

G25190

2'99

Beton-Informationen



montan
zement

Eine periodisch erscheinende
Informationsschrift
für die Zementverwendung

Heft 2, 1999, 39. Jahrgang
ISSN 0170-9283

Der neue Zollhof – Ein Highlight für den Betonbau

Anfang 1999 wurden im Düsseldorfer Hafengebiet – der neuen Medienmeile von Düsseldorf – die ersten beiden von drei Bürogebäuden fertiggestellt und bezogen. Nach Fertigstellung der Gebäudetrilogie stehen rd. 28.000 m² Bürofläche in einem skulpturalen bewohnbaren Kunstwerk zur Verfügung.

Das von dem amerikanischen Architekten Frank O. Gehry entworfene Objekt entstand auf einem über 12.500 m² großen Grundstück, das vollständig unterkellert ist. Dieser als weiße Wanne hergestellte Baukörper, genutzt als Tiefgarage, trägt mit seiner bis zu 1,6 m dicken Decke als lastverteilende Platte die gesamte Last aus der Hochbebauung.

Der Bericht beschreibt neben einigen architektonischen und konstruktiven Aspekten vorwiegend die Rohbauphase, beginnend von der Pfahlgründung über den Bau der Tiefgarage, den Ortbetonwänden, -decken und -stützen der drei Häuser bis hin zu den extern hergestellten nahezu 800 Betonfertigteil-Uniten.

Aufgrund der z.T. außergewöhnlich hohen Bewehrungsdichten mußten unterschiedliche Betone für normal und stark bewehrte Bauteile vorgesehen werden, aus statischen Gründen Betone der Festigkeitsklassen B 25 bis B 85 und aufgrund der Bauteilabmessungen vorwiegend Betone mit geringer Wärmeentwicklung. Darüber hinaus mußten auch noch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen durch „Sommermischungen“ und „Wintermischungen“ berücksichtigt werden.

Alle diese „Randbedingungen“ führten zu einer großen Anzahl unterschiedlicher Betonzusammensetzungen. Insgesamt wurden etwa 36.500 m³ Beton verarbeitet, für die überwiegend Hochofenzement CEM III/A (rd. 80 %) eingesetzt wurde.

Herausgeber:

montanzement Marketing GmbH
Bliersheimer Straße 83
47229 Duisburg (Rheinhausen)
Telefon 0 20 65 / 5 70 81
Telefax 0 20 65 / 5 56 42
eMail: info@montanzement.de
http://www.montanzement.de

Redaktion:

Dr.-Ing. K. Rendchen (verantw.)

Nachdruck nur mit Genehmigung
des Herausgebers

Schutzgebühr: DM 7,50 incl. 16% MwSt.
Jahres-Abo.: DM 42,00 incl. 16% MwSt.

Konten:

montanzement Marketing GmbH
Deutsche Bank AG, Düsseldorf,
(BLZ 300 700 10)
Konto-Nr. 3 332 475

Verlag:

Verlag Bau+Technik GmbH
Postfach 12 01 10
Telefon 02 11 / 9 24 99-0
40601 Düsseldorf

Layout: Gaby Groß
Grafiken: Aniela Adamczyk
Lithos und Druck:
Loose-Durach GmbH, Remscheid

Autor dieses Heftes:

Dipl.-Ing. Peer Albrecht
Philipp Holzmann AG
Direktion West
Eduard-Schulte-Str. 1
40225 Düsseldorf

Titelbild:

Der neue Zollhof in Düsseldorf, Haus C

Rückbild:

Impression von Haus B
Fotos: Lehr, Philipp Holzmann AG

Der neue Zollhof – Ein Highlight für den Betonbau

von Peer Albrecht, Düsseldorf

I Einleitung

Der neue Zollhof im Düsseldorfer Hafen ist schon während seiner Bauzeit zu einem der meist beachteten Bauwerke der letzten Jahre geworden. Entworfen von dem für seine skulpturalen Gebäudekompositionen bekannten amerikanischen Architekten Frank O. Gehry, hat der neue Zollhof nicht nur durch seine eigenwillige Architektur, sondern auch durch die bautechnischen Herausforderungen seiner Realisierung Aufmerksamkeit erregt.

Auf einer rd. 16.000 m² großen Plaza – bestehend aus dem direkt am Hafen gelegenen über 12.500 m² großen Grundstück und 3.500 m² umliegenden öffentlicher Fläche – sind drei Bürohäuser entstanden, die ein Gebäudeensemble bilden. Unter der Plaza wurde auf Grundstücksgröße eine eingeschossige Tiefgarage konzipiert und als weiße Wanne ausgeführt.

Die drei in Geometrie und Fassade vollkommen unterschiedlichen Gebäude (Häuser A, B und C) aus gedrehten und ineinander verschobenen geometrischen Körpern erheben sich oberhalb der Plaza und bilden dort eine kompositorische Einheit (**Bild 1**), die der Hafensilhouette ein eigenwilliges und markantes Element hinzugefügt hat. Durch die Aufteilung in drei Baukörper blieben der Zugang und die Blickbezüge von der Stadt in den Hafen erhalten. **Bild 2** zeigt diesen Blick vom neuen Düsseldorfer Stadtteil auf den Hafen durch den „computersimulierten“ Gebäudekomplex hindurch.

Nach 28 Monaten Bauzeit konnten Anfang dieses Jahres die ersten Büroflächen am neuen Zollhof bezogen werden. Der Bauherr, die Kunst- und Medienzentrum Rheinhafen GmbH,

beauftragte die Philipp Holzmann AG Niederlassung Düsseldorf mit der schlüsselfertigen Erstellung des außer-

gewöhnlichen Entwurfs. Zuvor wurde eine Machbarkeitsstudie erstellt, um die Realisierbarkeit des Bauvorhabens zu bewerten und sicherzustellen.

Die wesentlichste Rahmenbedingung des Projekts war eine unveränderte Ausführung des Entwurfs, wie ihn der Architekt vorgegeben hatte. Dies und die Einhaltung von normativen Vorgaben, von baurechtlichen Anforderungen, eine kurze Bauzeit sowie finanzielle Vorgaben stellten schon in der Planungsphase vielfältige konstruktive

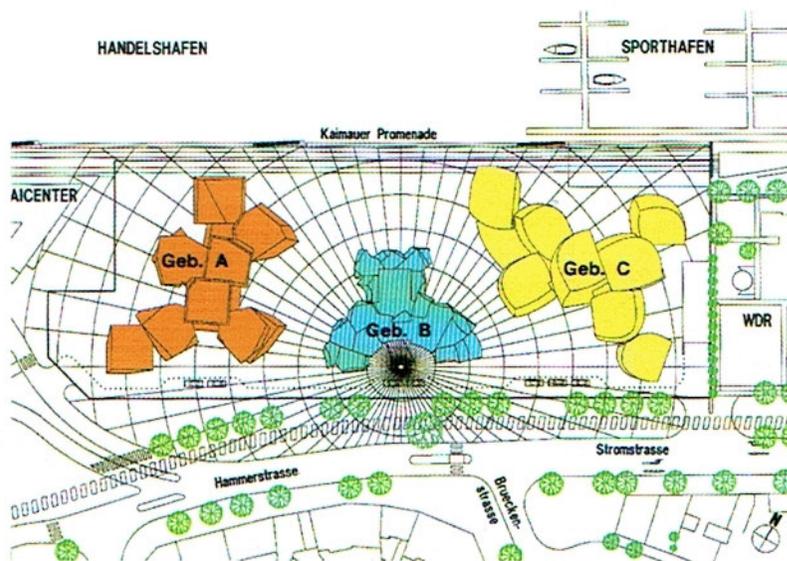


Bild 1: Einbindung der Gebäudetriglie mit Plaza in das Hafengebiet



Bild 2: „Computersimulierte“ Gebäude in der Medienmeile – Blick vom neuen Düsseldorfer Stadtteil



Bild 3: Modell der Häuser A, B und C

Herausforderungen an alle Beteiligten, die in der Folge zur Entwicklung neuer Bautechnologien führten.

Die drei Gebäude mit einem Gebäudevolumen von etwa 109.000 m³ umbautem Raum bieten rd. 28.000 m² Bürofläche. Hinzu kommen 470 Parkplätze in der darunterliegenden Tiefgarage.

Nachdem der neue Zollhof bereits in verschiedenen Beiträgen [1,2] vorgestellt wurde, geht dieser Beitrag schwerpunktmäßig auf den Rohbau und die damit verbundenen beton-technologischen und -technischen Aspekte ein.

2 Computermodell als Planungsgrundlage

Der Entwurf des Projekts mit seinen komplexen räumlichen Bezügen erfolgte nicht zeichnerisch, sondern in der Gehry eigenen Vorgehensweise am Modell (Bild 3). Dieses wurde im Anschluß zur planerischen Weiterbearbeitung dreidimensional eingescannt und konnte so als digitales Computermodell bearbeitet werden (Bild 4).

Da sich an jeder Stelle der Außenfassadenkontur der Radius sowie bei jeder Schnitthöhe der Grundriß ändern, war die Geometrie der Gebäude über herkömmliche Zeichnungen nicht darstellbar und eine Vermaßung damit nicht möglich. Die Bewältigung der außergewöhnlich umfangreichen Datenmengen für die komplexen Freiformflächen – d.h. frei geformte Flächen, die sich nicht mehr durch Radien, Hyperbeln, Klothoiden oder durch andere Funktionen mathematisch eindeutig beschreiben lassen – erfolgte über das hauptsächlich im Automobilbau verwendete CAD-Programm CATIA, das in der Baubranche bisher kaum Anwendung gefunden hat.

Für die nur im Computermodell vorhandenen Daten und Maße mußten neue Wege der Umsetzung gefunden werden, die es ermöglichten, diese Rechnerdaten z.B. in für den Praktiker verständliche und handhabbare Schalpläne darzustellen.



Bild 4: Eingescanntes, digitales Computermodell der Häuser A, B und C zur weiteren Bearbeitung



Bild 5: Tiefgarage nach Fertigstellung

3 Tiefgarage als „Fundament“ des Gebäudekomplexes

3.1 Gründung als Pfahlrost

Unter den drei Gebäuden befindet sich eine durchgehende, eingeschossige Tiefgarage mit einer äußeren maximalen Länge von 193 m und einer Breite von 67 m (**Bild 5**). Aufgrund des anstehenden, setzungsgefährdeten Auelehms war zur Lastabtragung eine Tiefgründung in die quartären Kies- bzw. unterlagernden tertiären Sandschichten erforderlich. Rund 200 Großbohrpfähle mit Längen zwischen 9 m und 14 m und Durchmessern von 90 cm bis 1,8 m sowie Fußaufweitungen von bis zu 3 m nehmen Traglasten zwischen 4,2 MN und 12 MN auf (**Bild 6**). Die Großbohrpfähle wurden aus Beton der Festigkeitsklasse B 25 mit CEM III/A 32,5 hergestellt (**Tafel 1**, Spalte 1).

Bild 6: Pfahlköpfe der Pfahlgründung



Einige dieser Pfähle wurden so ausgebildet, daß sie bei Eintritt des Lastfalls Hochwasser auch als Zugpfähle zur Auftriebsicherung dienen. Zusätzlich wurden noch vorhandene Gründungspfähle der ehemals auf dem Grundstück befindlichen Speichergebäude in die Lastabtragung integriert.

Die auf den neuen Bohrpfähle aufgelagerte Sohle wurde als im Mittel 50 cm dicke Betonplatte ausgeführt (**Bild 7**). Maßgebend für die Plattendicke war im wesentlichen die bei Hochwasser entstehende Auftriebskraft. Im Bereich der vorhandenen Gründungspfähle wurde die Sohle als

Tafel 1: Zusammensetzung der Betone für die Bohrpfähle und die Tiefgarage

| Bauwerk | Bauteil | Tiefgarage „Neuer Zollhof“ | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| | | Bohrpfähle | | Sohle/Decke | | Außenwände/ Stützen | | Außenwände/ Stützen | | hochfeste Stützen | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Bewehrungsgrad | | normal | normal | hoch | normal | hoch | normal | hoch | hoch | hoch | |
| Betonfestigkeitsklasse besondere Eigenschaften Konsistenz | | B 25 – KF | B 35 ¹⁾ wu KR | | B 35 wu KR | | B 45 ²⁾ wu KR | | B 85 – KF | B 65 – KF | |
| Zementart und Festigkeitsklasse | | CEM III/A 32,5 | CEM III/A 32,5 | | CEM III/A 42,5 | | CEM III/A 42,5 | | CEM I 42,5 R-HS | CEM I 42,5 R-HS | |
| Zementgehalt | kg/m ³ | 350 | 300 | 320 | 340 | 360 | 400 | 420 | 450 | 420 | |
| Wassergehalt w/z-Wert (w/(z + 0,4 · f)) | kg/m ³ | 190 0,54 – | 168 0,56 0,52 | 178 0,56 0,52 | 175 0,51 0,49 | 184 0,51 0,49 | 171 0,43 – | 184 0,44 – | 153 0,34 – | 152 0,36 0,35 | |
| Zuschlag | | | | | | | | | | | |
| Sieblinienbereich | | ③ | ③ | ③ | ③ | ③ | ③ | ③ | ③ | ③ | |
| Größtkorn | mm | 32 | 32 | 16 | 32 | 16 | 32 | 16 | 16 | 16 | |
| Gehalt | kg/m ³ | 1764 | 1890 | 1840 | 1847 | 1800 | 1800 | 1735 | 1816 | 1881 | |
| Zusatzstoff | | | Steinkohlenflugasche | | | | | | | MS-Slurry/ PP-Fasern | SFA/ PP-Fasern |
| Art | | | | | | | | | | | |
| Gehalt | kg/m ³ | – | 50 | 50 | 30 | 30 | – | – | 60 ³⁾ / 2 | 30 / 2 | |
| Zusatzmittel | | | | | | | | | | | |
| Art | | BV | BV | BV | BV | BV | BV | BV | FM / VZ | FM | |
| Gehalt | kg/m ³ | 1,23 | 1,40 | 1,50 | 0,80 | 0,80 | 1,20 | 1,30 | 14,30 / 1,60 | 14,20 | |

¹⁾ Gütenachweis nach 90 Tagen

²⁾ „Wintermischung“

³⁾ Feststoffgehalt 30 kg/m³



Bild 7: Betonieren der Sohle

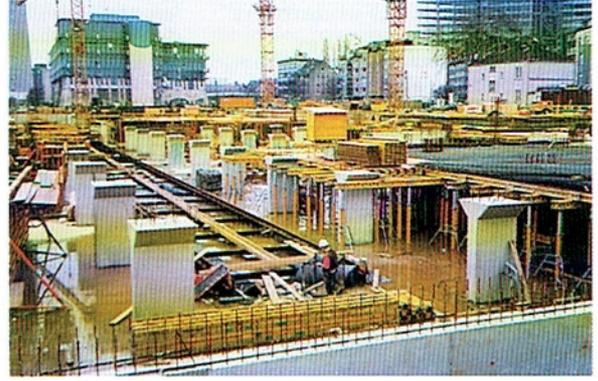


Bild 8: Stützen in der Tiefgarage im Raster von 8,25 m x 7,5 m

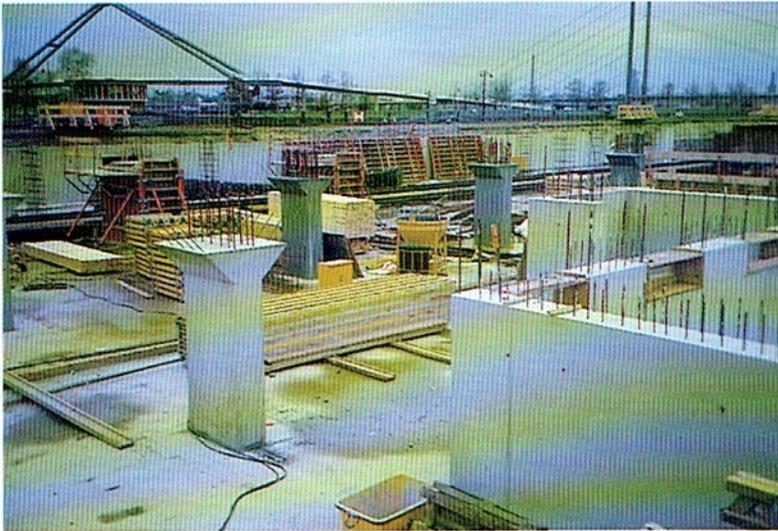


Bild 9: Drei Stützen aus hochfestem Beton B 85 in der Tiefgarage, nahezu schwarz durch den Einsatz von CEM I 42,5 R-HS



Bild 10: Rampe der Tiefgarageneinfahrt

Flachgründung durch eine 1,2 m dicke Sohlplatte realisiert. Die Zusammensetzung des Sohlbetons zeigt **Tafel I**, Spalten 2 und 3.

3.2 Garage als weiße Wanne

Bei extremem Hochwasser besteht die Möglichkeit, daß das Grundwasser und der Rhein bis zur Oberkante der Garagendecke ansteigen können. Da die Garage ohne die Lasteintragung aus den Hochbauten während der frühen Bauphase noch nicht auftriebssicher war, hätte die Baugrube oder die Tiefgarage in dieser Zeit bei extremem Hochwasser geflutet werden müssen, was jedoch nicht notwendig wurde.

Die Stützen mit Abmessungen von 40 cm x 120 cm mit einer Voute am

Stützenkopf stehen in einem Raster von 8,25 m x 7,5 m (**Bild 8**). Im allgemeinen befindet sich unter jeder Stütze ein Bohrpfahl; bei hochbelasteten Stützen ist eine Pfahlgruppe angeordnet. Die für die Stützen im Tiefgaragenbereich eingesetzten Betone sind in **Tafel I**, Spalten 4 bis 7, zusammengestellt. Da aus der unregelmäßigen Hochbebauung sehr ungleichmäßig verteilte und z.T. erhebliche Lasten in die Stützen eingeleitet werden, war es zur Beibehaltung eines regelmäßigen Stützenquerschnitts und des Rasters (wegen der späteren Nutzung der Tiefgarage) sowie eines hinsichtlich des Betoneinbaus sinnvollen Bewehrungsgehalts erforderlich, drei Stützen aus hochfestem Beton B 85 (**Tafel I**, Spalte 8; **Bild 9**) und sechs Stützen aus Beton B 65 (**Tafel I**, Spalte 9) herzustellen.

Die umlaufenden Außenwände wurden aus wasserundurchlässigem Beton der Festigkeitsklassen B 35 bzw. B 45 hergestellt (**Tafel I**, Spalten 4 und 5, bzw. 6 und 7).

In die Arbeitsfugen Sohle/Sohle, Sohle/Wand sowie Wand/Wand der als weiße Wanne ausgebildeten Tiefgarage wurden Injektionsschläuche eingebaut, um Schwachstellen später verpressen zu können.

3.3 Garagendecke als lastverteilende Tragplatte

Die Garagendecke mit einer Gesamtfläche von rd. 12.500 m² ist als lastverteilende Tragplatte für die asymmetrische Hochbebauung mit den

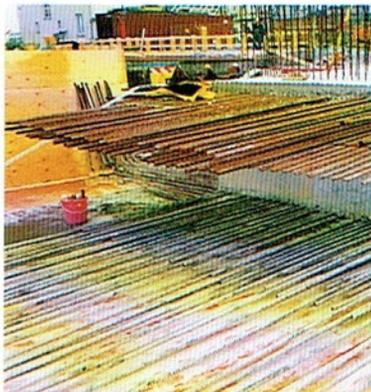


Bild 11: Tiefgaragendecke mit $d = 1,60$ m und mehrlagiger Bewehrung

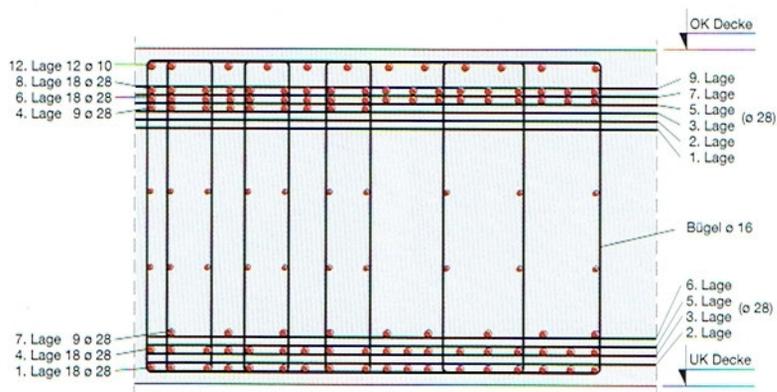


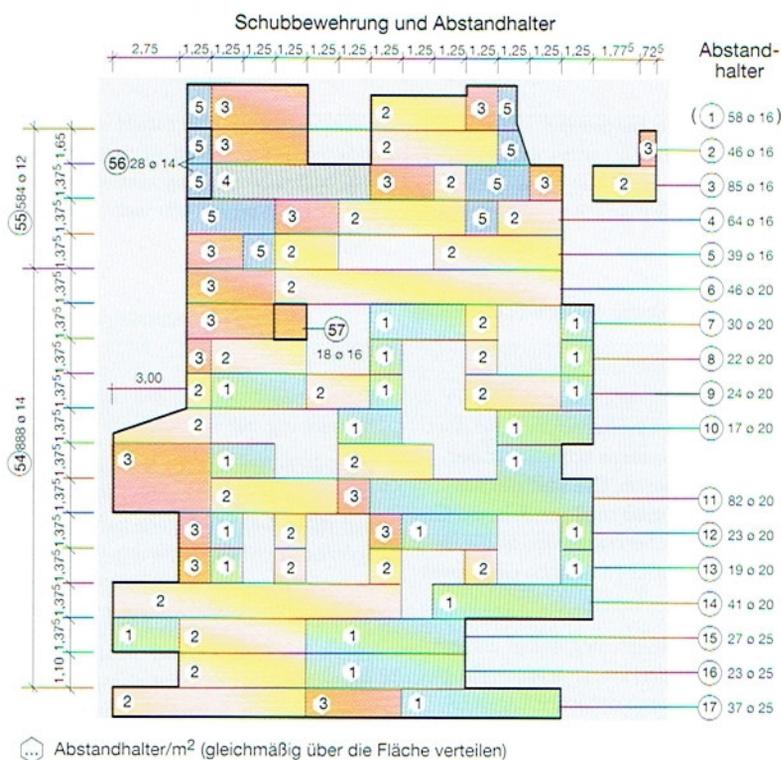
Bild 12: Ergänzungsbewehrung im hochbeanspruchten Bereich der Tiefgaragendecke

Häusern A, B, und C konzipiert. Ab Oberkante Gelände zeichnet sie sich auf den verbleibenden Restflächen wie eingangs erwähnt als Plaza ab. Da die gesamte Plaza als Feuerwehrezufahrt ausgewiesen ist, mußte sie zusätzlich als schwerlastbefahrbar Decke ausgebildet werden. Das zur Wasserablenkung erforderliche Gefälle des trapezförmigen Deckenprofils beträgt vom ungefähr am Eingang des mittleren Hauses liegenden Grats zum Rhein und zur Straße hin jeweils 2 %.

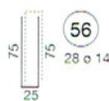
Auf der Ostseite des Grundstücks befindet sich die Rampe der Tiefgarageneinfahrt (Bild 10). Aus gestalterischen Gründen durfte die Garagendecke keine Dehnungsfuge erhalten, die auf der Plaza zu sehen gewesen wäre. Eine Abdichtung auf Basis eines Spezialkautschukbitumens mit sehr hoher Dehnfähigkeit stellt ihre Dichtigkeit sicher.

Mit einer Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) aus über 9.000 Elementen wurde die Decke als große Platte berechnet. Um die Standsicherheit sicherzustellen, war je nach Belastung eine Dicke von etwa 50 cm bis zu 1,60 m erforderlich (Bild 11).

Entsprechend aufwendig war auch der mehrlagige Bewehrungseinbau. An Stellen großer Lasteintragung aus den aufgehenden Bauteilen war ein besonders hoher Bewehrungsgrad der Decke zur Lasteinleitung in die Stützen erforderlich. So wird z.B. der zwölfge-



Ergänzungen zu Abstandhalter für Schubzulagen (je 2 Stück / Abstandhalter)



Schubzulagen (je 5 Stück / m² (x 2))

Bild 13: Ausschnitt aus dem Schubbewehrungsplan mit Schubzulagen und Abstandhalter im hochbelasteten Bereich der Tiefgaragendecke mit $d = 1,60$ m

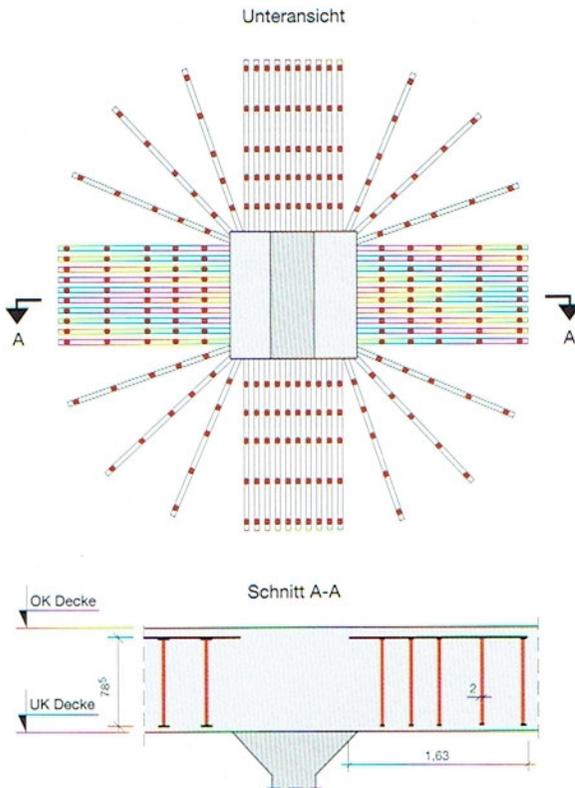


Bild 14: Anordnung der Schubdübelleisten

schossige Kern von Haus C nicht in die Tiefgarage weitergeführt und dort gegründet, sondern schließt auf der Garagendecke ab. Die Last des aussteifenden Kerns muß somit in die Garagendecke übertragen und in die unter ihr befindlichen Stützen eingeleitet werden.

Die Grundbewehrung des in diesem Deckenbereich integrierten Abfangbalkens bildeten mehrere Lagen Listenmatten. Bis zu 20 (!!) Lagen Stabstahzulagen (größtenteils $\varnothing 28$ mm) ergänzten die Bewehrung oben und unten (Bild 12). Auch die Anzahl der Abstandhalter und Schubzulagen war außergewöhnlich. Bild 13 zeigt einen Ausschnitt aus dem Plan für die Schubbewehrung mit Schubzulagen in diesem Bereich, in dem die Tiefgaragendecke 1,60 m dick ist. Auf dem hier dargestellten Deckenausschnitt von etwa 24 m x 22 m sind 713 Abstandhalter $\varnothing 16$ mm bis $\varnothing 25$ mm und insgesamt noch 1.518 Schubzulagen $\varnothing 12$ mm bis $\varnothing 16$ mm einzu-

bauen – zusätzlich zu der „normalen“ Bewehrung der Decke!

Zahlreiche zusätzliche Schubdübelleisten an einigen hochbelasteten Stützen (Bild 14) sowie eine aufwendige Stützenanschlußbewehrung (Bild 15) vervollständigten die in einigen Teilen extreme Deckenbewehrung.

Um sicherzugehen, daß diese komplizierte Bewehrung richtig eingebaut wurde, waren entsprechende Einbauanleitungen erforderlich. Bis zu fünf Bewehrungspläne je Deckenabschnitt waren erforderlich, um die umfangreiche Bewehrung darzustellen. Der Einbau wurde lagenweise durch den Prüfingenieur abgenommen.

3.4 Beton und Betonierarbeiten Tiefgarage

Die Betonzusammensetzungen für die verschiedenen Bauteile und -abschnitte der Tiefgarage wurden durch umfangreiche Eignungsversuche ermittelt. Dabei mußten folgende wichtige

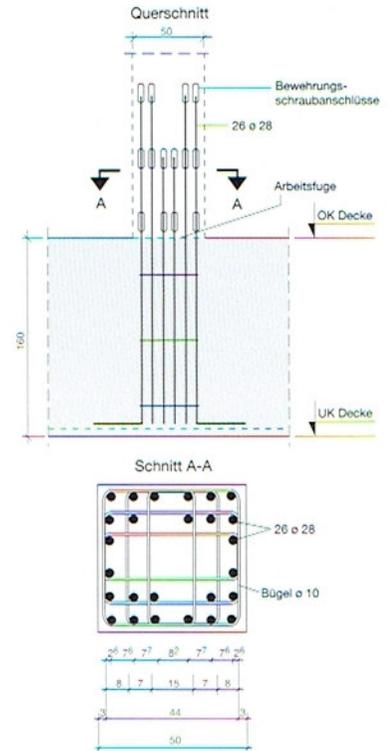


Bild 15: Stützenanschlußbewehrung in der Tiefgaragendecke

„Randbedingungen“ berücksichtigt werden:

Die Betone für die Sohle mit einer durchschnittlichen Dicke von 50 cm und für die Decke mit $d \approx 50$ cm bis 160 cm durften als Beton für massive Bauteile nur möglichst wenig Hydratationswärme freisetzen, um die Rißgefahr zu minimieren.

Die Betone für die Tiefgaragendecke, für einige Stützen und Stützenanschlüsse mußten aufgrund der oben beschriebenen sehr dichten Bewehrung und der vielen Lagen in diesen Bereichen mit kleinerem Größtkorn eingebaut werden.

Je nach Belastung aus der Hochbauung und um die Abmessungen der Stützen gleichzuhalten, waren unterschiedliche Betonfestigkeitsklassen erforderlich.

Der zeitliche Arbeitsablauf war eine wesentliche und vorgegebene Kenngröße. Um bei niedrigen Außentemperaturen die annähernd gleiche Fe-



Bild 17: Mehrschichtige Bewehrung der Tiefgaragendecke

Bild 16: Betonieren eines Abschnitts der Tiefgaragendecke

stigkeitsentwicklung und damit einen gleichbleibenden Arbeitsfortschritt beibehalten zu können wie im Sommer, mußten besondere „Wintermischungen“ verwendet werden.

Die verschiedenen für die Tiefgarage verwendeten Betonzusammensetzungen, die sich aufgrund obiger Vorgaben in den Eignungsprüfungen ergaben und auch eingebaut wurden, sind in Tafel 1 zusammengestellt. Dabei haben sich bei den Betonen Hochofenzemente als günstig erwiesen. Lediglich für die hochfesten Betone wurde Portlandzement verwendet (Tafel 1, Spalten 8 und 9). Ausschlaggebend hierfür war der geringe Wasseranspruch und die für diese Betonzusammensetzung sehr günstige Granulometrie dieses Zements CEM I 42,5 R-HS. Der Beton mit diesem Zement zeichnete sich im Gegensatz zu den sehr hellen Hochofenzementbetonen durch seine dunkle Färbung aus (Bild 9).

Für die Stützen und die „dünnen“ Außenwände wurde bei den „Wintermischungen“ die Zementart und die Betonfestigkeitsklasse der entsprechenden „Sommermischungen“ beibehalten, dafür aber der Zementgehalt um 60 kg/m^3 erhöht, auf die Zugabe von Steinkohlenflugasche verzichtet und der Betonverflüssiger um etwa 50 % erhöht (Tafel 1, Spalten 6 und 7). Mit dieser Betonzusammensetzung

konnte die Hydratationswärme einerseits geringer als bei Verwendung von Portlandzement gehalten werden, andererseits aber die Festigkeitsent-

wicklung der Betone bei niedrigeren Außentemperaturen ausreichend beschleunigt werden. Die gemessenen Wassereindringtiefen im Rahmen der

Tafel 2: Eingebaute Betonmengen

| Bauteil | Betonfestigkeitsklasse | Zementart | Größtkorn mm | Menge m^3 |
|-------------------------------------------------------|------------------------|-----------|--------------|--------------------|
| Pfähle | B 25 | CEM III/A | 32 | 2.500 |
| Sohle + Decke Tiefgarage | B 35 | CEM III/A | 32 | 20.580 |
| | | | 16 | 1.250 |
| Außenwände + Stützen Tiefgarage | B 45 | CEM III/A | 32 | 1.661 |
| | | | 16 | 568 |
| hochfeste Stützen | B 85 | CEM I-HS | 16 | 5 |
| | B 65 | CEM I-HS | 16 | 161 |
| Außenwände + Stützen Tiefgarage und Decken Hochbauten | B 35 | CEM III/A | 32 | 4.736 |
| | | | 16 | 1.725 |
| Decken + Wände + Stützen Hochbauten | B 35 | CEM I | 32 | 2.355 |
| | | | 16 | 786 |
| Wände + Stützen Hochbauten | B 45 | CEM I | 32 | 364 |
| | | | 16 | 580 |
| Stützen Hochbauten | B 55 | CEM I | 16 | 127 |
| | B 55 | CEM III/A | 16 | 5 |
| Fertigteile Haus A Haus B | B 45 | CEM I | 16 | 1.200 |
| | | | | 460 |

Tafel 3: Statistische Auswertung der Eigenüberwachung der mengenmäßig am meisten eingebauten Betone

| Festigkeitsklasse | | B 35* | B 35 | B 45 | B 35 | B 65 |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Tafel / Spalte | | I / 2 | I / 4 + 4 / I | I / 6 | 4 / 3 | I / 9 + 4 / 9 |
| Bauteil | | Sohle/ Tiefgaragendecke | Wände und Hochbau- decken | Wände und Stützen Tiefgarage | Decken bei niedriger Temperatur | Stützen |
| Eingebaute Menge | m ³ | 20.580 | 4.736 | 1.661 | 2.355 | 161 |
| Mittelwert β_{WM} | N/mm ² | 52 | 45 | 55 | 47 | 77 |
| Standardabweichung s | N/mm ² | 4,5 | 4,5 | 5 | 3,5 | 6 |
| Variationskoeffizient v | % | 8,6 | 10,0 | 9,1 | 7,4 | 7,8 |
| 5 %-Fraktile $\beta_{5\%}$ | N/mm ² | 44 | 37 | 47 | 41 | 67 |

* Gütenachweis nach 90 Tagen

Eigenüberwachung betragen bei dem B 35-wu im Mittel 15 mm und bei dem B 45-wu im Mittel 12 mm.

Die Betone wurden als Transportbetone angeliefert, mit Pumpen eingebaut (Bild 16) und mit Innenrüttlern verdichtet. Dabei wurde insbesondere bei den sehr dicht bewehrten Bauteilen verstärkt darauf geachtet, daß eine ausreichende Anzahl von Betonier- bzw. Rüttelgassen vorhanden waren. Für extrem stark bewehrte Bereiche (Bild 17) wurde zur Sicherstellung des sachgemäßen Einbaus außerdem ein fließfähiger Beton mit einem Größtkorn von 16 mm verwendet (Tafel 1, Spalten 3, 5, 7).

Zum Betonieren wurde die Tiefgaragendecke in schachbrettartige Abschnitte eingeteilt und in Arbeitsschritten von bis zu 1.000 m³ je Tag betoniert. Dafür waren zwei Betonpumpen im Einsatz, die jeweils von zwei Transportbetonfahrmischern beliefert wurden.

Eng gestellte Schalungsträger und doppelte Jochträger auf stark belastbaren Aluminium-Profil-Stützen bildeten die Schalung der Lastverteilungsplatte (Bild 8), die einen Schalungsdruck von bis zu 4.000 kg Frischbeton je m² aufnehmen mußten.

Der Beton der Sohle wurde sieben Tage durch Abdecken mit einer Folie

nachbehandelt. Die Stützen und Wände wurden nach zwei Tagen ausgeschalt, die drei Stützen aus hochfestem Beton B 85 nach vier Tagen. Die Stützen wurden nach dem Ausschalen mit Folie umwickelt.

Die Decke der Tiefgarage wurde aufgrund ihrer Dicke zur Vermeidung eines zu großen Temperaturgradientens nach dem Betonieren mindestens sieben Tage mit einer wärmedämmenden Folie abgedeckt.

Für der Herstellung der Tiefgarage wurden insgesamt rd. 25.000 m³ Beton und rd. 3.000 t Betonstahl eingebaut. Dabei lag der Anteil von B 35 bei über 20.000 m³ (Tafel 2). Bild 18 zeigt das Häufigkeitsdiagramm der ermittelten 90-Tage-Festigkeiten im Rahmen der statistischen Auswertung der Eigenüberwachung des B 35. In Tafel 3 sind einige statistische Kennwerte für die mengenmäßig am meisten eingebauten Betone angegeben. Die Auswertung macht u.a. deutlich, daß nach den in [3] angegebenen Beurteilungskennwerten für die Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Betonherstellung die Gleichmäßigkeit aller hier eingebauten Betone in die Kategorie „gut“ einzustufen ist. Als Kennwert dient dabei die Standardabweichung. Bei Bewertung mit dem Kennwert Variationskoeffizient v ist die Herstellung aller Betone sogar als „sehr gut“ (v < 10 %) zu beurteilen,

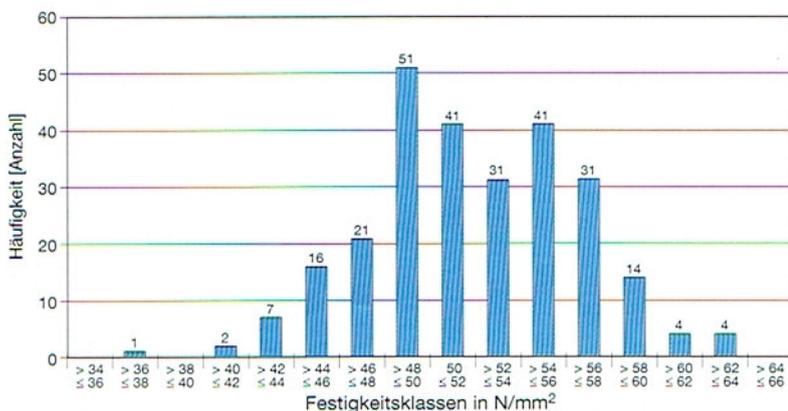


Bild 18: Häufigkeitsverteilung der Druckfestigkeitsergebnisse für Beton B 35 (Tafel 1, Spalte 2)

mit Ausnahme von Beton B 35 für die Wände und Hochbaudecken, der mit „gut“ zu bewerten ist, mit $v = 10\%$ aber an der Grenze zu „sehr gut“ liegt [3, 4].

4 Die Häuser A, B und C als neue Wahrzeichen Düsseldorfs

4.1 Wände und schiefgestellte Stützen als hochbelastete Trag-elemente

Die Außenwände von Haus A wurden als tragende Fassade ausgebildet, die Gebäude B und C sind dagegen mit nichttragenden Fassaden versehen. Haus A weist deshalb im Gebäudeinneren einen weitgehend stützenfreien Grundriß auf, während an den Außenwänden der Innenräume der Häuser B und C Stützen angeordnet sind (Bild 19). Die Stützen von Haus B haben einen kreisförmigen Querschnitt ($\varnothing 50\text{ cm}$), in Haus A und in Haus C sind sie quadratisch ausgebildet ($50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$) (Bild 20).

Die Stützen sind bis zu 7 m hoch und mit wenigen Ausnahmen alle „schief“. Bei Neigungen bis zu 28° können sich je Geschoß Abweichungen aus dem Lot von bis zu 1,7 m ergeben (Bild 21). Die Stützen wurden mit

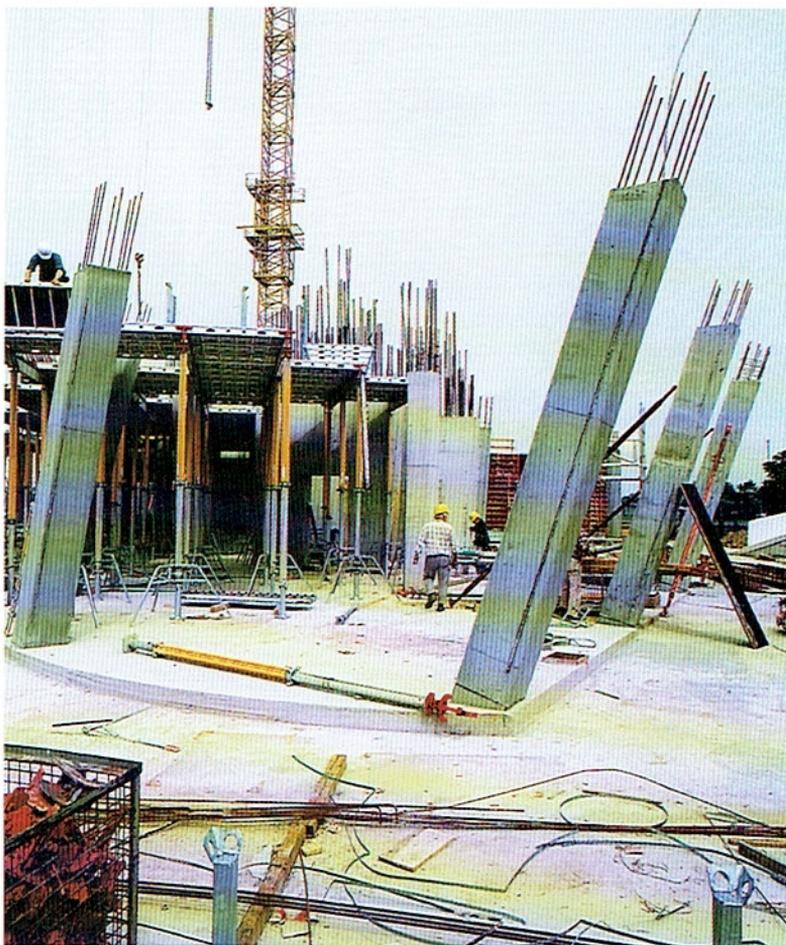


Bild 19: Schräge Stützen und Deckenschalung im Erdgeschoß von Haus C



Bild 20: Fast alle Stützen sind schräg! Quadratisch in Haus A (links) und Haus C (rechts), rund in Haus B (Mitte)



Bild 21: Bis zu 28° geneigte Stützen im 2. Obergeschoß von Haus C



Bild 22: Schalung und Abstützen für die schrägen Stützen

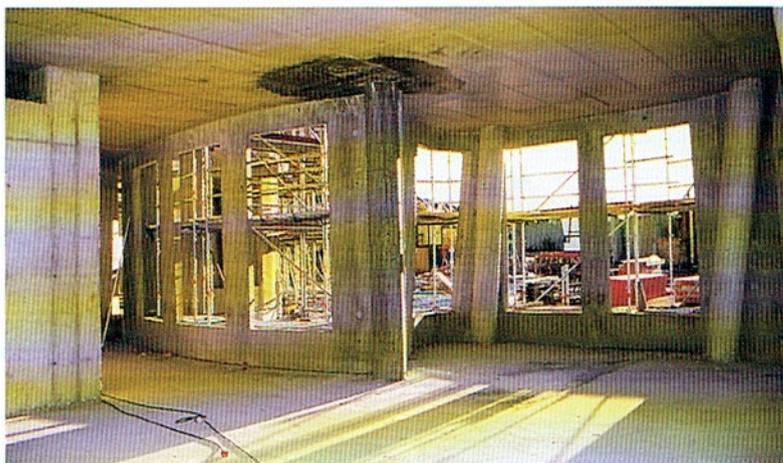


Bild 23: Eine von 74 Stützen aus dunkelgefärbtem hochfestem Beton B 65 mit Anschluß in der Deckenebene

einer herkömmlichen Schalung erstellt, wobei der Stützenfuß, bedingt durch die unterschiedlichen Neigungen der einzelnen Stützen, beigeschalt werden mußte (Bild 22). Eine ausreichende Standzeit in der Schalung bis zur erforderlichen Erhärtung gab dem jungen Beton seine Standfestigkeit.

In Haus C wurden in den Stützen Befestigungsschienen angeordnet, an denen das bewehrte Mauerwerk befestigt wurde (Bild 19 und Bild 20, rechts).

Für den Bauzustand mußte für die geneigten, ausgeschalten und unbelasteten Stützen der statische Nachweis der Standsicherheit für das Moment aus Eigengewicht x Hebelarm geführt werden. Im Endzustand wirken die meisten Stützen achsial belastet zwischen den Decken mit Mindesteinspannmomenten aus der Decke, jedoch ohne Momentenaufnahme infolge Horizontalkraft aus dem Schub der schiefen Decke.

In den drei Hochbauten wurden insgesamt 74 Stützen einschließlich der in Deckenebene liegenden Stützenköpfe in hochfestem Beton der Festigkeitsklasse B 65 hergestellt (Bild 23) (Tafel 4, Spalte 9). Bedingt durch den verwendeten Zement ergab sich auch hier eine deutliche Dunkelfärbung der Stützen. Bei hoher Luftfeuchtigkeit ist der Beton nahezu schwarz. Die hochfesten Stützenbetone B 65 und B 85 wurden aus brandschutztechnischen Gründen unter Zugabe von Polypropylenfasern hergestellt. Über Grund und Wirkung wurde bereits in [1, Abschnitt 5.1] ausführlich berichtet.

Die Kerne der drei Gebäude aus Aufzugschächten und Treppenhäusern wurden jeweils in Stahlbeton ausgeführt. Gemeinsam mit den lotrechten Stützen bilden sie die einzigen lotrechten Tragelemente und sind z.T. stark belastet. Für den statischen Nachweis der Tragfähigkeit war es erforderlich, die Windbelastung der Gebäude zu ermitteln, die aufgrund der verschobenen Geometrie in einigen Bereichen sehr groß war. Dazu wurde das Modell der Gebäudetripologie in einem Windkanal untersucht. Insbesondere für das

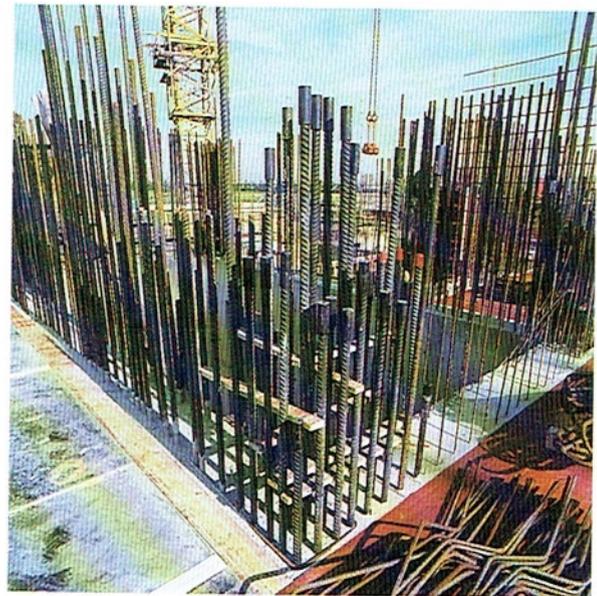
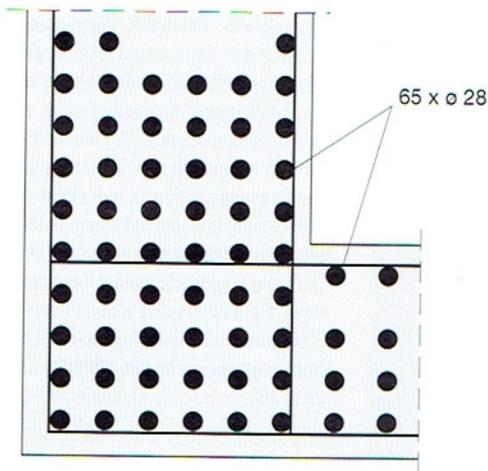


Bild 24: Bewehrungsanordnung im Bereich des Kerns von Haus C auf dem Plan...

Bild 25: ...und in der Praxis

Tafel 4: Zusammensetzung der Betone für die Häuser A, B und C

| Bauwerk | Bauteil | Neuer Zollhof, Häuser A, B, C | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|
| | | Decken / Wände / Stützen | | | | Wände / Stützen | | Stützen | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Bewehrungsgrad | | normal | hoch | normal | hoch | normal | hoch | hoch | hoch | hoch | |
| Betonfestigkeitsklasse besondere Eigenschaften Konsistenz | | B 35 wu KR | | B 35 ¹⁾ wu KR | | B 45 wu KR | | B 55 wu KR | B 55 wu KR | B 65 – KF | |
| Zementart und Festigkeitsklasse | | CEM III/A 42,5 | | CEM I 42,5 R | | CEM I 42,5 R | | CEM III/ A 42,5 | CEM I 42,5 R | CEM I 42,5 R-HS | |
| Zementgehalt | kg/m ³ | 340 | 360 | 340 | 360 | 400 | 420 | 430 | 430 | 420 | |
| Wassergehalt w/z-Wert (w/(z + 0,4 · f)) | kg/m ³ | 175 0,51 0,49 | 184 0,51 0,49 | 175 0,51 0,49 | 184 0,51 0,49 | 171 0,43 – | 185 0,44 – | 185 0,43 – | 185 0,43 – | 152 0,36 0,35 | |
| Zuschlag Sieblinienbereich Größtkorn Gehalt | mm kg/m ³ | ③ 32 1847 | ③ 16 1800 | ③ 32 1847 | ③ 16 1800 | ③ 32 1800 | ③ 16 1735 | ③ 16 1767 | ③ 16 1767 | ③ 16 1881 | |
| Zusatzstoff Art Gehalt | kg/m ³ | Steinkohlenflugasche | | | | | | – | – | – | SFA/ PP-Fasern 30 / 2 |
| Zusatzmittel Art Gehalt | kg/m ³ | BV 0,80 | BV 0,80 | BV 1,02 | BV 0,80 | BV 1,20 | BV 1,20 | BV / FM 1,20 / 3,00 | FM 3,00 | FM 14,20 | |

¹⁾ „Wintermischung“

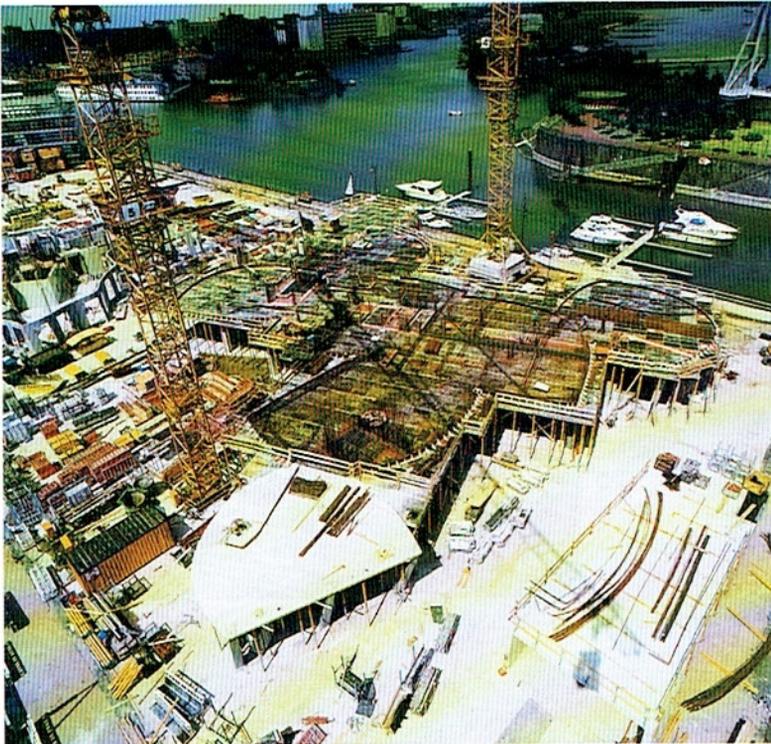


Bild 26: Schalen der horizontalen Decke über dem Erdgeschoß von Haus C

leicht spiralförmig verdrehte Haus C ergaben sich unter Windlast und Eigenlast, durch den Lasteintrag aus den schiefen Dächern, der Schiefstellung der Stützen sowie durch zusätzliche Lastannahmen sehr große Beanspruchungen. Deshalb führte man für Haus C eine dreidimensionale FEM-Berechnung zur Ermittlung der Verformungen durch, die dann der Bemessung der Bewehrung, insbesondere der Scheibenbewehrung in den Decken, zugrunde gelegt wurde. In einigen Bereichen des Kerns von Haus C ergaben sich dabei sehr große Bewehrungsquerschnitte (Bild 24 und 25).

Im Haus A findet über dem dritten Obergeschoß an zwei Stellen eine Baukörperverdrehung statt. Die Lastabtragung der Außenfassade wurde hier über einen zweigeschossigen Ortbetonrahmen ausgeführt. Zur Herstellung der ausragenden Ortbeton-Wandelemente wurde über drei Geschosse ein Leagerüst erbaut. Nach Fertigstellung wurde das Gerüst entsprechend dem Fassadenversprung umgebaut. Für die Wände und Stützen wurden neben Betonen der Festigkeitsklasse B 35 auch B 45, B 55 und B 65 verwendet (Tafel 4).

4.2 Decken als schiefe Dächer

Die horizontalen Geschoßdecken wurden mit einer Systemschalung mit Fallkopf geschalt (Bild 26, Bild 19). Die Schaltafeln konnten schon wenige Tage nach dem Betonieren entfernt werden. Die Schalungsstützen wurden nach zwei Wochen entfernt. Im Bereich der Deckenmitten wurden sie als temporäre Stützen wieder angeordnet, um während der Betonierphase der nachfolgenden Geschoßdecke den Lasteintrag des Frischbetons mit abzuleiten. Kontrollmessungen ergaben nur geringe Durchbiegungen während der Bauphase.

Die Deckenränder der Häuser A und B waren durch die Verwendung der vorgefertigten Wandelemente vorgegeben, so daß die Deckenschalung lediglich entlang der asymmetrischen Fertigteilkontur beigeschalt werden mußte.

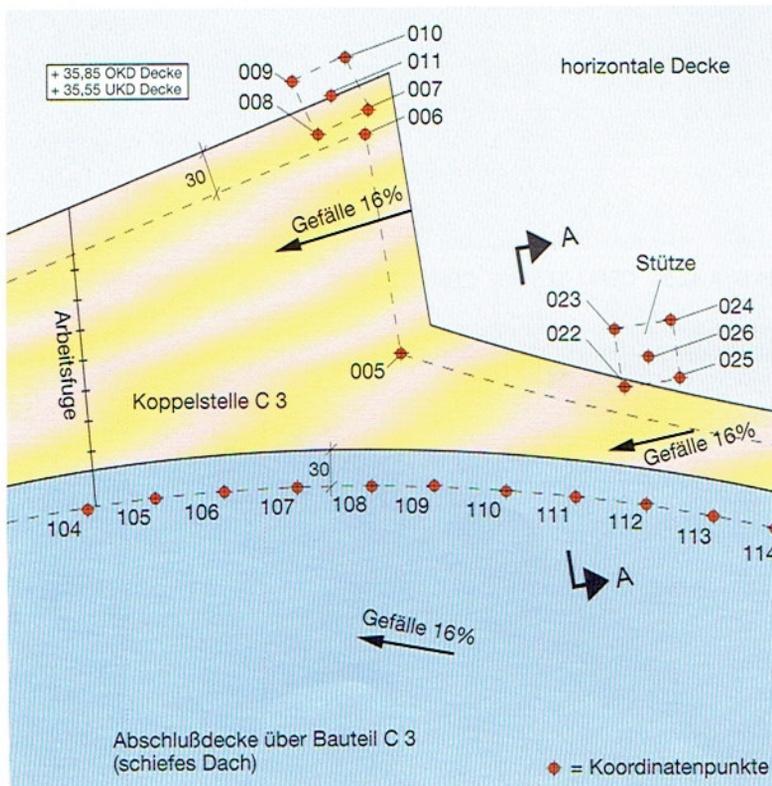
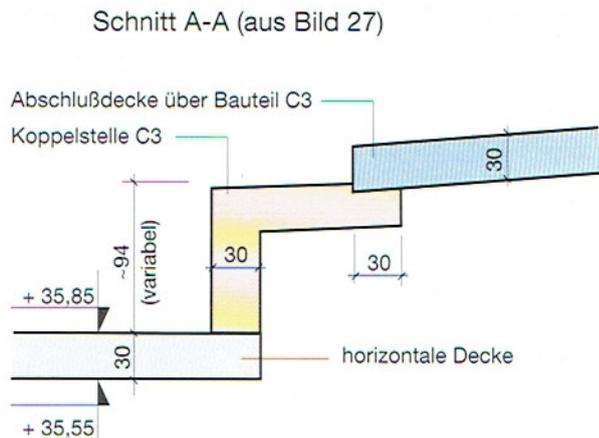


Bild 27: Anschluß eines schiefen Daches an eine horizontale Decke im Haus C über eine Koppelstelle (Draufsicht)

Bei Haus C wurde die Decke über den Deckenrand hinaus geschalt und auf der Deckenschalung eine Randschalung erstellt. Aufgrund der geneigten Fassade ergaben sich auch für den Deckenrand Neigungen mit horizontalen Abweichungen zwischen UK Decke und OK Decke von bis zu 10 cm. Zur Herstellung der überall unterschiedlichen Neigungen wurde auf der Deckenschalung die obere und untere Deckenrandkontur durch Koordinatenpunkte eingemessen. Die Anzahl der Punkte je laufendem Meter wurde entsprechend dem Radius durch ein Programm automatisch variiert. Die Koordinatenpunkte wurden anschließend am CAD-Schalplan automatisch generiert. Neben den Deckenrändern wurden sämtliche Rohbauelemente, d.h. auch Stützen und Wände, gleichfalls über Koordinatenpunkte vorgegeben (**Bild 27**). Statt Achsen auf der Baustelle abzustechen, wurden für den Rohbau ungefähr 22.000 Koordinatenpunkte abgesteckt. Um die schiefen Stützen bzw. die Wände vor Ort zu schalen, war im Vergleich zu konventionellen Bauten die doppelte Anzahl von Schalplänen erforderlich, jeweils ein Plan in der Höhenlage „UK Decke“ und ein Plan in der Höhenlage „OK Decke“.

Die Decken sind als Flachdecken mit einer Dicke von 30 cm ausgebildet. Die Grundbewehrung aus Listensmatten wurde um Zulagen aus Stabstahl für Biegung und Schub sowie für die Scheibenbeanspruchung ergänzt. Die einzelnen Gebäudeelemente der Häuser A und C enden jeweils mit einer geneigten Decke als Dach, lediglich die zwei höchsten Gebäudeelemente schließen mit einer horizontalen Decke ab. Diese schiefen Dächer sind bis zu 23° geneigt. Zwei Lagen Schalungsträger auf Schalungstürmen bildeten die Schalung. In die darunterliegende Decke wurden Spanneisen einbetoniert, an denen die schiefe Schalung abgefangen wurde. Mit einem Beton plastischer Konsistenz, vorwiegend unter Verwendung eines B 35, wurden die schiefen Decken in zwei Abschnitten betoniert. Die schiefen Dächer leiten über Zug-

Bild 28: Schnitt durch den Anschluß eines schiefen Daches an eine horizontale Decke im Haus C über eine Koppelstelle mit höhenvariablem Drempe



bänder aus Bewehrung ihre Lasten in den Kern ein, der sie weiterleitet. Der Anschluß der geneigten Dächer an die horizontalen Decken geschieht über eine geometrisch komplexe Koppelstelle. Je nach Lage der Decke erfolgt dieser Anschluß höhengleich, an einer Außenwand oder durch einen höhenvariablen Drempe (**Bild 28**).

Aufgrund des Anschlusses der schiefen Decken an den Kern ergaben sich für das Ausschalen der Decken besondere Bedingungen. Wurden die schiefen Decken vor den Kernbereichen betoniert, konnten sie trotz erreichter Ausschalfestigkeit erst nach Fertigstel-

lung und bei ausreichender Festigkeit der Decken im Kernbereich ausgeschalt werden.

Das Dach von Haus B besteht aus vielen geneigten Einzelflächen mit mehreren Deckenknicen und Deckenversprüngen, für die aus den Daten des CATIA-Modells die Schalpläne sowie anschließend der Koordinatenplan, die Bewehrungspläne und der Schalungsplan entwickelt wurden. Nur diese eine Arbeitsvorbereitung machte es den Zimmerleuten mit Unterstützung von Vermessungsingenieuren erst möglich, vor Ort die Schalung für die vierteilige Deckenfläche zu erstellen.

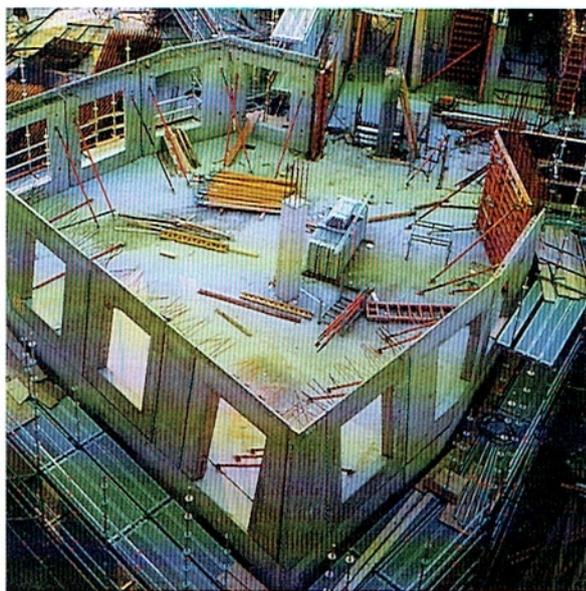


Bild 29: Aufstellung der ebenflächigen, bis zu 6° geneigten Wände in Haus A aus Betonfertigteilen

Tafel 5: Betonzusammensetzung für die Fertigteile

| Bauwerk | Neuer Zollhof, Häuser A und B | |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Bauteil | Fertigteile | |
| Betonfestigkeitsklasse besondere Eigenschaften Konsistenz | B 45 wu KR | |
| Zementart und Festigkeitsklasse | CEM I 42,5 R | |
| Zementgehalt | kg/m ³ | 400 |
| Wassergehalt w/z-Wert | kg/m ³ | 193 0,48 |
| Zuschlag Sieblinienbereich | ③ | |
| Größtkorn | mm | 16 |
| Gehalt | kg/m ³ | 1744 |
| Zusatzmittel Art | BV | |
| Gehalt | kg/m ³ | 0,30 |

Der gesamte Rohbau der Häuser A, B, C wurde in Eigenleistung des Generalunternehmers ausgeführt. Die Arbeitsvorbereitung sowie die Erstellung sämtlicher Schalpläne und eines Großteils der Bewehrungspläne erfolgten im technischen Büro des Generalunternehmers. Trotz der komplizierten Anforderungen konnte der Rohbau in einer gegenüber herkömm-

lichen Projekten nur unwesentlich längeren Bauzeit hergestellt werden.

4.3 Einbau des Betons

Die Wände, Stützen und Decken wurden mit Transportbeton hergestellt, der mit Pumpen gefördert und mit Innenrüttlern verdichtet wurde. Die Zusammensetzung der Betone ist in Tafel 4 angegeben. Während für die Wände und Stützen der Tiefgarage für die „Wintermischung“ die Zementart beibehalten und die Zusammensetzung geändert wurde, wurde für die „Wintermischung“ im Hochbaubereich bei gleichbleibendem Zementgehalt und w/z-Wert die Zementart gewechselt (Tafel 4, Spalten 3 und 4). Maßgebend war in diesem Fall, daß die Wärmeentwicklung bei den verhältnismäßig dünnen Bauteilen von untergeordneter, die Ausschaltfestigkeit im Rahmen des Baufortschritts dagegen von großer Bedeutung war. Da die Betonmengen für die „Wintermischungen“ außerdem im Verhältnis zu den „Som-



Bild 30: Verfüllen von Fugen zwischen den Fertigteilen mit thixotropem Mörtel

mermischungen“ gering waren, wurde der Beton mit CEM I 42,5 R hergestellt.

Für die Decken, Wände und Stützen wurden rd. 12.500 m³ Beton, rd. 2.000 t Bewehrung und rd. 54.000 m² Schalung benötigt. Die statistische Auswertung der Eigenüberwachung einiger Betone ist ebenfalls in Tafel 3 dargestellt.

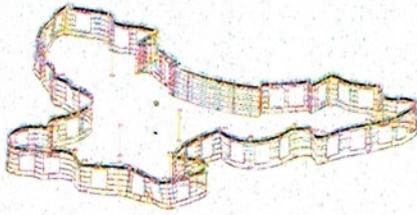
Die bis zu 7 m hohen Stützen wurden in zwei Abschnitten betoniert. Besondere Sorgfalt war beim Verdichten der geneigten Stützen erforderlich. Die bis zu 5 m hohen schrägen Stützen wurden nur in 1 m-Abschnitten gefüllt. Dann wurde die Rüttelflasche mittig eingetaucht und der Beton verdichtet, wobei darauf geachtet wurde, eine Berührung mit der Bewehrung möglichst zu vermeiden.

Die Decken wurden mindestens drei Tage lang durch Besprühen mit Wasser nachbehandelt, bei sehr hohen Außentemperaturen entsprechend länger. Die Stützen blieben mindestens zwei Tage in der Schalung und wurden anschließend entsprechend nachbehandelt.

5 Stahlbetonfertigteile als Herausforderung für Planer, Ingenieur und Hersteller

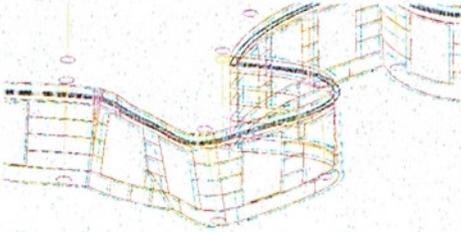
5.1 Haus A: Geknickte Fertigteile als Rohbaufassade

Das zwölfgeschossige Gebäude A besteht aus ebenflächigen, nach innen oder außen bis zu 6° geneigten Wänden, die zum überwiegenden Teil aus 25 cm dicken tragenden Stahlbetonfertigteilen zusammengesetzt sind (Bild 29). Durch die Verschneidung der Ebenen in der Fassade entstehen in den Fertigteilen räumliche Knicke. Die zur Erstellung der Schal- und Bewehrungspläne erforderlichen Daten wurden ebenfalls aus dem Computermodell gewonnen und die Fertigteile auf kippbaren Schaltschienen anschließend herkömmlich geschalt. Die 418 Fertigteile waren bis zu 6 m hoch, 4 m breit und bis zu 9 t schwer. Fast jedes Fertigteil war ein Unikat. Die verwendete Betonzusammensetzung ist in Tafel 5 dargestellt.



CAD 3D - Darstellung einer Geschoßscheibe

- Rohbau außen
- Rohbau innen



CAD 3D - Darstellung Detail

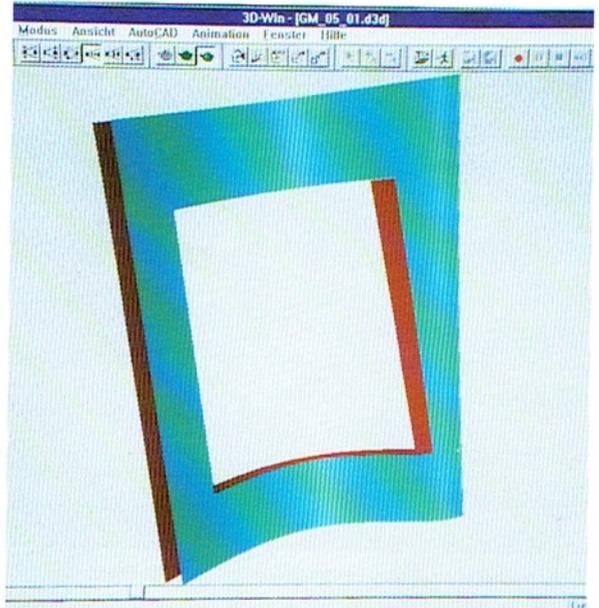


Bild 32: Frei geformtes Betonfertigteile für die Fassade von Haus B

Bild 31: Dreidimensionale Darstellung einer Geschoßscheibe von Haus B im Computer (oben) und Ausschnitt (unten)

Für das Schließen der vertikalen Fugen zwischen den einzelnen Fertigteilen entwickelte die Rohbauleitung ein neues, wirtschaftliches und vom Bauablauf zeitlich unabhängiges Verfahren, bei dem auf ein beidseitiges Schalen der Fugen verzichtet werden kann.

Außerdem ist das Verfüllen der Zwischenräume mit diesem Verfahren unabhängig vom weiteren Bauablauf, da der Füllbeton nicht mehr vor dem Betonieren der Decke von oben in die Fuge eingebracht werden muß. Mit einem speziellen mit einer Pumpe eingebrachten Mörtel wurden die Fugen ohne Aufbringen einer Schalung von der Innenseite verfüllt (Bild 30). Die Außenseite der Fuge wird während des Verfüllens mit dem schnell erhärtenden Mörtel kurzzeitig mit einem Brett abgedeckt. So kann das Schließen auch nach dem Betonieren der Decke erfolgen. Der Mörtel bestand aus Portlandzement (< 20 Gew.-%), abgestuften Sanden, organischen Zusatzmitteln (< 0,3 Gew.-%) und besonderen ausgewählten mineralischen Zusatzstoffen, die dem Mörtel pump-

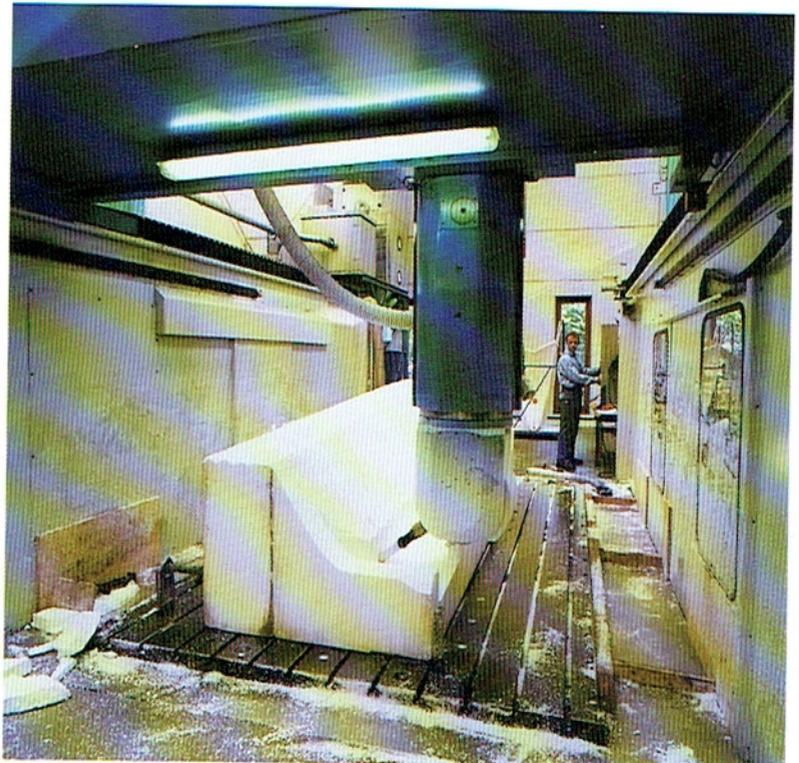


Bild 33: CNC-gesteuertes Ausfräsen der Schalung für ein Fassadenelement für Haus B aus einem Styroporblock

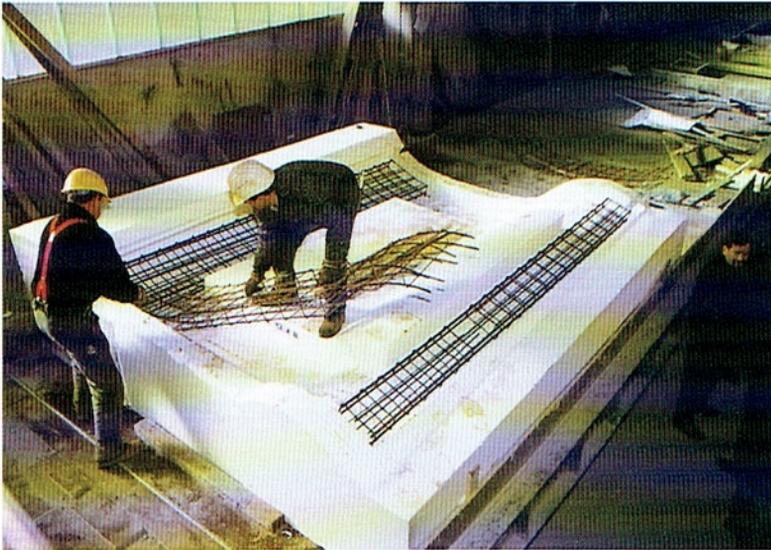


Bild 34: Bewehren eines Fertigteils für Haus B im Werk

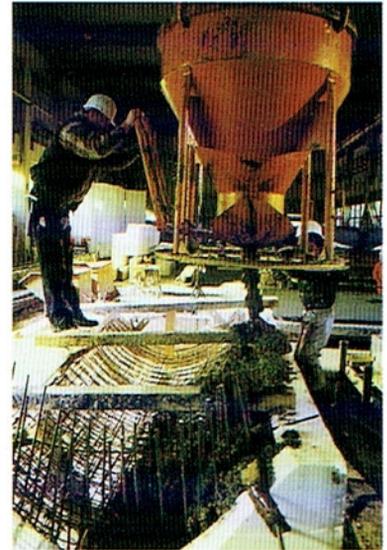


Bild 35: Betonieren eines Fertigteils mit „aufgehängter“ Bewehrung für Haus B

fähige, thixotrope Eigenschaften verliehen. Auf 30 kg Trockenmasse wurden vor Ort 5 l Wasser zugegeben. Der Mörtel, der eine Mindestdruck-

festigkeit von 15 N/mm² aufweisen mußte, erfüllte die Anforderungen gemäß DIN 1045 für Mörtel für Fertigteile.

5.2 Haus B: Frei geformte Fertigteile als Rohbaufassade

Die exakte bauliche Umsetzung der stark gekrümmten Fassaden-Freiformflächen des siebengeschossigen Hauses B stellte für die Techniker und Konstrukteure die größte Herausforderung dar. Die bisherigen Entwürfe Gehrys waren wie bereits oben erwähnt stets geometrisch und mathematisch erfassbar und beschreibbar gewesen sowie zudem überwiegend als Stahlbaukonstruktionen umgesetzt worden. Mit dem Haus B des neuen Zollhofs hatte Gehry jedoch ein nur durch Freiformflächen definiertes Bauwerk entworfen, das aus bauphysikalischen Gründen nur in Massivbauweise erstellt werden konnte.

Die Entwicklung eines zum Patent angemeldeten, neuen Bauverfahrens half, diese Aufgabe zu bewältigen. Dazu wurden die umfangreichen Daten des CATIA-Computermodells in Geschosse zerteilt und anschließend konvertiert, so daß die einzelnen Fassaden der Geschosse mit der Software „acad“ und „mechanical desktop“ bearbeitbar wurden (Bild 31). Jede Geschossscheibe wurde nach statischen und konstruktiven Gesichtspunkten in 18 cm dicke, nichttragende Segmente unterteilt, die als einzelne



Bild 36: Einbau der Fertigteile in die Fassade von Haus B

Bild 37: Fassadenteil-Baukasten im Erdgeschoß von Haus B

Stahlbetonfertigteile ausgebildet werden sollten (**Bild 32**). Anschließend wurden sie zur Überprüfung nochmals in die CATIA-Software importiert, auf Übereinstimmung kontrolliert und freigegeben. Für die Fertigteile von Haus B existierten damit lediglich Computerdaten und keine Schalpläne. Die Freigabe der einzelnen Fertigteile erfolgte somit gleichfalls auf Basis von Computerdaten.

Die CAD-Daten wurde in ein CNC-Programm zum Steuern einer Fräsmaschine umgeschrieben, die aus Styroporblöcken die individuellen Schalformen der einzelnen Elemente herausfräste (**Bild 33**). In Versuchen waren zuvor ein geeigneter Fräskopf, die optimale Fräsgeschwindigkeit und ein akzeptabler Frässpurbabstand ermittelt worden. Das anfallende Styropor-Fräsgut wurde gepreßt und recycelt.



Bild 38: Paßgenauer Einbau der Fertigteile auf der vor Ort betonierten Betonplatte für Haus B

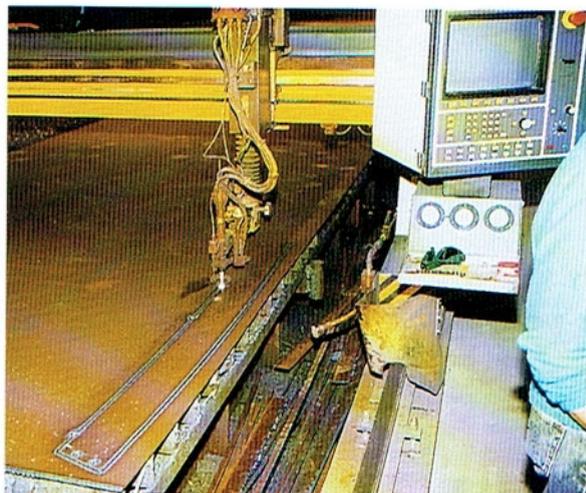
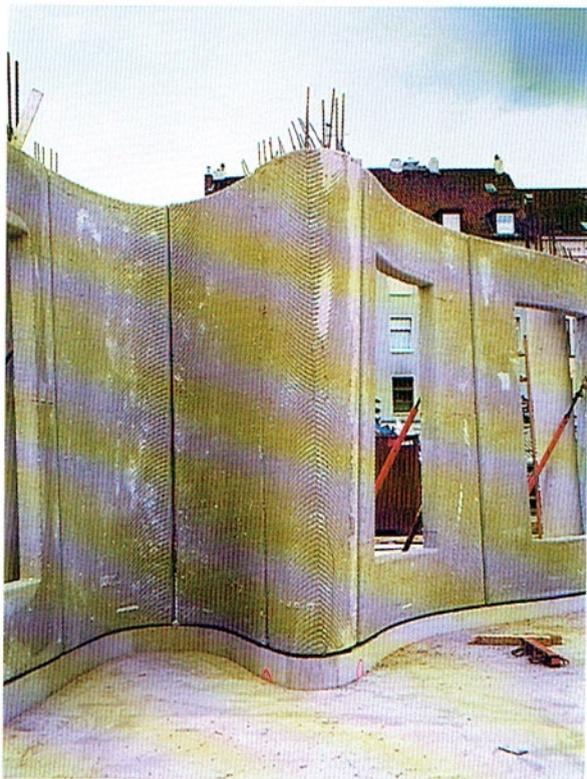


Bild 39: CNC-gesteuertes Brennen der formgebenden Stahlschwerter für Haus C

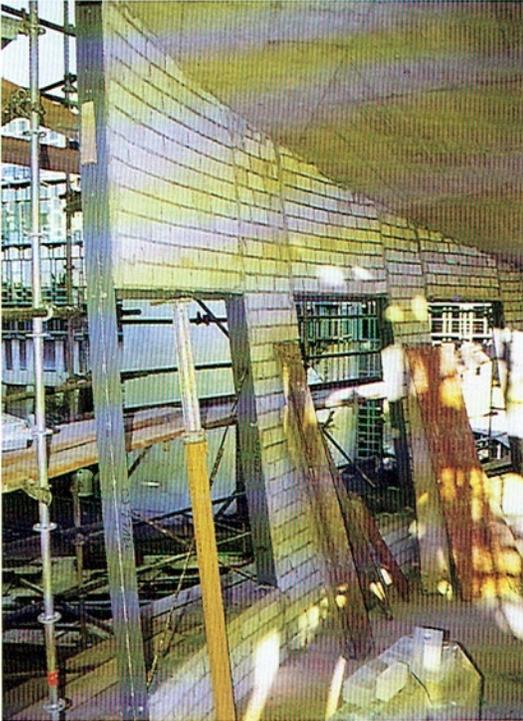


Bild 40: Mit bewehrtem Kalksteinmauerwerk ausgemauerte Wände in Haus C

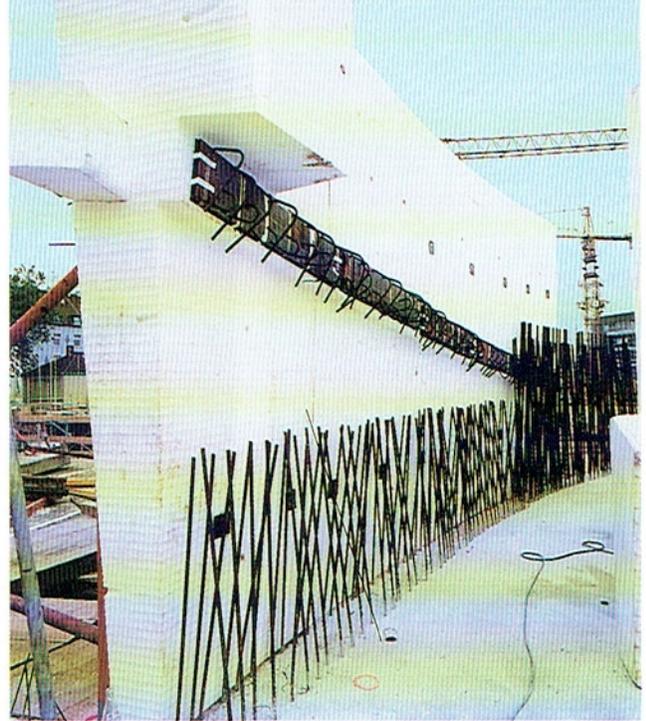


Bild 41: Styroporinlets für die Ortbetonwände in Haus C



Bild 42: Einbau der Bewehrung von Styroporinlets

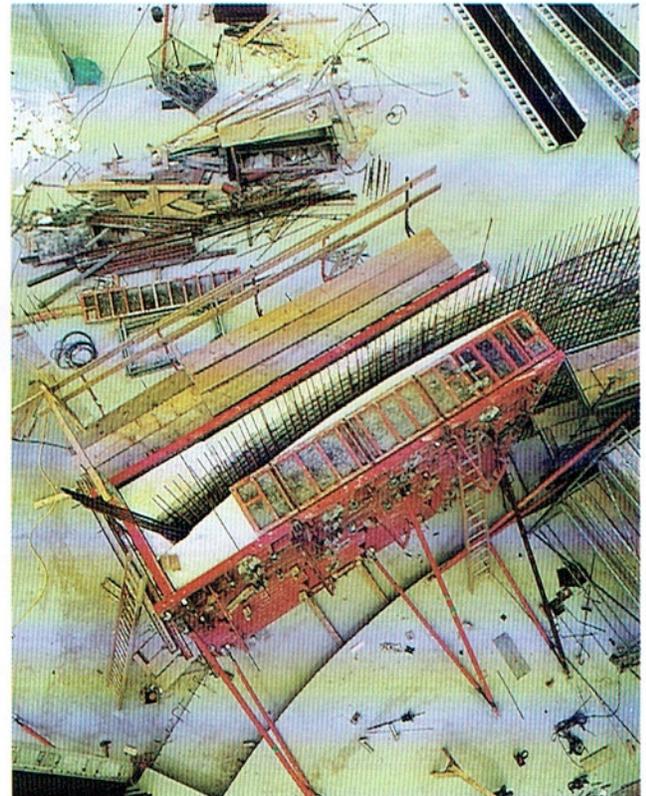


Bild 44: Fertige tragende Wand im Haus C

Um die fertige Form auf ihre Genauigkeit zu überprüfen, waren am Computer mehrere Kontrollmaße errechnet worden. Auf die gleiche Weise wurde die Betonoberfläche bestimmt, die kumuliert die gesamte Fläche der Fertigteilfassade ergab. Zwei in die Form gefräste, definierte Aussparungen dienten zum späteren Einbau von HülSEN für Vermessungspunkte.

Die fertige Schalform wurde zu einem Fertigteilwerk transportiert und entsprechend einem Bewehrungs-Musterplan mit einer Bewehrung versehen (Bild 34). Die Bewehrung wurde beim Betonieren nicht eingelegt, sondern an Kanthölzern „aufgehängt“, um die Schalform vor Beschädigung zu schützen (Bild 35). Der Beton wurde mit plastischer Konsistenz eingebaut. Die Konsistenz mußte es erlauben, den Beton einzubauen und zu verdichten, ohne daß er von dem höheren Abschnitt des Fertigteils weg- und im tieferliegenden Teil zusammenfloß. Nach dem Verdichten wurde das Fertigteil durch Abreiben in die genaue Form gebracht. Zum Ausschalen wurde ein das Schalungsmaterial nicht angreifendes Trennmittel mit guten Trenneigenschaften verwendet und der Schalkörper anschließend recycelt. Auf diese Weise entstanden ohne einen Schalplan mit einem Minimum an Bewehrungsplänen 355 verschiedene Fertigteile, die bis zu 6 m hoch, 4 m breit und bis zu 6 t schwer waren.

Auf der Baustelle wurde das Gebäude wie ein Puzzle aus den nummerierten Fertigteilen zusammengesetzt (Bilder 36 und 37). Mit Hilfe der exakt einbetonierten HülSEN der Vermessungspunkte wurden die Fertigteile mit einem Tachymeter über Koordinaten räumlich justiert. Die Kontrolle ergab, daß sie mit einer Genauigkeit von ± 1 cm der Vorgabe des CATIA-Computermodells entsprachen und damit eine höhere Paßgenauigkeit als konventionelle, gerade Wände aufwiesen. Die hohe Paßgenauigkeit der



Wände wurde besonders im Erdgeschoß deutlich, wo die vorgefertigten Elemente mit dem Verlauf der vor Ort gefertigten Bodenplatte genau übereinstimmte (Bild 38).

Das Gebäude B ist wahrscheinlich weltweit das erste Gebäude, das vollständig in Freiformflächen aus Beton erstellt wurde.

Dem reibungslosen Ablauf lag ein logistisches Konzept zugrunde, das sicherstellte, daß dem die Schalung herstellenden Unternehmen stets Styroporkörper in der jeweils benötigten Menge und Größe zur Verfügung standen und die Lieferung der fertigen Formen an das Fertigteilwerk sowohl dessen Produktionskapazitäten als auch der für den zügigen Bauablauf benötigten Menge an Fertigteilen auf der Baustelle entsprach – „Just in

time!“. So konnte für alle Beteiligten die vorzuhaltende Lagerkapazität auf ein Minimum beschränkt bleiben.

Das oben beschriebene Verfahren wurde bereits auf weiteren Baustellen eingesetzt, um räumlich gekrümmte Betonbauteile herzustellen. Damit sind die konstruktiven Grenzen kreativen Gestaltens weiter nach hinten verschoben wurden.

6 Haus C: Gebogene Stahlschwerter als Rohbaufassade

Für die Herstellung der ebenfalls frei geformten, jedoch weniger stark gekrümmten, gemauerten Außenwände von Haus C wurde in Anlehnung an das zuvor beschriebene Verfahren ein weiteres Verfahren entwickelt. Wiederum ausgehend vom CATIA-Modell

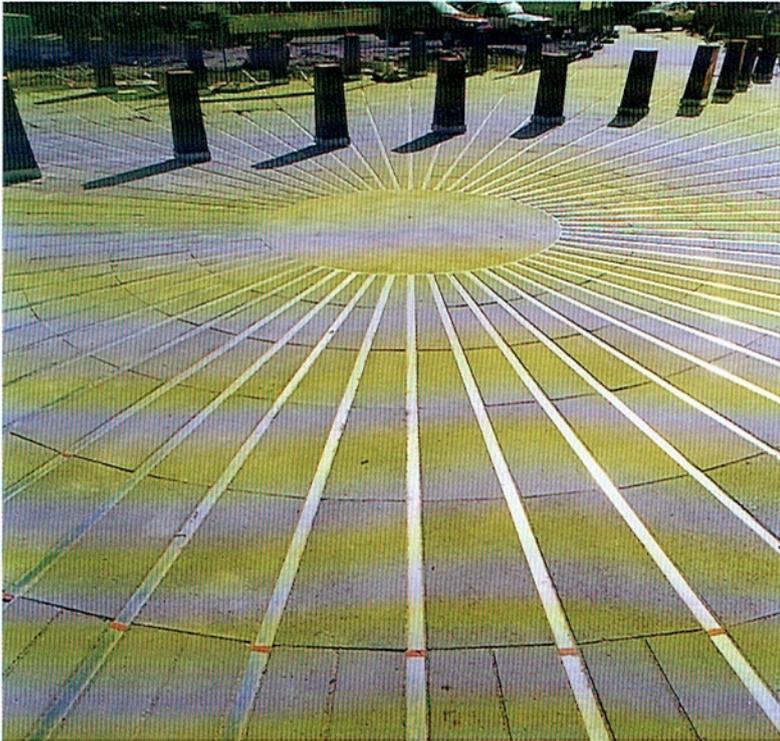


Bild 45: Plaza aus konzentrisch verlegten Betonplatten und radialen Edelstahlstreifen



Bild 46: Zentrum der Plaza mit Sichtbetonkreis vor Haus B

wurden Stahlschwerer konstruiert, die CNC-gesteuert aus einer Stahlplatte gebrannt werden konnten (Bild 39). Die rd. 2.900 verschiedenen 10 mm dicken Stahlschwerer wurden auf der Baustelle räumlich justiert und bildeten die Kontur der bis zu 17° geneigten Fassade ab, die mit 17,5 cm dickem bewehrtem Kalksandsteinmauerwerk ausgefacht wurde (Bild 40).

7 Ortbetonwände als Freiformfläche

Die Innenwände der Gebäude bestehen neben den Kern- und Treppenhäuswänden aus Stahlbeton sowie den Ständerwandkonstruktionen der Innenausbauten aus Gipskarton nur aus wenigen weiteren tragenden Stahlbetonwänden. Nur zwei tragende Stahlbetoninnenwände im Erdgeschoß und im ersten Obergeschoß von Haus C weisen eine räumliche Krümmung auf. Aufgrund ihrer großen Abmessungen war es nicht möglich, diese Wände als Fertigteile in der unter 5.2 beschriebenen Methode herzustellen. Sie mußten daher in Ortbeton erstellt werden. Hierzu wurde das Verfahren, mit dem die Styroporformen für die Fertigteile hergestellt wurden, auf den Ortbeton übertragen und CNC-gefräste Styroporinlets gefertigt. Diese wurden in herkömmliche Wandschalungen eingestellt. Versprünge oder Kanten konnten unproblematisch durch die Styroporform vorgegeben werden (Bild 41). Der Standpunkt der Schalung wurde hierbei entsprechend einer optimalen Dicke der Inlets festgelegt und durch Koordinatenpunkte in die Örtlichkeit übertragen. Die Inlets waren auf die Schalung abgestimmt und mit Löchern zum Durchstecken der Spanneisen versehen (Bild 42). Nach dem Bewehren wurde die Form zugeschalt und gegen Auftrieb gesichert (Bild 43).

Zum Betonieren wurde auch hier ein Beton mit Hochofenzement verwendet, um durch niedrige Wärmeentwicklung einen Wärmestau zu vermeiden (Tafel 4, Spalte 1). Die Art des Styropors war so gewählt, daß es nicht durch den auftretende Schal-

druck verformt werden konnte. Der Ortbeton erhielt zusätzlich durch die geschlossenporige, dennoch aber leicht wassersaugende Oberfläche des Styropors eine dichte Oberfläche. Durch die Spurrillen der Fräse ergaben sich wellenförmige Strukturen, die einen guten Haftgrund für den aufzubringenden Putz boten (Bild 44).

Da auch hier die für den Bauablauf maßgebenden, komplizierten Teile – die frei geformten Styroporinlets – fertig auf die Baustelle geliefert wurden, konnten die gekrümmten Wände unproblematisch und zügig vor Ort betoniert werden. Eine Kontrollmessung einiger Außenwandpunkte, die über räumliche Koordinaten aufgenommen und in die CAD-Planung eingespielt wurden, ergab nur geringfügige Soll-/Ist-Abweichungen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Sommer dieses Jahres werden alle drei Gebäude des neuen Zollhofs mit rd. 7.900 m² Klinkerfassade (Haus A), rd. 4.700 m² Edelstahlfassade (Haus B) und rd. 9.600 m² Putzfassade (Haus C), „gespickt“ mit rd. 1.600 verschiedenen Fensterboxen, in ihrer frei geformten Geometrie fertiggestellt sein und ihre eigenwillige Silhouette im Düsseldorfer Hafen offenbaren – angeordnet auf der 16.000 m² großen, aus konzentrisch verlegten Betonplatten bestehenden Plaza, die von ebenerdig eingebauten Edelstahlstreifen mit einer Gesamtlänge von rd. 6.000 m radial durchzogen ist (Bild 45). Das Zentrum der Plaza wird von einem Sichtbetonkreis von 2 m Durchmesser vor Haus B gebildet (Bild 46).

Der neue Zollhof ist ein Kunstwerk – ermöglicht durch die Entwicklung innovativer Schalungstechniken und durch den effektiven und kreativen Einsatz von Computertechnologie. Er zeigt, daß Freiformflächen in Beton in hoher Ausführungsqualität realisierbar geworden sind. Ohne den Baustoff Beton wäre die Geometrie des neuen Zollhofs in dieser Form nicht zu verwirklichen gewesen. Für den Werkstoff Beton wiederum bedeutet dies

eine fast unbegrenzte Einsetzbarkeit selbst in Bereichen, die vor kurzem noch als nicht machbar galten.

„Damit ist Wirklichkeit geworden, wovon russische Avantgardisten vom Beginn dieses Jahrhunderts nur träumen konnten: eine dynamische, revolutionäre, über den jahrhundertlang gepflegten rechten Winkel sich hinwegsetzende Architektur, die kühne Formen mit Funktionalität verbindet“ [5].

Der Architekturkritiker Pehnt spricht sogar von einer neuen Stilrichtung, dem CAD-Expressionismus [6].

Die Grenzen des technisch Machbaren sind an dieser Baustelle verschoben worden, und es läßt sich nur schwer errahnen, welche architektonischen Ausdrucksmittel sich daraus in der Zukunft noch ergeben werden.

9 Literatur

- [1] Albrecht, P.: „Der neue Zollhof – innovative Schalung für ein außergewöhnliches Bauprojekt“. Beton 48 (1998) H.9, S. 538 - 544.
- [2] Jonas, A.: „Freigeformte Betonfertigteile am Beispiel ‚Neuer Zollhof‘ Düsseldorf“. Vortrag auf dem Deutschen Betontag 1999, Berlin. Deutscher Beton-Verein, Vorträge 1999, noch nicht veröffentlicht.
- [3] Bonzel, J.; Dahms, J.: Über die Bedeutung der statistischen Qualitätskontrolle bei Beton. beton 14 (1964) H. 10, S. 429-436.
- [4] Cordon, W.A.: Evaluation of compressive strength test results of field concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56), S. 241-257.
- [5] Müller, B.: „Die Überwindung des rechten Winkels“. Rheinische Post, Düsseldorf, vom 3. März 1999.
- [6] Pehnt, W.: „Riesenzwerg am Hafen“. Frankfurter Allgemeine Zeitung, Frankfurt, vom 28. Dezember 1998.

Bauschild

Bauherr

Kunst- und Medienzentrum
Rheinhafen GmbH, Düsseldorf

Projektentwicklung

PHILIPP HOLZMANN
BauProjekt AG, Niederlassung Köln

Entwurfsarchitekt

Frank O. Gehry, Santa Monica,
Kalifornien, USA

Ausführungsarchitekt

Beucker, Maschlanka und Partner,
BM+P, Düsseldorf

Generalunternehmer und Bauausführung des Rohbaus

Philipp Holzmann AG –
Direktion West, Düsseldorf

Fräsen der Schalformen

grunewald Modellbau, Bocholt

Tragwerksplanung

Statik:
Ingenieurbüro AG
Hubertus Zimmerling, Düsseldorf

Ausführungspläne:
Technisches Büro Philipp Holzmann
AG, Düsseldorf

Prüfstatik

Gehlen Tragwerksplanung,
Düsseldorf

Eigenüberwachung

Betonprüfstelle E
Philipp Holzmann MTA Oberhausen

Fertigteile

Betonwerk Kronen,
Mönchengladbach

Transportbeton

Pfähle:
Horst Flock Transportbeton, Mönchengladbach,
Werk Düsseldorf

Tiefgarage und Hochbebauung:

Liefergemeinschaft
Elskes Transportbeton GmbH,
Duisburg,
Werk Düsseldorf-Hafen
und
Readymix Beton Rhein-Ruhr GmbH,
Düsseldorf

www.zollhof.de

