägig berechnet. „Lehm“ steht hier für die gesamten Lehmprodukte im Bauteil, eventuell sind manche davon mit Sand abgemagert.

Ressourcenverbrauch

Durch den Einsatz der Schilf-Lehm-Deckensteine, des Lehmestrichs und des Lehmputzes in Variante A lässt sich gegenüber der Referenz 81% Beton und 34% Stahl einsparen. Auch Variante B: Kappendecke CEB reduziert den Bedarf an Beton und Stahl weiter, schneidet aber nur minimal besser als Variante A ab – trotz doppelt so großer Achsabstände zwischen den Trägern. Das liegt am höheren Gewicht der Decke und der damit erforderlichen Belastbarkeit der Träger. Die mit Abstand beste Ökobilanz erzielt das Gewölbe, da hier ausschließlich Lehm zum Einsatz kommt. Jedoch stellt die mehr als zweifache Masse der Gewölbedecke eine Herausforderung in der Ausführung dar.

DACH



Gallé Leydi setzt auf geneigte Dächer, die auch während der starken Niederschläge in der Regenzeit eine zuverlässige Entwässerung gewährleisten. Flachdächer werden in Mako zwar häufig gebaut, doch da Abdichtungssysteme nicht bekannt sind, treten Leckagen regelmäßig auf.

In Mako sind Pult- und Satteldächer weit verbreitet, ebenso wie eine Variante mit zwei in der Höhe versetzten Pultdächern, die als „Pente Américaine“ bezeichnet wird. Die leichten Tragwerke aus Holz sind mit Wellblech gedeckt, wodurch sich die Innenräume extrem aufheizen. Eine einfache und wirkungsvolle Verbesserung ist die Dämmung dieser Blechdächer.

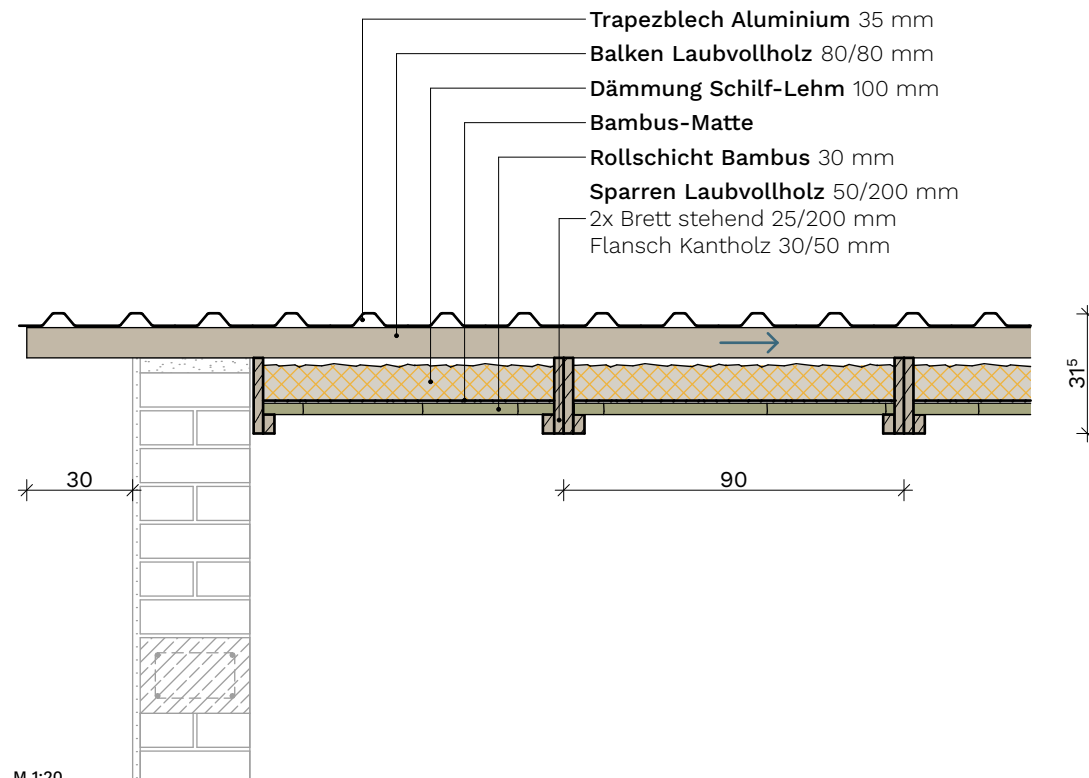
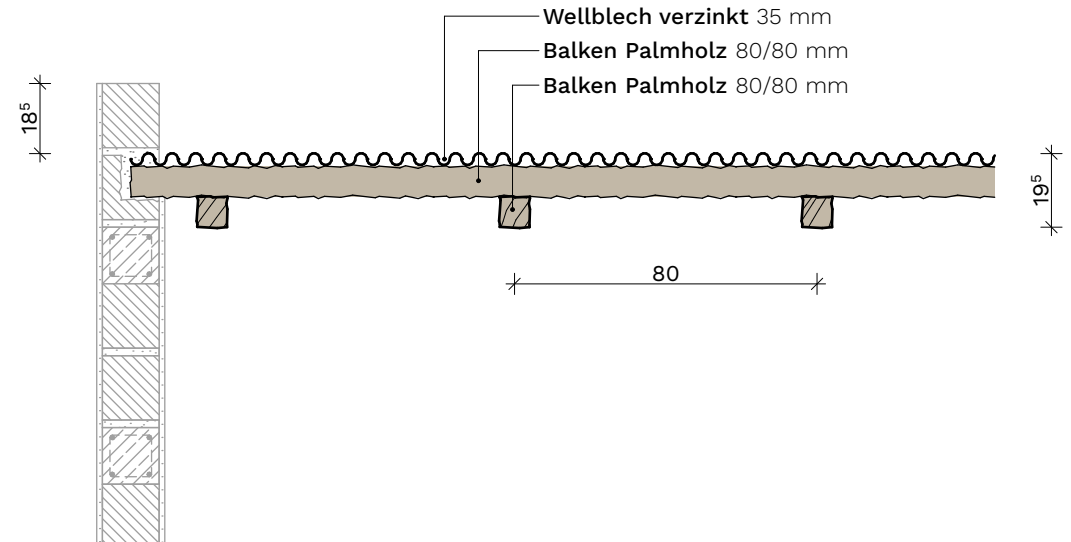
Interessant ist die Frage, ob sich die Dächer der traditionellen Rundhütten in eine zeitgenössische Architektur überführen lassen. Damit eine Dacheindeckung aus Schilfgras wasserführend ist, ist ein Gefälle von mindestens 45° erforderlich. Bei größeren Gebäuden würde dies jedoch zu sehr hohen Dachkonstruktionen führen. Durch die Reihung mehrerer Satteldächer zu einer Art Scheddach kann dieses Problem gelöst werden, wodurch zugleich eine interessante Formensprache entsteht. Problematisch ist die Entwässerung zwischen den einzelnen Dachflächen.

Die klimatisch günstigste Lösung bietet eine Kombination aus einem aufgeständerten, hinterlüfteten Blechdach und einer dämmenden Decke. Dafür wurde ein System aus räumlichen Fachwerkträgern aus Armierisen entworfen. Diese spannen von Wand zu Wand, schaffen den notwendigen Abstand zwischen Mauerwerk und Dach und tragen gleichzeitig die Lasten aus dem Dach und einer Abhang-Decke ab.

Alle Varianten mit Blechdeckung haben ein Gefälle von min. 10 %.

Referenz: Blechdach

Ein typisches Pultdach in Mako besteht aus einem Trägerrost aus Holzbalken, deren Enden eingemauert sind. Die Holzkonstruktion wird mithilfe von Draht verbunden, wobei mehrere Balken zusammengeschlossen werden, um die erforderliche Länge zu erreichen. Die Dächer werden meist mit dünnwandigem, verzinktem und lackiertem Stahlwellblech gedeckt, das mit Nägeln befestigt und an den Seiten zusätzlich durch eine Beschwerung mit Mauerwerk gesichert wird. Deutlich langlebiger ist Trapezblech aus Aluminium, das ebenfalls im lokalen Baustoffhandel erhältlich, jedoch deutlich teurer ist. Dieses wird mit Schrauben und Dichtscheiben montiert. Ein Dachüberstand besteht nur an der Traufseite, um die Entwässerung zu gewährleisten.



M 1:20

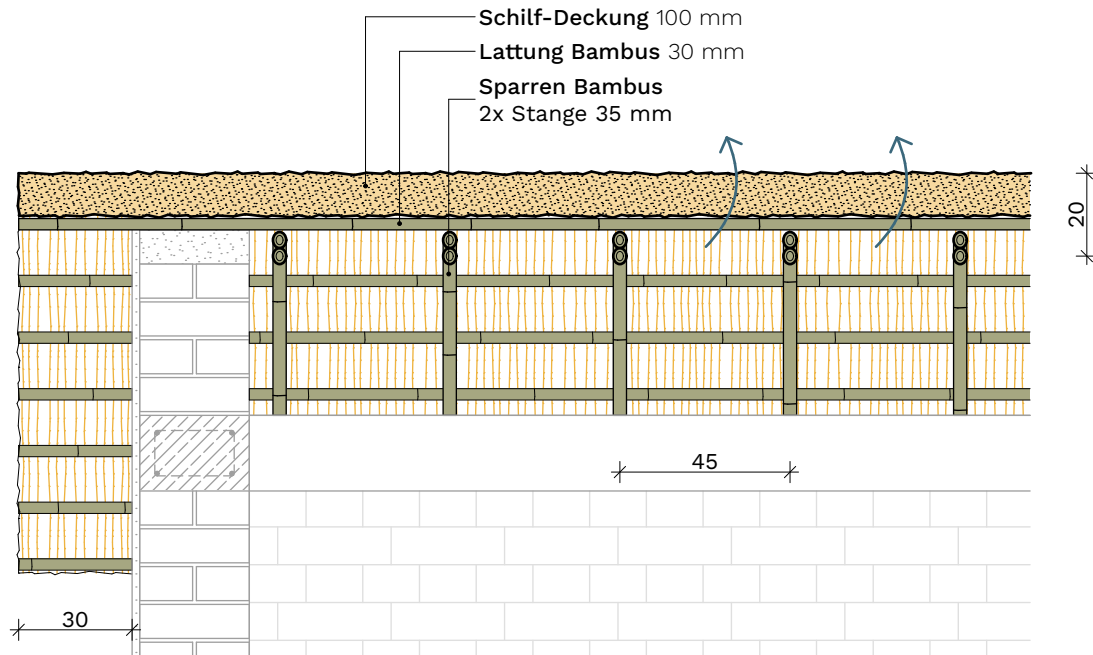
Variante A: Blechdach gedämmt

Eine Dämmung aus Leichtlehm mit Schilf auf einer Rollschicht aus Bambus-Stangen und einer Trennlage aus Bambus-Matten wurde von Studio Suddo Neue bereits in einem Bauwerk realisiert. Das Raumklima verbessert sich im Vergleich zu ungedämmten Blechdächern (siehe Abschnitt Raumklima in Kapitel III), die Ausführung ist einfach und die Untersicht des Daches ansprechend.

Eine Herausforderung stellt das höhere Gewicht des gedämmten Daches dar, da Balken mit größeren Querschnitten schwer zu beschaffen sind. Die Masterarbeit schlägt einen zusammengesetzten Träger aus zwei stehenden Schalbrettern vor. Beidseitig wird ein Flansch aus Holzlatten montiert, auf denen die Bambus-Stangen aufliegen. So entsteht ein schlanker Träger mit 20 cm Höhe, der durch die Bambus-Stangen und die Lattung oberhalb am Ausknicken gehindert wird. Für ein Dach über einem 5 m breiten Raum wurde ein statischer Nachweis geführt; der Träger verfügt über große Reserven (siehe statische Bemessung im Anhang).

Die Holzträger werden im Mauerwerk gehalten, durchdringen die Wand und bilden Dachüberstände zur First- und Traufseite aus. Die Kanthölzer für die Traglattung müssen so gewählt werden, dass auch an den Giebelseiten ein Dachüberstand ausgebildet werden kann.

Variante A ist ein hinterlüftetes Dach, allerdings fällt die Hinterlüftungsebene noch zu klein aus.



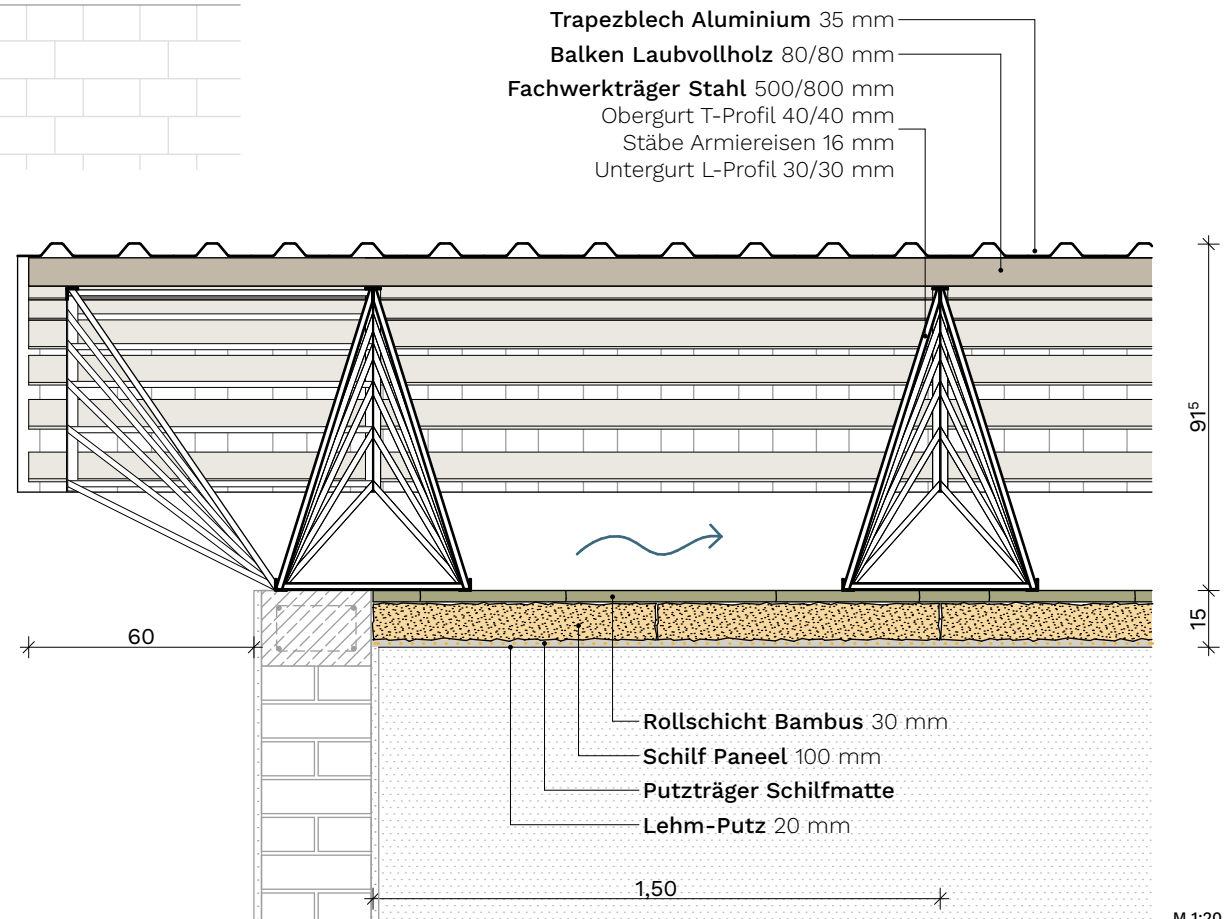
Variante B: Schilfdach

Die Dächer der traditionellen Rundhütten bestehen vollständig aus bio-basierten, lokalen Rohstoffen. Sie sind kostengünstig und ermöglichen eine sehr gute natürliche Lüftung. Die Adaption dieser Technik für zeitgenössische Wohnbauten birgt ein großes Potenzial. Es ist jedoch zu beachten, dass die Schilfdeckung alle paar Jahre erneuert werden muss, was bei zweigeschossigen Bauwerken einen größeren Aufwand bedeutet. Zudem gelten Bambus-Schilf-Dächer als weniger erstrebenswert, da sie keinen dichten Raumabschluss bilden: Vögel nisten im Schilf, Insekten befallen den Bambus, und Staub rieselt herab.

Variante C: Blechdach aufgeständert

Die leichten Fachwerkträger können am Boden geschweißt werden. Ihre räumliche Ausbildung ermöglicht eine einfache Montage auf dem Ringbalken, verhindert das Kippen und verringert die Gefahr des Knickens quer zur Tragrichtung. Die Stäbe des Fachwerks bestehen aus Bewehrungsstahl, der in der Region gut verfügbar und preiswerter als Stahlrohr ist. Die Träger stützen das Blechdach und ermöglichen einen Luftraum von bis zu 80 cm.

Unterseitig wird eine Abhangdecke aus Bambus-Stangen und Schilfmatten befestigt. Wird die Abhangdecke zusätzlich verputzt, entsteht ein komfortabler Innenraum. Die Fachwerkträger können auskragen und so besonders in Spannrichtung große Dachüberstände realisieren, quer zur Spannrichtung wird das Fachwerk räumlich erweitert. Verschiedene Dachformen sind möglich, darunter auch Tonnengewölbe. Ein 4 m langer Träger aus 16 mm Bewehrungsstahl erfüllt den statischen Nachweis (siehe statische Bemessung im Anhang).



Einsparpotenziale

Variante B: Schilfdach

100 % Aluminium

100 % Holz

Variante C: Blechdach aufgeständert

43 % Holz

Mehraufwand

Variante A: Blechdach gedämmt

55 % Holz

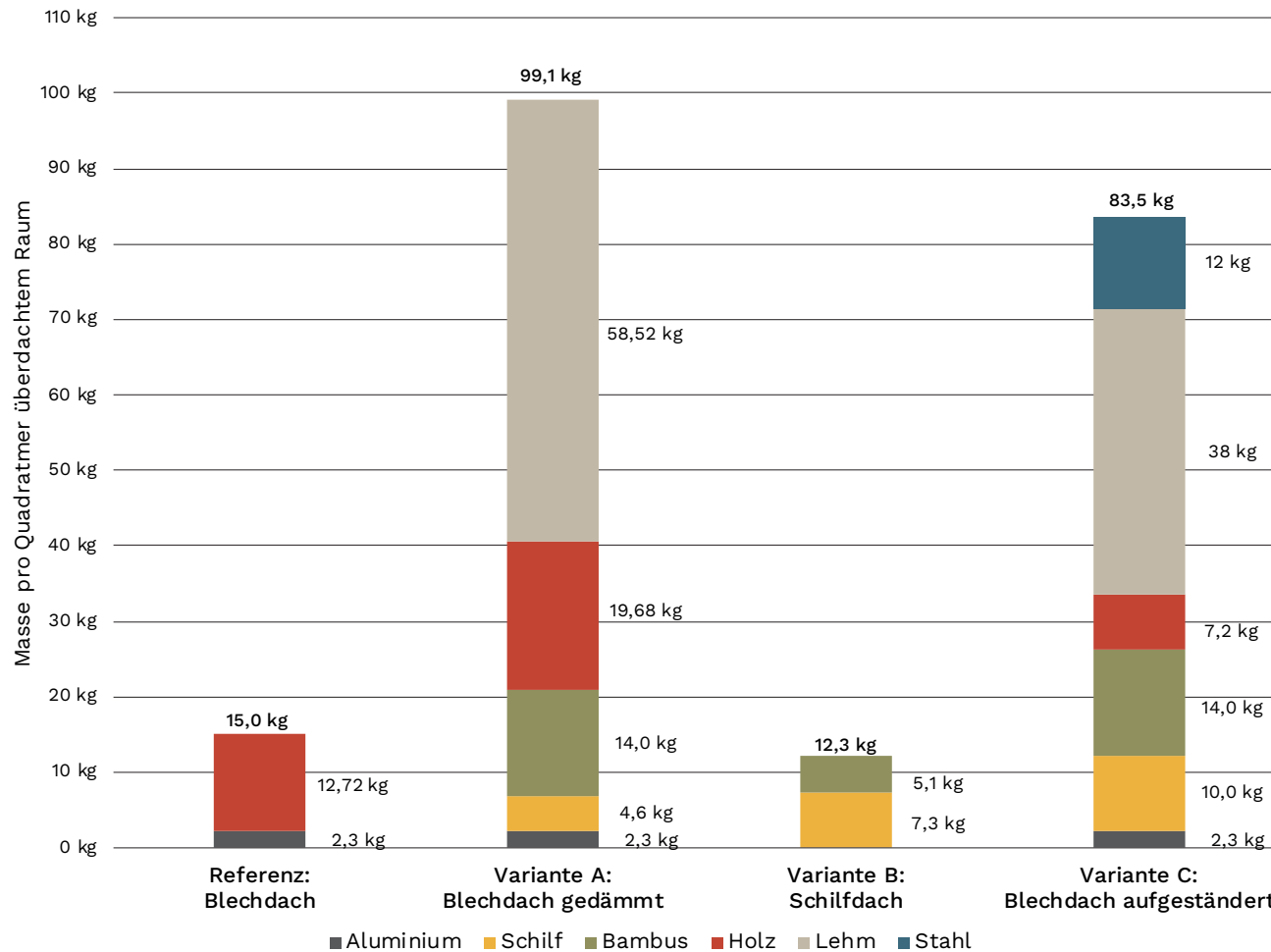
Variante C: Blechdach aufgeständert

100 % Stahl

Ressourcenverbrauch

Kritische Baustoffe beim Dach sind Stahlprofile und Trapezblech, die mit hohem Energieaufwand verbunden und teuer sind. Holz gilt als nachwachsender Rohstoff und CO₂-Speicher mit meist sehr guter Ökobilanz, sollte in Mako jedoch aufgrund knapper Vorkommen sparsam eingesetzt werden.

Variante A bietet eine Dämmung, verursacht dadurch einen höheren Materialbedarf als die Referenz und stellt dennoch einen praktikablen Kompromiss dar. Das Schilfdach kommt gänzlich ohne kritische Baustoffe aus, bringt dafür aber konstruktive Einschränkungen mit sich. Variante C sorgt für thermischen Komfort, ist allerdings aufwendig und benötigt viel Stahl.



Betrachtet wird der Materialbedarf der Dächer als Masse pro 1 Quadratmeter überdachtem Raum. Berechnungsgrundlage sind exemplarische Räume von jeweils 4x5m (20m²). Sparren und Fachwerkträger spannen entlang der kurzen Richtung von 4m. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für alle Varianten mit Blech-Deckung ein Trapezblech 35/207 aus Aluminium gewählt. „Lehm“ steht hier für die gesamten Lehmprodukte im Bauteil, eventuell sind manche davon mit Sand abgemagert.

VI.
GALLÉ LEYDI

EXEMPLARISCHER
ENTWURF



Fallstudie, Weg vom Entwurfs-Grundstück zum Bestands-Hof, Mako, 2025

ENTWURF

In diesem Kapitel werden die erarbeiteten baukonstruktiven Ansätze in einem exemplarischen Entwurf für ein Wohnhaus getestet. Es entsteht Gallé Leydi – das „Haus aus Erde“ oder das „Haus der Erde“. Als Typologie wurde ein freistehendes Einfamilienhaus gewählt. Dieser Haustyp wird städtebaulich oft kritisch gesehen, ist in Mako jedoch aufgrund familiärer Wohntraditionen sehr verbreitet und wird auch zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Der Entwurf ist zweigeschossig ausgelegt, um den Anforderungen an höhere bauliche Dichte und wandelnde Wohnbedarfe gerecht zu werden. Er ermöglicht zudem alternative Nutzungen über das reine Familienwohnen hinaus.

Als fiktives Baugrundstück dient das Grundstück der im Kapitel III untersuchten Familie von Marly Diallo. Sobald einer der Söhne eine eigene Familie gründet, entsteht Bedarf für einen Neubau auf dem elterlichen Grundstück. Zusätzlich plant die Familie Zimmer zur Vermietung anzubieten, und die Frauengruppe von Marly sucht nach Produktionsräumen für die gewerbliche Lebensmittelherstellung. Statt wie ursprünglich geplant das Maisfeld hinter dem Haus zu bebauen, setzt Gallé Leydi auf Nachverdichtung. Der Entwurf besteht aus zwei parallelen Riegeln, verbunden durch einen Mittelbau, was einen Hof bildet. Der Hof orientiert sich zum Feld, die Eingangsseite liegt zur Zufahrt. Es existiert eine Verbindung zum bestehenden Hof der Familie sowie zur Verwandtschaft gegenüber. Das Gebäude kann zunächst eingeschossig errichtet und später aufgestockt werden.

Der Grundriss ist durch vielseitig nutzbare, gleichwertige Räume geprägt, die wandelnden familiären Situationen Rechnung tragen. Die geschlossenen Zimmer in den Seitenflügeln dienen als Schlafzimmer für mehrere Personen, Wohnzimmer, Gewerbe- oder Mieträume. Der offene Mitteltrakt im Erdgeschoss und die Dachterrasse im Obergeschoss sind Erschließungs- und Gemeinschaftsflächen mit starkem Außenraumbezug. Die innenliegende Sanitäreinrichtung gewährleistet einen gewissen Komfortstandard; durch die Beschränkung auf ein Badezimmer im Erdgeschoss soll der Aufwand minimiert werden.

Baukonstruktiv setzt Gallé Leydi auf tragendes Lehmsteinmauerwerk. Die Grundrisse folgen der Logik eines

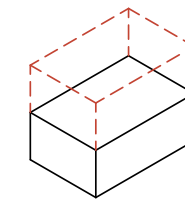
klassischen massivem Mauerwerksbaus. Für die anschließenden Bauteile werden jeweils die pragmatischen, einfach ausführbaren Varianten der untersuchten Konstruktionen verwendet. Das Bauwerk gründet auf Streifenfundamenten aus unbewehrtem Beton. Die Geschossdecke ist eine Einhängendecke aus Stahlbetonträgern und Schilf-Lehm-Deckensteinen. Das Dach wird als gedämmtes Blechdach ausgeführt.

Geschlossene Fassaden erhalten einen Witterungsschutz durch eine vorgehängte Bambusschalung. Die Fassaden mit Öffnungen werden mit Kalkputz verputzt, was die Ausführung von Laibungsdetails erleichtert. Dachüberstände und Vordächer bieten Schutz vor Sonne und Regen. Die Dachterrasse ist komplett regengeschützt, weshalb sie nicht als Flachdach ausgeführt werden muss.

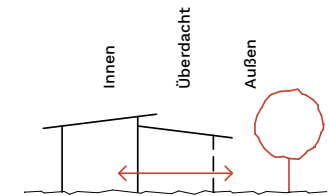
Alle räumlichen Situationen des Entwurfs lassen sich mit der vorgestellten Palette konstruktiver Systeme umsetzen. Eine Ausnahme bildet die Überdachung der Dachterrasse im Obergeschoss, bei der Stahl-Fachwerkträger von Außenwand zu Außenwand spannen und einen stützenfreien, luftigen Raum schaffen. Fenster und Türen sind grundsätzlich bis zum Ringbalken hochgeführt. Die Fenster in Schlaf- und Wohnräumen sind verglast. Querlüftung und Nachtauskühlung erfolgen über in die Öffnungselemente integrierte Lamellen im Erdgeschoss und durch Lochmauerwerk im Obergeschoss. Öffnungen im Mittelbau sind mit dekorativen Gittern versehen und dauerhaft luftdurchlässig.

Die Elektro- und Sanitärinstallationen sowie das Abwassermanagement werden in dieser Masterarbeit nicht behandelt.

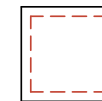
Im Außenbereich prägen die Bambus-Fassaden den Entwurf. Innen tritt Lehm als Material in Form von Sichtmauerwerk aus CEB, Lehmputz und Lehmböden hervor. Sichtbare Dachkonstruktionen bilden bewusste Kontraste. Gallé Leydi macht lokale, traditionelle Naturmaterialien als moderne Baustoffe für zeitgenössischen Wohnungsbau erfahrbar.



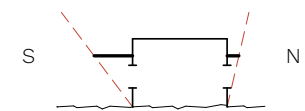
2 Geschosse, Errichtung in Phasen



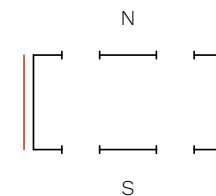
Außenraumbezug



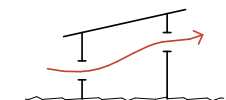
neutrale, flexibel nutzbare Räume



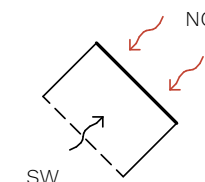
Sonnenschutz Öffnungen



Nord-Süd-Orientierung

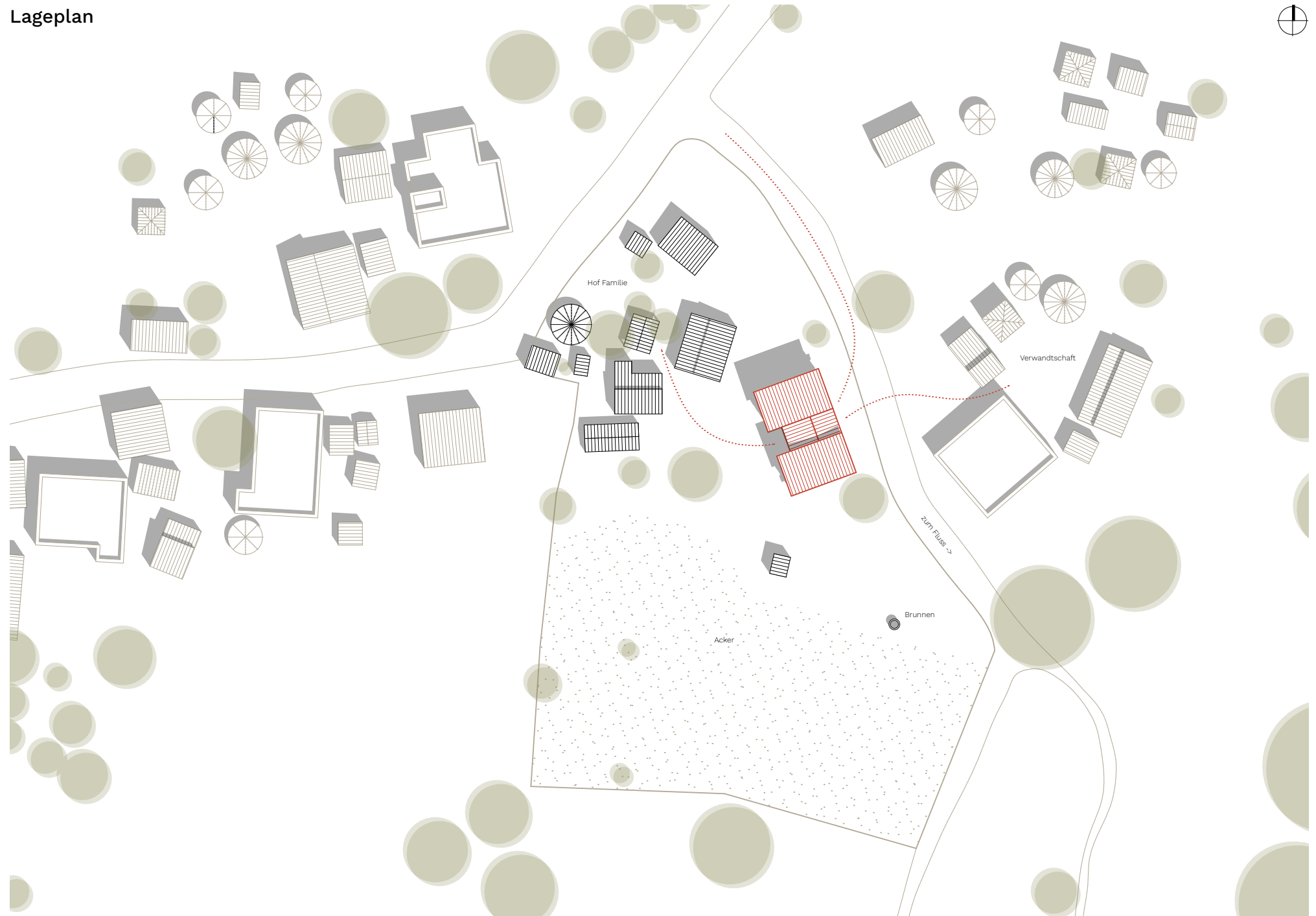


Querlüftung aller Räume



Windschutz

Lageplan



Axonometrie

1. Errichtung

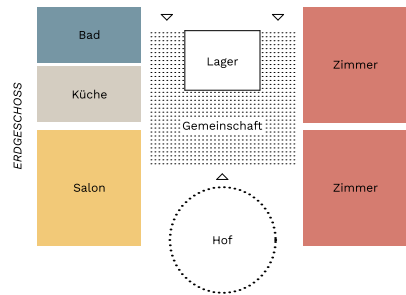


2. Aufstockung

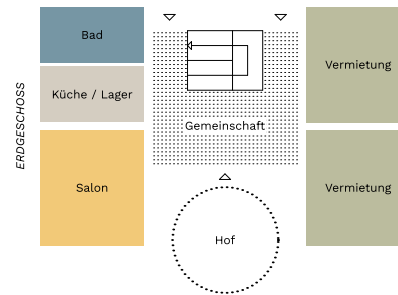
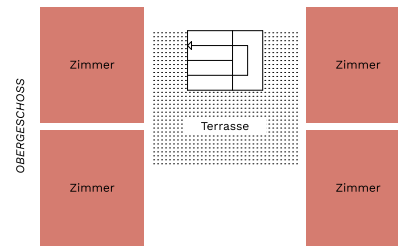




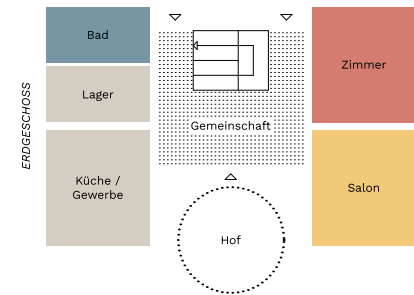
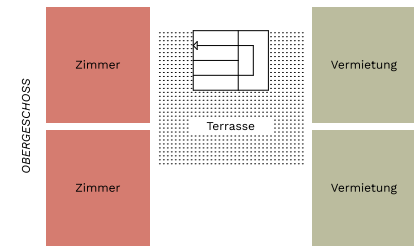
ERRICHTUNG



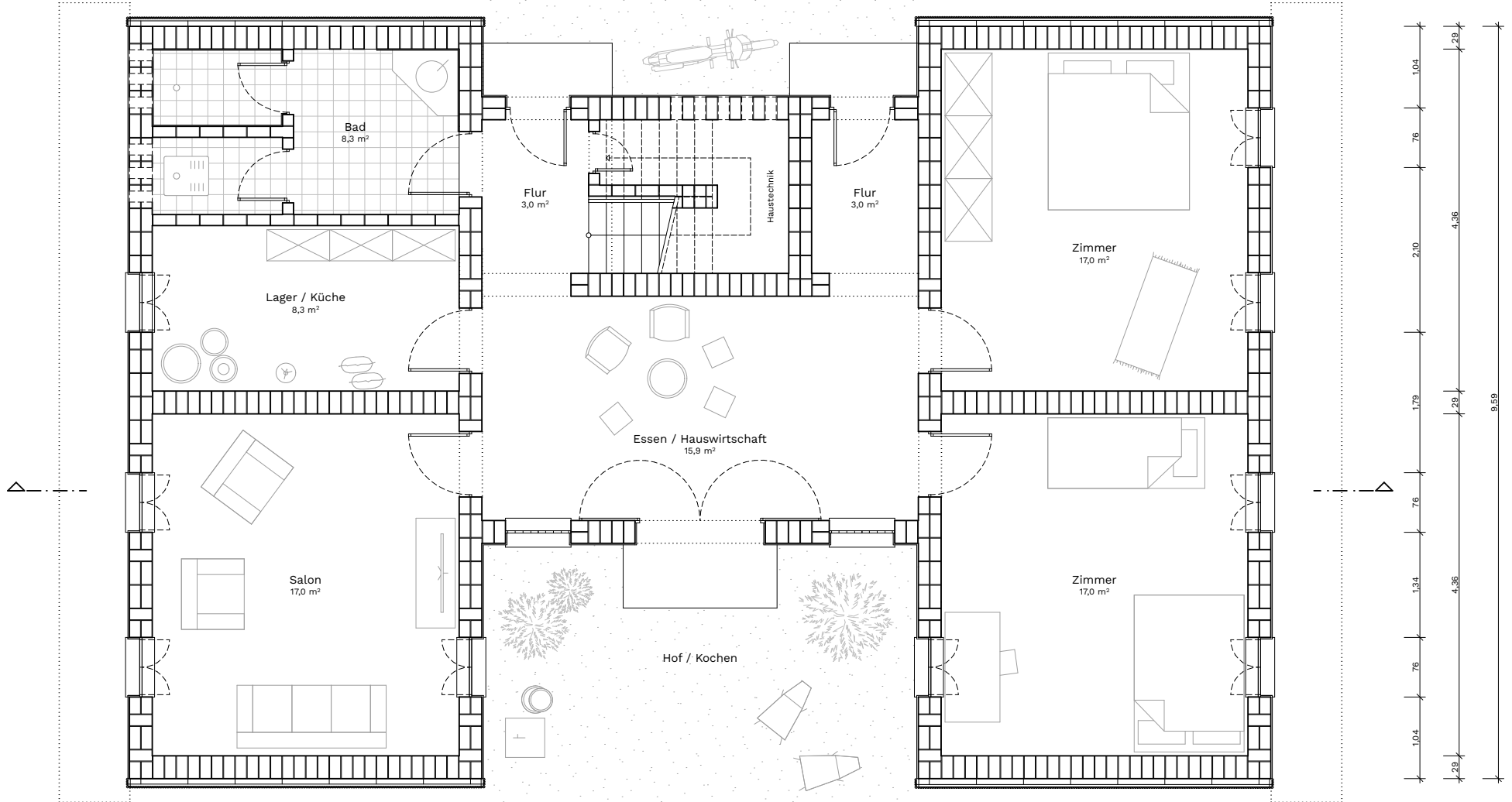
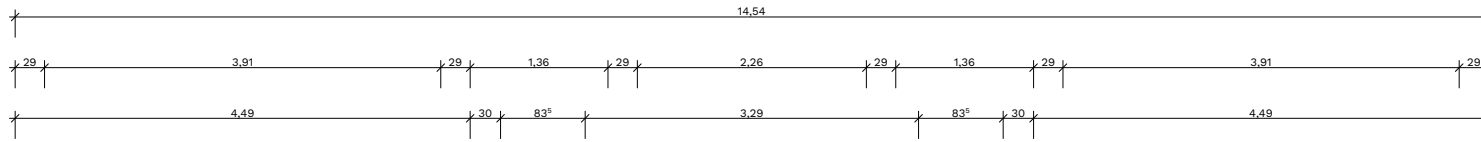
AUFSTOCKUNG



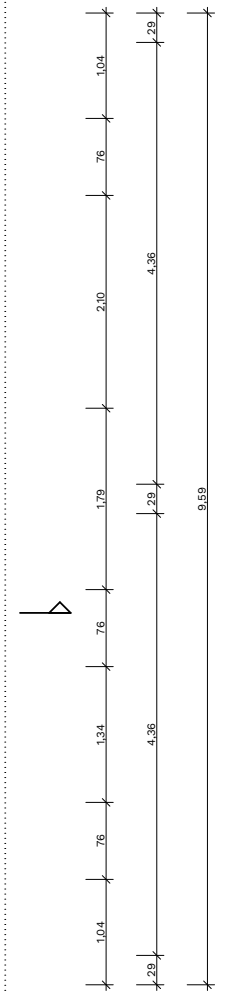
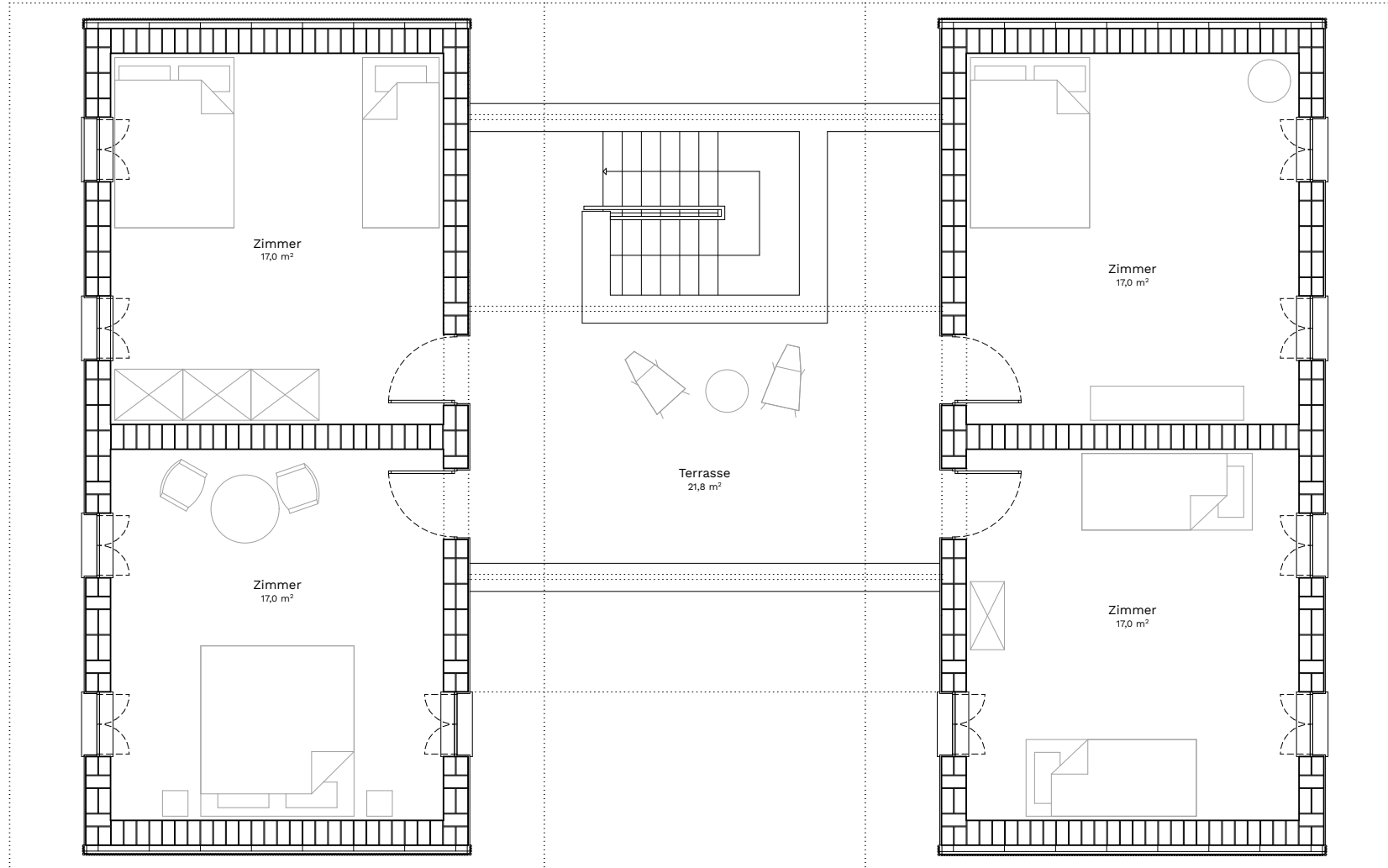
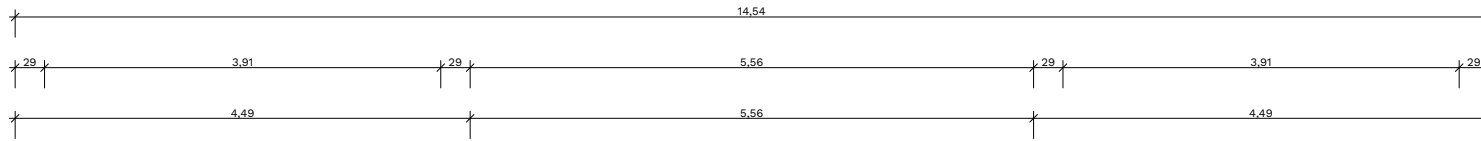
UMBAU



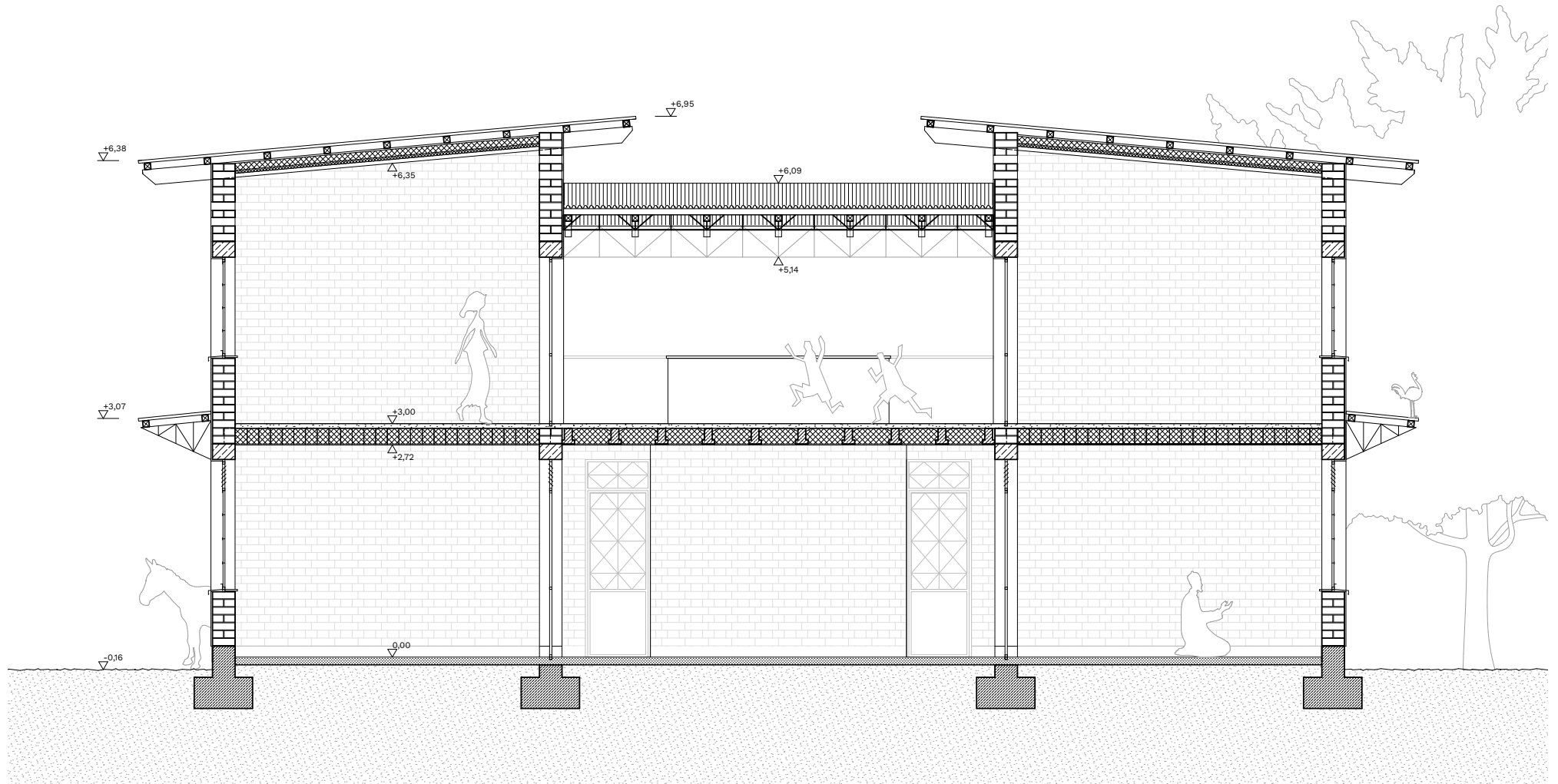
Grundriss Erdgeschoss



Grundriss Obergeschoss

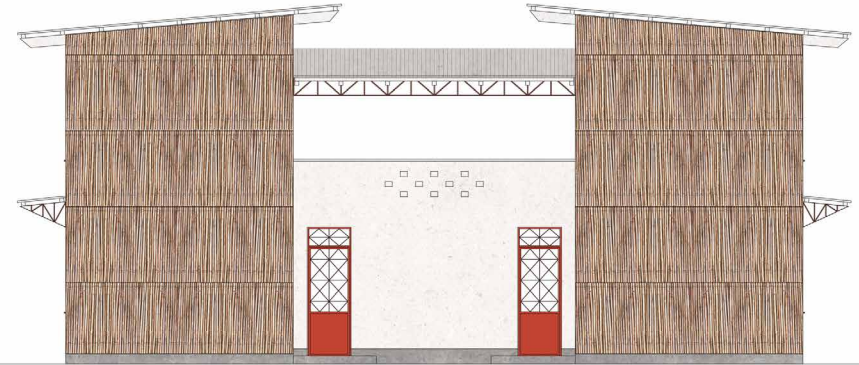


Schnitt

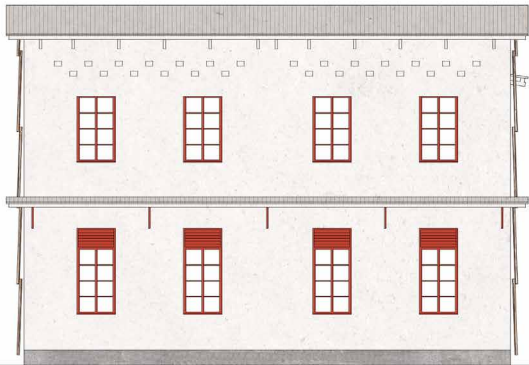




Ansicht Nord-West



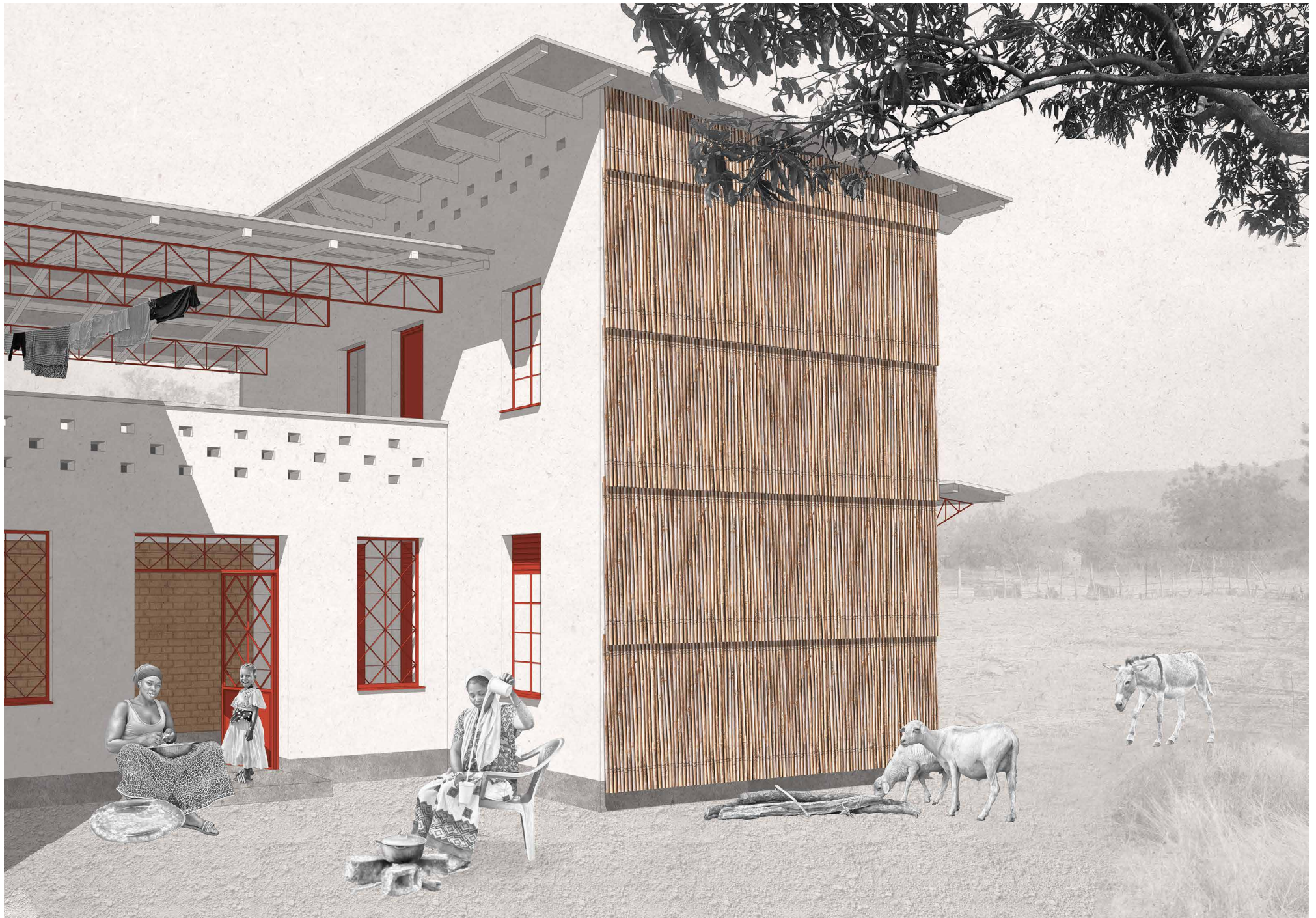
Ansicht Nord-Ost



Ansicht Süd-Ost



Ansicht Süd-West

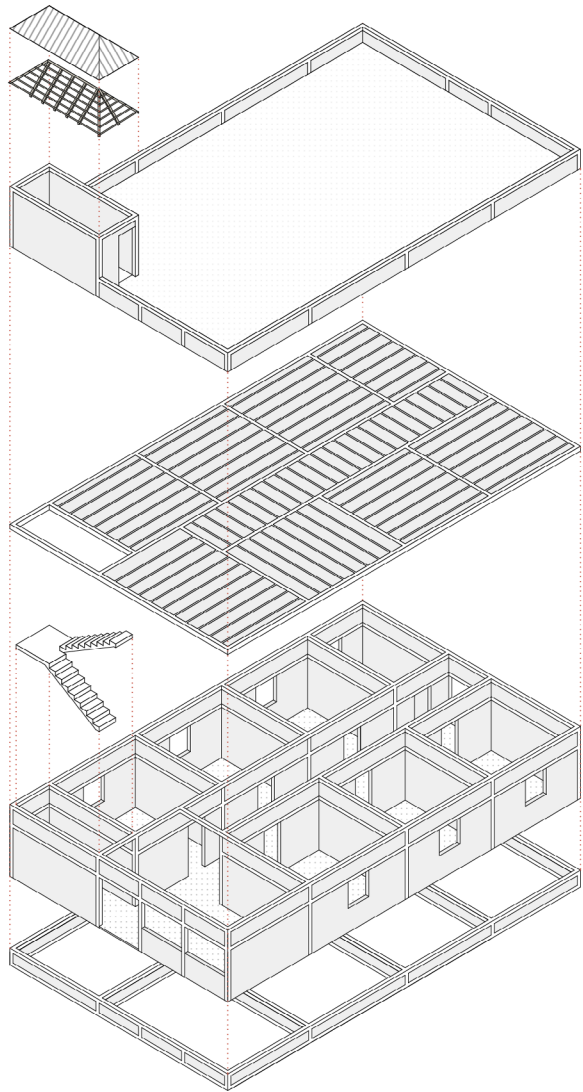


Hof, Gallé Leydi, Visualisierung

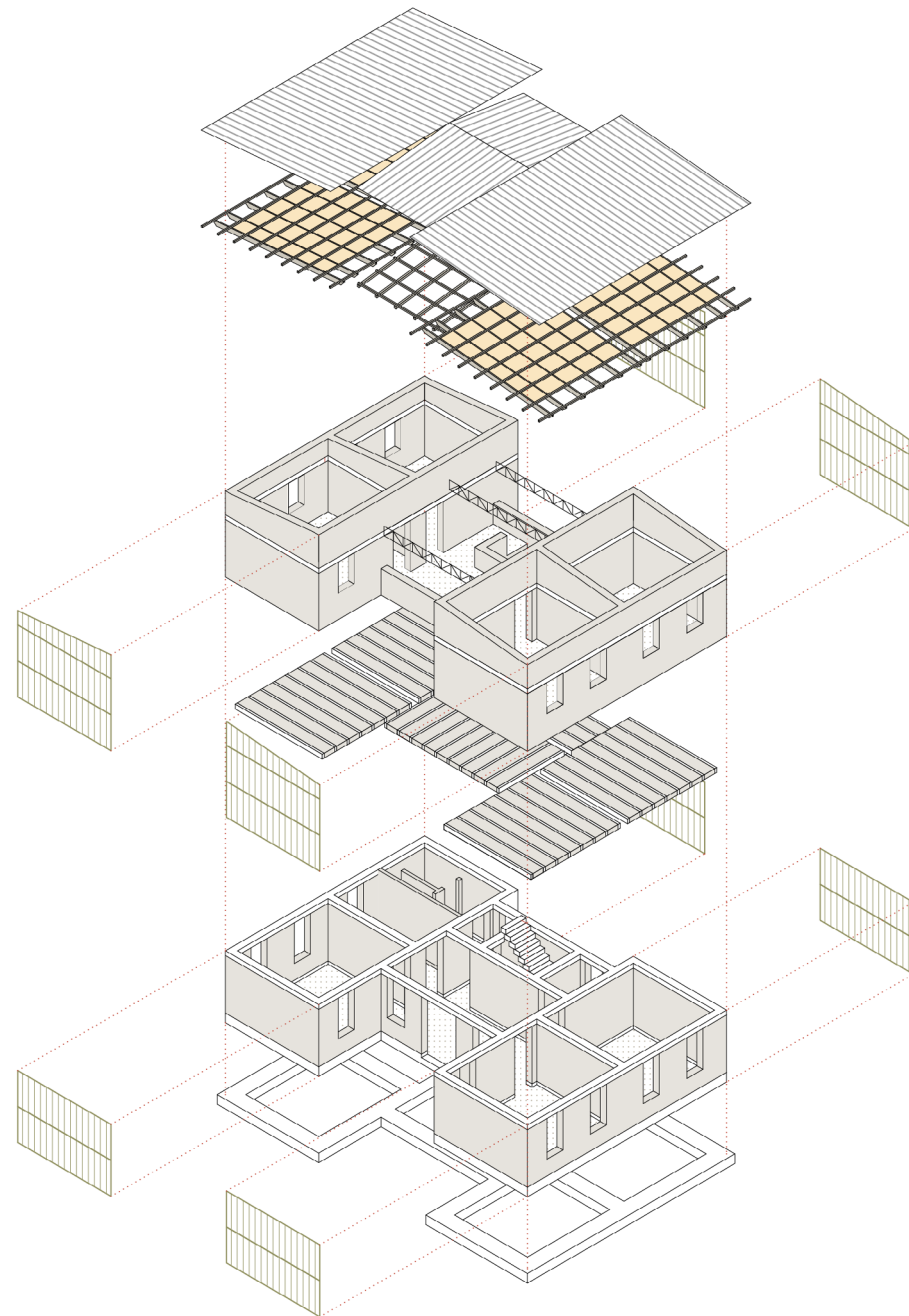
VII. AUSWERTUNG

RESSOURCEN
BAUKOSTEN

RESSOURCEN

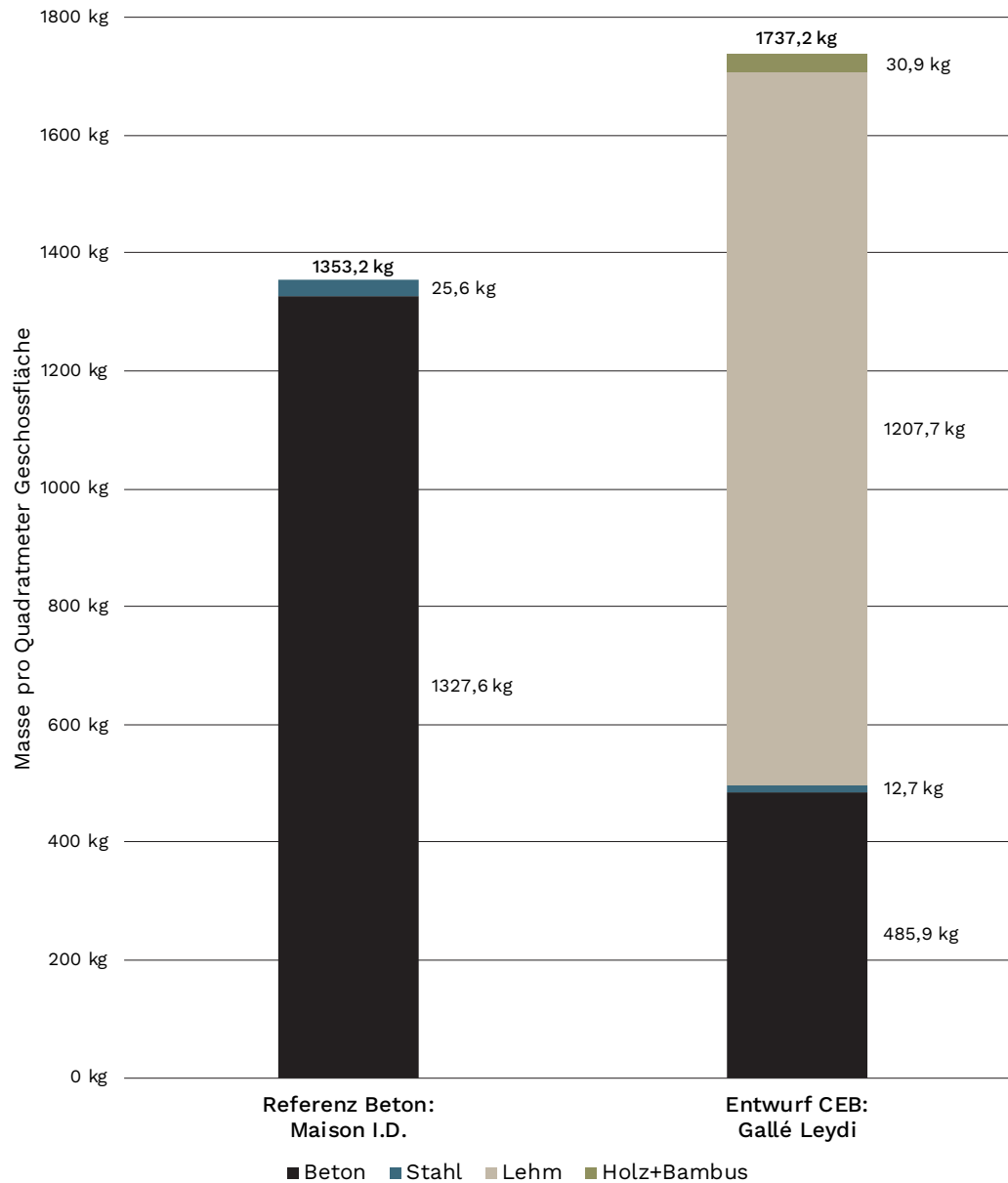


Referenz Beton: Maison I.D.



Entwurf CEB: Gallé Leydi

Referenz Beton: Maison I.D.						Entwurf CEB: Gallé Leydi					
Geschossfläche: 186 m ²						Geschossfläche: 235 m ²					
Freistehendes Einfamilienhaus, 1 Geschoss + Dachterrasse, Flachdach						Freistehendes Einfamilienhaus, 2 Geschosse, geneigtes Dach gedämmt					
<i>Hinweis: Nicht betrachtet sind Sanitärreinrichtung, Anstriche, Abdichtungen etc.</i>											
	Volumen gesamt [m ³]	Volumen pro 1 m ² Geschossfläche [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse gesamt [t]	Masse pro 1 m ² Geschossfläche [kg]		Volumen gesamt [m ³]	Volumen pro 1 m ² Geschossfläche [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse gesamt [t]	Masse pro 1 m ² Geschossfläche [kg]
Gründung + Sockel	111 Laufmeter					82 Laufmeter					
Ortbeton	7,32	0,039	2400,00	17,56	94,41		34,31	0,146	2400,00	82,34	350,37
Bewehrungsstahl (2%)	0,15	0,001	7850,00	1,15	6,18						
Beton-Hohlblockstein (Lochanteil 30%)	4,16	0,022	2400,00	9,99	53,72						
Fußboden EG	133 m ²					88 m ²					
Stampflehboden							8,77	0,037	2000,00	17,54	74,64
Zement-Estrich	5,32	0,029	2400,00	12,77	68,65		0,50	0,002	2400,00	1,20	5,09
Fliesen	1,06	0,006	2500,00	2,66	14,30		0,07	0,000	2500,00	0,17	0,71
Außenwand	235 m ²					313 m ²					
Ortbeton	5,54	0,030	2400,00	13,30	71,50						
Bewehrungsstahl (2%)	0,11	0,001	7850,00	0,87	4,68						
Beton-Hohlblockstein (Lochanteil 30%)	21,01	0,113	2400,00	50,43	271,14						
Zementputz	7,04	0,038	2400,00	16,90	90,84						
Lehmsteinmauerwerk							90,83	0,150	2000,00	181,66	773,00
Kalkputz							3,93	0,150	1800,00	7,07	30,09
Fassade Bambus							3,50	0,150	700,00	2,45	10,44
Innenwand	153 m ²					107 m ²					
Ortbeton	2,95	0,016	2400,00	7,07	38,03						
Bewehrungsstahl (2%)	0,06	0,000	7850,00	0,46	2,49						
Beton-Hohlblockstein (Lochanteil 30%)	10,57	0,057	2400,00	25,36	136,36						
Zementputz	4,59	0,025	2000,00	9,18	49,36						
Lehmsteinmauerwerk							31,15	0,150	2000,00	62,29	265,07
Fliesen							0,22	0,150	2500,00	0,55	2,32
Ringbalken	Bei Innenwand bereits berücksichtigt					143 Laufmeter					
Beton Ringbalken							8,30	0,150	2400,00	19,92	84,76
Bewehrungsstahl (2%)							0,17	0,150	7850,00	1,30	5,54
Treppe	7 m ²					6 m ²					
Beton	1,40	0,008	2400,00	3,36	18,06		1,16	0,150	2400,00	2,79	11,89
Bewehrungsstahl (2%)	0,03	0,000	7850,00	0,22	1,18		0,02	0,150	7850,00	0,18	0,78
Geschossdecke	178 m ²					90 m ²					
Zement-Estrich	7,93	0,043	2400,00	19,02	102,26						
Lehm-Estrich							5,87	0,150	1900,00	11,15	47,44
Deckenstein Beton	18,14	0,098	2400,00	43,53	234,01						
Deckenstein Lehm-Anteil (10%)							1,43	0,150	1900,00	2,71	11,53
Deckenstein Schilf-Anteil (90%)							12,83	0,150	100,00	1,28	5,46
Träger Beton	5,46	0,029	2400,00	13,11	70,48		3,31	0,150	2400,00	7,95	33,82
Bewehrungsstahl (gemäß Statik)	0,17	0,001	7850,00	1,32	7,08		0,06	0,150	7850,00	0,44	1,86
Zementputz	2,68	0,014	2000,00	5,36	28,79				1900,00		
Lehmputz							0,00	0,150		3,42	14,55
Dach	15 m ²					173 m ²					
Trapezblech Aluminium	0,53	0,003	65,71	0,03	0,19		6,06	0,150	65,71	0,40	1,69
Balken Laubvollholz	0,24	0,001	800,00	0,19	1,03		4,26	0,150	800,00	3,40	14,49
Dämmung Lehm-Anteil (40%)							2,65	0,150	1900,00	5,03	21,42
Dämmung Schilf-Anteil (60%)							3,97	0,150	100,00	0,40	1,69
Rollschicht Bambus							1,72	0,150	700,00	1,20	5,12
Fachwerkträger	-					16 Laufmeter					
Stahlprofile							0,01	0,150	7850,00	0,10	0,44
Vordach	-					18 m ²					
Trapezblech Aluminium							0,64	0,150	65,71	0,04	0,18
Balken Laubvollholz							0,26	0,150	800,00	0,20	0,87
Stahlprofile							0,00	0,150	7850,00	0,00	0,02
Türen + Fenster	35 m ²					55 m ²					
Stahlprofile	0,09	0,001	7850,00	0,74	4,00		0,12	0,150	7850,00	0,96	4,08
Verglasung 5 mm							0,08	0,150	2500,00	0,19	0,80
Materialbedarf gesamt	255 t					418 t					
Beton und Zementprodukte	104,10	0,560		246,94	1327,62		47,58	0,150		114,20	485,94
Bewehrungsstahl	0,51	0,003		4,02	21,60		0,24	0,150		1,92	8,18
Stahlprofile	0,09	0,001		0,74	4,00		0,14	0,150		1,07	4,54
Aluminium-Blech	0,53	0,003		0,03	0,19		6,70	0,150		0,44	1,87
Lehm und Lehmprodukte							140,69	0,150		283,80	1207,65
Schilfgras							16,80	0,150		1,68	7,15
Bambus							5,22	0,150		3,66	15,56
Holz	0,24	0,001		0,19	1,03		4,51	0,150		3,61	15,36
Kalkputz							3,93	0,150		7,07	30,09
Fliesen	1,06	0,006		2,66	14,30		0,28	0,150		0,71	3,03
Glas							0,08	0,150		0,19	0,80



Vergleich Materialverbrauch

Zum Abschluss wird der Ressourcenverbrauch des Entwurfs mit einem real existierenden Beton-Wohnhaus in Mako verglichen. Für beide Gebäude wurde eine Mengenermittlung des Materialbedarfs durchgeführt. Das Referenzgebäude ist zwar eingeschossig, jedoch gut vergleichbar, da es über ein Flachdach mit Betondecke verfügt.

Gallé Leydi benötigt 63% weniger Beton und 50% weniger Stahl als die Referenz. Dies ist eine beachtliche Einsparung bei gleichzeitig hochwertiger Baukonstruktion und räumlicher Qualität - damit ist das Ziel des Entwurfs erreicht!

Dennoch wird deutlich, dass trotz des Ersetzens von Beton-Hohlblocksteinen durch gepresste Lehmsteine und des Verzichts auf ein Stahlbetonskelett weiterhin erhebliche Mengen an Beton und Stahl für anschließende Bauteile benötigt werden. Nur radikalere konstruktive Alternativen könnten die Bilanz stärker verbessern. Kritisch ist zudem der gesteigerte Einsatz von Aluminium-Trapezblech und Holz bei Gallé Leydi zu betrachten.

Einsparpotenziale

63 % Beton

50 % Stahl

Mehraufwand

1207,7 kg Lehm / m²

14,3 kg Holz / m²

15,6 kg Bambus / m²

7,2 kg Schilf / m²

1,7 kg Aluminium / m²

Verglichen wird der Materialbedarf des Entwurfs aus CEB mit dem Materialbedarf eines realen Referenzgebäudes aus Beton, angegeben in Masse pro 1 Quadratmeter Geschossfläche.

Kostenschätzung Entwurf CEB: Gallé Leydi							
	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]	Einzelpreis F CFA	Einzelpreis €	Bezugsgröße	Kosten gesamt F CFA	Kosten gesamt €
Gründung + Socket		34,31				953.328	1.453,24
Ortbeton		34,31					
	Sand 80%	27,45	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	120.085	183,06
	Zement 20%	6,86	4.250	6,48	35 l (50 kg Sack)	833.243	1.270,19
Fußboden EG		88,00				85.462	130,28
Stampflehboden		8,77	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	38.369	58,49
Zement-Estrich		0,50					
	Sand 80%	0,40	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	1.750	2,67
	Zement 20%	0,10	4.250	6,48	35 l (50 kg Sack)	12.143	18,51
Fliesen		8,30	4.000	6,10	1 Paket (1m ²)	33.200	50,61
Außenwand		313,20				3.291.509	5.017,54
Lehmsteinmauerwerk 29cm		313,20	90,83				
	CEB 290x140x90mm	313,20	150	0,23	1 CEB (65 Steine = 1m ³)	3.053.700	4.655,03
	Lehmmörtel 15%	13,62	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	59.606	90,86
Kalkputz		3,39					
	Kalk 25%	0,85	4.000	6,10	50 l (Sack)	67.800	103,35
	Sand 75%	2,54	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	11.123	16,96
Bambus Fassade		116,80	100	0,15	1 Stange (8,5 St. = 1m ³)	99.280	151,34
Innenwand		107,00				1.063.613	1.621,36
Lehmsteinmauerwerk 29cm		107,00	31,03				
	CEB 290x140x90mm	107,00	150	0,23	1 CEB (65 Steine = 1m ³)	1.043.250	1.590,32
	Lehmmörtel 15%	4,65	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	20.363	31,04
Ringbalken		8,30				299.592	456,70
Stahlbeton		8,30					
	Sand 80%	6,64	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	29.050	44,28
	Zement 20%	1,66	4.250	6,48	35 l (50 kg Sack)	201.571	307,27
	Bewehrungsstahl 2%	0,17	405.712	618,46	1 m ³	68.971	105,14
Treppe		1,16				41.644	63,48
Stahlbeton		1,16					
	Sand 80%	0,93	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	4.060	6,19
	Zement 20%	0,23	4.250	6,48	35 l (50 kg Sack)	28.171	42,94
	Bewehrungsstahl 2%	0,02	405.712	618,46	1 m ³	9.413	14,35
Geschossdecke		90,00				163.561	249,33
Lehm-Estrich		5,78	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	25.288	38,55
Deckenstein							
	Lehm-Anteil (10%)	1,43	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	6.256	9,54
	Schilf-Anteil (90%)	12,83	1.000	1,52	1 m ³	12.830	19,56
Stahlbeton-Träger		3,13					
	Sand 80%	2,50	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	10.955	16,70
	Zement 20%	0,63	4.250	6,48	35 l (50 kg Sack)	76.014	115,88
	Bewehrungsstahl 2%	0,06	405.712	618,46	1 m ³	24.343	37,11
Lehmputz		1,80	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	7.875	12,00
Dach		173,00				1.563.464	2.383,33
Trapezblech Aluminium		173,00	3.600	5,49	1 m ²	622.800	949,39
Laubvollholz		4,26	200.000		1 m ³	852.000	1.298,78
Dämmung		86,00					
	Lehm-Anteil (40%)	2,65	35.000	53,35	1 LKW (8m ³)	11.594	17,67
	Schilf-Anteil (60%)	3,97	1.000	1,52	1 m ³	3.970	6,05
Rollschicht Bambus		86,00	100	0,15	1 Stange (8,5 St. = 1m ³)	73.100	111,43
Fachwerkträger						300.800	458,54
Schlosserarbeiten		6,40	47.000	71,65	1 m ²	300.800	458,54
Vordach		18,00				210.800	321,34
Trapezblech Aluminium		18,00	3.600	5,49	1 m ²	64.800	98,78
Laubvollholz		0,26	200.000		1 m ³	52.000	79,27
Schlosserarbeiten		2,00	47.000	71,65	1 m ²	94.000	143,29
Türen + Fenster		55,00				2.762.000	4.210,37
Schlosserarbeiten		55,00	47.000	71,65	1 m ²	2.585.000	3.940,55
Glaserarbeiten		15,00	11.800	17,99	1 m ²	177.000	269,82
Sanitärinstallation + Klärgube						300.000	530,97
ähnlich wie "Suddo Neuve"						300.000	530,97
Elektro-Installation + PV						1.198.500	2.121,24
wie "Suddo Neuve"	235,00		5.100	9,03	1 m ² Geschossfläche	1.198.500	2.121,24
Baukosten gesamt						17.495.011	26.669,22
Materialkosten						12.234.273	18.649,81
Sicherheitszuschlag 10%						1.223.427	1.864,98
Personalkosten 30%						4.037.310	6.154,44

BAUKOSTEN

Alternative Bauweisen sind in Mako nur dann relevant, wenn sie zu geringeren oder zumindest vergleichbaren Kosten wie konventionelle Bauweisen realisierbar sind. Daher wird zum Abschluss ein Baukostenvergleich vorgestellt.

Die Recherche zu Baukosten in Mako erwies sich als äußerst schwierig, da Bauherr:innen ihre Investitionen oft schrittweise über lange Zeiträume tätigen und kaum Buch führen. Gesamtkosten lassen sich meist nicht in Material- und Personalkosten aufschlüsseln. Drei Bauherr:innen standen für Auskünfte zur Verfügung, zusätzlich dienten Vergleichsgebäude von Studio Suddo Neuve als Referenz.

Dank einer guten Datengrundlage von Studio Suddo Neuve war eine präzise Kalkulation der Materialkosten für Gallé Leydi möglich. Personalkosten sowie Schlosser-, Sanitär- und Elektroinstallationen konnten jedoch nur grob auf Basis von Erfahrungswerten geschätzt werden.

Zur Bepreisung von CEB wurde aus der Preiskalkulation von CSEB der Zement-Anteil herausgerechnet. Eine in Mako produzierende Firma könnte einen CEB im Format 29x14x9 cm für umgerechnet 23 Cent pro Stein anbieten, CSEB kosten etwa das 1,5-Fache.

Die geschätzten Baukosten für Gallé Leydi belaufen sich auf rund 26.669 € (umgerechnet). Bei 235 m² Geschossfläche entspricht das Baukosten von 113 € pro Quadratmeter. Die Dachkonstruktion sowie Schlosserarbeiten an Türen, Fenstern und Fachwerkträgern machen anteilig besonders hohe Kosten im Verhältnis zum Materialanteil des Bauwerks aus.

Der Vergleich auf der folgenden Seite zeigt, dass der zweigeschossige Entwurf aus CEB deutlich teurer als eingeschossige Betonbauten mit Blechdach ist, aber kostengünstiger als eingeschossige Betonbauten mit Flachdach bleibt. Gegenüber dem Bauen mit CSEB ergibt sich eine deutliche Kosteneinsparung.

52 € / m²

Maison M.D.
(Fallstudie)

Nutzung: **Wohnen**
Geschosse: I
Konstruktion:
Beton, Blechdach
Geschossfläche: **49 m²**
Baukosten: **2.550 €**



113 € / m²

Gallé Leydi
(Entwurf)

Nutzung: **Wohnen**
Geschosse: II
Konstruktion:
CEB, Blechdach gedämmt
Geschossfläche: **235 m²**
Baukosten: **26.669 €**



117 € / m²

Maison Is.D.

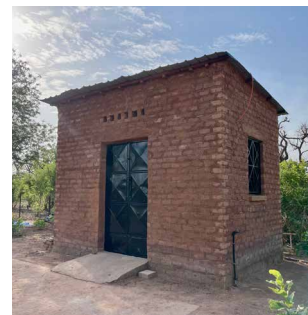
Nutzung: **Wohnen**
Geschosse: I
Konstruktion:
Beton, Flachdach
Geschossfläche: **75 m²**
Baukosten: **8.809 €**



124 € / m²

Maison NiokoBâti

Nutzung: **Atelier**
Geschosse: I
Konstruktion:
CSEB,
Blechdach gedämmt
Geschossfläche: **18 m²**
Baukosten: **2.238 €**



148 € / m²

Maison I.D.
(Referenz)

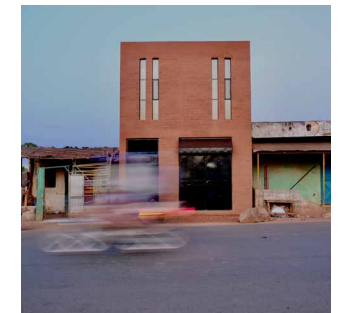
Nutzung: **Wohnen**
Geschosse: I
Konstruktion:
Beton, Flachdach
Geschossfläche: **186 m²**
Baukosten: **27.438 €**



173 € / m²

Suddo Neuve
(Demonstrationsgebäude)

Nutzung:
Wohnen, Gewerbe
Geschosse: II
Konstruktion:
CSEB, Flachdach
Geschossfläche: **80 m²**
Baukosten: **13.847 €**



VIII.

FAZIT

Die rasante Urbanisierung Westafrikas stellt die Region vor eine zentrale Frage: Wie lässt sich der dringend benötigte Wohnungsbau innerhalb planetarer Grenzen realisieren? In Mako zeigt sich diese Herausforderung exemplarisch. Der Ort wächst, neue Wohnbedarfe entstehen, doch die vorherrschende Betonbauweise verursacht immense Emissionen und hohe Kosten. Gleichzeitig gerät eine reiche, über Generationen gewachsene Baukultur in Vergessenheit – obwohl mit Lehm ein ressourcenschonender, lokal verfügbarer Baustoff in großen Mengen vorhanden ist.

Diese Masterarbeit untersucht, wie gepresste Lehmsteine ohne Zementstabilisierung – CEB – eine Alternative zu Beton-Hohlblocksteinen und CSEB bieten können. Die vor Ort durchgeführten Bodenanalysen und Prototypentests beweisen: Aus Makos Lehmerden lassen sich CEB mit ausreichender Druckfestigkeit für tragendes, mehrgeschossiges Mauerwerk herstellen. Die besondere Herausforderung liegt im konstruktiven Witterungsschutz, da Lehm feuchteempfindlich ist. Durch vorgehängte Bambusfassaden oder Kalkputz, ausreichende Dachüberstände und eine solide Sockelausbildung lässt sich diese Anforderung erfüllen.

Für anschließende Bauteile wurden verschiedene Ansätze entwickelt: von pragmatischen, einfach ausführbaren Varianten bis hin zu unkonventionelleren Lösungen. Gründungen sind als Streifenfundamente aus unbewehrtem Beton, aus Beton-Hohlblocksteinen oder CSEB ausführbar. Geschossdecken können als Einhängedecken mit Schilf-Lehm-Deckensteinen, als Kappendecken oder als Gewölbe aus CEB realisiert werden. Für Dächer bieten sich gedämmte Blechdächer, die Weiterentwicklung traditioneller Schilfdächer oder aufgeständerte Konstruktionen an. Jede Variante hat ihre Vor- und Nachteile hinsichtlich Ressourceneinsatz, Ausführbarkeit und klimatischer Performance.

Der exemplarische Entwurf Gallé Leydi zeigt, dass zweigeschossiger Wohnungsbau aus tragendem Lehmsteinmauerwerk in Mako umsetzbar ist. Durch die Adaption etablierter Bautechniken und die (Wieder-) Einführung des Baustoffs Lehm entsteht ein Gebäude, das zeitgenössische Anforderungen an das Wohnen erfüllt, ein besseres Raumklima als konventionelle Betonbauten schafft und sich durch seine Materialästhetik auszeichnet. Die Auswertung belegt: Gegenüber einem vergleichbaren Betonhaus spart Gallé Leydi 63% Beton und 50% Stahl ein – bei Baukosten, die im wirtschaftlich vertretbaren Rahmen liegen. Mit den anspruchsvolleren Varianten der vorgestellten Konstruktionsarten für Fundamente, Decken und Dächer ließe sich der Ressourcenverbrauch noch weiter reduzieren.

Viele Fragen bleiben offen: Welche Antworten lassen sich auf städtebauliche Fragestellungen Mako finden? Gibt es typologische Alternativen zum freistehenden Einfamilienhaus? Wie sehen baukonstruktive Details zur Fügung der Bauteile aus? Wie lassen sich Elektro-, Sanitär- und Abwassersysteme integrieren? Und vor allem: Wie gelingt die Implementierung in die lokale Bauwirtschaft, welche Akteur:innen müssen eingebunden werden, wie kann Akzeptanz geschaffen werden?

Die architektonische Entwicklung in Mako und der gesamten Region bleibt spannend zu beobachten. Naturbaustoffe werden eine Schlüsselrolle in einer zukunftsfähigen, klimagerechten Baupraxis spielen. Gallé Leydi beschreibt die Entwicklung des Mauersteins: von Adobe zu Beton-Hohlblocksteinen, von CSEB zu CEB – zurück zum Lehm! Die Masterarbeit skizziert auch die Evolution der Bauweise: vom biobasierten Leichtbau über den Stahlbeton-Skelettbau hin zu massivem Mauerwerk – eine Entwicklung, die der europäischen Baugeschichte gewissermaßen entgegenläuft. Architektur entsteht durch Ort und Material.



Blick von einer Dachterrasse in Mako, 2025

ANHANG

STATISCHE BEMESSUNG

Wand

Bemessung Lehmsteinmauerwerk

Untersucht wird eine exemplarisches, 1m langes Stück einer Außenwand über zwei Geschosse, mit jeweils einer Einhängedecke aus Schilf-Lehm-Steinen.

$l=1\text{m}$, $t=29\text{cm}$, $h=3\text{m}$

Spannweite Decke: $l_f=5\text{m}$

Lehmsteine Druckfestigkeitsklasse 3

$f_k=2,4\text{N/mm}^2$

Mörtelgruppe 2,5

$\gamma_M=1,7$ (Baustellenmörtel)

NKL 2 -> Umgebungsfeuchtefaktor $M=0,55$

Dauerstandsfaktor $\zeta=0,85$ (Ständige Beanspruchung)

Einwirkungen (siehe auch Bemessung Decke)

Die Decken werden als Einfeldträger betrachtet, die halbe Spannweite (2,5m) wirkt auf die Außenwand.

Geschossdecke OG: $q_d=5,26\text{kN/m}/0,6\text{m}=8,77\text{kN/m}^2 \rightarrow 8,77\text{kN/m}^2 \cdot 2,5\text{m}=21,93\text{kN/m}$

Wand OG: $g=20\text{kN/m}^3 \cdot 0,29\text{m} \cdot 3\text{m}=17,4\text{kN/m} \rightarrow q_d=17,4\text{kN/m} \cdot 1,4=24,36\text{kN/m}$

Geschossdecke EG: $q_d=21,93\text{kN/m}$

Wand EG: $q_d=24,36\text{kN/m}$

Gesamt: $q_d=92,58\text{kN/m}$

$N_{Ed}=q_d \cdot l=92,58\text{kN/m} \cdot 1\text{m}=92,58\text{kN}$

Tragfähigkeit Mauerwerk

Abminderungsfaktor Mauerwerksverband: 0,9

$f_k=0,24\text{kN/cm}^2 \cdot 0,9=0,216\text{kN/cm}^2$

$f_d=\zeta \cdot M \cdot (f_k/\gamma_M)=0,85 \cdot 0,55 \cdot (0,216\text{kN/cm}^2/1,7)=0,0594\text{kN/cm}^2$

Tragfähigkeit Wand

$\Phi_1=1,6-(l_f/6) \leq 0,9$ für $M \cdot f_k \geq 1,8\text{N/mm}^2$

$\Phi_1=1,6-(l_f/5) \leq 0,9$ für $M \cdot f_k < 1,8\text{N/mm}^2$

$M \cdot f_k=0,55 \cdot 2,4\text{N/mm}^2=1,32\text{N/mm}^2 < 1,8\text{N/mm}^2$

$\Phi_1=1,6-(5\text{m}/5)=0,6 \leq 0,9$

Berücksichtigung Knickgefahr: $\Phi_1=0,9-0,03 \cdot (h/t)=0,9-0,03 \cdot (3\text{m}/0,29\text{m})=0,59$

$0,59 < 0,6 \rightarrow$ maßgebend ist $\Phi_1=0,59$

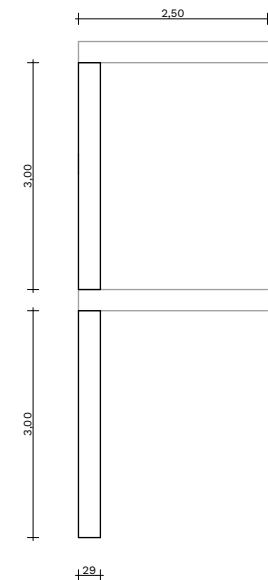
$N_{Rd}=\Phi_s \cdot f_d \cdot A$

$N_{Rd}=0,59 \cdot 0,0594\text{kN/cm}^2 \cdot (29\text{cm} \cdot 100\text{cm})=101,63\text{kN}$

Nachweis

$N_{Ed} \leq N_{Rd}$

$92,58\text{kN} < 101,63\text{kN} \rightarrow$ **Nachweis erfüllt!**



Bemessung Streifenfundament

Zur Vereinfachung wird ein 1m langer Abschnitt eines Streifenfundaments einer Außenwand bemessen. Es werden Lasten aus zwei darüber liegenden Geschossen angenommen, jeweils mit der Variante "Einhängedecke Schilf-Lehm" als Geschossdecke und jeweils mit einer 29cm starken Wand aus Lehmsteinmauerwerk. Hier wird von einem unbewehrtem Fundament aus Beton ausgegangen, die Bemessung kann jedoch auf gemauerte Fundamente übertragen werden.

$l=1\text{m}$, $b=75\text{cm}$, $h=40\text{cm}$

$A=0,75\text{m} \cdot 1\text{m}=0,75\text{m}^2$

Einzugsbreite Decke= $2,5\text{m}$

Beton unbewehrt 25kN/m^3

Aufnehmbarer Sohldruck $\sigma_{zul.}=150\text{kN/m}^2$

(Da der tatsächliche aufnehmbare Sohldruck nicht bekannt ist, wird ein geringer Wert von 150kN/m^2 angenommen)

Einwirkungen (siehe auch Bemessung Wand und Bemessung Decke)

Geschossdecke OG: $q_d=5,26\text{kN/m}/0,6\text{m}=8,77\text{kN/m}^2 \rightarrow 8,77\text{kN/m}^2 \cdot 2,5\text{m}=21,93\text{kN/m}$

Wand OG: $g=20\text{kN/m}^3 \cdot 0,29\text{m} \cdot 3\text{m}=17,4\text{kN/m} \rightarrow q_d=17,4\text{kN/m} \cdot 1,4=24,36\text{kN/m}$

Geschossdecke EG: $q_d=21,93\text{kN/m}$

Wand EG: $q_d=24,36\text{kN/m}$

Fundament: $g=25\text{kN/m}^3 \cdot 0,75\text{m} \cdot 0,4\text{m}=7,5\text{kN/m} \rightarrow q_d=7,5\text{kN/m} \cdot 1,4=10,5\text{kN/m}$

Gesamt: $q_d=103,08\text{kN/m}$

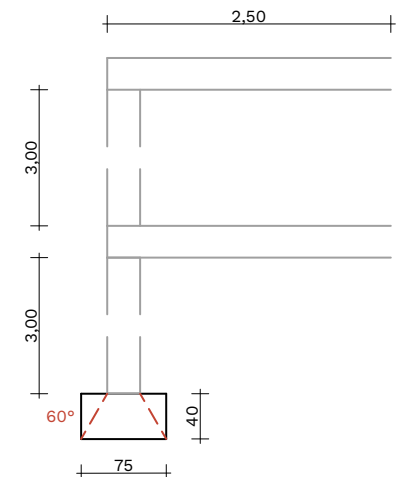
$N_k=q_d \cdot l=103,08\text{kN/m} \cdot 1\text{m}=103,08\text{kN}$

Vorhandener Sohldruck

$\sigma_{vorh.}=N_k/A=103,08\text{kN}/0,75\text{m}^2=137,44\text{kN/m}^2$

Nachweis

$\sigma_{vorh.} \leq \sigma_{zul.} \rightarrow 137,44\text{kN/m}^2 \leq 150\text{kN/m}^2 \rightarrow$ **Nachweis erfüllt!**



Decke, Variante A: Einhängende Schilf-Lehm-Stein
Biegebemessung Stahlbetonträger, Spannweite 4m
 (μ_{Eds} -Verfahren)

Einfeldträger

$l=4m$, $b=10cm$, $h=20cm$, $A=0,02m^2$
 Einzugsbreite = 60cm
 Beton C20/25
 $f_{cd} = 11,3N/mm^2$
 Expositionsklasse XC1 (Innenraum), $c_{nom} = 20mm$
 Bst. 500A $\Phi 10mm$, 3 Stäbe Zugbewehrung

Einwirkungen

Stahlbetonträger: $g=25kN/m^3 \cdot 0,02m^2=0,5kN/m$
 Lehm-Estrich (wie Lehmputz): $g=19kN/m^3 \cdot 0,06m \cdot 0,6m=0,68kN/m$
 Deckenstein Schilf-Lehm (Hersteller: Elementerre): $g=6kN/m^3 \cdot 0,2m \cdot 0,6m=0,72kN/m$
 Rohrdeckenputz: $g=0,18kN/m^2 \cdot 0,6m=0,18kN/m$
 Trennwandzuschlag: $g=0,8kN/m^2 \cdot 0,6m=0,48kN/m$
 Nutzlast (Wohnen): $q=2kN/m^2 \cdot 0,6m=1,2kN/m$
 $q_d=(g+q) \cdot 1,4=(2,56kN/m+1,2kN/m) \cdot 1,4=5,26kN/m$

Maximales Biegemoment in Trägermitte

$M=(q_d \cdot l^2)/8=(5,26kN/m \cdot (4m)^2)/8=10,52kNm$
 ($M=M_{Eds}$, da keine Normalkraft wirkt)

Statische Höhe

$d=h-c_{nom}-(\Phi/2)=20cm-2cm-(1cm/2)=17,5cm$

Bemessungsmoment

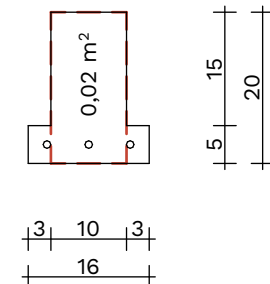
$\mu_{Eds}=M_{Eds}/(b \cdot d^2 \cdot f_{cd})=1052kNm/(10cm \cdot (17,5cm)^2 \cdot 11,3kN/cm^2)=0,30$
 Bei $\mu_{Eds}=0,36 \rightarrow \omega=0,3706 \rightarrow \sigma_{sd}=435N/mm^2$
 (siehe Bemessungstafel Stahlbeton nach Eurocode 2)

Erforderlicher Bewehrungsquerschnitt

$A_s=1/\sigma_{sd} \cdot (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed})=0,3706 \cdot 10cm \cdot 17,5cm \cdot 11,3kN/cm^2/43,5N/cm^2=1,68cm^2$
 (Es gibt keine Normalkraft)

Nachweis

3 Bewehrungsstäbe $\Phi 10mm$ haben einen Querschnitt von $2,36cm^2$.
 $2,36cm^2 > 1,68cm^2 \rightarrow$ **Nachweis erfüllt!**
 Die 3 Stäbe Zugbewehrung werden auf die gesamte Breite im unteren Bereich des Trägers (16cm) verteilt:
 $3 \cdot \Phi + 2 \cdot c_{nom} + 2 \cdot 2cm = 3cm + 4cm + 4cm = 11cm$
 Bei einer Breite von 16cm ist genug Platz vorhanden. Bei größeren Spannweiten könnte der Durchmesser der Bewehrungsstäbe erhöht werden.



Decke, Variante B: Kappendecke CEB
Biegebemessung Stahlbetonträger, Spannweite 4m
 (μ_{Eds} -Verfahren)

Einfeldträger

$l=4m$, $b=12cm$, $h=30cm$, $A=0,04m^2$
 Einzugsbreite = 120cm
 Beton C20/25
 $f_{cd} = 11,3N/mm^2$
 Expositionsklasse XC1 (Innenraum), $c_{nom} = 20mm$
 Bst. 500A $\Phi 12mm$, 3 Stäbe Zugbewehrung

Einwirkungen

Stahlbetonträger: $g=25kN/m^3 \cdot 0,04m^2=1,0kN/m$
 Lehm-Estrich (wie Lehmputz): $g=19kN/m^3 \cdot 0,06m \cdot 1,2m=1,37kN/m$
 Schüttung Kies: $g=18kN/m^3 \cdot 0,1m^2=1,8kN/m$
 Kappe aus CEB: $g=20kN/m^3 \cdot 0,12m^2=2,4kN/m$
 Trennwandzuschlag: $g=0,8kN/m^2 \cdot 1,2m=0,96kN/m$
 Nutzlast (Wohnen): $q=2kN/m^2 \cdot 1,2m=2,4kN/m$
 $q_d=(g+q) \cdot 1,4=(7,53kN/m+2,4kN/m) \cdot 1,4=13,9kN/m$

Maximales Biegemoment in Trägermitte

$M=(q_d \cdot l^2)/8=(13,9kN/m \cdot (4m)^2)/8=27,8kNm$
 ($M=M_{Eds}$, da keine Normalkraft wirkt)

Statische Höhe

$d=h-c_{nom}-(\Phi/2)=30cm-2cm-(1,2cm/2)=27,4cm$

Bemessungsmoment

$\mu_{Eds}=M_{Eds}/(b \cdot d^2 \cdot f_{cd})=2780kNm/(12cm \cdot (27,4cm)^2 \cdot 11,3kN/cm^2)=0,27$

Bei $\mu_{Eds}=0,36 \rightarrow \omega=0,3239 \rightarrow \sigma_{sd}=435N/mm^2$

(siehe Bemessungstafel Stahlbeton nach Eurocode 2)

Erforderlicher Bewehrungsquerschnitt

$A_s=1/\sigma_{sd} \cdot (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed})=0,3239 \cdot 12cm \cdot 27,4cm \cdot 11,3kN/cm^2 / 43,5N/cm^2=2,77cm^2$

(Es gibt keine Normalkraft)

Nachweis

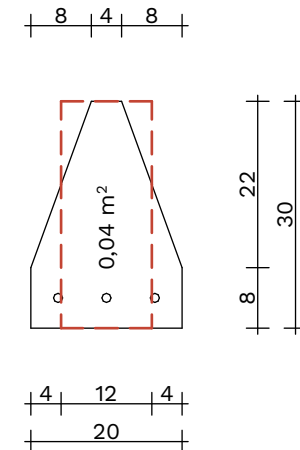
3 Bewehrungsstäbe $\Phi 10mm$ haben einen Querschnitt von $3,39cm^2$.

$3,39cm^2 > 2,77cm^2 \rightarrow$ **Nachweis erfüllt!**

Die 3 Stäbe Zugbewehrung werden auf die gesamte Breite im unteren Bereich des Trägers (20cm) verteilt:

$3 \cdot \Phi + 2 \cdot c_{nom} + 2 \cdot 2cm = 3,6cm + 4cm + 4cm = 11,6cm$

Bei einer Breite von 20cm ist genug Platz vorhanden. Bei größeren Spannweiten könnte die Anzahl der Bewehrungsstäbe erhöht werden.



Dach, Variante A: Blechdach gedämmt Biegebemessung Sparren Holz

Das Pultdach hat eine Dachneigung von nur 10%. Zur Vereinfachung wird der Sparren als waagerechter Einfeldträger betrachtet. Der Sparren setzt sich aus zwei Holzbrettern (Stege) und je einem Flansch auf jeder Seite zusammen. Da unklar ist, inwieweit die Verbindung der beiden Stege Kräfte übertragen kann, wird nur ein Steg, also der halbe Sparren, bemessen. Dementsprechend beträgt die Einzugsbreite die Hälfte des Achsabstands der Sparren ($90\text{cm}/2=45\text{cm}$). Die Sparren werden durch dazwischen eingebaute Bambus-Stangen und einer Lattung oberhalb gegen Ausknicken gesichert. Eine Berechnung der Windlast für ein exemplarisches Pultdach von $5 \times 8\text{m}$ mit 10% Gefälle hat ergeben, dass ausschließlich Windsog entsteht, die Windlast reduziert also die Last auf den Träger. Für die Biegebemessung des Sparrens wird ein windstillere Tag angenommen und die Windlast nicht berücksichtigt.

Einfeldträger

$l=5\text{m}$

$b=2,5\text{cm}$, $h=20\text{cm}$

Einzugsbreite= 45cm

Laubvollholz, Festigkeitsklasse D60 bis D70

Festigkeitskennwert Biegung $f_{m,k}=60\text{Nmm}^2$

Teilsicherheitsbeiwert Material $\gamma_M=1,3$

Lasteinwirkungsdauer KLED: kurz (Dächer, nicht begehbar)

Nutzungsstufe NKL 2 (überdachte, offene Tragwerke)

Modifikationsbeiwert $k_{mod}=0,9$

Einwirkungen

Trapezblech 35/207: $g=0,073\text{kN/m}^2 \cdot 0,45\text{m}=0,033\text{kN/m}$

Lattung Laubvollholz 8/8, alle 80cm: $g=(7\text{Stk.} \cdot (10,8\text{kN/m}^3 \cdot 0,08\text{m} \cdot 0,08\text{m} \cdot 0,45\text{m}))/5\text{m}=0,044\text{kN/m}$

Sparren: $g=10,8\text{kN/m}^3 \cdot 0,025\text{m} \cdot 0,2\text{m}=0,054\text{kN/m}$

Flansch Laubvollholz 3/5: $g=10,8\text{kN/m}^3 \cdot 0,03\text{m} \cdot 0,05\text{m}=0,016\text{kN/m}$

Dämmung Schilf-Lehm 100mm: $g=6,0\text{kN/m}^3 \cdot 0,1\text{m} \cdot 0,45\text{m}=0,27\text{kN/m}$ (wie Deckenstein von Elementerre)

Rollschicht Bambus 30mm: $g=3,5\text{kN/m}^3 \cdot 0,03\text{m} \cdot 0,45\text{m}=0,047\text{kN/m}$

Nutzlast (Wartung): $q=0,5\text{kN/m}^2 \cdot 0,45\text{m}=0,225\text{kN/m}$

$q_d=(g+q) \cdot 1,4=(0,464\text{kN/m}+0,225\text{kN/m}) \cdot 1,4=0,965\text{kN/m}$

Maximales Biegemoment in Trägermitte

$M_d=q_d \cdot l^2/8=0,965\text{kN/m} \cdot (5\text{m})^2/8=3,016\text{kNm}=3016\text{Ncm}$

Widerstandsmoment des Balkens

$w=b \cdot h^2/6=2,5\text{cm} \cdot (20\text{cm})^2/6=167\text{cm}^3$

Vorhandene Biegespannung

$\sigma_d=M_d/w=3016\text{Ncm}/167\text{cm}^3=1,8\text{kN/cm}^2$

Bemessungswert des Baustoffs

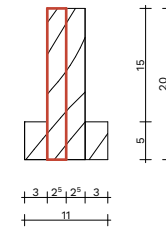
$\sigma_{R,D}=k_{mod} \cdot (f_{m,k}/\gamma_M)=0,9 \cdot (60\text{kN/cm}^2/1,3)=4,15\text{kN/cm}^2$

Spannungsnachweis

$\sigma_d < \sigma_{R,D}$

$1,8\text{kN/cm}^2 < 4,15\text{kN/cm}^2 \rightarrow$ **Nachweis erfüllt!**

$\sigma_d/\sigma_{R,D}=1,8\text{kN/cm}^2/4,15\text{kN/cm}^2=0,43 < 1 \rightarrow$ Der Sparren ist zu 43% ausgelastet.



Bemessung Fachwerkträger mit 16mm Armiereseisen

Der räumliche Fachwerkträger wird zur Vereinfachung als zweidimensionaler Träger betrachtet. Eine Berechnung der Windlast für ein exemplarisches Pultdach von 5x8m mit 10% Gefälle hat ergeben, dass ausschließlich Windsog entsteht, die Windlast reduziert also die Last auf den Träger. Für die Bemessung des Fachwerkträgers wird ein windstiller Tag angenommen und die Windlast nicht berücksichtigt.

Fachwerkträger 2D

$l=4\text{m}$

$h=0,6\text{m}$

Einzugsbreite=1,5m

Eigengewicht Fachwerkträger (hier 3D-Fachwerk)

Obergurt T-Profil 40/40: $A=3,77\text{cm}^2 \rightarrow \text{Länge}=4\text{m}$

Untergurt 2Stk. L-Profil 30/30: $A=1,74\text{cm}^2 \rightarrow \text{Länge gesamt}=8\text{m}$

Stäbe quer: Länge=0,5m \rightarrow Länge gesamt=6*0,5m=3m

Stäbe diagonal stehend: Länge durchschnittlich=0,76m \rightarrow Länge gesamt=20*0,76m=15,2m

Stäbe diagonal liegend: Länge=0,94m \rightarrow Länge gesamt=5*0,94m=4,7m

Stäbe Armiereseisen 16mm: $A=2,01\text{cm}^2 \rightarrow$ Summe Länge alle Stäbe=22,9m

Wichte Stahl: 78kN/m^3

Obergurt: $78\text{kN/m}^3 \cdot 4\text{m} \cdot 0,000377\text{m}^2 = 0,118\text{kN}$

Untergurte: $78\text{kN/m}^3 \cdot 8\text{m} \cdot 0,000174\text{m}^2 = 0,109\text{kN}$

Stäbe: $78\text{kN/m}^3 \cdot 22,9\text{m} \cdot 0,000201\text{m}^2 = 0,359\text{kN}$

Fachwerkträger gesamt: $0,586\text{kN}/4\text{m} = 0,147\text{kN/m}$

Einwirkungen

Trapezblech 35/207: $g=0,073\text{kN/m}^2 \cdot 1,5\text{m} = 0,11\text{kN/m}$

Kanthölzer Laubvollholz D70 8/8, alle 80cm: $g=(5\text{Stk.} \cdot (10,8\text{kN/m}^3 \cdot 0,08\text{m} \cdot 0,08\text{m} \cdot 1,5\text{m})) / 4\text{m} = 0,13\text{kN/m}$

Eigengewicht Fachwerkträger: $g=0,15\text{kN/m}$

Rollschicht Bambus 30mm: $g=3,5\text{kN/m}^3 \cdot 0,03\text{m} \cdot 1,5\text{m} = 0,16\text{kN/m}$

Dämmung Schilfmatte 100mm: $g=1,0\text{kN/m}^3 \cdot 0,1 \cdot 1,5\text{m} = 0,15\text{kN/m}$

Rohrdeckenputz: $g=0,18\text{kN/m}^2 \cdot 1,5\text{m} = 0,27\text{kN/m}$

Nutzlast (Wartung): $q=0,5\text{kN/m}^2 \cdot 1,5\text{m} = 0,75\text{kN/m}$

$q_d=(g+q) \cdot 1,4=(0,97\text{kN/m}+0,75\text{kN/m}) \cdot 1,4=2,41\text{kN/m}$

Maximales Biegemoment in Trägermitte

$M_{Ed}=q_d \cdot l^2/8=2,41\text{kN/m} \cdot (4\text{m})^2/8=4,82\text{kNm}$

Zug in Untergurt bzw. Druck in Obergurt in Trägermitte

Zug=Druck

$N_{ED}=M_{Ed}/h$

$N_{ED}=4,82\text{kNm}/0,6\text{m}=8,03\text{kN}$

Zugnachweis Untergurt

Im räumlichen Fachwerkträger teilt sich die Kraft auf 2 Untergurte auf

$N_{ED,\text{einzel}}=N_{ED}/2=4,02\text{kN}$

L-Profil 30/30 S235

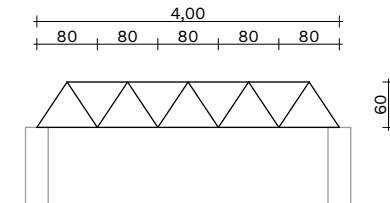
$A=174\text{mm}^2$

$f_y=235\text{N/mm}^2$ (Streckgrenze)

$\gamma_{MO}=1,0$ (Sicherheitsbeiwert Material)

$N_{RD,\text{Zug}}=A \cdot f_y / \gamma_{MO}=174\text{mm}^2 \cdot 235\text{N/mm}^2 / 1,0=40890\text{N}=40,89\text{kN}$

$N_{ED,\text{einzel}} < N_{RD,\text{ZUG}}=4,02\text{kN} < 40,89\text{kN} \rightarrow$ **Nachweis erfüllt!**



Drucknachweis Obergurt

Länge des Obergurts zwischen zwei Knoten: 0,8m

Eulerfall 2 -> $L_{eff}=0,8m$

T-Pofil 40/40 S235 $A=3,77cm^2=377mm^2$

$f_y=235N/mm^2$ $\gamma_{M1}=1,1$

$E=21000kN/cm^2$ $I_z=2,58cm^4$

Knicklast $N_{cr}=(\pi^2 * E * I_z) / L_{eff}^2 = (\pi^2 * 21000kN/cm^2 * 2,58cm^4) / (0,8m)^2 = 83,552kN = 83552N$

Schlankheit $\lambda = \sqrt{(A * f_y / N_{cr})} = \sqrt{(377mm^2 * 235N/mm^2 / 83552N)} = 1,03$

-> $\kappa = 0,54$ bei Knicklinie c (Abminderungsfaktor aus Tabelle Eurocode 3)

$N_{RD,Druck} = \kappa * A * f_y / \gamma_{M1} = 0,54 * 377mm^2 * 235N/mm^2 / 1,1 = 43492N = 43,49kN$

$N_{ED} < N_{RD,Druck} = 8,03kN < 43,49kN$ -> **Nachweis erfüllt!**

Für eine vereinfachte Betrachtung wird nun der in Ober- und Untergurt vorhandene Zug und Druck auch auf die Stäbe angesetzt.

Zugnachweis Stab

Im räumlichen Fachwerkträger teilt sich der Zug auf 2 Stäbe auf:

$N_{ED,einzeln} = N_{ED} / 2 = 4,02kN$

Armierestien 16mm 500A $A=201mm^2$

$f_y=500N/mm^2$ (Streckgrenze) $\gamma_{M0}=1,0$ (Sicherheitsbeiwert Material)

$N_{RD,Zug} = A * f_y / \gamma_{M0} = 201mm^2 * 500N/mm^2 / 1,0 = 100500N = 100,5kN$

$N_{ED,einzeln} < N_{RD,ZUG} = 4,02kN < 100,5kN$ -> **Nachweis erfüllt!**

Drucknachweis Stab

Im räumlichen Fachwerkträger teilt sich der Druck auf 2 Stäbe auf:

$N_{ED,einzeln} = N_{ED} / 2 = 4,02kN$

Längster Stab im 3D-Fachwerk: 0,9m

Eulerfall 2 -> $L_{eff}=0,9m$

Armierestien 16mm 500A $A=201mm^2$

$f_y=500N/mm^2$ (Streckgrenze) $\gamma_{M1}=1,1$

$E=21000kN/cm^2$ (Elastizitätsmodul)

Flächenträgheitsmoment berechnen (mit Hilfe von ChatGPT):

$I = (\pi * d^4) / 64 = (\pi * 16^4) / 64 = (3,1416 * 65536) / 64 = 3215,8mm^4 = 0,3216cm^4$

Knicklast $N_{cr} = (\pi^2 * E * I) / L_{eff}^2 = (\pi^2 * 21000kN/cm^2 * 0,3216cm^4) / (0,9m)^2 = 8,229kN = 8229N$

Schlankheit $\lambda = \sqrt{(A * f_y / N_{cr})} = \sqrt{(201mm^2 * 500N/mm^2 / 8229N)} = 3,495$

Abminderungsfaktor κ berechnen (mit Hilfe von ChatGPT):

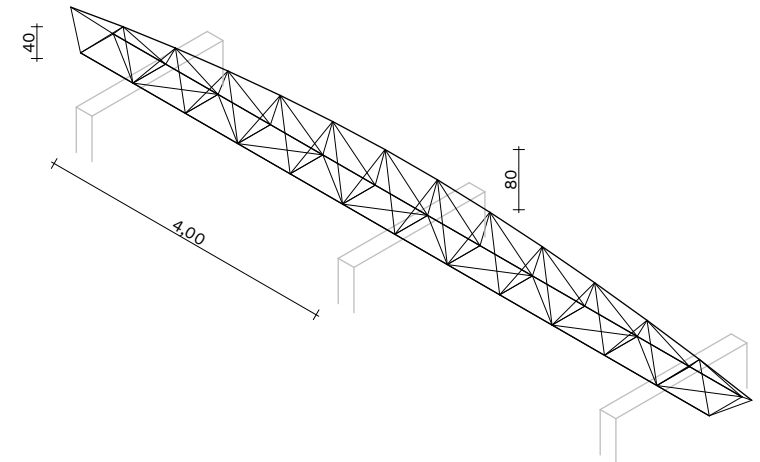
$\alpha = 0,49$ $\lambda = 3,495$

$\phi = 0,5 * (1 + \alpha * (\lambda - 0,2) + \lambda^2) = 0,5 * (1 + 0,493 * 2,95 + 12,22) = 0,5 * (1 + 1,461 + 12,22) = 0,5 * 14,835 = 7,42$

$\chi = 1 / (\phi + \sqrt{(\phi^2 - \lambda^2)}) = 1 / (7,42 + \sqrt{(55,06 - 12,22)}) = 1 / (7,42 + 6,54) = 1 / 13,96 = 0,072$

$N_{RD,Druck} = \kappa * A * f_y / \gamma_{M1} = 0,072 * 201mm^2 * 500N/mm^2 / 1,1 = 6578N = 6,58kN$

$N_{ED,einzeln} < N_{RD,Druck} = 4,02kN < 6,58kN$ -> **Nachweis erfüllt.**



LITERATUR + QUELLEN

Quellenangaben

Quellenangaben sind auf den jeweiligen Seiten direkt vermerkt.

Grundlegende Literatur

Block, Philippe, Gengnagel, Christoph & Peters, Stefan 2013. Faustformel Tragwerksentwurf. München: Deutsche Verlags-Anstalt.

Denizart, Marion 2025. TOOLBOX Stratégies bioclimatiques adaptées aux climats. Acted, Zero Exclusion Carbon Poverty.

Deutsches Institut für Normung e. V. 2023. DIN 18940 Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung.

Deutsches Institut für Normung e. V. 2024. DIN EN 15978 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Umweltleistung von Gebäuden – Methodik.

Deutsches Institut für Normung e. V. 2024. DIN 18945 Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.

Gaß, Siegfried & Dunkelberg, Klaus 1996. Bambus - Bamboo. Stuttgart: Krämer u.a.

Gäth, Christian & Kretschmann, Micha 2023. Gepresste Lehmsteine. Master Thesis. Technische Universität Berlin, Berlin.

Hebel, Dirk E. u. a. SUDU Research & Manual. Berlin: Ruby Press.

Hornstein, Lucia & von Pander, Hannah 2024. Bauen mit Lehm in der Stadt. Master Thesis. Technische Universität München, München.

Krauss, Franz, Führer, Wilfried & Jürges, Thomas 2016. Tabellen zur Tragwerklehre. Köln: Rudolf Müller GmbH & Co. KG.

Minke, Gernot 2016. Building with Bamboo. Basel: Birkhäuser.

Pfeifer, Günter 2001. Mauerwerk Atlas. Basel: Birkhäuser.

Reddy, B. V. Venkatarama 2022. Compressed Earth Block & Rammed Earth Structures. Bd. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, Singapore: Springer Singapore Pte. Limited.

Röhlen, Ulrich 2020. Lehm-bau-Praxis - Planung und Ausführung. 3. Auflage. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH.

Steele, James 1997. An architecture for people - The complete works of Hassan Fathy. London: Thames and Hudson.

Studio Suddo Neue 2025. Back to Earth - Urbanization without Depletion. Berlin: Jovis.

Fotos und Zeichnungen

Bei Grafiken, die nicht vom Autor stammen, ist die Quelle auf der jeweiligen Seite angegeben. Alle weiteren Zeichnungen und Fotos wurden vom Verfasser selbst erstellt.

© 2025 Alexander Dürr

Einsatz von KI

Die KI-Anwendung Claude von Anthropic wurde für die sprachliche Überarbeitung von Texten eingesetzt.

DANKE!

Mein besonderer Dank gilt:

Prof. Eike Roswag-Klinge, Prof. Kerstin Wolff, Jonas Müller und Julian Mönig für die Betreuung meiner Masterarbeit.

Thierno Dabo, Ousman Ba, Dura Ba, Marly Diallo und Familie, Issa Diallo, Ibrahima Diallo und vielen weiteren lieben Menschen für ihre großartige Unterstützung und ihr kritisches Feedback während meines Recherche-Aufenthalts in Mako.

Micha Kretschmann, Christian Gäth, Nick Roberts, Clémence Herding und vielen weiteren tollen Kommiliton:innen und Freund:innen für ihre großartige Unterstützung und ihr kritisches Feedback in Berlin.