

# Spritzbeton in den NÖT-Abschnitten des Kanaltunnels

## SHOTCRETE IN THE NATM-SECTIONS OF THE CHANNEL TUNNEL

**Dipl.-Ing. Dr. mont. Walter Purrer, ILF Folkestone/England**

Im Herbst 1987 wurde auf der englischen Seite des Kanaltunnels am Shakespeare Cliff mit den Vortriebsarbeiten für den 450 m langen und 15 % geneigten Zugangstollen A2 begonnen. Nach erfolgreicher Durchörterung des schwierigen Anfangsbereiches mit Hilfe der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise entschloß sich der englische Auftragnehmer TML, den gesamten Tunnelkomplex Shakespeare Underground Development an der englischen Küste mit "NATM" aufzufahren. Danach folgten die drei Castle Hill Tunnels von je 500 m Länge am Portal des Channel Tunnels und schließlich als dritter und kompliziertester Abschnitt der UK-Undersea-Crossover, 7 km von der englischen Küste zwischen England und Frankreich, der momentan im Bau befindlich ist.

Zu Beginn am Shakespeare Cliff kam Trockenspritzverfahren mit pulverförmigem BE und Handauftrag zum Einsatz. Zugleich wurden Spezifikationen für temporären und permanenten Spritzbeton entwickelt. Am Castle Hill kam sodann Trockenspritzverfahren mit flüssig-BE und Spritzmanipulator, jedoch immer noch als temporärer Spritzbeton, zum Einsatz. Mittlerweile werden Anstrengungen unternommen, permanenten Spritzbeton zu verwenden.

In diesem Vortrag wird über die speziellen technischen Anforderungen an Spritzbeton am Channel Tunnel, die Erfahrungen im praktischen Einsatz sowie sich daraus ergebende Anregungen berichtet.

*In autumn 1987 tunneling works were started at the English side of the Channel Tunnel at Shakespeare Cliff with the drive of the 450 m long and 15 % inclined access tunnel Adit A2. After successfully tunneling through the difficult first section by using the New Austrian Tunneling Method, TML, the English contractor, decided to excavate the entire tunnel system of Shakespeare Underground Development at the English coast by this method. "NATM" was also employed for the three Castle Hill Tunnels of 500 m length each situated at the future portal of the Channel Tunnel and finally for the third and most complex construction of the UK-Undersea-Crossover, which is currently being excavated 7 km offshore under the Channel between England and France.*

*Shotcreting works were started at Shakespeare Cliff using the dry method with powder accelerator and hand application. At the same time specifications for temporary and permanent shotcrete were being developed. At Castle Hill dry shotcrete with liquid accelerator and application by Robojet was used still satisfying only temporary shotcrete requirements. In the meantime efforts are being made to introduce permanent shotcrete into the remaining shotcrete works.*

*This report deals with the specific technical requirements for shotcrete at the Channel Tunnel, the practical experiences gained from the works as well as conclusions and recommendations derived thereof.*



Bild 1: Baustelle Shakespeare Cliff

## 1. Einführung

Spritzbeton ist in Großbritannien seit einigen Jahrzehnten sowohl über als auch unter Tage im Einsatz. Dennoch wurde im Herbst 1987 mit dem Beginn der Vortriebsarbeiten für den Zugangstollen Adit A2 bezüglich der Anwendung von Spritzbeton Neuland betreten. Der für die Neue Österreichische Tunnelbauweise geforderte Qualitätsanspruch mußte im praktischen Einsatz neue Maßstäbe setzen.

## 2. Spritzbeton im Bereich Shakespeare Cliff Underground Development (SUD)

Bild 1 und Bild 2 zeigen eine Ansicht sowie einen Plan der Baustelle Shakespeare Cliff. An die Spritzbetonrezeptur ergaben sich folgende baustellenspezifische Anforderungen:

a) Dauerhaftigkeit: Aufgrund der Lage unterhalb des Meeresspiegels mußte mit 100 % Salzwasserzutritt mit einem Sulfatgehalt von 2.500 mg/l (höchste Sulfatangriffsklasse) gerechnet werden.

b) Die Vielzahl von sehr nahe beieinanderliegenden Tunneln und Kreuzungen erforderte einen möglichst elastischen und kriechfähigen Spritzbeton zur Vermeidung von zu hohen Spannungskonzentrationen und Rißentwicklung bei aufeinander zulaufenden Vortrieben.

Als Basis für die Entwicklung einer geeigneten Betonrezeptur dienten anfangs die Österreichischen Richtlinien für Spritzbeton. Diese waren auch die Basis für die "British Tunnels - Specifications for Materials and Workmanship, Shotcrete Class T, P1 and P2", die während der Vortriebsarbeiten am Shakespeare Cliff erarbeitet wurden.

Bild 3 zeigt die wichtigsten Eigenschaften des allgemein für die Herstellung von Beton verwendeten Zementes "Blue Circle, Northfleet". Wie auch in vielen anderen europäischen Ländern der Fall, wird von den Herstellern keinerlei Garantie für die für Spritzbeton so wichtigen besonderen Eigenschaften Mahlfeinheit und Wasserabsonderung gegeben. Die erreichten Mittelwerte sind jedoch akzeptabel und werden relativ konstant erreicht. Die chemische Zusammensetzung liegt im üblichen Rahmen für Portlandzement.



Ordinary Portland Cement Blue Circle Northfleet

Compound Analysis

C <sub>3</sub> S %	C <sub>2</sub> S %	C <sub>3</sub> A %	C <sub>4</sub> AF %
56 ± 2	15 ± 2	8,5 ± 0,5	9,5 ± 0,5

Physical Properties

		Setting Time		Compressive Strength*		
Bleed %	Fineness m <sup>2</sup> /kg	Initial min	Final min	3 day MPa	7 day MPa	28 day MPa
16 ± 2	370 ± 13	135 ± 8	170 ± 13	26 ± 1	35 ± 1	44 ± 1

\* Test as per British Standard

Bild 3: Eigenschaften des Spritzbetonzementes

Die auf der Baustelle für Beton verwendeten Zuschläge erwiesen sich als ungeeignet für Spritzbeton. Nach mehreren Versuchen entschloß man sich, für Spritzbeton eigene Zuschläge mit 2 Kornfraktionen, Größtkorn 10 mm zu verwenden. Die Zuschläge wurden in einer eigenen Spritzbetonmischanlage - voll überdacht - gelagert, wodurch sich die Eigenfeuchte des Spritzbetons trotz "englischem Wetter" bei etwa 5 ± 1 % einpendelte. Bild 4 zeigt, daß die Sieblinie der Zuschläge weitgehend im günstigen Bereich der Spritzbetonnorm liegt.

Shakespeare Cliff

COMBINED GRADING : 75 % RIVER SAND  
25 % SEA GRAVEL

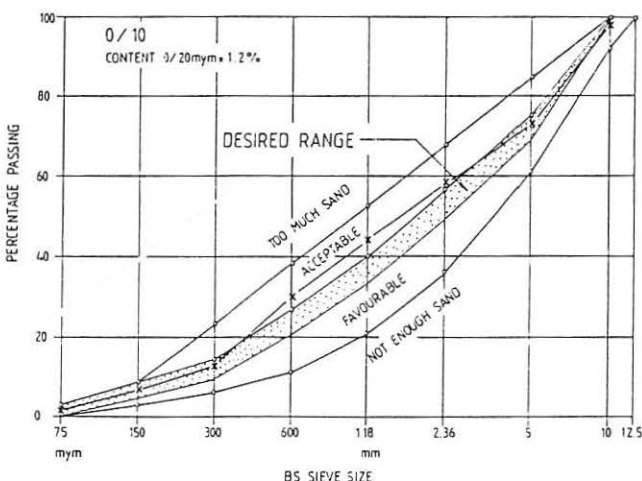


Bild 4: Sieblinie der Zuschläge Shakespeare Cliff

Aus den Eignungsprüfungen ergab sich schließlich folgende Betonrezeptur:

- 1340 kg (75 %) Flußsand 0 - 5 mm
- 446 kg (25 %) Meereskies 5 - 10 mm
- 390 kg OPC (Ordinary Portland Cement)
- 8 - 10 % BE Sigit Pulver

Nachdem die Entwicklung der Spritzbetonspezifikation aufgrund der notwendigen Anpassung an bestehende Britische Normen sowie an landesspezifische Verhältnisse einige Zeit in Anspruch nahm, wurde am Shakespeare Cliff vorerst nur temporärer Spritzbeton (Class T) verwendet. Die Dimensionierung der Innenschale erfolgte somit unter Annahme völligen Kohäsionsverlustes der Außenschale über einen Zeitraum von 120 Jahren. Die Dauerhaftigkeit (baustellenspezifische Anforderung a) ) der obigen Spritzbetonrezeptur mußte somit nur für etwa 4 - 5 Jahre gewährleistet sein. Dies konnte durch eine einfache Beschränkung des Anteils an wasserlöslichen Aluminaten (0,6 % der Zementmenge) erreicht werden.

Bezüglich der baustellenspezifischen Forderung b) (Elastizität und Kriechfähigkeit) waren die Möglichkeiten vorerst beschränkt. Durch die Wahl des Trockenspritzverfahrens ergaben sich von vorneherein günstige Verformungseigenschaften im Vergleich zur "Alternative" Naßspritzen mit Aluminatbeschleuniger". Naßspritzen mit Wasserglas wurde nicht in Erwägung gezogen. Eine Erhöhung der Elastizität durch teilweisen Zementersatz durch Flugasche (PFA) wurde aufgrund der Unsicherheit des Erreichens des geforderten Festigkeitsverlaufes anfänglich nicht in Erwägung gezogen. Erst später sollte sich herausstellen, daß die zur Verfügung stehende Flugasche als Spritzbetonzusatz nicht geeignet ist.

Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Eignungsprüfung für diese Betonrezeptur, durchgeführt an Kernen aus Spritzplatten. Wie man sieht, sind die 24 h-Festigkeiten mit 14 - 19 MPa bereits relativ hoch im Vergleich zu den geforderten 10 MPa. Laufende Güteprüfungen wurden an aus dem Bauwerk entnommenen Bohrkernen durchgeführt. Bild 6 zeigt die erzielten Festigkeiten, ermittelt an 94 x 3 = 282 Kernen für 28 Tage und ebenso viele für 1 bzw. 7 Tage-Festigkeiten. Aufgrund der guten 1-Tage-Festigkeiten ergaben sich keinerlei Probleme mit der Kernentnahme, weshalb indirekte Testverfahren für Frühfestigkeit, wie z. B. das Hilti-Bolzensetzverfahren, nach einigen anfänglichen Versuchen nicht eingesetzt wurden. Für die 28 Tage-Festigkeiten sind in Anpassung an die Britische Norm zwei Kriterien zu erreichen:

- a) jeder Einzelwert mindestens 19 MPa

TRIAL MIX TEST -RESULTS	AGE	1 DAY				3 DAYS				7 DAYS				28 DAYS			
		TEST SERIES No.				TEST SERIES No.				TEST SERIES No.				TEST SERIES No.			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
COMPRESSIVE STRENGTH PARALLEL  N/mm <sup>2</sup>		18.5	15	19	15.5	20	24	33.5	21	23.5	28	42	27.5	28.5	33	46.5	28
		17				25				30				34			
COMPRESSIVE STRENGTH PERPENDICULAR  N/mm <sup>2</sup>		15.5	16.5	16	14	18.5	23	33	23.75	22.5	29	36.5	23.3	29.5	36.75	43	31.5
		16				25				28				35			
E - MODULES  N/mm <sup>2</sup>		13880	16500	12500	14750	<del>10297</del>	19000	21000	17600	16390	20750	23900	21500	21330	24000	25000	22500
		14 400				19 200				20 600				23 200			
TENSILE SPLITTING STRENGTH PERPENDICULAR  N/mm <sup>2</sup>														4.7	3.1	3.2	3.4
														3,6			

TEST SERIES No. 1: 7% ACCELERATOR. TEST SERIES No. 3: 4% ACCELERATOR.  
 TEST SERIES No. 2: 8% ACCELERATOR. TEST SERIES No. 4: 6% ACCELERATOR.

Bild 5: Ergebnisse der Eignungsprüfung Shakespeare Cliff

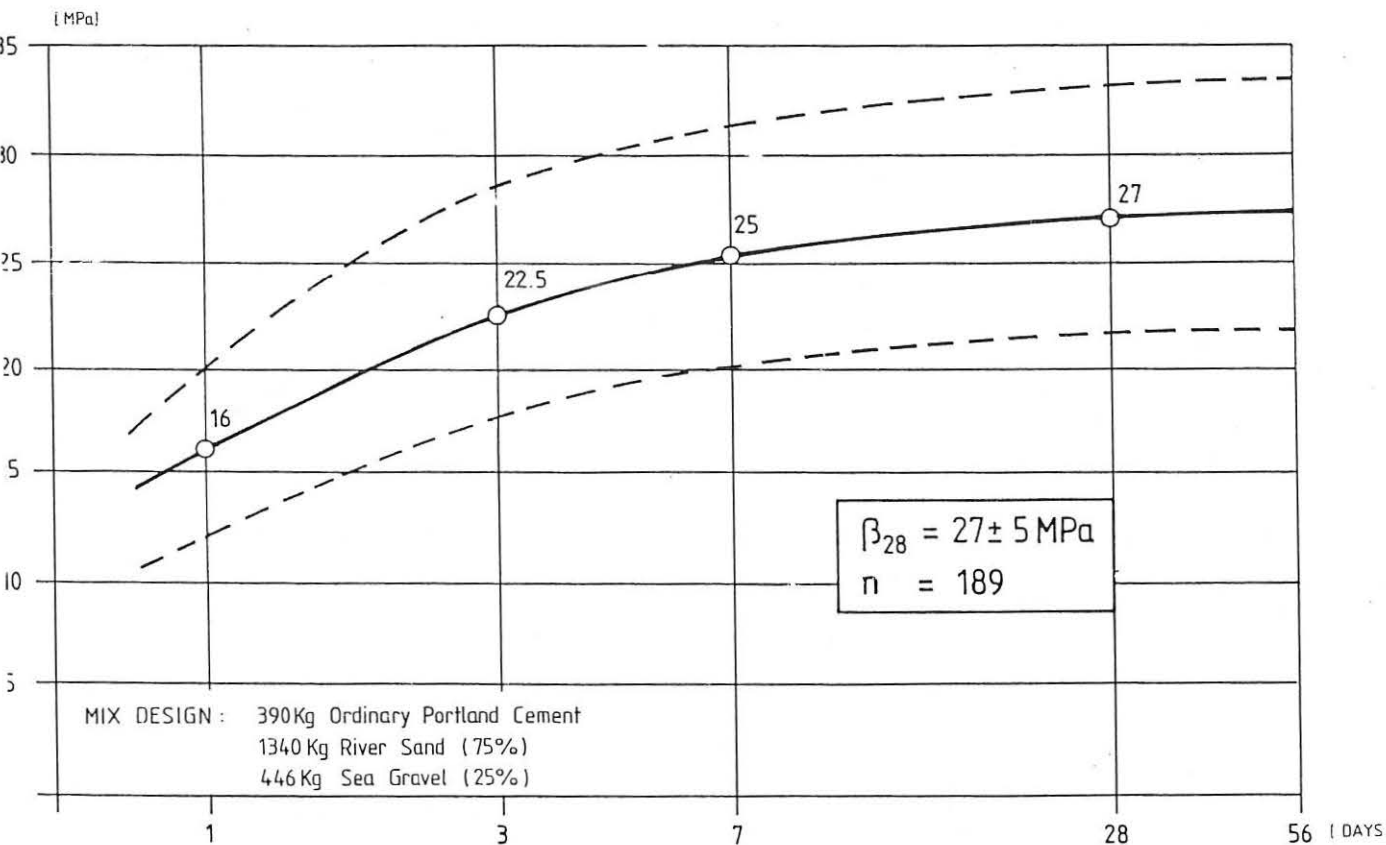


Bild 6: Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons Shakespeare Cliff



- b) das Mittel aus 4 aufeinanderfolgenden Einzelwerten mindestens 25 MPa,

wobei ein Einzelwert wiederum den Mittelwert aus 3 an derselben Stelle entnommenen Kernen  $l_g = \varnothing = 100$  mm darstellt. Beide Kriterien wurden schließlich, abgesehen von wenigen Ausnahmen, problemlos erreicht. Aufgrund der weit über die geforderten 8 MPa hinausgehenden 24 h-Festigkeiten wäre ein gewisser Spielraum zum teilweisen Zementersatz durch Flugasche vorhanden gewesen. Die zur Verfügung stehende Flugasche wird jedoch hinsichtlich der Mahlfineinheit vom Hersteller in keiner Weise garantiert und ein Labortest zeigte darüberhinaus einen Blaine-Wert von nur  $3.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Nach einem negativen Spritzversuch auf der Baustelle Castle Hill wurde schließlich der Einsatz von PFA (pulverized fly ash) nicht mehr in Erwägung gezogen. Die Rißentwicklung in der Spritzbetonschale im Bereich der vielen Kreuzungen von SUD konnte aufgrund der günstigen Gebirgseigenschaften mit rein konstruktiven Mitteln (Bauablauf, Systemankerung) zufriedenstellend unter Kontrolle gehalten werden.

### 3. Der Erstarrungsversuch

#### Accelerator Setting Test

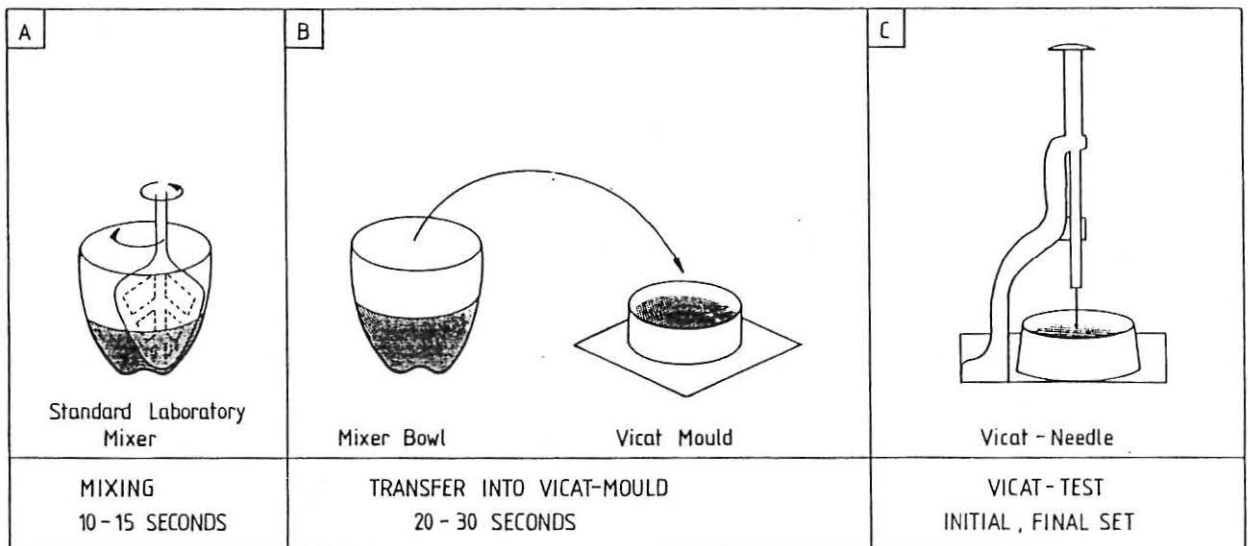


Bild 7: Erstarrungsversuch

Diesem in den Österreichischen Richtlinien beschriebenen Laborversuch soll hier ein eigenes Kapitel gewidmet werden. Es benötigte besonders viel Zeit und Energie, den Test an die lokalen Verhältnisse anzupassen; einerseits wegen anfänglicher Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung, andererseits aufgrund ungeschlüssiger Versuchsergeb-

nisse. Der Versuch ist jedoch von besonderer praktischer Bedeutung und dient im wesentlichen drei Zwecken:

- als laufende Qualitätskontrolle des verwendeten BE
- als Vergleichstest für zur Auswahl stehender BE Hersteller
- als Schnelltest bei Störungen in der Spritzbetonverarbeitung während des laufenden Vortriebs

Bezüglich der Versuchsdurchführung sind drei Abschnitte zu unterscheiden (siehe Bild 7):

- Durchmischen von Zement, BE und Wasser (10 - 15 Sekunden): Im Gegensatz zu den Ö-Richtlinien wird dieser Arbeitsgang nach vielen Versuchen nun nicht von Hand, sondern mit Hilfe des genormten Laborrührmixers durchgeführt. Bei den Tests ließ sich nur dadurch eine gleichmäßige Durchmischung unabhängig von der durchführenden Person erzielen.
- Einbringen der Paste in die Ringform (20 - 30 Sekunden): Dies ist der problematischste Abschnitt, da der Erstarrungsbeginn bereits vor

Beendigung eintreten kann und sodann das Versuchsergebnis verfälscht.

- Bestimmung von Erstarrungsbeginn und -ende nach Vicat: Dieser Versuchsteil ist in allen internationalen Normen klar definiert und bringt keine Schwierigkeiten mit sich.



Bild 7a: Probe mit ungelösten Partikeln Pulver-BE

### 3.1 Der Versuch mit pulverförmigem BE

Sowohl die beschriebene Versuchsdurchführung als auch die Beurteilungskriterien waren ursprünglich für pulverförmigen BE entwickelt worden. Zur Erinnerung:

Pulver-BE wird üblicherweise auf das Förderband mit dem eigenfeuchten Trockenspritzbeton verteilt, fällt nach einigen Sekunden in die meist volle Spritzmaschine, wo es wiederum mehrere Sekunden verbleibt, bis es dann im Dünnstrom zur Düse gefördert wird. Es vergeht also einige Zeit vom ersten Kontakt und somit der ersten Reaktion mit Zement und Wasser bis zum Spritzen an die Auftragsfläche. Durch Störungen und Unachtsamkeiten kann sich diese Zeitspanne noch zusätzlich erhöhen. Als Optimum für den Erstarrungsbeginn im Versuch ist aus Erfahrung (Ö-Richtlinien) ein Maximum von 80 Sekunden sowie auch ein Mindestwert von 40 Sekunden bekannt. Dieses Kriterium wird mit Blue Circle Northfleet-Zement und Sigunit-Pulver bei 6 % BE-Zugabe erreicht. Bei höheren Dosierungen bestand zunehmend die Gefahr einer Verfälschung des Versuchsergebnisses. Bei den Tests entstand der Eindruck, daß die zunehmenden Erstarrungszeiten bei höheren BE-Prozentsätzen nicht unwesentlich auf dieses Problem zurückzuführen ist.

Ein weiteres Detail: Trotz 15 Sekunden Durchmischung mit dem Labormixer finden sich in der Probe trockene BE-Partikel, die nicht gelöst wurden und folglich auch nicht mit dem Zement reagieren konnten (siehe Bild 7a). Dieser Effekt wird umso stärker, je länger das hygroskopische BE-Pulver der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt ist. Bei den Versuchen wurde durch Zufall einmal ein Sack Pulver-BE getestet, der etwa 2 Monate lang im Labor halb geöffnet gestanden war. Der Erstarrungsbeginn war bei diesem Test mehr als doppelt so lange mit augenscheinlich größerer Anzahl ungelöster Partikel in der Zementpaste.

### 3.2 Versuch mit Flüssig-BE für Trockenspritzbeton

Im Gegensatz zum Versuch mit Pulver-BE ließ sich eine sofortige Versteifung beim ersten Kontakt Zement-BE-Wasser erkennen. Durch den Rührvorgang verflüssigte sich wiederum der Zementleim, erreichte jedoch nicht die weiche Konsistenz wie bei Pulver.

In der Praxis vergehen bei Flüssig-BE im Gegensatz zum Pulver nur ein bis zwei Sekunden zwischen BE-Zugabe und Spritzbetonauftrag. Im Labor vergehen jedoch 40 Sekunden bis zum Erstarrungstest mit offensichtlich erhöhter Gefahr des Zerrührens einer bereits erstarrenden Zementpaste. Die Laborversuche mit Barragunit F loo (verwendet am Castle Hill) erzielten jedoch gute Erstarrungszeiten bei nur 3 % BE. Offensichtlich ist der zum Zeitpunkt der BE-Zugabe noch trockene Zement nicht sofort aktiviert und die beobachtete sofortige Versteifung ist noch kein Erstarrungs-, sondern ein reiner Geliervorgang. Wiederum ergeben sich schlechtere Erstarrungszeiten bei höherer Dosierung, ein Ergebnis, das durch Erfahrungen der Praxis keineswegs bestätigt wird.

Die Beobachtung des Phänomens der sofortigen Versteifung bzw. "Aushärtung" der Zementpaste war Anlaß zur Vermutung, der Düsenführer würde beim tatsächlichen Spritzbetonauftrag eine höhere Wassermenge begeben (höherer W/Z-Faktor). Diese Frage blieb unbeantwortet.

### 3.3 Versuch mit Flüssig-BE für Naßspritzbeton

Bei Versuchen mit 3 - 5 % BE, der dem vorher vermischten Wasser-Zement-Leim beigegeben wurde, konnte kein Erstarrungsbeginn vor 3 Minuten festgestellt werden. Dieses Ergebnis stand im krassen Gegensatz zum Naßspritzversuch unter Tage, der bei einer Dosierung von 4,5 % ein befriedigendes Erstarrungsverhalten zeigte.

Wahrscheinlich erfolgt aufgrund des bereits aktivierten Zementes ein sofortiger Beginn des Erstarrungsvorganges. Ein 10 - 15 Sekunden dauerndes Zerrühren stört diesen Prozeß und verfälscht völlig das Versuchsergebnis.

Im Hinblick auf die zunehmende Verwendung flüssiger Beschleuniger und des Naßspritzverfahrens erscheint es aufgrund dieser Erfahrungen angebracht, diesen Versuch hinsichtlich der Zeitspanne für Teil A und Teil B zu verbessern. Unbedingt sollte allgemein (speziell von BE-Herstellern) für die Beurteilung des Erstarrungsverhaltens der Vicat-Test mit der klaren Definition von Erstar-

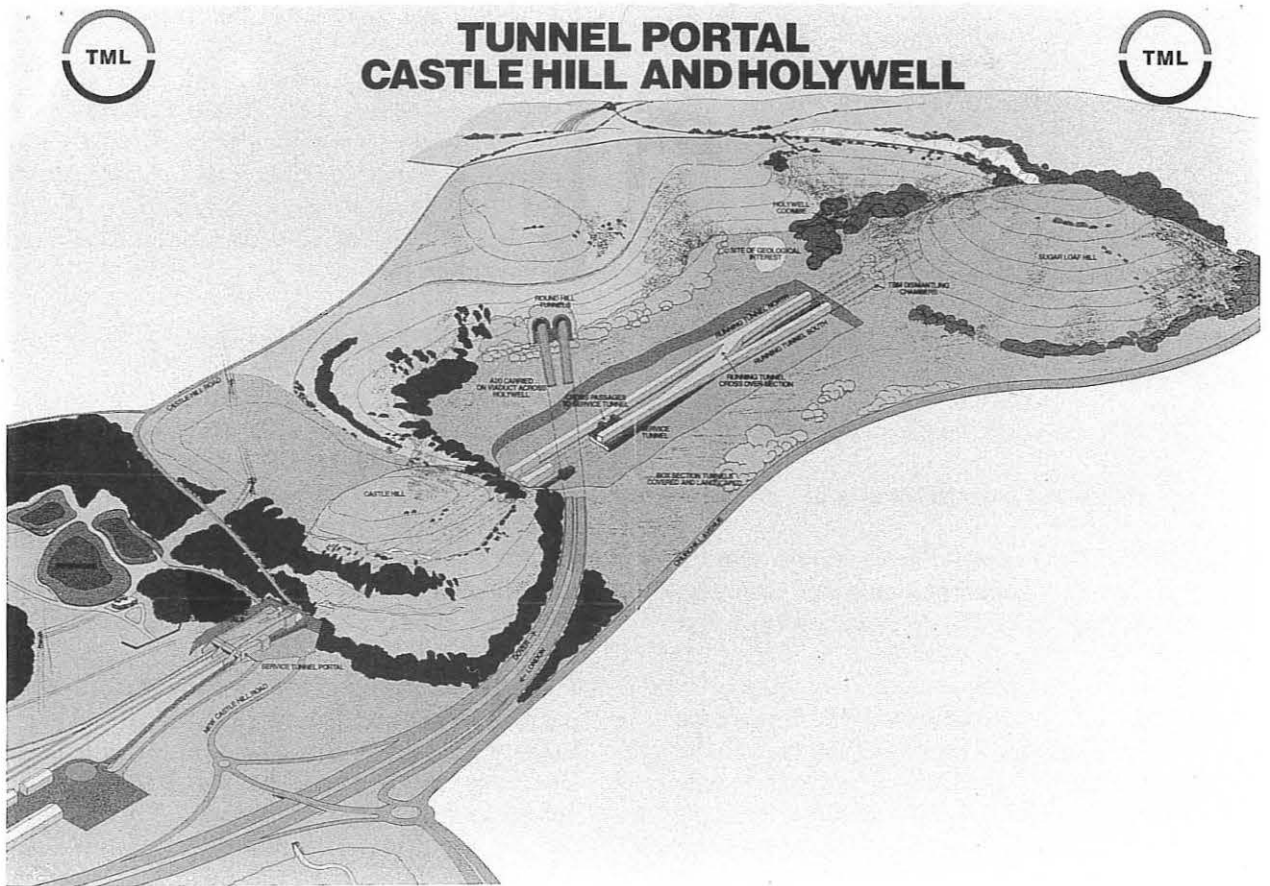


Bild 8: Portalbereich Channel Tunnel



Bild 9: Offene Bauweise und Castle Hill (Hintergrund)



rungsbeginn und Erstarrungsende verwendet werden. Diese Grenzwerte sind für die Haftung einer 10 - 20 cm starken Spritzbetonschicht über Kopf von Bedeutung.

#### 4. Spritzbeton in den Castle Hill Tunnels

Der zweite NÖT-Abschnitt am Channel Tunnel sind die drei Tunnels unter dem Castle Hill zwischen dem Terminal und dem Bereich der offenen Bauweise von Holywell. Bild 8 und Bild 9 zeigen den Castle Hill mit den drei Tunnels, die im Zeitraum Sommer 1988 bis Herbst 1989 von Osten her vorgetrieben und durchgeschlagen wurden.

#### Castle Hill Tunnels / Combined Gradings

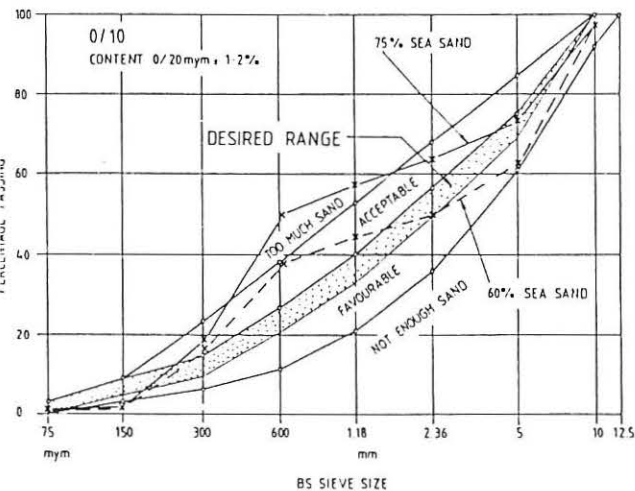


Bild 10: Sieblinie der Zuschläge Castle Hill

Auf der Basis der Erfahrungen von Shakespeare Cliff entschloß man sich zur Verwendung von Flüssig-BE und dem Einsatz zweier Spritzmanipulatoren. Der Grund für den Verzicht des Handauftrags lag nicht so sehr in den technischen Vorzügen als vielmehr aus Sicherheitsgründen. Alle drei Tunnels lagen im sogenannten Grault Clay, einem sehr steifen, überkonsolidiertem Ton, der durch viele Klüfte eine große Gefährdung des Personals an der Ortsbrust darstellte. Dies war auch der Grund für den Vortrieb mit nach vorne geneigten Bögen in allen drei Tunnels.

Für die Spritzbetonrezeptur stand der gleiche Zement sowie der gleiche 5 - 10 mm Kies wie auf Shakespeare Cliff zur Verfügung. Aus baustellenspezifischen Gründen, auf die hier nicht näher eingegangen wird, mußte jedoch ein Sand verwendet werden, der eine sehr ungünstige Sieblinie ergab (siehe Bild 10). Der gewählte Prozentsatz von 75 % Sand und 25 % Kies lag schließlich außerhalb des geeigneten Sieblinienbereiches mit einem geringen Anteil an 0,6 - 5 mm Körnung und zu viel Sand 0,15 - 0,6 mm. Eine Versuchsserie mit stufenweise verringertem Sandanteil

zeigte, daß die 28 Tage-Festigkeit durch Änderung des Verhältnisses Kies/Sand nur geringfügig verändert werden konnte. Eindeutig verschlechtertes Verhalten beim Auftrag (Rückprall) mußte jedoch bei erhöhtem Kiesanteil festgestellt werden. Schließlich erwies sich der Prozentsatz von 75 % Sand/25 % Kies als beste Variante. Diese so ungünstige Sieblinie erforderte einen Zementanteil von  $420 \text{ kg/m}^3$ , und zwar sowohl aus Gründen des Auftrages (Kleber) als auch zur Erreichung der geforderten Endfestigkeit. Wie schon in Punkt 2) erwähnt, war die auf der Baustelle vorhandene Flugasche als Kleber oder Zementersatz für Spritzbeton ungeeignet. Der Zusatz von amorpher Kieselsäure hätte wahrscheinlich die gewünschte Qualitätsverbesserung erzielt. Versuche mit Microsilica wurden jedoch erst im Herbst 1989 (nach Durchschlag der Castle Hill Tunnels) durchgeführt.

#### Shotcrete Strength - Castle Hill Tunnels 28 days in situ

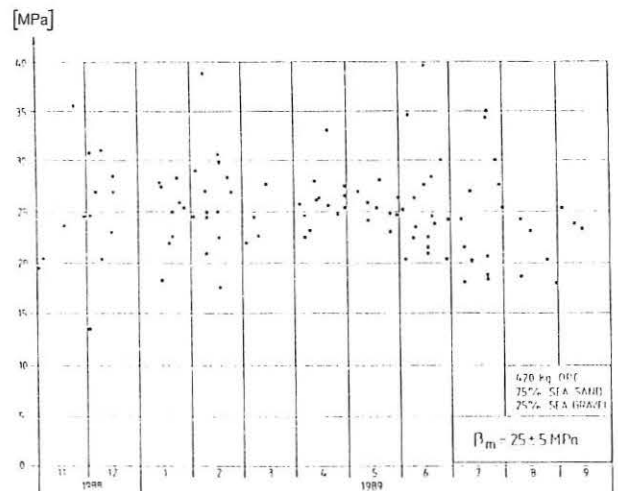


Bild 11: 28 Tage-Festigkeiten Castle Hill

Wie Bild 11 zeigt, konnten die geforderten 28 Tage-Festigkeiten schließlich trotz des hohen Zementanteiles von  $420 \text{ kg/m}^3$  im Gesamtmittel zwar erreicht werden, einzelne Monatsabschnitte lagen jedoch um 2 - 3 MPa darunter; eine Tatsache, der schließlich durch konstruktive Mittel Rechnung getragen werden mußte.

Vergleicht man nun diese Ergebnisse mit den Festigkeiten von Shakespeare Cliff, ist zu beobachten, daß am Castle Hill drei Faktoren gegeben waren, die erfahrungsgemäß die Festigkeiten positiv beeinflussen hätten müssen:

- 30  $\text{kg/m}^3$  mehr Zement
- Auftrag mit Spritzmanipulator
- Flüssig-BE

Daß dennoch die Festigkeiten unter denen von

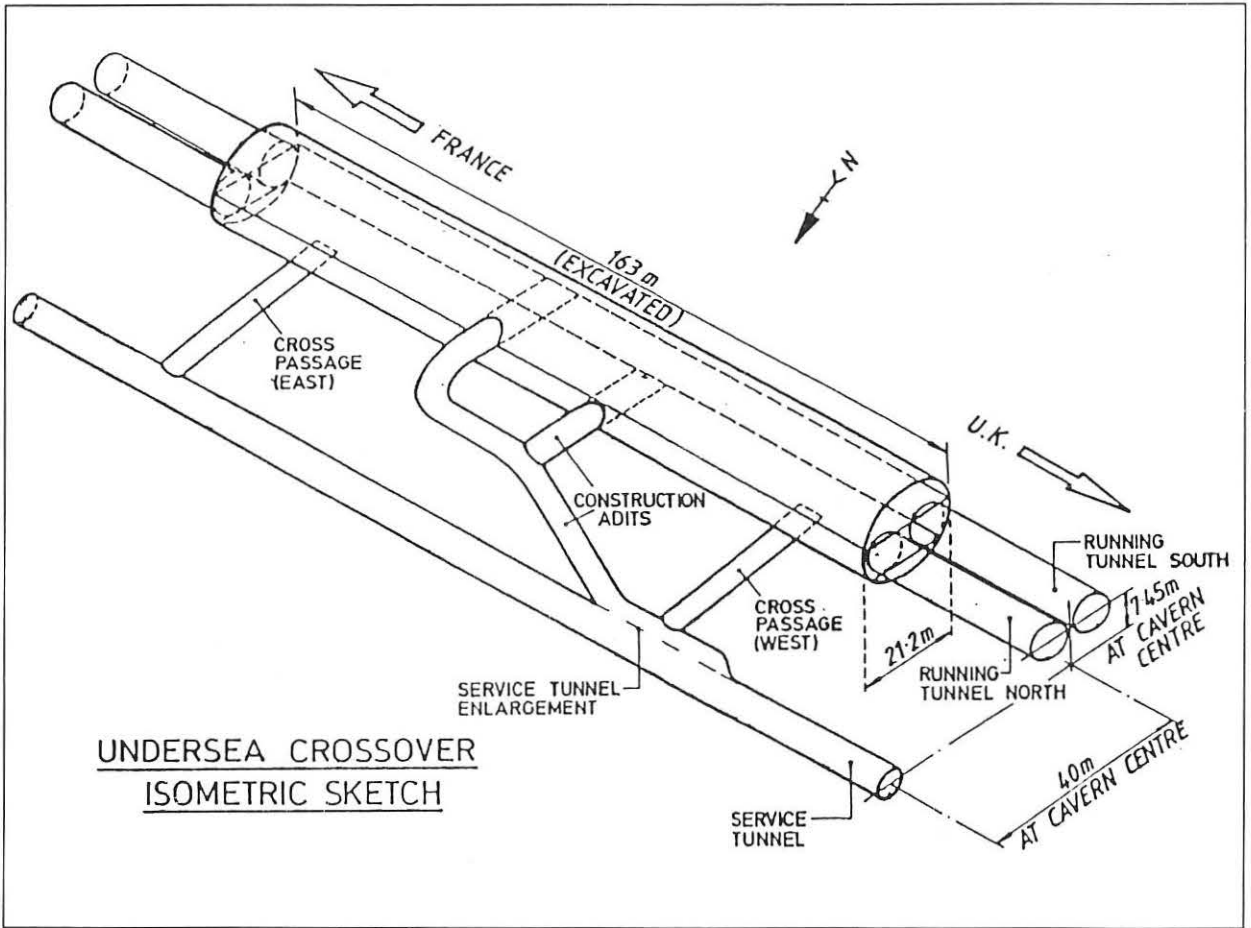


Bild 12: Englischer Undersea Crossover

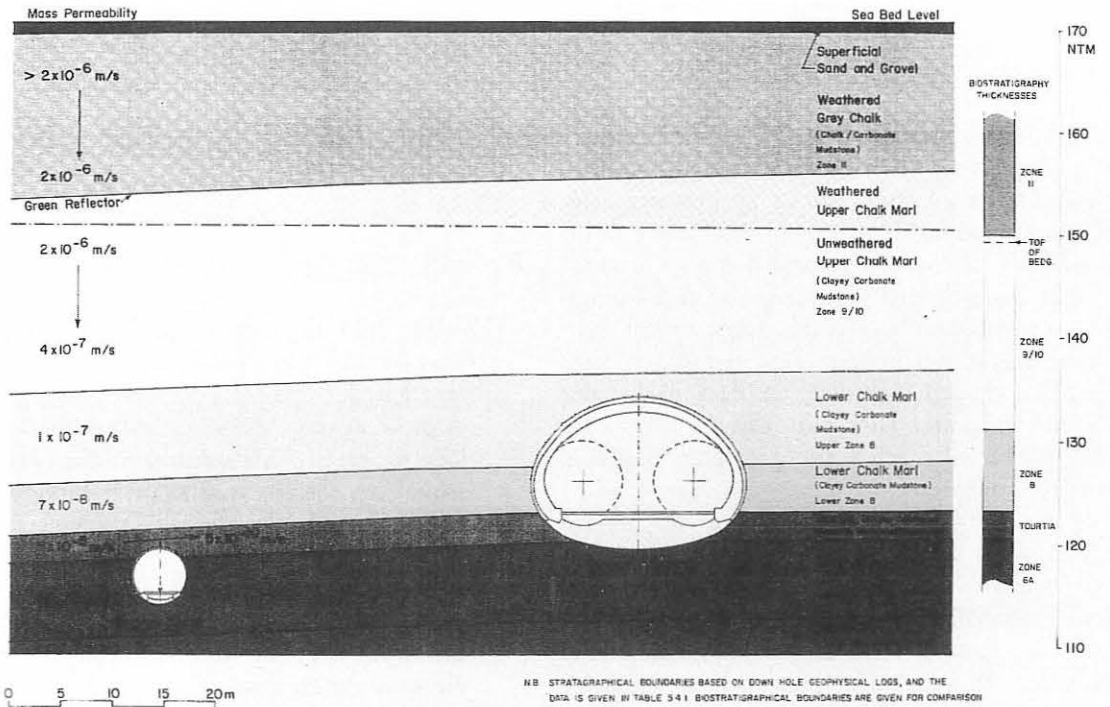


Fig. (iii) GEOLOGICAL CROSS SECTION AT CENTRE OF CROSSOVER CAVERN

Bild 13: Geologischer Schnitt Crossover

Shakespeare Cliff lagen, zeigt deutlich den Einfluß der ungünstigen Sieblinie des verwendeten Sandes mit zu großem Anteil im Fein- bis Mittelsandbereich.

### 5. Spritzbeton am englischen Crossover

Der dritte und technisch bedeutendste Bauteil der NÖT ist der englische Crossover. Bild 12 und 13 zeigen diese 160 m lange, 20 m breite und 15 m hohe Kaverne, die sich 7,5 km von der englischen Küste unter dem Ärmelkanal befindet, vom vorseilenden Service-Tunnel aufgefahren wird und vor Eintreffen der beiden Running-Tunnel-Vortriebe im Sommer 1990 fertiggestellt sein wird.

der drei Angriffspunkte und resultierte in durchschnittlich etwa 4 Stunden Lieferzeit für den Spritzbeton. Unter diesen Voraussetzungen war von vorneherein das Trockenspritzverfahren die einzige Möglichkeit und es wurde die am Shakespeare Cliff bereits bewährte Spritzbetonrezeptur verwendet. Aufgrund der langen Lieferzeiten mußte dennoch wiederholt Spritzbetontrockenmischgut weggekippt und neu bestellt werden. Die erzielte Endfestigkeit lag mit 21 MPa knapp 20 % unter den geforderten 25 MPa. Dies mußte durch entsprechende Mehrstärke ausgeglichen werden. Nach Fertigstellung der Service-Tunnel-Aufweitung und eines Großteiles der Zugangsstollen konnte schließlich Ende Oktober 1989 die Unter-Tage-Mischanlage in der Aufweitung installiert und

### Shotcrete Strength Increase by Use of Microsilica (MS)

		SHAKESPEARE CLIFF IN - SITU	SHAKESPEARE CLIFF PANELS	U.K.CROSS OVER IN - SITU
SHOTCRETE STRENGTH	7 days	25 MPa	32 MPa	31 MPa
	28 days	27 MPa	42 MPa	40 MPa
No.OF CORES TESTED		189	11	5
MIX DESIGN		0 MS 390 kg OPC 6-12 % POWDER ACCELERATOR	30 kg MS-SLURRY 360 kg OPC 5 % LIQUID ACCELERATOR	30 kg MS-POWDER 390 kg OPC 4 % POWDER ACCELERATOR
REMARKS		WORKS TESTS	MS ADDED AT NOZZLE	MS PREMIXED WITH AGGREGATES

Bild 14: Festigkeitszuwachs durch Microsilica

Für die Anwendung von Spritzbeton bestand von Beginn der Arbeiten an das Problem der langen Zeitdauer zwischen Mischen und Aufbringen des Spritzbetons. Das Trockenmischgut mußte mittels Dumper von der Spritzbetonmischanlage zur Verladestation (in Nachmischerwaggons) gebracht werden. Von dort sind es etwa 8,5 km bis zum Crossover. Der Service-Tunnel-Vortrieb sowie der knapp dahinter Schritt haltende Ausbruch der Querschläge (alle 375 m) sollte dabei nicht unterbrochen werden. Diese Umstände führten zu erheblichen Engpässen in der Ver- und Entsorgung

in Betrieb genommen werden.

Im Laufe der Vorbereitungsmaßnahmen für die Kaverne wurden mehrere Spritzbetonversuche im Bereich Shakespeare Cliff durchgeführt:

- a) Naßspritzversuche mit Aluminatbeschleuniger: Obwohl bei einem der Versuche die Endfestigkeiten nicht überzeugend waren, können alle drei durchgeführten Tests (einer davon im Castle Hill) positiv beurteilt werden. Wie schon erwähnt, kam am Crossover - solange von der

Oberfläche beliefert werden mußte - Naßspritzen nicht in Betracht. Nach der kürzlichen Inbetriebnahme der Unter-Tage-Mischanlage wird nun noch einmal geprüft, inwieweit sich die Umstellung der gesamten Baustelle noch amortisiert. Für eine sofortige Umstellung auf Naßspritzen spricht unabhängig von wirtschaftlichen Überlegungen ein akutes Lüftungsproblem. Vom technisch konstruktiven Standpunkt spricht das geringe Kriechvermögen des Naßspritzbetons mit Aluminatbeschleuniger zwar dagegen, ist jedoch kein ausschließendes Entscheidungskriterium.

b) Trockenspritzten mit Microsilica: Es wurden zwei Versuche mit MS-Pulver (je einer am Crossover und in SUD) sowie ein Versuch mit MS-Slurry im Bereich SUD durchgeführt. Alle drei Versuche zeigten die folgenden entscheidenden Verbesserungen ohne erkennbaren Unterschied zwischen MS-Slurry, zugegeben an der Düse, und MS-Pulver, vorgemischt mit den Zuschlägen (siehe Bild 14):

- verringerte Staubentwicklung
- verringerter Rückprall: Beim Versuch am Crossover wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Es ergab sich eine Reduktion

von 19 % (ohne MS) auf 14 % (mit MS) Rückprall.

- erhöhte Festigkeiten: Die 28 Tage-Festigkeitswerte liegen im Schnitt um etwa 15 MPa höher als der Durchschnittswert der Güteprüfungen von SUD. Dies liegt vor allem an dem Festigkeitszuwachs zwischen 7 und 28 Tagen, der ohne MS nur bei etwa 2 - 3 MPa liegt.

Diese positiven Versuchsergebnisse eröffnen die Möglichkeit einer Verringerung der erforderlichen Spritzbetonstärke. Dies ist auch Gegenstand derzeitiger Untersuchungen.

Die Versuche mit Microsilica zielen jedoch nicht nur auf eine Verringerung der notwendigen Spritzbetonstärke hin, sondern auch auf die Entwicklung einer "permanenten" Spritzbetonrezeptur. Spritzbeton als Innenschale wäre eine sehr kostengünstige und zeitsparende Alternative zum Ort beton in den vielen Verschneidungen des Tunnelkomplexes Shakespeare Cliff. "Permanent Shotcrete" als Innenschale muß auf eine Nutzungsdauer von 120 Jahren ausgelegt werden und somit gegen vollen Salzwasserzutritt mit einem Sulfatgehalt von 2.500 mg/l beständig sein.