

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

AFDELING DER CIVIELE TECHNIEK

Rapport 5-79-30

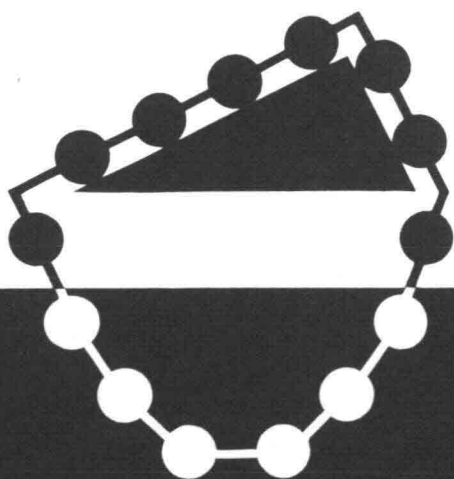
EROSIE VAN BETON

ing. M.G.M. Pat

ir. H.L. Fontijn

dr. ing. H.W. Reinhardt

dr. ir. P. Stroeven



STEVIN-LABORATORIUM

Stevin-laboratorium
van de afdeling der
Civiele Techniek
TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

Rapport : 5-79-30
Onderzoek: 7702
Maart 1979

Erosie van beton
door
ing. M.G.M. Pat
ir. H.L. Fontijn
dr.-ing. H.W. Reinhardt
dr.ir. P. Stroeven

Postadres:
Technische Hogeschool Delft
Vakgroep Betonkonstrukties
Stevin-laboratorium
2628 CN Delft

Voorwoord

Het onderzoek waarover hier gerapporteerd wordt kwam in nauwe samenwerking tussen het Laboratorium voor Vloeistofmechanica en de vakgroepen Materiaalkunde en Betonconstructies tot stand. Literatuuronderzoek, ontwikkeling en bouw van de opstelling voor de erosieproeven met stromend water en de uitvoer van deze proeven werden in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica gedaan.

De proefstukken werden door de vakgroep Betonconstructies in het Stevinlaboratorium vervaardigd. Ontwerp en bouw van de meetapparatuur gebeurde ook door deze groep die tevens de metingen uitvoerde en de resultaten analyseerde. De abrasieproeven op de slijptafel en de uitwerking hiervan werden door de vakgroep Materiaalkunde verzorgd.

Alle leden van de CUR Commissie "Erosie van beton" droegen door waardevolle ideeën en discussies bij tot het bereikte resultaat.

INHOUD	blz.
Voorwoord	1
1. Inleiding	3
2. Literatuuronderzoek	4
3. Buitenlandse kontakten	15
4. Proefmethoden	19
4.1. Erosie door stromend water en abrasief materiaal	19
4.1.1. Opstelling en bedrijf	19
4.1.2. Meetapparatuur	23
4.1.3. Opslag en verwerking van de meetresultaten	32
4.2. Slijptafel	33
4.2.1. Principe van de methode	33
4.2.2. Opzet en uitvoering van de proef	33
4.2.3. Verwerking van de meetresultaten	35
5. Omvang van het onderzoek	38
6. Het onderzochte beton	38
6.1. Samenstelling van de mengsels	39
6.2. Zeefanalyses	40
6.3. Cement	45
6.4. Vervaardiging van en metingen aan de verse specie	45
6.5. Nabehandeling	47
6.6. Druk- en slijttreksterkte van het beton	49
7. Resultaten van de erosieproeven	50
7.1. Gewichtsverschillen voor en na de aantasting	50
7.2. Afslijting van het oppervlak, hoogteverschillen	52
7.2.1. Gemiddelde afslijting serie 1	52
7.2.2. Gemiddelde afslijting serie 2	54
7.2.3. Gemiddelde afslijtverschillen voor serie 1	56
7.2.4. Gemiddelde afslijtverschillen voor serie 2	61
7.2.5. Gemiddelde afslijtverschillen voor serie 3	65
7.3. Beschouwing van de werking van de erosie	68
8. Evaluatie van de resultaten	72
8.1. Invloed van de betonkwaliteit	72
8.2. Invloed van de nabehandeling	78
9. Resultaten van de afslijpproeven	81
10. Vergelijking van de resultaten tussen de verschillende proeven	92
11. Samenvatting en konklusies	97
12. Literatuur	101
13. Bijlagen (19x)	107

1. INLEIDING

Als laatste grote opening van de Deltawerken zal de Oosterschelde met een dam afgesloten worden. Er is besloten deze dam in de vorm van een pijlerdam uit te voeren wat betekent dat onder normale omstandigheden het zeewater in en uit de Oosterschelde kan vloeien, terwijl bij gevaarlijk hoge waterstanden de dam gesloten wordt. Normaliter stroomt dus het water twee keer per dag door de openingen van de dam heen en weer.

Na berekeningen van de Rijkswaterstaat is de watersnelheid in deze openingen 3 tot 5 m/s. Op ongunstige plaatsen kan de snelheid ook hoger zijn. Tevens voert het water abrasief materiaal mee in de vorm van zand. De relatief hoge watersnelheid en het meegevoerde zand kunnen tot een verhoogde erosie van het beton leiden, vreest men bij Rijkswaterstaat en dat gezien binnen de tijd van de bedoelde lange levensduur van het bouwwerk.

Deze vrees was aanleiding voor Rijkswaterstaat, samen met de CUR, het verschijnsel "erosie van beton" nader te onderzoeken.

In maart 1977 is derhalve de CUR-commissie C37 ingesteld met de volgende leden en medewerkers:

Voorzitter	:	ir. W. Stevelink
Secretaris	:	dr.ir. J.P.Th. Kalkwijk
Leden	:	ir. P. van den Berg ir. J.M. van Geest dr.-ing. H.W. Reinhardt dr.ir. P. Stroeven ir. A.P. van Vugt prof.dr. F.H. Wittmann
Mentor	:	ir. J.C. Slagter
Medewerkers	:	ir. H.L. Fontijn ing. M.G.M. Pat ir. J.P. van Stekelenburg

In de eerste fase van de werkzaamheden van de commissie was dr.ir. Y.M. de Haan nauw betrokken. In verband met andere inspanningen heeft hij zich echter eind 1977 teruggetrokken uit de commissie.

Deze commissie is direkt aan het werk gegaan. Voor een verkenning van de problematiek werd eerst een literatuurstudie uitgevoerd.

Tevens werden door verschillende leden van de commissie instanties in het buitenland geraadpleegd waarvan verwacht kon worden dat zij ervaring hadden in het bouwen, onderhouden of repareren van constructies met soortgelijke randvoorwaarden.

Daarna werd in de commissie besloten ook zelf onderzoek te gaan doen en wel op twee verschillende manieren.

Bij de eerste wordt gebruik gemaakt van een cirkelvormige goot waardoorheen water met grind over proefstukken stroomt. Bij de tweede methode wordt de slijptafel voor het bepalen van de abrasieweerstand van mineralogische materialen gebruikt.

2. LITERATUURONDERZOEK

Literatuuronderzoek is uitgevoerd met betrekking tot de eroderende werking van water waarin zich een abrasief materiaal bevindt, alsook het gedrag van beton en de beproevingsmethodiek met betrekking tot de beschadiging van constructies door deze erosie.

De definitie van erosie en de aantasting door kavitatie worden als volgt omschreven:

- Binnen dit onderzoek wordt onder erosie het afslijten van een oppervlak door water en de daarin meegevoerde sedimenten verstaan;
- Onder erosie door kavitatie wordt verstaan: Het beschadigen van het

oppervlak door het imploderen van gas-of dampbellen waarbij hoge drukken kunnen ontstaan. Gasbellen kunnen in gebieden met drukvermindering optreden, b.v. bij stroomversnellingen of loslatende stroomlijnen. De aantasting door kavitatie is meestal lokaal begrensd en gekenmerkt door cirkelvormige holtes.

In dit onderzoek gaat het om de erosie door water en de daarin meegevoerde sedimenten, terwijl de kavitatie buiten beschouwing wordt gelaten. Deze werkwijze wordt gerechtvaardigd doordat kavitatie meestal bij hogere watersnelheden optreedt dan bij de stormvloedkering in de Oosterschelde het geval zal zijn. Het is echter niet uitgesloten dat plaatselijk ook kavitatie een rol kan spelen.

2.1. Algemene beschouwing

- De ervaringen met bestaande werken betreffende de erosie van beton door (sediment bevattend) stromend water zijn tamelijk fragmentarisch; rapportage vindt slechts plaats in bijzondere gevallen - met name bij (ernstige) schade - die moeilijk te generaliseren zijn.

Ter bepaling van de abrasiebestendigheid zijn laboratoriumproeven i.h.a. systematisch(er), maar omdat deze uitgevoerd worden op kleinere schaal, kunnen ze het verschijnsel 'slijtage door bodemtransport' slechts zeer onvolkomen weergeven (met name de invloed van de turbulentie van het stromende water waardoor de vaste (sediment)deeltjes naast 'rollen en glijden' ook gaan 'springen' is moeilijk te simuleren).

- Het verschijnsel slijtage wordt i.h.a. beïnvloed door een groot aantal parameters. De verdwijning van een meetbare hoeveelheid materiaal a.g.v. afslijting is het resultaat van

- een aantal statistisch verdeelde individuele processen, gebaseerd op verschillende fysisch-chemische wetten. Deze feiten vereisen voor ieder geval een andere aanpak, ze maken het moeilijk om algemene verbanden te herkennen en sluiten feitelijk de toepassing van gelijkvormigheidswetten uit. Gebruikmaking van resultaten, verkregen onder bepaalde condities, voor andere situaties, zal alleen mogelijk zijn in speciale gevallen. Resultaten verkregen uit experimenten behouden slechts hun fundamentele geldigheid, en een theoretisch goed gefundeerde getalsmatige 'vertaling' van laboratoriumresultaten naar prototypen is zelden mogelijk. Slijtage is uitgesproken afhankelijk van de elasticiteitsmodulus en de hardheid van het proefmateriaal /6,10/.
- De erosie van beton in stromend water waarin transport van vaste stoffen plaatsvindt, is afhankelijk van de hoeveelheid, de vorm, de dichtheid, de afmetingen en de hardheid van de meegevoerde sedimentdeeltjes, van de stroomsnelheid van het water en de aanwezigheid van wervels, en van de betonkwaliteit.
De erosie/abrasie ontstaat door de slijpende (i.g.v. fijner sediment) of schurende (i.g.v. grover sediment) werking van de vaste stoffen die door het stromende water meegevoerd worden; het cementsteen (=bindmiddel) tussen de toeslagmaterialen wordt geërodeerd, waarna de toeslagmaterialen worden afgesleten (tamelijk uniform, glad en vlak slijtage patroon /3, 8, 13/.
 - Theoretisch onderzoek en modelonderzoek in het laboratorium (m.b.v. sediment transporterend water) naar de erosie/abrasie van beton is (zeer) moeilijk.
 - In /3, 4, 5, 7, 20/ wordt melding gemaakt van vaak ernstige schade aan (de onderdelen van) diverse dammen; de erosie wordt vnl. veroorzaakt door de schurende en malende, resp. 'bonkende' werking van klei, zand, kiezelstenen en grover materiaal, in enkele gevallen is een verergering van de schade ontstaan door het versneld optreden van erosie t.g.v.

kavitatie na het ruwer worden van oppervlakken a.g.v. uitschuring.

- Zelfs beton van de allerbeste kwaliteit is niet in staat om weerstand te bieden aan ernstige erosieve/abrasieve inwerking gedurende langere tijd /3, 8, 13, 16, 19/.

2.2. Aanbevelingen voor een goede erosie/abrasiebestendigheid van beton t.a.v.:

- Cementgehalte en cementklasse:

- . Het cementgehalte dient niet te hoog, althans relatief laag, te zijn:

/1, 11, 17/ : cementgehalte $< 350 \text{ kg/m}^3$,
/2/ : $320 \text{ kg/m}^3 < \text{cementgehalte} < 360 \text{ kg/m}^3$,
/18/ : de slijtage neemt af bij afneming van het specifieke mortelgehalte van de beton,
/22/ : $400 \text{ kg/m}^3 < \text{cementgehalte} < 500 \text{ kg/m}^3$

- . De gebruikte cementklasse is van weinig belang /3, 8, 13/ (dit wordt min of meer tegengesproken in /24/ en /19/: de kwaliteit van het mortelgehalte van de beton is van het grootste belang).

- Druksterkte:

- . De erosiebestendigheid van beton neemt (progressief) toe bij het groter worden van de druksterkte; de druksterkte is de voornaamste factor m.b.t. de erosiebestendigheid /3, 8, 9, 13, 16, 18, 19, 21, 22/.

E.e.a. vereist een lage w.c.-factor en een naar verhouding hoog cementgehalte /22/.

Aanbevolen druksterkten na 28 dagen:

35 N/mm^2	/1, 17/,
45 N/mm^2	/2/,
42 N/mm^2	/3, 8, 13/.

- Betonsamenstelling (toeslagmaterialen, zetmaat, w.c.-factor):

Naast een goede druksterkte is ook de betonsamenstelling van belang.

- . Het mengstel dient goed opgebouwd te worden /9/ met een minimum aan fijne bestanddelen, het dient continu en goed gegradeerd te zijn /19, 21, 24, 25/.
- . Beton met grove(re) toeslagmaterialen erodeert minder (dan mortel met gelijke sterkte) /16, 18, 21, 24/. 'Steen- slagbeton' heeft een grotere weerstand tegen erosie dan gewone beton /18/.
- . Harde abrasiebestendige toeslagmaterialen zijn gewenst /1, 2, 3, 8, 9, 13, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 25/, de grove toeslagmaterialen dienen tenminste dezelfde hardheid te hebben als het eroderende materiaal /2/.

.Bij een betondruksterkte $< 56 \text{ N/mm}^2$ is het effect van de hardheid der toeslagmaterialen minimaal, voor $21 \text{ N/mm}^2 < \text{betonsterkte} < 35 \text{ N/mm}^2$ is de hardheid van het grove toeslagmateriaal zeer belangrijk /8/.

- . De maximale korreldiameter is van belang: de grootste korrel moet klein zijn (verhoging homogeniteit) /22/.
- . I.h.a. geldt dat bij gelijkblijvende zetmaat de abrasiebestendigheid afneemt indien het cementgehalte kleiner wordt, en dat bij gelijkblijvend cementgehalte de abrasiebestendigheid toeneemt bij kleiner worden van de zetmaat (e.e.a. is vermoedelijk in overeenstemming met de algemene invloed van de druksterkte) /16, 21/.
- . Een lage w.c.-factor is zeer gewenst /11, 19, 22/; aanbevolen wordt: w.c.-factor = 0.40-0.45 /22/.

- Verdichting en nabehandeling:

- . De beton dient goed verdicht te worden /9, 19, 22/.
- . Een goede nabehandeling is zeer gewenst /8, 9, 11, 19, 21, 22/.

- Vormgeving constructie:

- . De toepassing van gladde, geleidelijk verlopende vlakken zonder scherpe kanten, voegen en scheuren wordt aanbevolen /9, 22/.

Invloed stroomsnelheid

- Bij toenemende stroomsnelheid (in buizen) neemt de erosie af: door grotere turbulentie bij hogere stroomsnelheden vindt een geleidelijke overgang plaats van bodemtransport naar transport in suspensie /23/.
- Er bestaat een tendens naar een kleiner worden van de abrasie/erosie bij hogere zandconcentraties /23/.

Gebruik van speciale, hoogwaardige betonsoorten

- Speciale betonsoorten met hoogwaardige cementen en bijzondere hulpstoffen (t.b.v. omlaagbrengen w.c.-factor bij blijvende verwerkbaarheid) bieden goede perspectieven t.a.v. erosie/abrasiebestendigheid /25, vb. van samenstelling/.
- Kwaliteitsbeton en synthetische beton (bindmiddel kunsthars) /6/, alsmede epoxy -beton en polymeerbeton /21, 49/ hebben een grotere erosie/abrasiebestendigheid dan gewone beton.

Oppervlakte beschermende middelen i.g.v. erosie/abrasie

- Toegepast kunnen worden:

- . (evt. gewapende) asfaltmengsels /4/,
- . bitumenachtige en epoxyhars coatings /9, 25/,
- . kunststoffen bekledingsplaten /26/.

2.3. Proeven ter bepaling van de erosie/abrasie bestendigheid

- Een probleem bij het uitvoeren van abrasieproeven in het

laboratorium is, dat het simuleren van de werkelijke condities waaronder de slijtage plaatsvindt niet goed mogelijk is; het onderling vergelijken van de resultaten van verschillende methoden is niet zinvol, bij toepassen van één bepaalde test is alleen vergelijkend onderzoek mogelijk. Wel blijkt bij de meeste testprocedures dat de abrasiebestendigheid evenredig is met de betondruksterkte. De invloed van de fysische eigenschappen van het toeslagmateriaal op de abrasiebestendigheid varieert met het type test; ook de gradering van het toeslagmateriaal heeft enige invloed.

- Typen van proeven

Experimenteel (onder laboratoriumomstandigheden) kan de bestendigheid tegen erosie/abrasie bepaald worden m.b.v.:

- . een zandvoerende water-of luchtstraal onder diverse hoeken van inval met het oppervlak van het proefobject /4, 6, 10, 14, 20/;
- . een waterstraal onder een hoek van 90° en een zandstraal onder een hoek van 20° met het oppervlak van het proefobject, welke stralen elkaar treffen t.p.v. het oppervlak /6/;
- . een roterende cilinder, aan de binnenzijde bekleed of bezet met het te onderzoeken materiaal, gevuld met abrasieve korrelvormige stoffen /6/;
- . het laten circuleren langs hydraulische weg, bij een gegeven snelheid, van een zekere hoeveelheid abrasief materiaal over de bodem van een leiding die bekleed is met het te beproeven materiaal /6/;
- . het laten roteren van proefstukken onder water, waarbij kogels van een zeer hard materiaal door rollende, glijdende en springende bewegingen de natuurlijke beweging van de vaste getransporteerde deeltjes nabootsen /15, 25, 26/.

2.4. Overzicht betonnen constructies, beschadigd door erosie/abrasie.

Anderson Ranch dam, U.S.A. /29, 32, 36, 39/

- De uitschuring van de tijdelijke omleidingstunnel (i.e. tijdens de bouw) bedroeg ca 70 mm. De bedrijfsomstandigheden waren : $\bar{v}_{\max} \simeq 10 \text{ m/s}$, gebruiksduur 43 maanden, transport van grote hoeveelheden klei, zand en grind.
De slijtage van alle toeslagmaterialen was tamelijk uniform, de aangetaste oppervlakken van de grotere toeslagmaterialen waren glad en vlak, pleisterwerk was plaatselijk volledig weggeërodeerd, i.h.a. was het pleisterwerk meer geërodeerd dan de beton.
- In gebruikneming 1955.
- Bij inspectie tijdens de winter van 1959-1960 werd schade geconstateerd aan de vloer van de woelbak: ruw geworden betonoppervlakken, alsmede ernstiger beschadigingen in diepte variërend van 10 mm tot 130 mm. Bij inspectie in april 1962 bleek de maximale diepte van de erosie plaatselijk te zijn toegenomen tot 230 mm.
Oorzaak: de abrasieve werking van woelend gesteente en grof zand, met een mogelijke verergering van de schade door het optreden van kavitatie na het opruwen van de oppervlakken).

Bonneville dam, U.S.A. /30, 33/

- Tijdens de bouw ontstond op diverse plaatsen in de woelbak schade t.g.v. erosie door grof meegevoerd materiaal (puin, keien, stenen); daarnaast was er sprake van ernstige schade door erosie t.g.v. kavitatie.
- Voltooiing dam in 1938.
- Er werd een niet ernstige, geringe slijtage geconstateerd t.p.v. de kruin van de dam, op de spillway en in de woelbak: opgeruwde vlakken, afgeronde hoeken van blokken. Tevens trad een veel ernstiger schade op t.g.v. erosie door kavitatie.

Oorzaak van de slijtage: de abrasieve werking van door het water meegevoerde zand- en kleideeltjes (1000 ppm, diameter deeltjes $< 500 \mu$) tijdens hoogwaterafvoer (duur verscheidene weken, snelheden op de spillway ≈ 20 m/s).

N.B.: Een scherpe scheidslijn tussen de aangegeven oorzaken van schade (t.g.v. kavitatie en/of erosie) is niet altijd te trekken.

Bull Shoals dam, U.S.A. /35/

- Binnen een jaar ontstond een erosie van 1,20 mm.

Grand Coulee dam, U.S.A. /28, 29, 31, 32, 35, 39/

- In gebruikneming 1938.

- Bij inspectie in 1943 werd over een groot oppervlak ernstige schade geconstateerd aan de 'spillway bucket', in diepte variërend van 25 tot 1200 mm.

Oorzaak: de abrasieve werking van grote hoeveelheden grof zand en grind en vooral stenen en keien in een sterk turbulente stroming met wervels, die veroorzaakt werd door de niet-uniforme afvoer tijdens de bouw en de lage afvoeren gedurende de daarop volgende perioden.

Hoover dam, U.S.A. /32, 39/

- De uitschuring van de tijdelijke omleidingstunnel (i.e. tijdens de bouw) is te vergelijken met de erosie van de soortgelijke voorziening bij de Anderson Ranch dam.

Nagayasuguchi dam, Japan /37/

- In gebruikneming 1955.

- Nadat 6 maal een hoogwaterafvoer had plaatsgevonden (gemiddelde duur 300 uur), werd in 1958 ernstige schade geconstateerd aan

de vloer van de woelbak (tot een diepte van 2 m), alsmede een opruwing van de geleidingsmuren; plaatselijk vond verergering van de schade plaats door het optreden van kavitatie (versneld door het ruw worden van oppervlakken a.g.v. uitschuring).

Oorzaak: de abrasieve werking van puin in een sterk turbulente dwarsstroming met wervels, veroorzaakt door de asymmetrische aanstroming van de woelbak en de kromming van het aflaatkanaal.

Dammen in Polen /40/

- Er wordt melding gemaakt van schade, o.a. aan de onderafvoervoorzieningen van de Koronowo dam en de Goczalkowice dam, alsmede aan de woelbakken van de Roznów dam en de Pilichowice dam.

Oorzaak: de abrasieve werking van door het water meegevoerde rotsstenen.

Strawberry Valley project, Provo, Utah, U.S.A. /27, 29/

- Na 22 jaar werd aan de spillway (helling 42%, max. afvoer $28 \frac{l}{s}$, $\bar{v}_{max} \approx 12 \frac{m}{s}$) een slijtage geconstateerd van 6 mm.

- Oorzaak: de abrasieve werking van af en toe door het water meegevoerde hoeveelheden zand.

Tase dam, Japan /37/

- Nadat, sinds de voltooiing, 16 maal een hoogwaterafvoer had plaatsgevonden, werd in 1959 (ernstige) schade geconstateerd aan de vloer van de woelbak, in diepte variërend van 100 mm tot 1000 mm met een ringvormig patroon.

- Oorzaak: de abrasieve werking van grote, circulerende hoeveelheden zand, grind en vooral puin in een sterk turbulente dwarsstroming met wervels, die veroorzaakt werd door asymmetrische afvoer naar de woelbak.

Dam in de Tuolumne rivier, LaGrange, Calif., U.S.A. /27/

- De overlaat van deze dam is S-vormig, ca 30 m hoog en gemaakt van beton, bestaande uit een mengsel van cement en zand met gebroken rots (taai 'groensteen').
- Na ca 18 jaar werd op de meeste plaatsen van de overlaat een geringe slijtage (~ 10 mm) geconstateerd, het ergste t.p.v. de cementsteen, waardoor de stukken 'groensteen' - sterk gepolijst - enigszins uit het oppervlak omhoog staken.
- Oorzaak: de abrasieve werking van grote hoeveelheden zand die, gedurende 6 tot 8 maanden per jaar door het water ($\bar{v}_{\max} \simeq 20$ m/s) over de dam heen werden getransporteerd. De slijtage was vermoedelijk het grootst bij de lagere snelheden.

Zeewering tussen Greenhill en Gunrock, Mass., U.S.A. /34/

- Bouwjaar 1908.
- Bij inspectie in 1952 werd de conditie als slecht beoordeeld: afsplintering en abrasie t.g.v. het beuken door rotsstenen.

Prototype onderzoek kustverdedigingswerken, Fleetwood, Lancashire, U.K. /38/

- Van 1961 tot 1968 werd - in situ - de weerstand tegen abrasie onderzocht van (flauwhellende) platen - samengesteld uit diverse mengsels en cementsoorten - t.g.v. door (zee)golven aangevoerd grind.
- De w.c.-factor en de consistentie waren voor alle toegepaste betonmengsels gelijk.
- Afhankelijk van de gebruikte cementsoort, de verhouding tussen de hoeveelheden toeslagmateriaal en cement, en de aard en samenstelling van het toeslagmateriaal, bedroeg de gemiddelde slijtage over een periode van 7 jaar 10 tot 90 mm.

3. BUITENLANDSE KONTAKTEN

- Oostenrijk

Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten, Wenen.

Er wordt gewezen op lit. /25, 26/ en vooral beklemtoond dat de nabehandeling van de oppervlakte zeer belangrijk is bij het erosiegedrag.

- Zwitserland

Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie, Wildegg.

Er wordt ons lit. /6, 22/ gestuurd. Lit. /6/ is een goede bron van informatie over mogelijke proeven en heeft geïnspireerd tot de later toegepaste eigen proefmethode.

- Duitsland

. Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf.

Er wordt gewezen op de samenvatting van 1969, lit. /11/. Recenter onderzoek is bij hen niet uitgevoerd.

. Universität Stuttgart. Institut für Wasserbau.

Een door hen gezonden publicatie /45/ bevat o.a. resultaten van erosieproeven op beton B 37,5 met watersnelheden tussen de 0,6 en 5 m/s. Als abrasief materiaal worden staalkogels ϕ 16,7 mm toegepast. De proefduur bedroeg steeds 24 uur.

Na uitwerking van de resultaten bleek een functie van de vorm

$$s = at + b.t.v^c$$

het beste de slijtage in de tijd weer te geven. De factor a vormt daarbij het aandeel die door het rollen en schuren van het abrasief materiaal wordt veroorzaakt en b geeft de invloed t.g.v. het aanbotsen tegen de korrels weer.

De watersnelheid v wordt tot de macht c verheven, terwijl de tijd t in beide aandelen lineair zit. In de volgende figuur zijn resultaten op een beton B37,5 te zien:

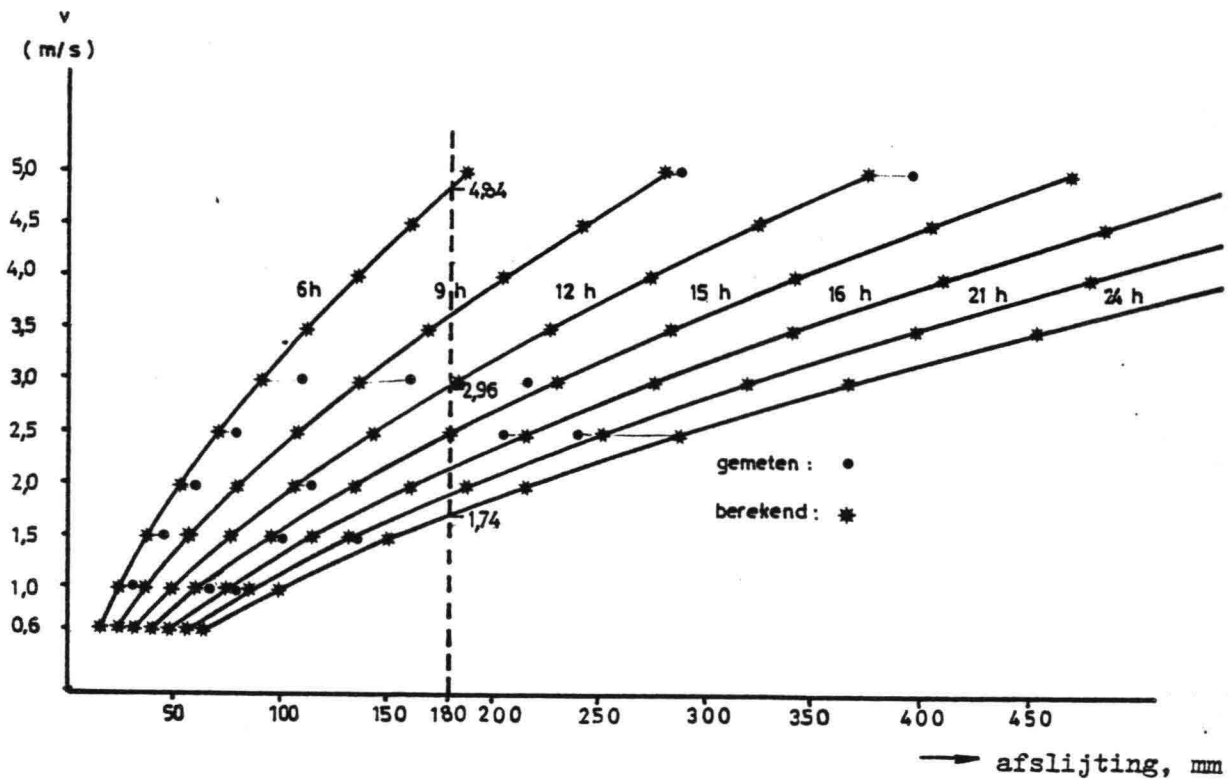


Fig. 1 Afslijting van beton. Resultaten van Röhnisch en Vollmer /45/.

— Frankrijk

Electricité de France, Direction de l'équipement, Paris.

In Frankrijk bestaat een electriciteitscentrale die gebruik

maakt van de getijverschillen. Dat is de "Usine marémotrice de la Rance" te Bretagne. Daar treden watersnelheden op tot 11 m/s. Om erosie te voorkomen werd een 0,30 m dikke deklaag op het normale beton aangebracht met 400 kg/m^3 hoogovercement en plastificeerder. Er is geen erosie geconstateerd.

Uit een bijgesloten publicatie /41/ volgt dat een discontinu zeeflijn is toegepast (geen materiaal tussen 3,15 en 10 mm) bij een $w/c = 0,40$.

- Engeland

Greater London Council, Dept. of Public Health Engineering, London.

I.v.m. het Thames Barrier Project werd in Engeland geïnformeerd. De watersnelheid zal maximaal 13 m/s zijn en het water kan zand met zich meevoeren. Het beton bevat 355 kg sulfaat bestendig Portlandcement bij een $w/c = 0,47$.

De toeslag van 10 t/m 40 mm wordt uit zee gebaggerd.

- Rusland

. Gosstroy USSR. Research Institute of concrete and reinforced concrete, Moskou.

Er is geen directe informatie ontvangen.

In /42/ is echter over een project geschreven dat in Rusland gebouwd wordt. In deze getijcentrale wordt beton toegepast met een cementgehalte van 480 kg/m^3 en een $w/c = 0,38$ met een maximale korrel van 20 mm. Het hoge cementgehalte is vooral gekozen doordat de dam in een Siberisch klimaat wordt gebouwd met grote temperatuurwisselingen en grotere kans op vriezen en dooien. In vries-dooi proeven kon dit beton 3700 wisselingen doorstaan.

- Prof. Dr.-ing. J.W. Zaitsev, Moskou

Tijdens zijn bezoek in Delft heeft Zaitsev over Russisch talige literatuur gerapporteerd. Het betrof vooral kavitatieverschijnselen waarop hier niet ingegaan zal worden.

- Verenigde Staten van Amerika

Department of the Army. Waterways experiment station, Corps of engineers, Vicksburg, MS.

Naast literatuur over reparaties aan een dam in de VS /43, 44/ gaf B. Mather zijn eigen visie:

My own personal feeling is that the production of high quality concrete made with a low water-cement ratio placed in forms prepared so as to give good surfaces that is thereafter well-cured will probably resist most abrasive environments for a sufficiently long time so that the additional benefits of expensive special treatments are unlikely to be cost effective. On the other hand, however, if one is very pessimistic about the possibility of obtaining good concrete and good construction practice including good curing, then perhaps one should pay extra and employ an exotic process or exotic materials not so much for the specific benefits that their use offers but rather in the hope that those connected with the construction will exert more care because they are using exotic processes or materials of high cost and thus work harder to get a good job."

- United States Dept. of the interior. Bureau of Reclamation Engineering and Research Center, Denver Co.

Er is literatuur gestuurd over een ontsiltingsinstallatie bij de Colorado rivier waar beton met sulfaat bestendig cement zal worden toegepast.

4. PROEFMETHODEN

4.1. Erosie door stromend water en abrasief materiaal

In deze proef wordt geprobeerd de werkelijkheid zo goed mogelijk na te bootsen door water tezamen met abrasief materiaal over de betonnen proefstukken te leiden. Weliswaar is voor een verhoogde erosiewerking gekozen, zodat de resultaten wel onderling vergeleken kunnen worden, maar de vertaling naar de werkelijkheid met betrekking tot de tijdsafhankelijkheid niet mogelijk zal zijn.

Deze proefmethode vertoont veel overeenkomst met de methode die door Gardet en Dysli /6/ gebruikt werd.

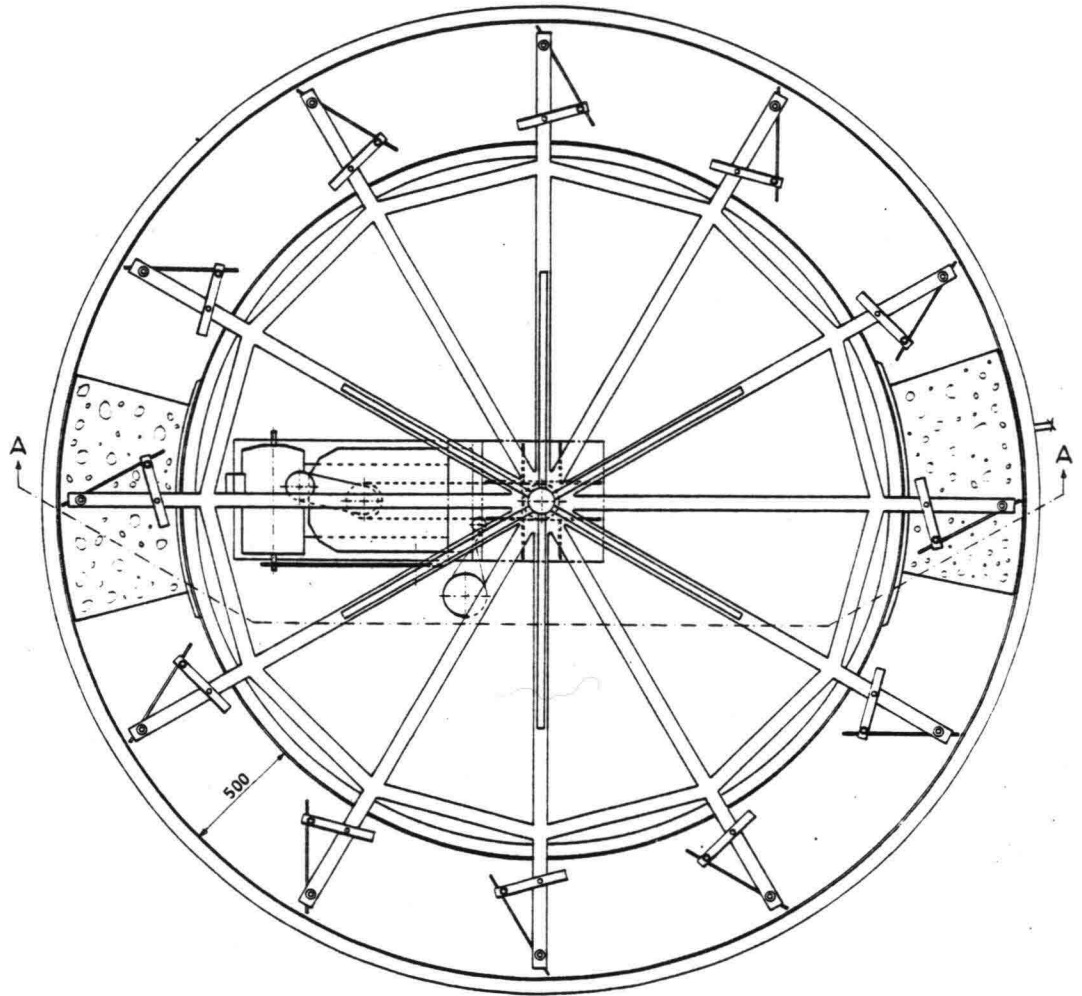
4.1.1 Opstelling en bedrijf

In een open cirkelvormige goot met een buitendiameter van 4 meter met rechthoekige doorsnede zoals in figuur 2 en op foto 1 wordt getoond, zijn 12 segmentvormige proefstukken elk met een oppervlak van ca. $0,5 \text{ m}^2$ voorzien van verstelbare pootjes horizontaal op de bodem geplaatst. De voegen tussen deze proefstukken bedragen geen tot enkele millimeters. Door deze kleine spelingen kan het gebruikte water via een omloopstelsel na beproeving worden afgevoerd.

In ruststand ligt de bovenzijde van ieder proefstuk 0,30 m onder het wateroppervlak.

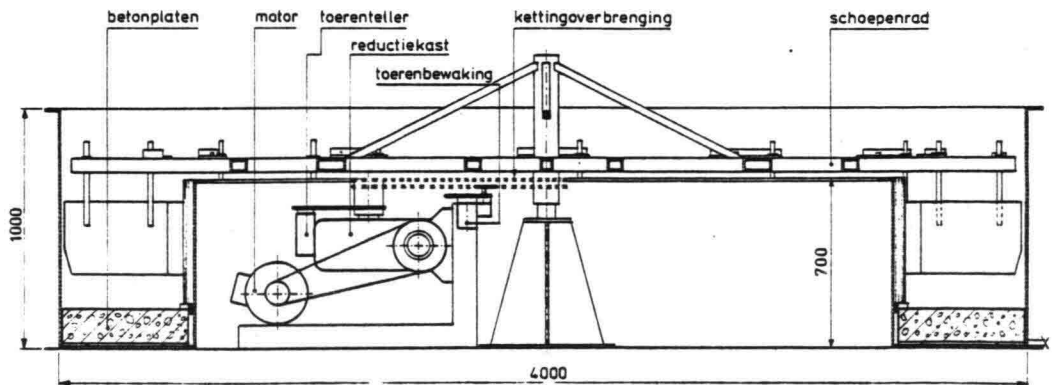
Om straks gemakkelijk met een meetframe te kunnen meten zijn in ieder proefstuk 3 puntvormige referentiepunten aangebracht welke zich in een cilindervormige holte bevinden en afgedekt zijn met een stop waarvan de bovenzijde gelijk met de bovenzijde van het beton ligt. (Zie figuur 3)

Bovenaanzicht

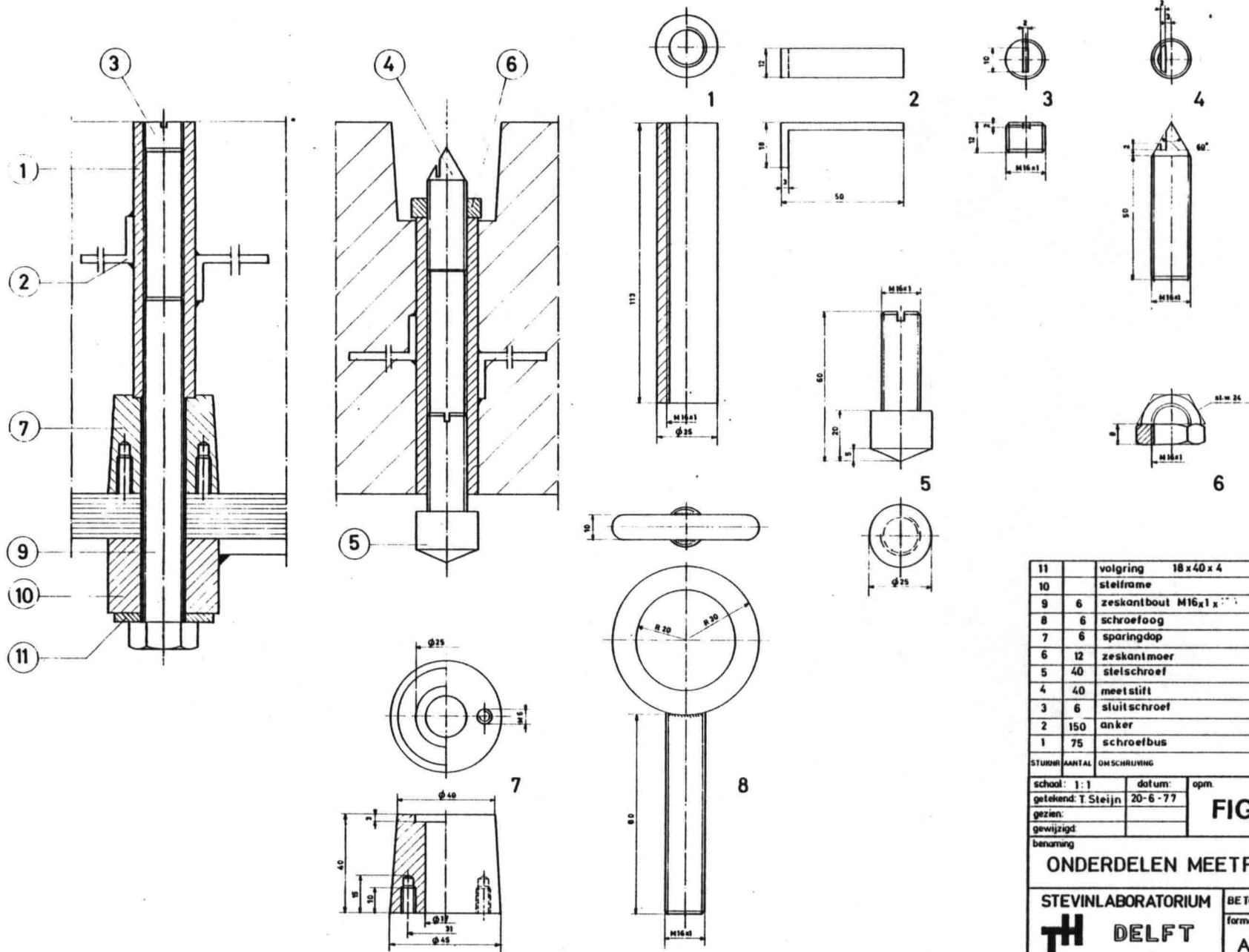


Overzicht proefopstelling: Erosie van Beton

doorsnede A-A



Lab. voor Vloeistofmechanica	TH-Delft	afn. CT
Overzicht Proefopstelling		
schaal 1:10		
datum 9-6-77		
no. VLM-117		
JG		
FIGUUR 2		



11	volgtring	18 x 40 x 4	staal
10	stelframe		zie tek 7702-5
9	6	zeskantbout M16x1	staal
8	6	schroefoog	staal
7	6	sparringdop	staal
6	12	zeskantmoer	Set messing / r.v.s. Set staal
5	40	stelschroef	messing / r.v.s.
4	40	meetstift	messing / r.v.s.
3	6	sluitschroef	messing / r.v.s.
2	150	anker	messing / r.v.s.
1	75	schroefbus	messing / r.v.s.

STUKNR	AANTAL	OMSCHRIJVING	OPMERKING
--------	--------	--------------	-----------

school:	1:1	datum:	opm.
getekend:	T. Steijn	20-6-77	
gezien:			
gewijzigd:			

FIGUUR 3

ONDERDELEN MEETPUNTEN
(EROSIE)

STEVINLABORATORIUM **BETONCONSTRUCTIES**

TH DELFT **A2** **tek. no. 7702-4**

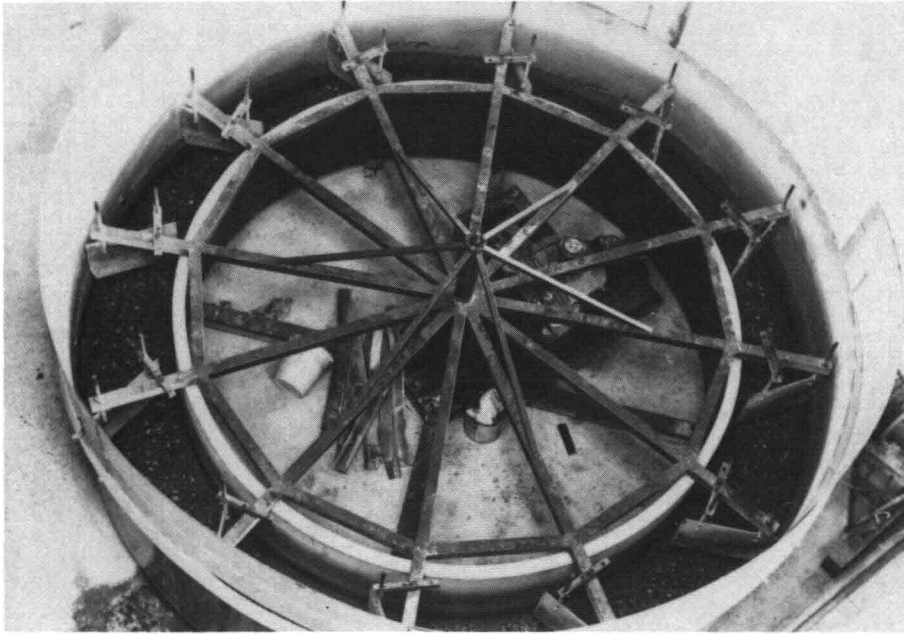


Foto 1 Bovenaanzicht beproevingsopstelling (zie ook litt. /6/). De draairichting is linksom.

In het water steken vertikaal gerichte schotten tot een diepte van 0,15 m onder de waterspiegel. De omloopsnelheid van de schotten en dus de watersnelheid kan traploos via een elektromotor en een tandwielkast worden geregeld. Iedere omwenteling wordt geteld zodat een controle op de omloopsnelheid mogelijk is. De omwentelingssnelheid van de motor bedraagt 18 toeren per minuut.

De gemiddelde omloopsnelheid van de schotten is 3,5m/s. Zij zijn alle onder een hoek van 30° met de radiaal geplaatst om een ten gevolge van centripetale krachten hoge waterstand aan de buitenzijde te verlagen.

Door deze constructie maakt het water in de bak een schroefvormige beweging en voert daarbij in totaal 50 kg riviergrind als abrasief materiaal mee.

Er staat dus ongeveer $\frac{1}{4}\pi(4^2 - 3^2)0,30 = 1,65 \text{ m}^3$ water boven de proefstukken met daarin $50/2,65 \times 10^3 = 0,019 \text{ m}^3$ grind.

Dit is een verhouding van 87 : 1.

Na een bepaalde tijd wordt de rotor gestopt en door middel van een hijsinstallatie van de middenas afgenomen. Tegelijkertijd wordt het water van onder de proefstukken weggepompt en het overgebleven grind verwijderd. Dit is ca 33 à 35 kg. Per proefstuk worden nu door middel van een op de 3 vaste referentiepunten geplaatst meetframe (zie figuur 4) 24 hoogteverschilmetingen verricht. Voor een nadere omschrijving van deze meetmethode zie par. 4.1.2. Na deze 12 x 24 metingen welke direkt op een ponsband worden vastgelegd wordt de bak opnieuw met schoon water en ongebruikt grind gevuld en begint een nieuwe cyclus.

Er worden 3 series proefstukken beproefd. Deze 36 proefstukken worden verkregen uit verschillende betonmengsels. Het cementgehalte, de hoeveelheid aanmaakwater (watercement-factor), het gebruik van een plastificeerder als watercement-factor verlagende toevoeging, de maximum korrelgrootte en de nabehandeling bij de verharding van de proefstukken spelen voor deze verschillen een belangrijke rol. Getracht wordt nu aan te geven voor welk betonmengsel, en eventueel de nabehandeling, de abrasieve werking van het door het water meegevoerde materiaal het kleinst is, zodat bij toepassing van beton bij aan erosie blootgestelde kunstwerken de minst-gevoelige kwaliteit kan worden gekozen.

4.1.2 Meetapparatuur

Hoogteverschilmetingen

Deze metingen zijn verricht met behulp van een stalen meetframe waaraan vast 24 inductieve opnemers waren bevestigd (zie foto 2). Voor de plaatsing van de opnemers, zie figuur 4.

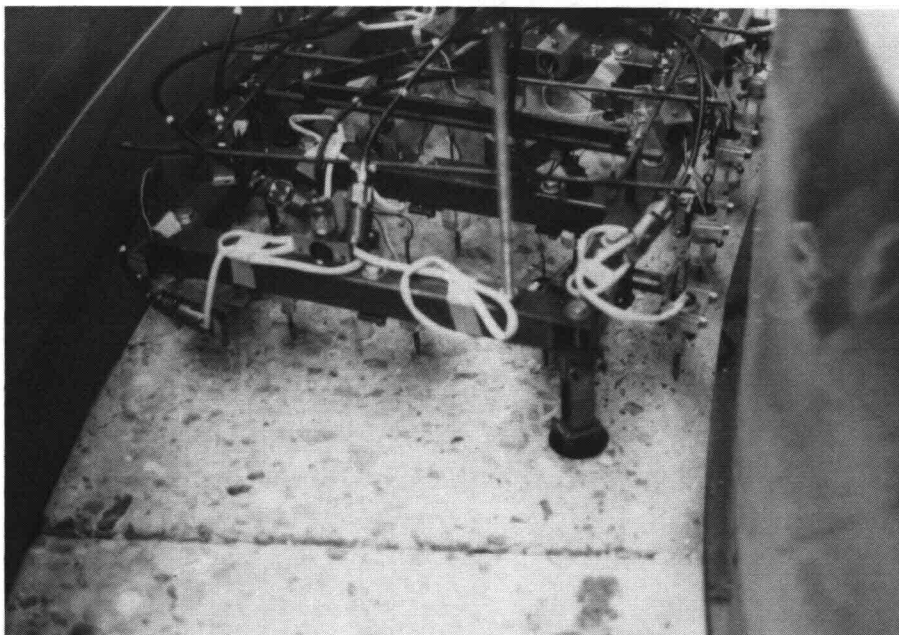


Foto 2 Detailopname meetframe in aktie.

Per cyclus zijn steeds 12 proefstukken gemeten.

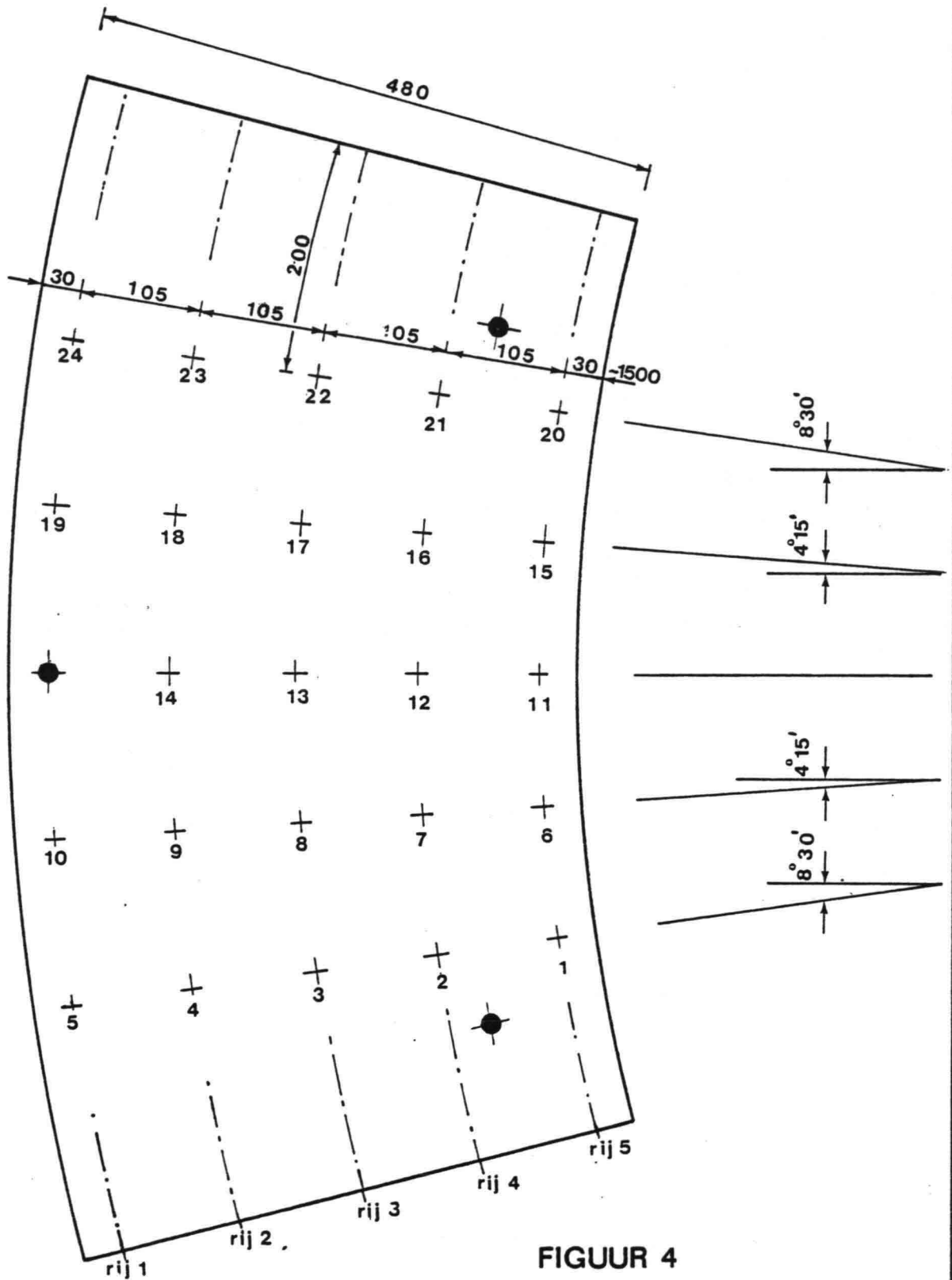
Bij serie 1 werd gemeten volgens onderstaande tabel 1.

De proefstuknummers in de meetvolgorde waren voor serie 1:

1.1 2.1 3.1 4.1 5.1 6.1 1.2 2.2 3.2 4.2 5.2 6.2

De referentiemetingen (Tabel 1 metingen 5 en 6) waren noodzakelijk omdat wegens het te kleine bereik van de eerst gemonteerde $\pm 1/10$ -inch -inductieve opnemers overgegaan werd op opnemers met een bereik van $\pm \frac{1}{2}$ -inch. Zij werden uitgevoerd op een zuiver horizontaal oppervlak.

Het verschil van deze 2 metingen werd verwerkt in het computerprogramma.



FIGUUR 4

plaats van de meetpunten

TABEL 1 OVERZICHT METINGEN SERIE 1

METING NR.	METING	DATUM	SCANS	OPMERKINGEN
1	1e nul-meting	10 okt. 1977		+ 1/10-inch-opnemers
2	2e nul-meting	10 " "		
3	1e meting na 20 uur	14 " "	12-23	
4	2e meting na 20 uur	14 " "	24-35	
5	referentiemeting	14 " "		+ 1/10-inch-opnemers
6	" "	18 " "		+ 1/2 -inch-opnemers
7	1e meting na 30 uur	18 " "	36-47	
8	2e " " 30 "	18 " "	48-59	
9	1e " " 40 "	24 " "	60-71	
10	2e " " 50 "	24 " "	72-83	
11	meting na 50 uur	25 " "	84-95	
12	" " 60 "	27 " "	96-107	
13	" " 70 "	3 nov. "	108-119	
14	" " 80 "	7 " "	120-131	
15	" " 90 "	14 " "	132-143	
16	" " 100 "	15 " "	144-155	
17	" " 140 "	17 " "	156-167	
18	" " 180 "	25 " "	168-179	
19	" " 220 "	29 " "	180-191	
20	" " 260 "	2 dec. "	192-203	

De resultaten van de metingen alsmede de datum en een meetnummer werden vastgelegd op ponsband. Hiertoe werd tussen de 24 aansluitingen van de opnemers en de ponsbandponser een meetkast geschakeld (VAMA). Deze meetkast tastte automatisch alle 24 opnemers af en gaf de resultaten in volgorde door aan de ponser. Nadat alle 20 meetseries waren verricht, zijn deze ponsbandjes in volgorde door de computer verwerkt. Naast de invoer van de meetgegevens was ook de invoer van de ijkwaarden van de inductieve opnemers noodzakelijk.

De resulterende computeruitvoer is hier niet opgenomen maar bevindt zich in het archief van de vakgroep betonconstructies. De scannummers op deze computeruitvoer corresponderen met de nummers vermeld in tabel 1 of 2. De getallen geven per meetpunt de verplaatsing ten opzichte van de nulmeting in mm aan.

Bij serie 2 werd gemeten volgens onderstaande tabel 2.

TABEL 2 OVERZICHT METINGEN SERIE 2

METING NR.	METING	DATUM	SCANS
1	mul-meting	3 febr. '78	1-12
2	meting na 10 uur	7 "	13-25
3	" 20	8 "	26-38
4	" 40	10 "	39-51
5	" 60	14 "	52-64
6	" 80	16 "	65-77
7	" 120	20 "	78-90
8	" 160	23 "	91-103
9	" 200	28 "	104-116
10	" 240	2 maart "	117-129

Bij de metingen van serie 2 is steeds als eerste een meting op een zuiver horizontaal en vlakke plaat uitgevoerd om eventuele meetfouten door niet goed functionerende opnemers te kunnen elimineren.

Voor een overzicht van de plaats van de meetpunten per proefstuk wordt verwezen naar figuur 4.

Verder in dit rapport wordt gesproken van de rijen 1 t/m 5. Hierbij is rij 1 de buitenste rij meetpunten (5, 10, 19 en 24) en rij 5 de binnenste rij meetpunten (1, 6, 11, 15, 20).

De codering van de proefstukken was als volgt:

TABEL 3 CODERING PROEFSTUKKEN SERIE 2

Computer- code	Proefstuk nr.	Mengsel nr.	Behandeling na het storten
001	Ref.Plaat	-	-
002	2.1.1	7W	Nabehandeld door opslag
003	2.2.1	7W	Bij 20°C en 98% RV
004	2.3.1	8W	"
005	2.4.1	8W	"
006	2.5.1	9W	"
007	2.6.1	9W	"
008	2.1.2	7N	Niet nabehandeld
009	2.2.2	7N	Opslag bij $\pm 20^{\circ}\text{C}$ en
010	2.3.2	8N	$\pm 40\%$ RV
011	2.4.2	8N	"
012	2.5.2	9N	"
013	2.6.2	9N	"

De metingen in serie 3 zijn als volgt uitgevoerd:

Allereerst zijn referentiemetingen op de platen 1 t/m 14 uitgevoerd waarbij de eerste en de laatste (1 en 14) een zo vlak mogelijk opgestelde plaat van perspex was. Deze vlakke-plaatmetingen werden uitgevoerd om later eventuele meetfouten te kunnen herleiden.

De tweede meetserie geschiedde op dezelfde (SCANS 14 t/m 17 en 25 t/m 27) en op een ca 2 mm lager gelegen plaat (SCANS 18 t/m 24) om eventuele spreiding in resultaten en interpretatie van de nauwkeurigheid van meten te kunnen onderzoeken. Hierbij dient als uitgangspunt dat de sprong in resultaten naar de lager gelegen plaat overal hetzelfde moet bedragen.

Tot en met 160 uur na het starten van de proef (metingen 3 t/m 5) is het beton onderworpen aan aantasting door zand (voor meettijden zie tabel 4). Doordat van duidelijk zichtbare erosie vrijwel geen sprake was is besloten na 160 uur verder te gaan met dezelfde soort abrasief materiaal (grind) als in de series 1 en 2 werd gebruikt (zie vanaf meting 6 = vanaf SCAN 70).

Een nul-meting op het tijdstip van 160 uur is helaas niet uitgevoerd.

TABEL 4 OVERZICHT METINGEN SERIE 3

Meting nr.	Meting	Meet-datum	SCANS	Proef-nr.
1	Ref. meting 1		0-13	
2	Ref. meting 2		14-27	
3	Meting na zandaant. na 10 uur		28-41	
4	" " zandaant. na 40 uur		42-55	
5	" " zandaant. na 90 uur		56-69	
6	" " grindaant.na 10 uur		70-83	
7	" " grindaant.na 20 uur		84-97	
8	" " grindaant.na 40 uur	25 sept.	98-111	306
9	" " grindaant.na 60 uur	2 okt.	112-125	307
10	" " grindaant.na 80 uur	4 okt.	126-139	308
11	" " grindaant.na 120uur	19 okt.	140-153	309
12	" " grindaant.na 160uur	27 okt.	154-167	310
13	" " grindaant.na 200uur	3 nov.	168-181	311
14	" " grindaant.na 240uur	10 nov.	182-195	312

TABEL 5 CODERING PROEFSTUKKEN SERIE 3

Computer- code	Proefstuk nr.	Mengsel nr.	Behandeling na het storten
001	Ref. plaat	-	
002	311	10	Nabehandeld door
003	312	11	opslag bij 20°C en 98% RV
004	313	12	gedurende 2 weken.
005	314	13	Verder zoveel mogelijk
006	315	14	onder water bewaard.
007	316	15	
008	321	10	
009	322	11	
010	323	12	
011	324	13	
012	325	14	
013	326	15	
014	Ref. plaat	-	

Massaverschillen voor en na de aantastingsproeven.

De massavermindering ten gevolge van de afslijting van de platen is door middel van onderwaterweging bepaald.

Dit geschiedde met behulp van een trekkring waarop rekstrookjes waren aangebracht.

Voor iedere meting werd een ijkblok van 82,5 kg boven water gewogen om eventuele afwijkingen ten gevolge van temperatuurverschillen en/of instelverschillen te kunnen verwerken.

De berekening van de massa verliep volgens formule (1):

$$\text{massa} = x = \frac{2p-q-r}{2a-b-c} \cdot 82,5 \text{ /kg/ (1)}$$

waarin: p = meetwaarde proefstuk	
q = nulmeting 1	onder water
r = nulmeting 2	
a = meetwaarde ijkblok	
b = nulmeting 1 ijkblok	boven water
c = nulmeting 2 ijkblok	

Om eventuele gewichtsveranderingen ten gevolge van vochtgehalteverschillen te elimineren zijn de proefstukken onder water gewogen na tenminste 24 uur in dit water te hebben gelegen.

Schaduw-moiré opnamen

Van enige proefstukken zijn ook nog schaduw-moiré foto's gemaakt. Een voorbeeld hiervan is hieronder als foto 3 opgenomen. Uit zo'n opname is een hoogtelijnenkaart te halen, maar het te verrichten werk is daarvoor zeer omvangrijk. Gezien het feit dat het niet duidelijk is wat de resultaten nog meer zouden kunnen zeggen over de proeven, werd besloten niet verder te gaan met deze methode.

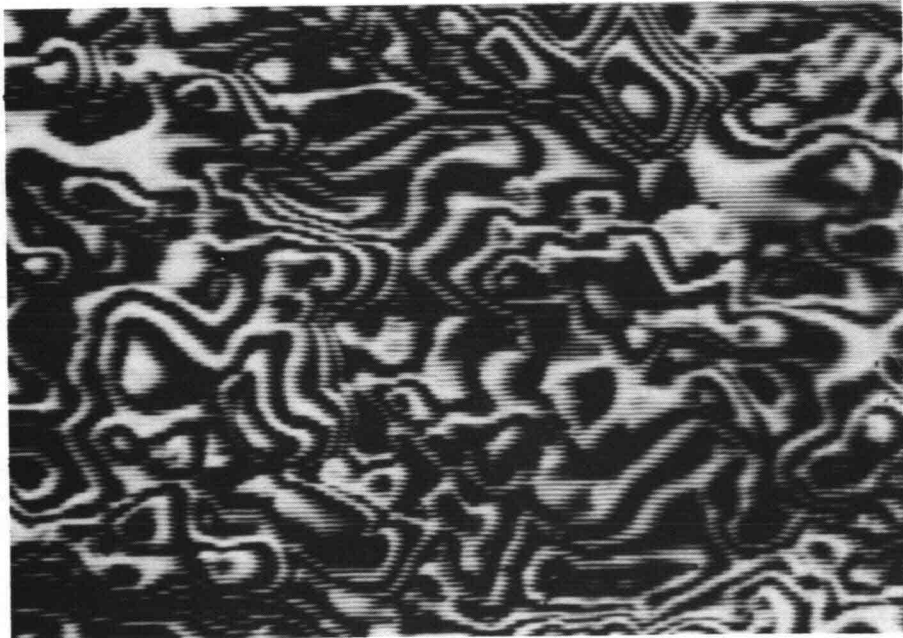


Foto 3 Moiré-opname van een door erosie aangetast proefstuk.

4.1.3 Opslag en verwerking van de meetresultaten

De onbewerkte computeruitvoer, zoals omschreven in par. 4.1.2 wordt bewaard in het archief van de vakgroep betonconstructies van de TH-Delft.

Door afslijting van de meetstiften in de laatste fase van het onderzoek zijn de verplaatsingen bij de metingen na 260 uur van serie 1 zoals vermeld op de computeruitvoer niet juist. Zij zijn daarom gecorrigeerd. Hiertoe werd de afslijting van de meetstift opgemeten en rekening houdend met de ligging van de meetpunten voor een bepaald deel bij de waarden opgeteld.

Het kwam voor dat sommige meetresultaten sterk afweken van het normaal te verwachten beeld. Als oorzaak kan het slecht functioneren van een inductieve opnemer worden genoemd. Deze resultaten worden daarom ook genegeerd. De bijbehorende gemiddelden en standaardafwijkingen zijn aangepast.

De volgende verwerkingen van meetresultaten zijn verricht:

- Computeruitvoer van de hoogteverschilmetingen (archief)
- Samenvattingen van deze meetresultaten per serie, per rij, per mengsel en per nabehandeling, al of niet gecombineerd (hoofdstuk 7, 8)
- Grafische voorstelling van enige samenvattingen van de hoogteverschilmetingen (bijlagen)
- Samenvatting van de gewichtsverschilmetingen (hoofdstuk 7.1)
- Samenvatting van slijptafelmetingen (hoofdstuk 9)

De hoeveelheid berekeningstabellen is te omvangrijk om als bijlagen in dit rapport op te nemen. Deze gegevens zijn echter ter inzage bij de vakgroep betonconstructies aan de TH-Delft.

4.2. Slijptafel

Proeven op een slijptafel zijn makkelijk uit te voeren en de resultaten kunnen met talloze andere vergeleken worden. Dit maakt het aantrekkelijk om ook i.v.m. erosie deze proef toe te passen en met de erosieproeven te vergelijken. Zou een strakke correlatie tussen de beide proefmethodes bestaan, dan zouden in de toekomst de (duurdere) erosieproeven achterwege gelaten kunnen worden.

Bij deze proeven wordt de weerstand tegen afslijting bepaald door middel van de slijpweg van Amsler.

4.2.1 Principe van de methode

De voor dit doel reeds lang bestaande apparatuur (zie foto 4) omvat als centraal element een horizontaal draaiende, ringvormige schijf, waar de proefstukken tegenaan gedrukt worden onder toevoeging van een nat slijpmengsel.

De diktevermindering na het afleggen van 500 m slijpweg wordt opgemeten. De proef is gestandaardiseerd in N 502 welke bovendien in grote lijnen overeen komt met de Duitse norm DIN 52108. De methode wordt o.a. toegepast voor het bepalen van de slijtweerstand van baksteen, betontegels, natuursteen, e.d.

Naast deze zgn. natte slijpproef bestaan er ook varianten, waarbij geen water wordt toegevoegd. Hiervoor kan bv. naar de Engelse norm BS 812 verwezen worden. De gekozen methode lijkt relevanter in het kader van erosieonderzoek aan beton.

4.2.2 Opzet en uitvoering van de proef.

Van de 15 te onderzoeken mengsels zijn er van twaalf (mengsels 1 t/m 6 en 10 t/m 15) in een enkele en van drie (mengsels 7 t/m 9) in een dubbele stort halve kuben vervaardigd met lineaire afmetingen van het grondvlak van 150 mm. Per stort zijn drie kuben vervaardigd, die door verzagen in totaal 12 proefstukjes opleverden.

Door de afmetingen hiervan globaal 71 x 71 mm te kiezen, resulteert een oppervlak van bijbenadering $5 \times 10^3 \text{ mm}^2$.

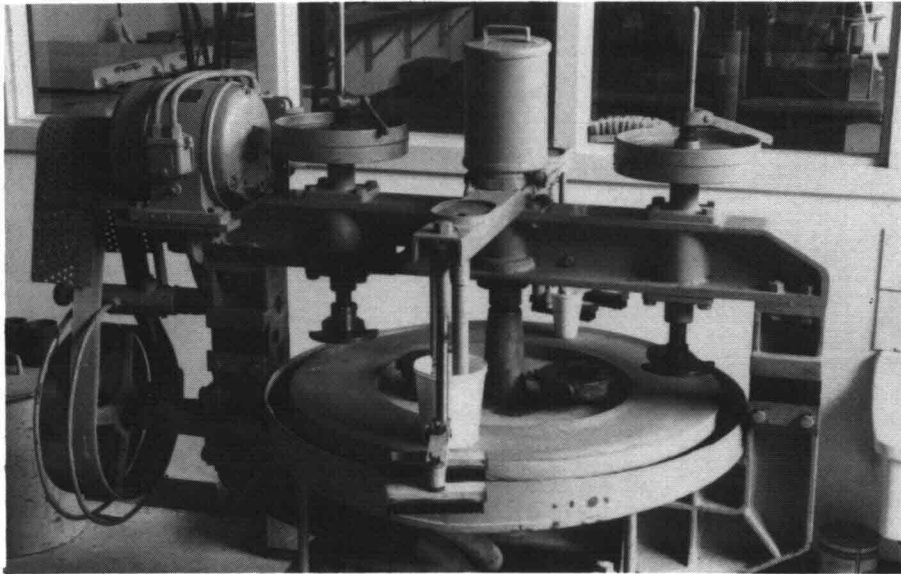


Foto 4 Proefopstelling slijpproef

De halve kuben zijn in een klimaatkamer opgeslagen onder identieke omstandigheden als de proefstukken die onderworpen zijn aan het erosieonderzoek (20°C , 99% RV).

Na het verzagen zijn de proefstukjes onder water bewaard.

Met het oog op een extra controlemogelijkheid op de diktemetingen zijn de proefstukjes vooraf gewogen. Daarna zijn telkens twee stukjes in de houders gemonteerd, waarna m.b.v. een schuifmaat - op voorgeschreven wijze - aan de vier hoekpunten de afstand bepaald is tussen de bovenkant van de houder en het slijpvlak.

Voor de aanvang van de proef wordt de slijpbaan bevochtigd en afgestreken met rubber.

Twee diametraal tegenover elkaar boven de baan gemonteerde reservoirs bevatten elk 125 gram Naxos amarilpoeder*, dat gedurende de proef, geleidelijk wordt toegevoegd. Hetzelfde geldt voor een totale hoeveelheid van 120 cm^3 water, dat uit een centraal geplaatst reservoir, eveneens op twee punten geleidelijk op de baan wordt gedruppeld. Twee paar borstels zorgen voor een goede verdeling van het natte slijpmengsel over de baan.

(* Naxos amarilpoeder no. 70, met een korrelgrootte van 0,3 mm)

De afslijping wordt gerelateerd aan 500 m slijpweg, die bereikt wordt door de machine zonder onderbreking 250 omwentelingen te laten maken. De proefstukken worden daarbij zodanig tegen de slijpschijf gedrukt dat een spanning in het grensvlak van $30 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ gehandhaafd blijft.

Na beëindiging van de proef worden de proefstukken in de klemmen afgespoeld en als tevoren opgemeten. De afname in de dikte is de afslijping, die in millimeters wordt opgegeven. Na demontage worden de proefstukken tenslotte weer gewogen.

4.2.3 Verwerking van de meetresultaten

De gemiddelde afslijping per proefstuk wordt bepaald uit de vier diktemetingen. Uit de 12, respectievelijk 24 gegevens per mengsel is een gemiddelde afslijping bepaald en de standaardafwijking van de individuele resultaten rond dit gemiddelde. Hiervoor zijn van toepassing de formules (afslijping aangeduid met d):

$$\bar{d} = \frac{12}{1} \sum_{i=1}^{12} d_i / 12 \quad (\text{resp. } \frac{24}{1} \sum_{j=1}^{24} d_j / 24)$$

$$s_{d_i}^2 = \frac{12}{1} \sum_{i=1}^{12} (d_i - \bar{d})^2 / 11 \quad (\text{resp. } \frac{24}{1} \sum_{j=1}^{24} (d_j - \bar{d})^2 / 23)$$

Vervolgens is de standaardafwijking van het gemiddelde bepaald m.b.v. de formule:

$$s_{\bar{d}} = s_{d_i} / \sqrt{12} \quad (\text{resp. } s_{d_j} / \sqrt{24})$$

Om te onderzoeken of de verschillende mengsels tot significante verschillen in de afslijping aanleiding hebben gegeven, is een t-toets toegepast. De formules luiden voor twee mengsels 1 en 2

$$t = \frac{\bar{d}_1 - \bar{d}_2}{s_0 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{zie litt. /46/})$$

$$s_0^2 = \frac{(n_1-1) s_1^2 + (n_2-1) s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Hierin zijn \bar{d}_1 en \bar{d}_2 de gemiddelde waarden voor de afslijping van mengsels 1 en 2, s_1 en s_2 de bijbehorende standaardafwijkingen rond die gemiddelde waarden.

De aanname is dat de standaardafwijkingen van de populaties identiek zijn en n_1 en n_2 de proefseriegrootten.

s_0 is een gemiddelde waarde voor de standaardafwijking ("pooled estimate"). Pas als voor twee mengsels de t-waarden volgend uit de experimenten een theoretisch berekende waarde overschrijden mag worden aangenomen dat het verschil met een zekere, voorafgekozen, waarschijnlijkheid niet bepaald wordt door de inherent aanwezige experimentele spreiding. Pas dan zijn verschillen als wezenlijk te onderkennen.

Voor deze theoretische grenswaarde wordt in tabellen gevonden voor $\alpha = 0,05$ (95% kans dat keuze terecht is) en $n = 12$:

$$t_{\alpha; 2n-2} = t_{0,05; 22} = 1,717$$

Evenzo voor $n_1=12$ en $n_2=24$, respectievelijk $n_1=n_2=24$:

$$t_{\alpha; n_1+n_2-2} = t_{0,05; 34} = 1,69$$

$$t_{\alpha; 2n-2} = t_{0,05; 46} = 1,68$$

Vanwege de geringe verschillen is eenvoudigheidshalve de waarde $t=1,7$ gehanteerd. Voor een 90% waarschijnlijkheid ($\alpha=0,10$) daalt de t-waarde tot 1,32 à 1,31.

Van dié mengselcombinaties waarvoor significante verschillen in de afslijpwaarde gevonden zijn is nagegaan welke betontechnologische verschillen hieraan ten grondslag zouden kunnen liggen. Hierbij valt de denken aan de "betonkwaliteit", uit te drukken in bv. de druksterkte na 28 dagen en een samenstellingsparameter als

toeslaghoeveelheid of toeslag-cementverhouding.

De verschillen in druksterktecijfers zijn eveneens per mengselcombinatie aan een t-toets onderworpen. Slechts die mengselcombinaties welke zowel significante verschillen in afslijpwaarden als in druksterktecijfers opleverden zijn in deze analyse opgenomen. De betrokken t-waarden (voor $n_1=n_2=3$, $n_1=3$ en $n_2=6$ en $n_1=n_2=6$) luiden:

$$t_{0,05;4} = 2,13$$

$$t_{0,05;7} = 1,90$$

$$t_{0,05;10} = 1,81$$

Wat de relatie van de afslijping met de toeslag-cementverhouding betreft zijn verschillen tussen mengsels in deze laatste grootheid niet onderzocht (men kan slechts een taxatie maken van de nauwkeurigheid in T/C-waarde). Ter compensatie is aan de verschillen in afslijpwaarden tussen twee mengsels een hogere eis gesteld. D.w.z. in eerste instantie zijn slechts die mengselcombinaties beschouwd, waarbij verschillen in afslijpwaarden met 99% waarschijnlijkheid als significant kunnen worden aangemerkt. Vervolgens zijn apart die mengselcombinaties behandeld welke de 99% onderschrijden maar de 97,5% waarschijnlijkheidsgrens overschrijden. De respectieve t-waarden voor beide gevallen luiden:

t	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,025$
$n_1=n_2=12$	2,51	2,07
$n_1=12; n_2=24$	2,45	2,04
$n_1=n_2=24$	2,41	2,02

Tenslotte zijn op een traditionele manier alle meetwaarden in een grafiek verzameld, waarna door lineaire regressie een verband is aan te geven. Hetzelfde is ter completering gedaan voor de relatie toeslaghoeveelheid en afslijping.

Zie voor uitgebreidere omschrijving rapport 1-79-1, /48/.

5. OMVANG VAN HET ONDERZOEK

Tot op heden zijn 15 mengsels in de erosie proefopstelling en op de slijptafel onderzocht. Bovendien zijn de bijbehorende controleproeven op de specie en het verharde beton uitgevoerd. De resultaten zijn uitgewerkt tot grafieken waaruit de slijtage in de loop van de tijd, de invloed van de betonkwaliteit en de invloed van de nabehandeling op die slijtage ontnomen kunnen worden.

6. HET ONDERZOCHE BETON

De eerste 6 mengsels sluiten nauw aan aan mengsels die voor de Oosterschelde in aanmerking zouden kunnen komen en die ontworpen zijn met alle kennis uit de literatuur en eigen ervaring. Bij de volgende drie mengsels werd getracht een lage sterkte en een hoge sterkte van het beton te verkrijgen om voor de interpretatie van de resultaten twee extremen te hebben en daardoor verschillende invloedsparameters duidelijker te kunnen aanwijzen.

Na beschouwing van de resultaten van deze 2 series erosieproeven bleken de verschillen in de onderzochte betonsoorten te klein te zijn. Besloten werd dan ook tot uitvoering van een derde serie proefnemingen waarbij zowel de cementhoeveelheden (hoogoven-A) als de watercementfactor wat sterker werden gevarieerd.

6.1 Samenstelling van de mengsels

Aan de hand van de stortgegevens zijn de mengselsamenstellingen gecontroleerd. Hieronder worden zij in tabel 6 vermeld. De verhouding zand/grind was 35/65% voor de mengsels 8, 9, 12, 13, 15. Voor de mengsels 1, 2, 3, 4, 6, 7, 11 en 14 was dit 38/62%.

TABEL 6 MENGSELSAMENSTELLINGEN

Serie	Mengsel	Mengselcode	Hoeveelheid cement (kg/m ³)	Water/cement faktor	Plastifi- ceerder gew.% tov. cement
1	1	3228155HA	281 HA	0,55	-
	2	3229648HAS	296 HA	0,48	0,400
	3	323075OHB	307 HB	0,50	-
	4	323035OHBS	303 HB	0,50	0,855
	5	8030637HAS	306 HA	0,37	0,855
	6	3236837HBS	368 HB	0,37	0,855
2	7	3226663HA	266 HA	0,63	-
	8	3233542HAS	335 HA	0,42	0,857
	9	3238443HAS	384 HA	0,43	0,858
3	10	8030338HAS	303 HA	0,38	0,855
	11	3226363HA	263 HA	0,63	-
	12	3233441HAS	334 HA	0,41	0,857
	13	3238043HAS	380 HA	0,43	0,858
	14	3226663HA	266 HA	0,63	-
	15	3222563HA	225 HA	0,63	-

HA = Hoogovencement klasse A

HB = Hoogovencement klasse B

Plastificeerder = Cretoplast SL. (Superplastificeerder)

N.B. Mengsels no. 5 en 10 zijn mengsels met een nom. maximum korrel van 80 mm, zg. grof-grind-mengsel.

6.2 Zeefanalyses

De volgende zeefanalyses zijn bepaald:

- a. Zeefanalyses van de toeslagmaterialen gebruikt in de betonmengsels;
- b. Zeefanalyses van het grind gebruikt als abrasiefmateriaal bij de proeven van serie 1;

De fijnheidsmoduli (NF) van het zand, grind en het mengsel van 35% zand en 65% grind zijn resp. 2,9 7,2 en 5,7.

Die van 38/62% resp. 3,1 7,2 en 5,6.

Een overzicht van de zeefanalyses van het abrasief materiaal uit serie 1 is vermeld in tabel 7.

Dit abrasief materiaal, riviergrind met een max. korrelgrootte van 31,5 mm, is volgens opgave van de leverancier "FIWES-Wessem" afkomstig uit de bovenloop van de Rijn.

Al deze monsters zijn aan het eind van een gebruiksduur van 20 uur op een tijdstip t na de start van de totale proef genomen. Na iedere cyclus van 20 uur is het grind steeds ververst. Op de tijdstippen 30, 50, 70 en 90 uur is echter ook gemeten maar is het gebruikte materiaal opnieuw ingebracht en gebruikt.

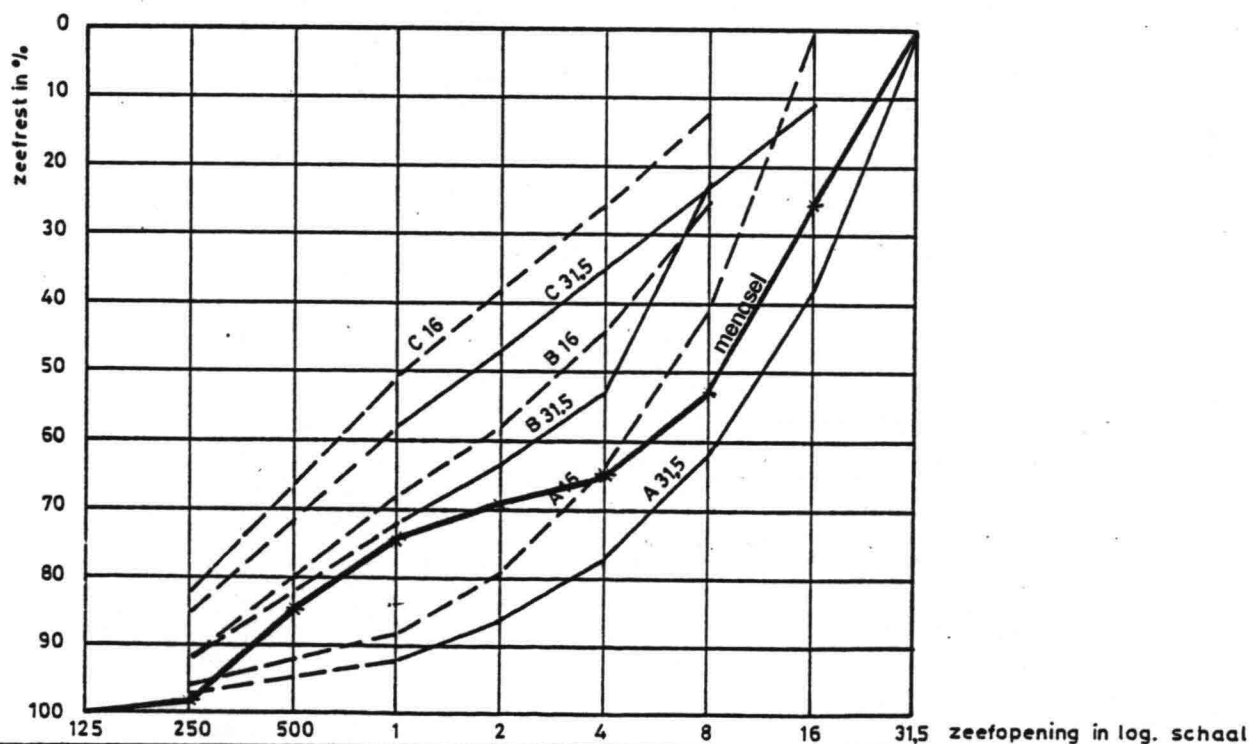
Het niet gebruikte materiaal is vermeld in kolom 1 onder $t = 0$.

TABEL 7 OVERZICHT ZEEFANALYSES ABRASIEF MATERIAAL (GEW.%) SERIE 1

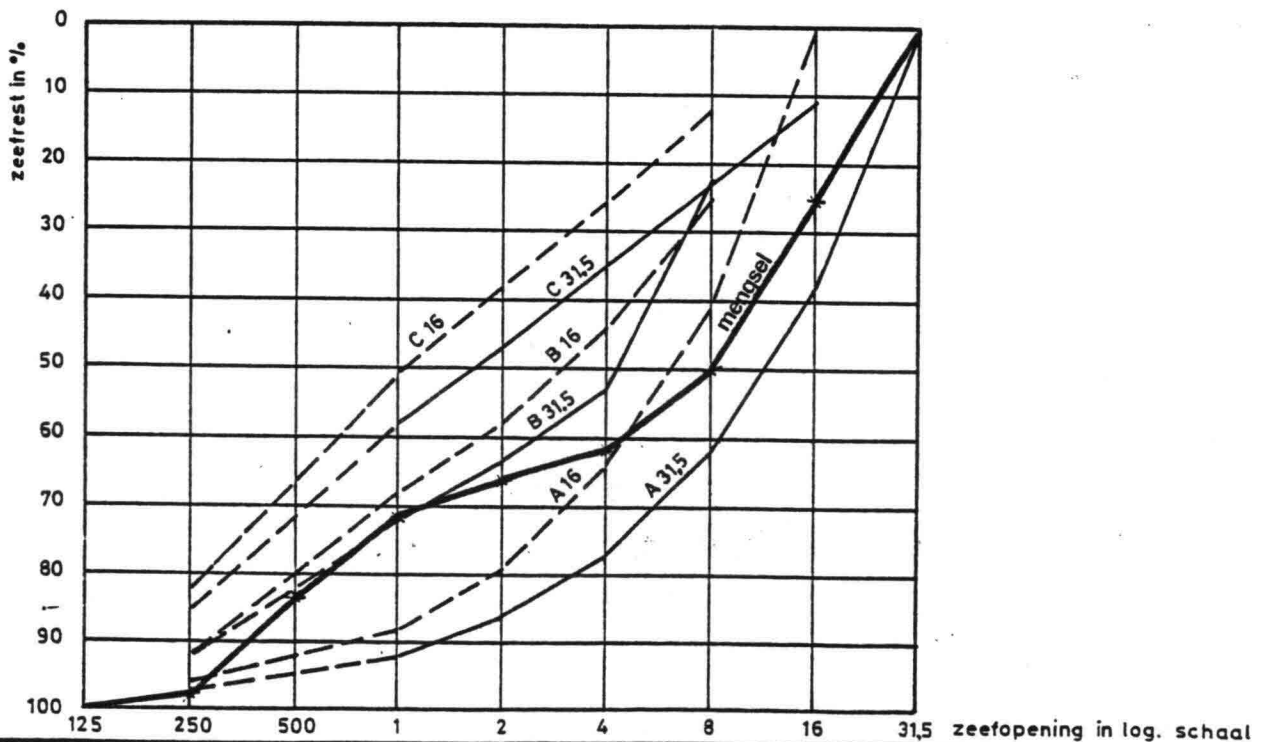
Fraktie	t=0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
16-31,5mm	42,0	46,2	40,1	45,2	43,7	20,7	26,6	28,6	29,7	28,0	39,5	30	38,4	26,7
8-16	56,8	48,7	54,3	48,7	48,2	73,5	69,0	64,9	64,5	64,7	56,1	66,2	58,8	64
4-8	1,1	5,1	4,8	5,8	7,3	5,2	3,4	5,0	3,9	4,7	3,5	3,4	2,3	7,6
2-4			0,5	0,2	0,5	0,4	0,6	0,9	1,0	1,4	0,4	0,2	0,2	0,8
1-2			0,2		0,3	0,1	0,4	0,5	0,8	1	0,3	0,1	0,1	0,6
0,5-1														
0,125	0,1	0,04	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,2	0,2	0,1	0,1	0,04	0,2

Hieronder volgen de zeefanalyses van de toeslagmaterialen gebruikt in de verschillende betonmengsels.

STEVINLAB. BETONKONSTRUKTIES				programma		EROSIE c37		N ^o 7702	
naam				mengsel		8, 9, 12, 13, 15			
stortdatum				ontkistdatum					
ZEEFANALYSE				STORTGEGEVENS					
zeven volgens N EN 2560	ZAND			GRIND			MENGSEL		
	GRAM	%	%cum.	GRAM	%	%cum.	Z 35 %	G 65 %	%
C 31,5									
C 16				2025	40,5	40,5		26,32	26,32
C 8				2010	40,2	80,7		52,45	52,45
C 4	28	2,8	2,8	820	16,4	97,1	0,98	63,11	64,09
2 mm	102	10,2	13,0	105	2,1	99,2	4,55	64,48	69,03
1 mm	132	13,2	26,2			100	9,17	65,0	74,17
500 μm	302	30,2	56,4			100	19,74	65,0	84,74
250 μm	381	38,1	94,5			100	33,07	65,0	98,07
125 μm	50	5,0	99,5			100	34,82	65,0	99,82
rest	5	0,5	X	40	0,8	X			X
totaal	1000	100	292,5	5000		717,5			568,68
NF			2,9			7,2			5,7



STEVINLAB. BETONKONSTRUKTIES				programma			EROSIE C37		N ^o 7702	
naam				mengsel			7, 11, 14			
stortdatum				ontkistdatum						
ZEEFANALYSE				STORTGEGEVENS						
zeven volgens NEN 2560	ZAND			GRIND			MENGSEL			
	GRAM	%	%cum.	GRAM	%	%cum.	Z 38 %	G 62 %	%	%
C 31,5										
C 16				2025	40,5	40,5		25,1	25,1	
C 8				2010	40,2	80,7		50,0	50,0	
C 4	28	2,8	2,8	820	16,4	97,1	1,1	60,2	61,3	
2 mm	102	10,2	13,0	105	2,1	99,2	4,9	61,5	66,4	
1 mm	132	13,2	26,2			100	10,0	62,0	72,0	
500 μm	302	30,2	56,4			100	21,4	62,0	83,4	
250 μm	381	38,1	94,5			100	35,9	62,0	97,9	
125 μm	50	5,0	99,5			100	37,8	62,0	99,8	
rest	5	0,5	X	40	0,8	X				X
totaal	1000	100	292,5	5000		717,5				555,9
NF			2,9			7,2				5,6



Grof-grind mengsel

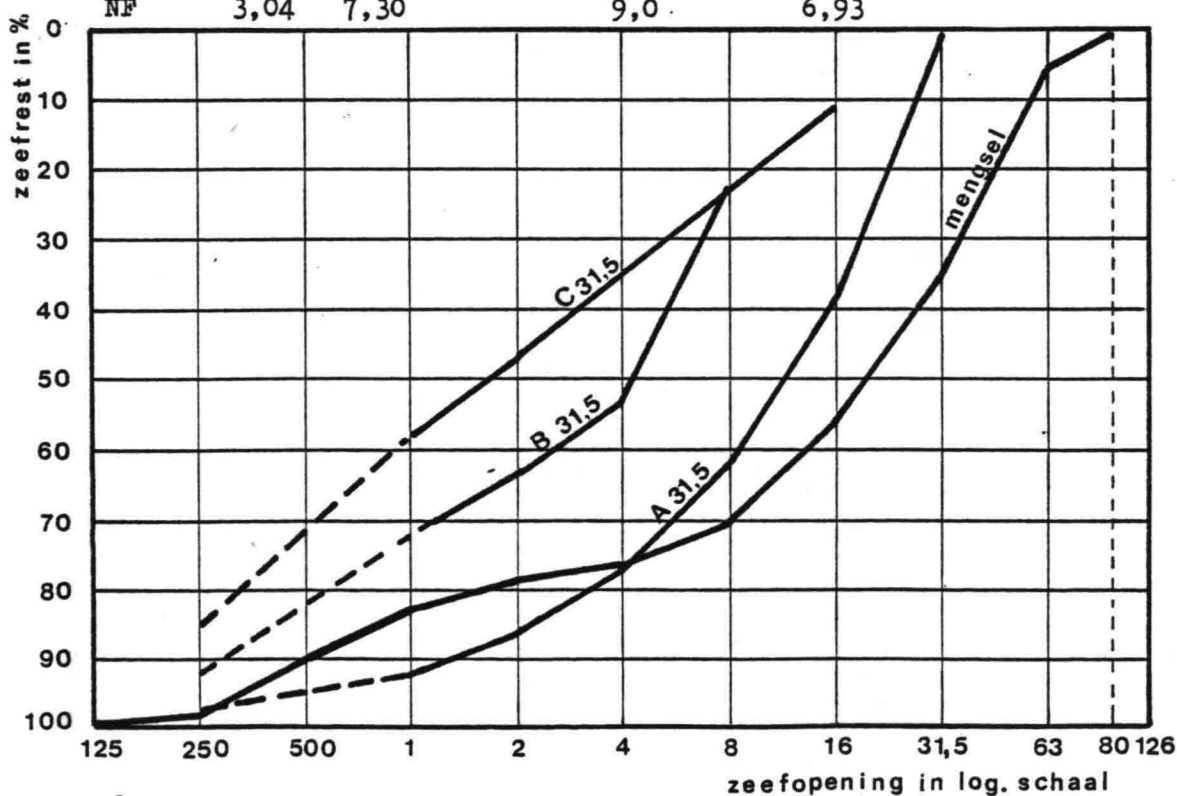
Zeefanalyse van het toeslagmateriaal gebruikt in het grof-grind-mengsel (mengsels 5 en 10).

Uit praktijkproeven en ervaringen op betoncentrales is gebleken dat het de voorkeur verdient om het toeslagmaterialenmengsel samen te stellen uit betonzand, grind 5-30 en grof grind 30-80. Met deze materialen werd gekozen voor een korrelverdeling volgens onderstaande tabel.

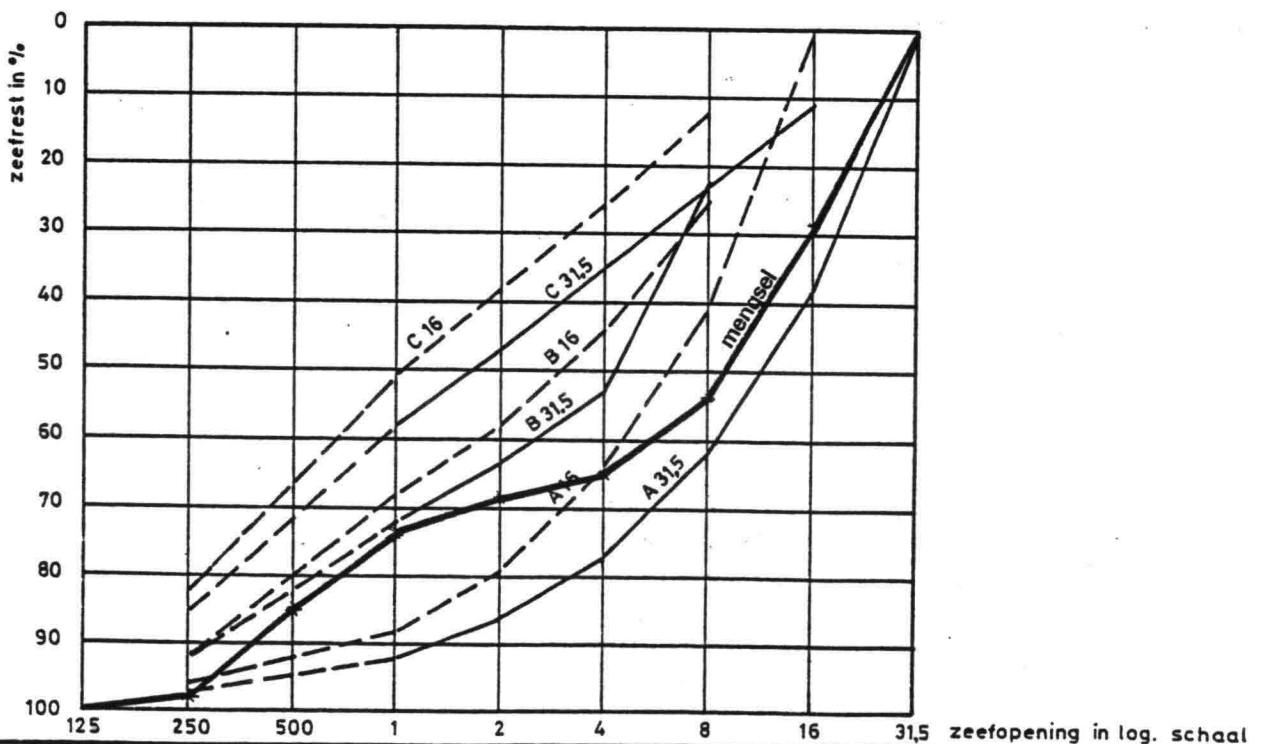
De verhouding zand : grind 5/30 : grind 30/80 was 25 : 35 : 40%.

TABEL 8 ZEEFANALYSE GROF-GRIND MENGSEL

Zeef	Zand	Grind 5/30	Grind 30/80	Mengsel
63	-	-	13	5,2
31,5	-	-	88	35,2
16	-	46	99	55,7
8	1	85	100	70,0
4	7	99	100	76,4
2	16	100	100	79,0
1	30	100	100	82,5
0,5	60	100	100	90,0
0,25	90	100	100	98,8
0,125	100	100	100	100
NF	3,04	7,30	9,0	6,93



STEVINLAB. BETONKONSTRUKTIES				programma		EROSIE C37		N ^o 7702	
naam				mengsel		1,2,3,4,6			
stortdatum				ontkistdatum					
ZEEFANALYSE				STORTGEGEVENS					
zeven volgens NEN 2560	ZAND			GRIND			MENGSEL		
	GRAM	%	%cum.	GRAM	%	%cum.	Z 38 %	G 62 %	%
C 31,5									
C 16				2320	46	46		28,5	28,5
C 8	6	0,6	1	1925	39	85	0,4	52,7	53,1
C 4	60	6	7	700	14	99	2,7	61,4	64,0
2 mm	90	9	16	45	1	100	6,1	62	68,1
1 mm	143	14,3	30			100	11,4	62	73,4
500 μm	296	29,6	60			100	22,8	62	84,8
250 μm	354	35,4	95			100	36,1	62	98,1
125 μm	46	4,6	100			100	38	62	100
rest	5	0,5	X	10		X			X
totaal	1000		309	5000		730			570
NF			3,09			7,3			5,7



6.3. Cement

Het voor de betonmengsels gebruikte hoogovencement klasse A of B van het merk ENCI-HOFANORM is geleverd door Rijkswaterstaat verpakt in zakken van 50 kg.

De normsterkte van het cement is bepaald na 7, 14 en 28 dagen en samengevat in onderstaande tabel (Bepalingen volgens NEN 3550).

TABEL 9 NORMSTERKTES CEMENT /N/mm²/

Hoogovencement klasse A						Hoogovencement klasse B					
Druksterkte			Buigtreksterkte			Druksterkte			Buigtreksterkte		
7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28 d.
25,6	34,7	35,3	7,0	5,7	9,0	35,6	42,4	53,3	7,0	8,3	9,3
28,4	35,0	39,4	6,8	5,7	8,3	35,9	41,9	51,7	8,5	8,5	8,0
29,4	36,9	39,3	6,0	5,7	7,5	32,2	43,8	49,8	7,0	8,0	8,0
27,6	36,5	38,1				34,4	43,4	51,8			
28,7	36,5	41,8				33,4	43,1	46,5			
26,1	37,2	38,0				33,5	44,1	53,7			
\bar{x} = 27,6	36,1	38,7	6,6	5,7	8,3	34,2	43,1	51,1	7,5	8,3	8,4

Deze normsterktes zijn bepaald door de vakgroep Materiaalkunde van de TH-Delft.

6.4. Vervaardiging van en metingen aan de verse specie.

Na het droog voormengen van toeslagmaterialen tezamen met de later toegevoegde hoeveelheid cement in een horizontaal opgestelde dwangmolen, werd de hoeveelheid water met de eventueel hierin opgeloste hulpstof (plastificeerder) toegevoegd en ca. 2 minuten intensief vermengd. Hierna werden de proeven op de verse specie volgens NEN 3861 uitgevoerd en de vormen voor de proefstukken gevuld. Voor de bekistingsvorm zie figuur 5.

De resultaten van de proeven op de verse specie zijn hieronder vermeld.

TABEL 10 STORTGEGEVENS

Stortnr.	Mengsel	Zetmaat mm	Walzmaat	Lucht%	Vol.massa	Triltijd sec.	Temp. °C	Datum
1	1	0	1,14	0,8	2371	60	20	2.9.11
5	2	45	1,10	1,4	2364	60	20	9.9.11
2	3	5	1,08	0,8	2378	60	20	5.9.11
3	4	190	1,00	1,7	2330	30	20	6.9.11
6	5	-	(1,25)	1,2	2433	60	20	12.9.11
4	6	100	1,08	3,2	2351	30	20	8.9.11
1	7	80	1,08	1,2	2371	60	17	5.12.11
1	7	150	1,11	1,1	2366	60	17	7.12.11
3	8	120	1,05	4,0	2301	30	17	9.12.11
4	8	100	1,08	3,8	2284	30	17	12.12.11
5	9	140	1,04	3,2	2333	30	18	14.12.11
6	9	200	-	3,6	2324	30	19	16.12.11
13	10	-	(1,21)	1,2	2417	60	18	13.6.12
14	11	100	1,11	1,0	2376	60	18	16.6.12
15	12	120	1,07	3,2	2321	30	18	20.6.12
16	13		1,01	3,1	2308	30	18	23.6.12
17	14		1,01	1,3	2361	30	18	27.6.12
18	15		1,13	1,7	2364	20	18	30.6.12

De Walzmaat van de mengsels 5 en 10 (grof-grindtoeslag) staat tussen haakjes omdat voor deze grote korrelafmeting de beproevingsmethode niet ideaal genoemd kon worden. Eveneens kon door de grote korrelafmetingen de zetmaat niet worden bepaald.

6.5. Nabehandeling

De proefstukken van de mengsels 1 t/m 6 en 10 t/m 15 zijn na het storten afgedekt om uitdroging te voorkomen. Na 1 of 2 dagen werden ze ontkist en gedurende tenminste 2 weken opgeslagen bij 20°C en 99% relatieve vochtigheid. Hierna werden zij (12 stuks) vervoerd naar het lab. voor vloeistofmechanica waar zij onder water werden bewaard.

Tijdens het vervoer en tijdens de metingen waren de proefstukken onderhevig aan uitdroging.

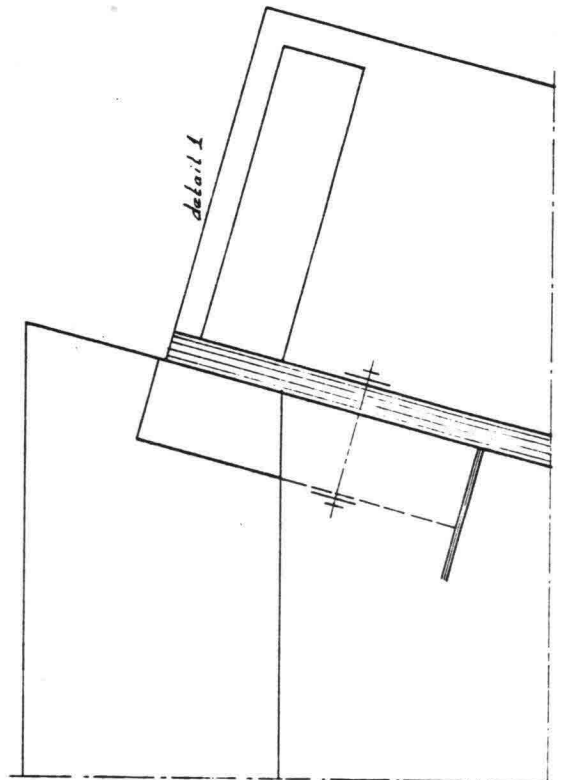
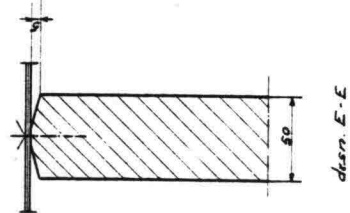
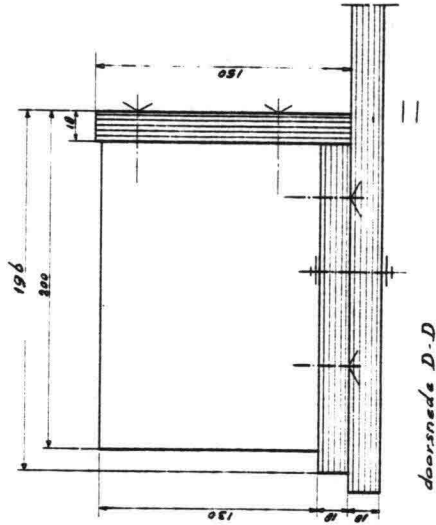
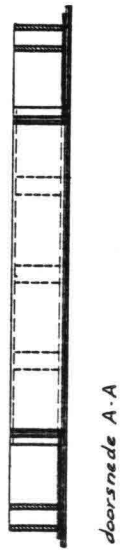
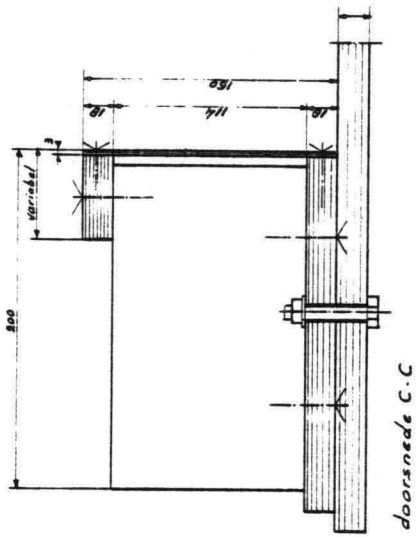
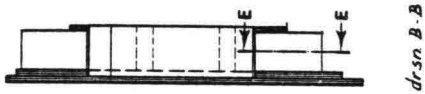
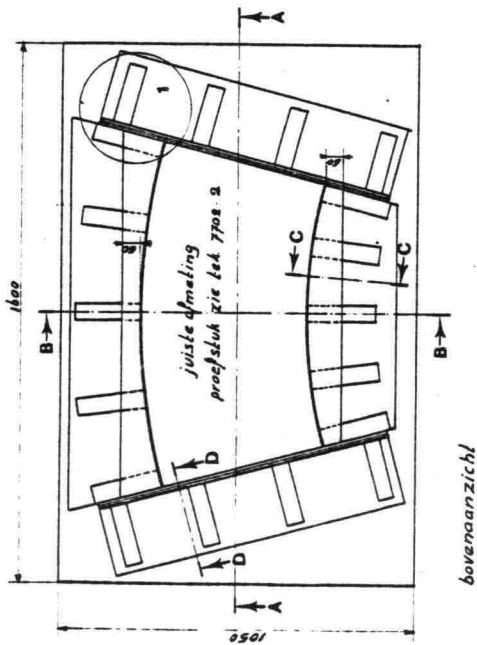
Bij de proefstukken van de mengsels 7 t/m 9 zijn ook 6 storts uitgevoerd. Per stort zijn steeds 2 proefstukken vervaardigd waarvan één dezelfde nabehandeling als hierboven omschreven onderging. Het andere proefstuk werd na het storten niet afgedekt en tot en met het vervoer naar het lab. voor vloeistofmechanica (ca. 4 weken na storten) opgeslagen in de hal bij ca. 20°C en 40 tot 50% RV.

Hierbij werd ervoor gezorgd dat het te beproeven oppervlak vrij werd geëxposeerd.

Op deze wijze werden van de mengsels 7 t/m 9 zes proefstukken die wél gedurende de eerste verhardingstijd waren nabehandeld en zes die géén nabehandeling hadden ondergaan, verkregen.

Door deze werkwijze werd een nieuwe parameter ingevoerd, nl. de nabehandeling. Uit het onderzoek zou moeten blijken of het al dan niet zorgvuldig afdekken of nat houden van bouwdelen invloed zou hebben op de mate van erosie.

Opgemerkt moet worden dat het beproevingsoppervlak van de proefstukken tijdens het storten aan de onderzijde van de vorm lag waardoor een glad oppervlak kon ontstaan.



school: 19 - 1:10	datum:	opm. uitgevoerd in betonnen triplex. Aanv. gestroomd buizen	
ontk.: T. Sluis	18-4-77	waterdicht verlijmd en geschroefd	
gezet:		met messings ankringen 1/2"	
gewijzigd:			
benaming:			

BEKISTING FIGUUR 5

STEVINLABORATORIUM
TH DELFT

beton constructies
formaat A2
Tek. no 7702 - 3

6.6. Druk-en slijttreksterkte van het beton.

Van ieder betonmengsel is de ontwikkelde druk-en slijttreksterkte na resp. 7, 14 en 28 dagen bepaald (vgl. VB-A, NEN 3861). In tabel 11 zijn deze samengevat.

De gemiddelde druksterktes zijn bepaald aan de hand van 3 proefstukken. De terksterkte na 7 dagen, is bepaald met 1 proefkub, na 14 dagen met 2 en de treksterkte na 28 dagen met 3 proefkuben.

TABEL 11 RESULTATEN DRUK-en SPLIJTTREKSTERKTES /N/mm²/

Mengsel	Mengselcode	f ₇	f ₁₄	f ₂₈	f ₇	f ₁₄	f ₂₈
1	3228155HA	24,5	30,9	37,2	1,9	2,2	2,6
2	3229648HAS	29,3	33,5	37,9	2,3	2,7	2,8
3	323075OHB	35,1	39,4	43,1	2,3	2,6	2,9
4	323035OHBS	32,5	37,4	41,3	2,5	3,0	2,8
5 ^{***}	8030637HAS	35,2	35,7	48,0	3,0	2,9	2,8
6	3236837HBS	42,3	46,6	47,7	2,9	3,4	3,6
7	3226663HA	20,8	25,9	31,2	1,8	2,5	2,6
7	3226663HA	16,8	20,6	24,1	1,6	1,8	2,3
8	3233542HAS	31,5	36,3	39,2	2,8	2,7	3,0
8	3233542HAS	32,0	37,8	40,1	2,9	3,2	2,8
9	3238543HAS	34,6	41,7	44,4	2,7	2,9	3,3
9	3238343HAS	31,2	35,7	39,1	2,6	2,6	3,4
10 ^{***}	8030338HAS	-	-	46,3	-	-	2,4
11	3226363HA	13,2	19,0 ^{**}	22,7	1,1	1,6 ^{**}	1,9
12	3233441HAS	33,4	36,2	40,5	2,0	2,9	2,8
13	3238043HAS	26,9 [≠]	31,3	35,4	2,3 [≠]	2,6	2,7
14	3227063HA	12,0	17,5	21,0	1,0	1,7	1,7
15	3222563HA	11,8	17,1	21,9	0,9	1,6	1,7

f = betondruksterkte, bepaald met kuben 150³mm³

f = betonslijttreksterkte, bepaald met kuben 150³mm³

*** = kuben 300³mm³

** = na 17 dagen

≠ = na 10 dagen

7. RESULTATEN VAN DE EROSIEPROEVEN

7.1. Massaverschillen voor en na de aantasting

De massabepaling zoals vermeld in par. 4.1.2. is zowel voor als na de erosieproeven uitgevoerd zodat een massaverschil kon worden berekend.

Deze massaverschillen zijn hieronder per plaat samengevat in tabel 12.

Om een indruk te geven van de hoeveelheid afgesleten boven water gewogen materiaal is het massaverschil vermenigvuldigd met de factor $2350/1350 = 1,74$. Dit "droge" massaverschil is vermeld in tabel 12 laatste kolom.

TABEL 12 MASSAVERSCHILLEN PROEFSTUKKEN /g/

Proefstuk	Mengsel	Gew.voor beproeving	Gew.na beproeving	Gewichtsverschil	"Droog"gew. verschil
1.1	1	97651	94529	3122	5435
1.2	1	94140	90427	3713	6463
2.1	3	99314	96221	3093	5384
2.2	3	98722	96129	2593	4514
3.1	4	96907	94036	2871	4998
3.2	4	98501	95850	2651	4615
4.1	6	98312	95137	3175	5527
4.2	6	98853	96331	2522	4390
5.1	2	97966	96296	1670	2907
5.2	2	98759	95675	3084	5368
6.1	5	101878	99211	2667	4643
6.2	5	101791	99789	2002	3485
2.1.1	7W	98730	93570	5160	8982
2.2.1	7W	96980	93220	3760	6545
2.3.1	8W	96310	92220	4690	7120
2.4.1	8W	96210	95050	1160	2019
2.5.1	9W	95810	91390	4420	7694
2.6.1	9W	94960	93000	1960	3411
2.1.2	7N	99300	93520	4780	8321
2.2.2	7N	96970	92720	4250	7398
2.3.2	8N	95650	92930	3720	6476
2.4.2	8N	95540	92670	2870	4996
2.5.2	9N	95700	93610	2090	3638
2.6.2.	9N	95220	93070	2150	3743
3.1.1	10	104040	101260	2780	4839
3.1.2	10	105300	101130	4170	7259
3.2.1	11	97540	96480	1060	1845
3.2.2	11	98190	93860	4330	7537
3.3.1	12	96360	93200	3160	5501
3.3.2	12	98190	90910	7280	12673
3.4.1	13	95570	92900	2670	4648
3.4.2	13	95330	91510	3820	6650
3.5.1	14	99070	93860	5210	9069
3.5.2	14	100980	96000	4980	8669
3.6.1	15	100210	97830	2380	4143
3.6.2	15	100650	95870	4780	8321

In tabel 13 zijn deze resultaten per mengsel samengevat.
 Na deling door de volumieke massa (2350 kg/m^3) en de oppervlakte $\hat{a} \frac{1}{12} \times \frac{1}{4} \pi (3980^2 - 3020^2) \text{ mm}^2$ wordt een indruk van de gemiddelde afslijting in mm, bepaald door weging, verkegen.

TABEL 13 GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL /g,mm/

Mengsel	Gew.verschil onder water	"Droog"gew. verschil	Gem.afslijting door weging/mm/	Gem.afslijting door meting /mm/
1	3418	5949	5,756	4,23
2	2377	4138	4,003	4,28
3	2843	4949	4,788	4,46
4	2761	4806	4,650	3,77
5	2335	4046	3,932	4,25
6	2849	4959	4,797	3,79
\bar{x}			4,654	4,198
s			0,663	0,256
7W	4460	7764	7,511	3,49
7N	4515	7859	7,604	5,36
8W	2625	4569	4,421	2,81
8N	3295	5736	5,549	2,57
9W	3190	5553	5,373	2,07
9N	2120	3690	3,570	2,23
\bar{x}			5,671	3,088
s			1,625	1,220
10	3475	6049	5,853	4,00
11	2695	4691	4,539	4,63
12	5220	9087	8,791	4,55
13	3245	5649	5,465	4,11
14	5095	8869	8,581	5,28
15	3580	6232	6,029	6,74
\bar{x}			6,543	4,885
s			1,739	1,016

Het niet eenzijdige verschil in resultaten tussen de gewichtsbepaling en de metingen met behulp van inductieve opnemers kan wellicht worden verklaard door de niet lineaire afslijting (kratervorming, niet lineaire dwarsdoorsnede, randeffecten, etc.)

7.2. Afslijting van het oppervlak, hoogteverschilmetingen

7.2.1 Gemiddelde afslijting serie 1

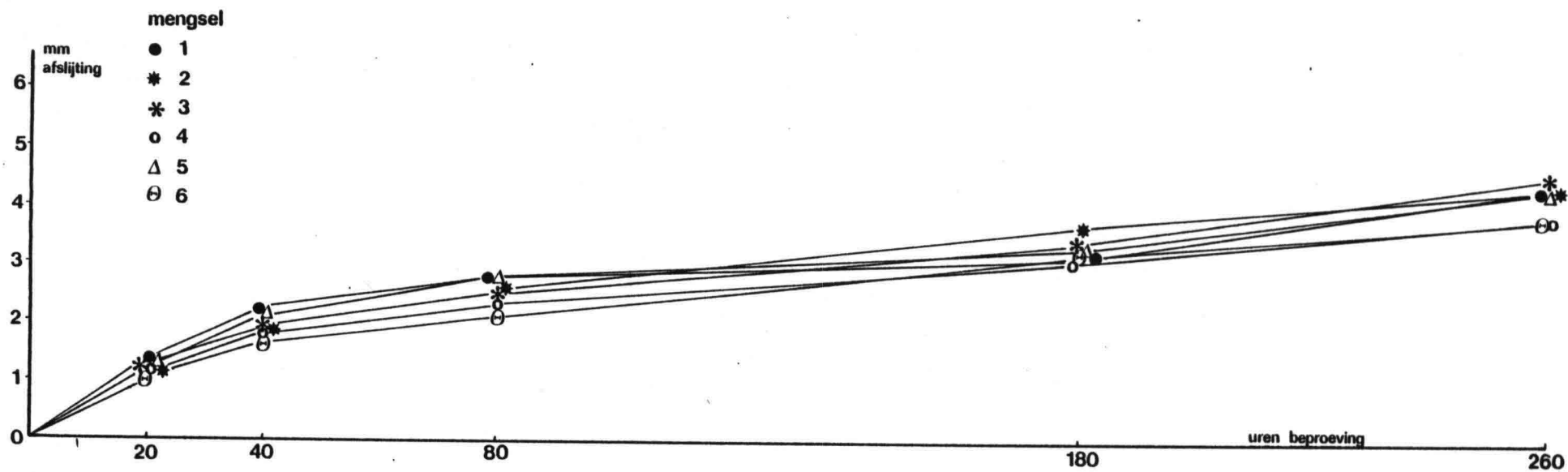
Uit de computeruitvoer zijn na enige correcties te hebben aangebracht de gemiddelde afslijtingen in mm per rij voor de tijdstippen van 20, 40, 80, 180 en 260 uur na de start van de proef, berekend.

Voor grafische voorstellingen van de meetresultaten per rij zie de bijlagen.

De totaal-gemiddelden per mengsel zijn in onderstaande tabel 14 vermeld. Deze waarden zijn uitgezet in de daaropvolgende grafiek (fig. 6). In tabel 15 zijn de mengsels in volgorde van de mate van erosie, zowel voor de gemiddelde als die voor de 95%-overschrijdingswaarde: samengevat. De 95%-overschrijdingswaarde is berekend volgens: $\bar{x} + 1,64s$

TABEL 14 TOTALE GEMIDDELDEN PER MENGSEL (48 MEETPUNTEN) SERIE 1.

Mengsel	20	40	80	180	260 uur
1	1,31	2,19	2,74	3,15	4,23
2	1,14	1,86	2,55	3,64	4,28
3	1,20	1,92	2,48	3,37	4,46
4	1,14	1,75	2,30	3,05	3,77
5	1,20	2,19	2,77	3,25	4,25
6	1,03	1,62	-	3,12	3,79



FIGUUR 6 gemiddelde afslijting per mengsel (ca.48 meetpunten per mengsel)

TABEL 15 VOLGORDE VAN DE MENGSELS VAN MIN. TOT MAX. EROSIE, SERIE 1

rij	Tijd /h /					opm.
	20	40	80	180	260	
1	316245	632415	634215	634152	643521	buitenrand
	632415	634125	634215	364125	342165	
2	625413	645231	546213	564123	542163	
	625431	625341	654321	654132	546123	
3	642531	642315	416235	124635	126435	
	642531	624315	421365	124635	126345	
4	536241	635241	635241	642453	641253	
	652314	562341	532641	421536	412356	
5	346251	463512	463512	465132	416352	binnenrand
	462531	465123	465312	641352	461352	

bovenste rij: t.o.v. het gemiddelde

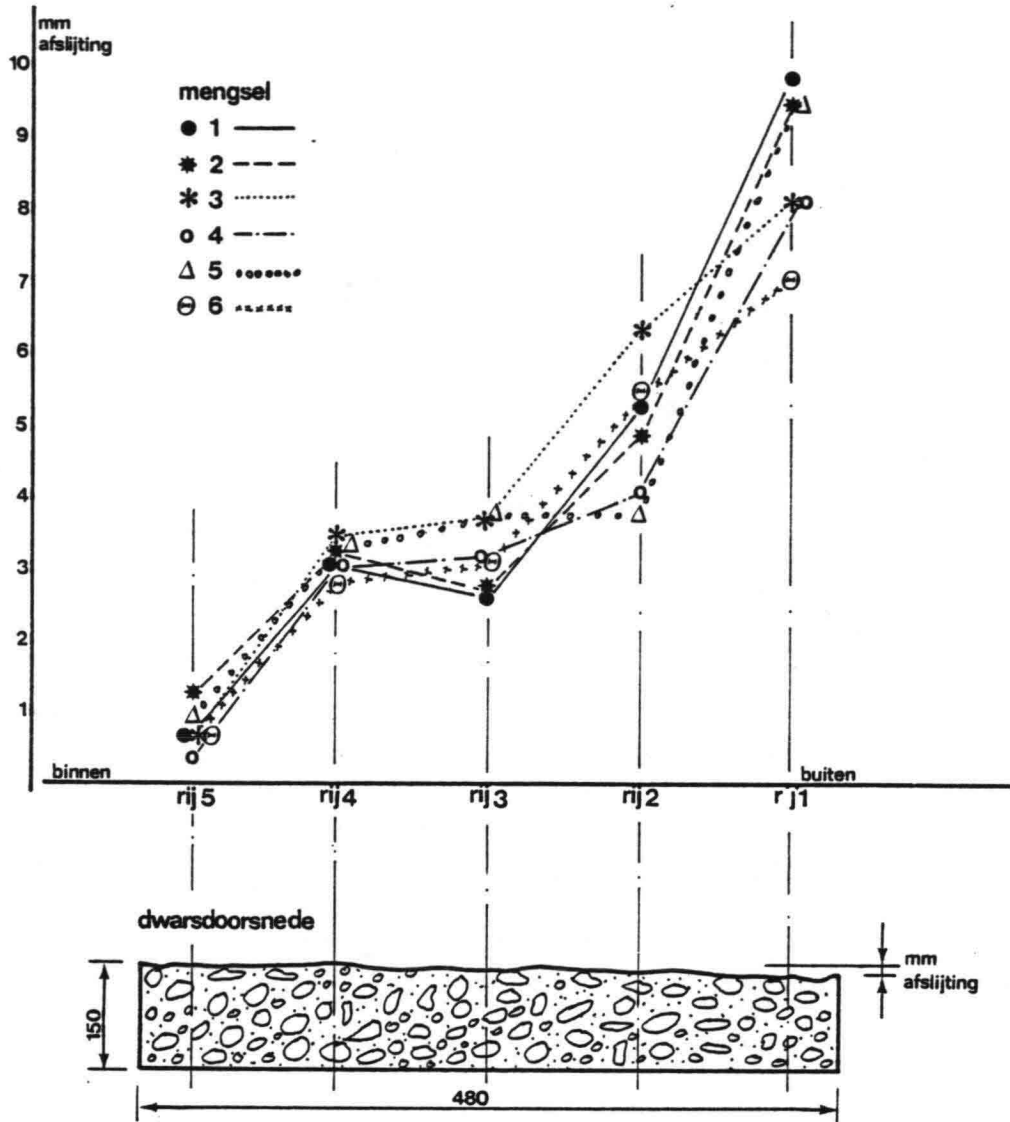
onderste rij: t.o.v. de 95% kans

Om een indruk te geven van het verloop van de aantasting over de dwarsdoorsnede zijn de gemiddelde gemeten waarden opgetekend in figuur 7 . Opgemerkt moet worden dat het gebied tussen de rijen 2 en 4 het meest stabiel is, zodat conclusies verbonden aan de mate van afslijting van de proefstukken, volgens dit figuur het beste uit de waarnemingen van de rijen 3 en 4 kunnen worden getrokken.

7.2.2 Gemiddelde afslijting serie 2

Evenals bij serie 1 zijn na enige correcties te hebben aangebracht de gemiddelde afslijtingen in mm per rij voor de tijdstippen 10, 20, 40, 80, 160 en 240 uur na de start van de proef uit de computeruitvoer berekend.

Voor grafische voorstellingen van de meetresultaten zie de bijlage. In de bijlagen betreft de codering W of N een proefstuk dat wel of niet is nabehandeld.



FIGUUR 7 verloop van de aantasting over de dwarsdoorsnede

In onderstaande tabel zijn de resultaten per mengsel voor de rijen 3 en 4 samengevat.

TABEL 16 SAMENVATTING GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSSEL (RIJEN 3 + 4)

Mengsel	tijd /h/					
	10	20	40	80	160	240
7W	1,18	1,45	1,91	2,38	3,26	3,49
7N	1,61	1,78	2,52	3,69	4,68	5,36
(8W	0,64	0,71	1,13	1,51	2,17	2,81)
8N	0,58	0,72	1,05	1,44	2,03	2,57
9W	0,68	0,80	1,07	1,36	1,77	2,07
9N	0,84	0,95	1,22	1,44	1,87	2,23 /mm/

7.2.3 Gemiddelde afslijtingsverschillen voor serie 1

In onderstaande tabel is de gemiddelde afslijting per rij 1,5 en het gemiddelde over de rijen 3 en 4 voor de mengsels 1 t/m 6 opgetekend, zowel voor 260 als voor 80 uur.

TABEL 17a

Mengsels:	Rij 1						Rij 5					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
\bar{x}_{260}	9,84	9,44	8,14	8,11	9,42	7,04	0,62	1,26	0,69	0,39	0,95	0,67
s 260	2,76	2,51	1,45	2,65	3,37	4,73	0,73	1,16	0,78	0,72	0,82	0,62
\bar{x}_{80}	5,35	4,88	4,16	4,76	5,86	3,42	0,66	0,72	0,43	0,22	0,65	0,43
s 80	2,66	2,02	0,86	1,63	3,25	0,95	0,44	0,48	0,53	0,37	0,38	0,36
s_v	3,83	3,22	1,69	3,11	4,68	4,82	0,85	1,26	0,94	0,81	0,90	0,72
X_v	4,49	4,56	3,98	3,35	3,56	3,62	-0,04	0,54	0,26	0,170	0,30	0,24
X_{VHx10^3}	24,9	25,3	22,1	18,6	19,8	20,1	-0,22	3,0	1,44	0,94	1,67	1,33
X95	10,8	9,84	6,74	8,45	11,2	11,5	1,36	2,60	1,81	1,50	1,78	1,42
X_{95Hx10^3}	59,9	54,7	37,5	47,0	62,4	64,1	7,54	14,4	10,0	8,32	9,90	7,87

TABEL 17b

	$\frac{1}{2}(\text{Rij } 3+4)$					
Mengels:	1	2	3	4	5	6
\bar{x}_{260}	2,84	2,92	3,55	3,14	3,52	2,99
s_{260}	0,78	1,04	1,43	1,36	1,47	1,36
\bar{x}_{80}	2,04	1,92	2,03	1,83	2,28	1,83
s_{80}	0,94	0,69	0,89	0,81	1,00	1,08
s_v	1,22	1,25	1,68	1,58	1,78	1,74
X_v	0,80	1,00	1,52	1,31	1,24	1,16
$X_{VH} \times 10^3$	4,44	5,56	8,44	7,28	6,89	6,44
X_{95}	2,80	3,05	4,28	3,91	4,16	4,01
$X_{95H} \times 10^3$	15,6	16,9	23,8	21,7	23,1	22,3

- \bar{x}_{260} = gemiddelde afslijting voor $t = 260$ uur
 s_{260} = bijbehorende standaardafwijking
 \bar{x}_{80} = gemiddelde afslijting voor $t = 80$
 s_{80} = bijbehorende standaardafwijking
 s_v = standaardafwijking van het verschil volgens
 $s_v^2 = s_{260}^2 + s_{80}^2$
 X_v = $\bar{x}_{260} - \bar{x}_{80}$ = gemiddelde verschil = ΔS
 X_{VH} = gemiddelde verschil per uur besproeving = $\Delta S / \Delta t$
 X_{95} = 95%-overschrijdingskans volgens $X_v + 1,64s_v = X_{95}$
 X_{95H} = 95%-overschrijdingskans per uur = $X_{95} / 180$

De berekening van statistische grootheden van gelijkwaardige meetseries (hier bijvoorbeeld de serie van rij 3 + serie van rij 4) verliep volgens:

$$s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \quad = \text{variantie per serie}$$

$$s_t^2 = \frac{1}{T} \left(\sum_{p=1}^{n_i} (x_p - \bar{x}_i)^2 + \dots \right) \quad = \text{var. voor meerdere series}$$

waarin $f_t = (\sum_{i=1}^t n_i) - 1$ = aantal vrijheidsgraden

$\bar{x}_t = \frac{\sum x_i n_i}{\sum n_i}$ = totaal gemiddelde, \bar{x}_i = gemiddelde per serie

n_i = aantal waarden per serie

zodat $s_t^2 = \frac{\sum_{i=1}^t (n_i - 1) s_i^2}{(\sum_{i=1}^t n_i) - t}$ = variantie voor meerdere series

Om een indruk te verkrijgen in de verschillen tussen de mengsels onderling is in onderstaande tabel het gemiddelde verschil over de rijen tussen de mengsels onderling opgetekend. Deze verschillen zijn per mengsel statistisch verwerkt. Als verschil is steeds de kolomwaarde - rijwaarde berekend. Hoe lager de absolute waarde van de variatiecoëfficiënt (VC%) des te aantoonbaarder is een systematisch verschil.

De variatiecoëfficiënt is berekend volgens $VC\% = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$

TABEL 18a GEMIDDELDE AFSLIJTINGSVERSCHILLEN NA 260 UUR

Mengsel	RIJ 1						RIJ 5					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	0	0,40	1,70	1,73	0,42	2,80	0	-0,64	-0,07	0,23	-0,33	-0,05
2	-0,40	0	1,30	1,33	0,02	2,40	0,64	0	0,57	0,87	0,31	0,59
3	-1,70	-1,30	0	0,03	-1,28	1,10	0,07	-0,57	0	0,30	-0,26	0,02
4	-1,73	-1,33	-0,03	0	-1,31	1,07	-0,23	-0,87	-0,30	0	-0,56	-0,28
5	-0,42	-0,02	1,28	1,31	0	2,38	0,33	-0,31	0,26	0,56	0	0,28
6	-2,80	-2,40	-1,10	-1,07	-2,38	0	0,05	-0,59	-0,02	0,28	-0,28	0
Σ	-7,05	-4,65	3,15	3,33	-4,53	9,75	0,86	-2,98	0,44	2,24	-1,12	0,56
\bar{x}	-1,18	-0,78	0,53	0,56	-0,76	1,63	0,14	-0,50	0,07	0,37	-0,19	0,09
s	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
vc%	-91	-139	205	194	-142	66	211	-61	412	81	-162	3,23

18b

$\frac{1}{2}(\text{RIJ } 3 + 4)$						
Mengsel	1	2	3	4	5	6
1	0	-0,09	-0,71	-0,30	-0,68	-0,15
2	0,09	0	-0,63	-0,22	-0,60	-0,07
3	0,71	0,63	0	0,41	0,03	0,56
4	0,30	0,22	-0,41	0	-0,38	0,15
5	0,68	0,60	-0,03	0,38	0	0,53
6	0,15	0,07	-0,56	-0,15	-0,53	0
Σ	1,93	1,42	-2,34	0,13	-2,16	1,03
\bar{x}	0,32	0,24	-0,39	0,02	-0,36	0,17
s	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
vc%	95	130	-79	1535	-85	181

Tussen de gemiddelde afslijtwaarden van de mengsels onderling is de t-toets uitgevoerd om op statistisch verantwoorde wijze eventuele verschillen aan te kunnen tonen.

Onderstaande tabel 19 laat zien met welk betrouwbaarheidspercentage verschil tussen de mengsels onderling (per rij) kan worden aangetoond.

In de daaronder staande tabel 20 wordt een en ander samengevat waarbij bij de bepaling van het gemiddelde getal de meest extreme waarde werd weggelaten.

Gesommeerd geven deze getallen het volgende beeld (berekend is het gemiddelde percentage verschil t.o.v. de andere mengsels per mengsel):

Mengsel	1	2	3	4	5	6
gem. betrouw. perc.						
van het aantoonbare verschil	54	61	68	56	61	54

TABEL 19 BETROUWBAARHEIDSPERCENTAGES VAN AANTOONBARE VERSCHILLEN
TUSSEN DE MENGSELS VAN SERIE 1 NA 260 UUR

Mengsel							73,1	Rij 1	buit.
							97,9	Rij 2	
5							66,8	Rij 3	
							42,1	Rij 4	
							58,0	Rij 5	binn.
						59,5	41,3		
						35,2	89,8		
4						44,5	12,7		
						34,4	21,3		
						87,6	61,8		
				2,2		65,7	45,9		
				98,6		99,7	83,0		
3				38,7		7,4	61,1		
				50,6		14,3	53,1		
				61,5		52,2	4,9		
		77,1		67,7		1,0	77,1		
		90,1		62,4		82,4	42,9		
2		87,7		57,8		89,9	72,6		
		31,3		19,0		16,1	31,8		
		78,4		93,9		50,0	80,3		
	22,6	84,6		75,6		20,1	79,8		
	36,4	86,2		87,5		96,9	10,3		
1	14,8	92,0		65,3		93,6	86,5		
	15,1	46,0		3,4		30,4	22,5		
	84,1	16,1		51,1		64,4	12,5		
	2	3		4		5	6		Mengsel

TABEL 20 SAMENVATTING BETROUWBAARHEIDSPERCENTAGES VAN
VERSCHILLEN

5					74 +
4				43 (-)	34 (-)
3			62 (+)	58 (+)	61 (+)
2		83 +	70 +	60 (+)	68 (+)
1	22 -	77 +	70 +	71 +	31 (-)
mengsels	2	3	4	5	6

- geen verschil (<25%)
- (-) nauwelijks v. (tot50)
- (+) iets v. (tot70)
- + duidelijk v. (≥ 70)

7.2.4 Gemiddelde afslijtverschillen voor serie 2

Ook voor serie 2 is deze t-toets uitgevoerd.
Zie verder de volgende tabellen.

TABEL 21 BETROUWBAARHEIDSPERCENTAGES VAN AANTOONBARE VERSCHILLEN
TUSSEN DE MENGSELS VAN SERIE 2 NA 240 UUR

Mengsel						92,7 16,4 11,0 63,7 43,9 42,2	Rij 1 buit. Rij 2 Rij 3 Rij 4 Rij 5 binn. Rij 3+ Rij 4
9W							
8N				42,9 32,0 28,0 99,8 19,8 93,5	72,9 46,8 16,4 96,8 61,8 78,1		
8W			78,2 21,1 54,6 29,4 99,8 57,4	94,7 5,9 71,5 96,0 99,4 97,7	12,0 18,7 63,3 87,9 99,4 92,2		
7N		100,0 99,5 99,9 95,0 77,9 100,0	100,0 99,6 99,9 99,0 88,7 100,0	100,0 99,7 100,0 100,0 81,3 100,0	100,0 99,7 100,0 99,9 63,0 100,0		
7W	76,6 67,3 98,8 90,1 10,2 99,8	99,7 99,4 95,4 52,2 85,4 94,6	99,9 99,7 98,3 88,2 87,0 99,6	100,0 99,7 98,9 99,9 78,4 100,0	99,8 99,7 98,4 99,4 57,4 100,0		
Mengsel :	7N	8W	8N	9W	9N		

TABEL 22 TOETSING RIJ3+RIJ 4
SAMENVATTING BETROUWBAARHEIDSPERC. VAN VERSCHILLEN

9W					42 (-)
8N				94 +	78 +
8W			57 (+)	98 +	92 +
7N		100 +	100 +	100 +	100 +
7W	100 +	95 +	100 +	100 +	100 +
mengsel	7N	8W	8N	9W	9N

- geen verschil (< 25%)
- (-) nauwelijks verschil (tot 50%)
- (+) iets verschil (tot 70%)
- + duidelijk verschil (\geq 70%)

Worden de verschillen van de 3e + 4e rij onderzocht naar de tijd om een eventuele invloed van de proefduur te kunnen constateren, dan levert dit de volgende tabellen. In de laatste tabel zijn deze percentages gemiddeld weergegeven. Er kan echter niet worden gekonkludeerd dat de aantoonbaarheid van de verschillen in erosie toeneemt met de proefduur hoewel een tendens aanwezig is. Het middengebied $20 < t < 160$ is echter, door het lage percentage en de hoge standaardafwijking daarvan, minder geschikt om konklusies aan te verbinden.

TABEL 23 BETROUWBAARHEIDSPERC. VAN VERSCHILLEN ONDERLING

Het betreft de metingen van de 3e en 4e rij per uren beproeving.

9W					84,9	10 uren
					74,5	20
					70,6	40
					31,8	80
					29,9	160
					42,2	240
8N				82,6	99,2	
				62,6	94,2	
				13,1	76,5	
				32,1	0,0	
				71,4	49,4	
				93,5	78,1	
8W			61,6	34,5	93,2	
			8,5	59,1	92,4	
			47,8	37,0	46,6	
			28,0	53,2	27,8	
			40,2	83,6	71,0	
			57,4	97,7	92,2	
7N		100,0	100,0	100,0	100,0	
		100,0	100,0	100,0	100,0	
		100,0	100,0	100,0	100,0	
		100,0	100,0	100,0	100,0	
		100,0	100,0	100,0	100,0	
		100,0	100,0	100,0	100,0	
7W	95,6	99,6	99,9	99,2	92,2	
	82,1	99,9	100,0	99,6	96,9	
	95,6	100,0	100,0	100,0	99,7	
	99,8	99,9	100,0	100,0	100,0	
	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0	
	99,8	94,6	99,6	100,0	100,0	
mengsel	7N	8W	8N	9W	9N	

TABEL 24 GEMIDDELDE PERCENTAGE VAN AANTONBAARHEID VAN
VERSCHILLEN HAAR DE TIJD.

Tijd	\bar{x}	s
10	89,5	18,5
20	84,6	25,3
40	79,1	29,3
80	68,2	41,5
160	83,0	24,8
240	90,3	17,7

7.2.5. Gemiddelde afslijtverschillen voor serie 3.

Ook voor serie 3 is deze t-toets uitgevoerd.

Zie verder de volgende tabellen.

TABEL 25 GEMIDDELDE AFSLIJTINGSVERSCHILLEN NA 240 UUR.
SERIE 3, $\frac{1}{2}(\text{RIJ } 3 + 4)$

Mengsel	10	11	12	13	14	15
10	0	-0,33	-0,17	-0,22	-0,70	-2,39
11	0,33	0	0,16	0,11	-0,37	-2,06
12	0,17	-0,16	0	-0,05	-0,53	-2,22
13	0,22	-0,11	0,05	0	-0,48	-2,17
14	0,70	0,37	0,58	0,48	0	-1,69
15	2,39	2,06	2,22	2,17	1,69	0
Σ	3,81	1,83	2,79	2,49	-0,39	-10,53
\bar{x}	0,64	0,31	0,47	0,42	-0,07	-1,76
s	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
vc%	140	287	192	215	-1371	-51

TABEL 26 BETROUWBAARHEIDSPERCENTAGES VAN AANTOONBARE VER-
SCHILLEN TUSSEN DE MENGSELS VAN SERIE 3 NA 240 UUR.

Mengsel	11	12	13	14	15
10 Rij 1	78,1	64,2	35,5	84,0	91,0
2	44,3	42,3	82,8	97,8	99,9
3	47,5	26,2	39,7	67,2	99,9
4	86,9	55,9	13,3	54,2	99,7
5	97,0	14,1	57,0	99,8	100,0
3 + 4	38,0	23,4	27,9	62,5	99,9
11 1		22,2	97,1	12,4	65,6
2		4,7	61,9	94,2	99,7
3		36,9	75,2	84,7	100,0
4		70,8	94,6	65,4	97,3
5		98,7	99,9	100,0	100,0
3 + 4		24,9	15,7	38,6	99,8
12 1			90,2	33,7	71,4
2			51,8	89,5	99,3
3			69,5	81,3	100,0
4			65,4	1,6	99,6
5			48,8	99,8	100,0
3 + 4			8,7	58,2	100,0
13 1				99,0	97,9
2				70,4	98,1
3				46,2	99,7
4				59,8	99,9
5				99,7	100,0
3 + 4				51,1	99,9
14 1					63,8
2					88,6
3					85,2
4					99,4
5					96,3
3 + 4					97,3

TABEL 27 SAMENVATTING BETROUWBAARHEIDSPERCENTAGES VAN
VERSCHILLEN VAN SERIE 3.
OVER DE RIJEN 1 t/m 5 NA 240 UUR.

14					87 ₊
13				75 ₊	99 ₊
12			65 ₍₊₎	76 ₊	94 ₊
11		57 ₍₊₎	86 ₊	86 ₊	93 ₊
10	71 ₊	47 ₍₊₎	54 ₍₊₎	81 ₊	98 ₊
Mengsels	11	12	13	14	15

- geen verschil ($<25\%$)
- (-) nauwelijks verschil (tot 50%)
- (+) iets verschil (tot 70%)
- + duidelijk verschil ($>70\%$)

Opmerking. Bij de bepaling van bovenvermelde percentages zijn de meest extreme waarden, bij bepaling van de gemiddelden over de rijen 1 t/m 5, weggelaten.

TABEL 28 IDEM OVER DE RIJEN 3 + 4.

14					97 ₊
13				51 ₍₊₎	100 ₊
12			9 ₋	58 ₍₊₎	100 ₊
11		25 ₋	16 ₋	39 ₍₊₎	100 ₊
10	38 ₍₋₎	23 ₋	28 ₍₋₎	63 ₍₊₎	100 ₊
Mengsels	11	12	13	14	15

7.3. Beschouwing over de werking van de erosie

Foto 5 toont de proefstukken van serie 1 nadat tijdens de 240 uren durende beproeving water met grind langs de oppervlakte van het beton is gestroomd.

De oppervlakte is ruw, er zijn holtes ontstaan, soms zijn korrels losgekomen, hoeken en kanten van de proefstukken zijn afgeboerd.

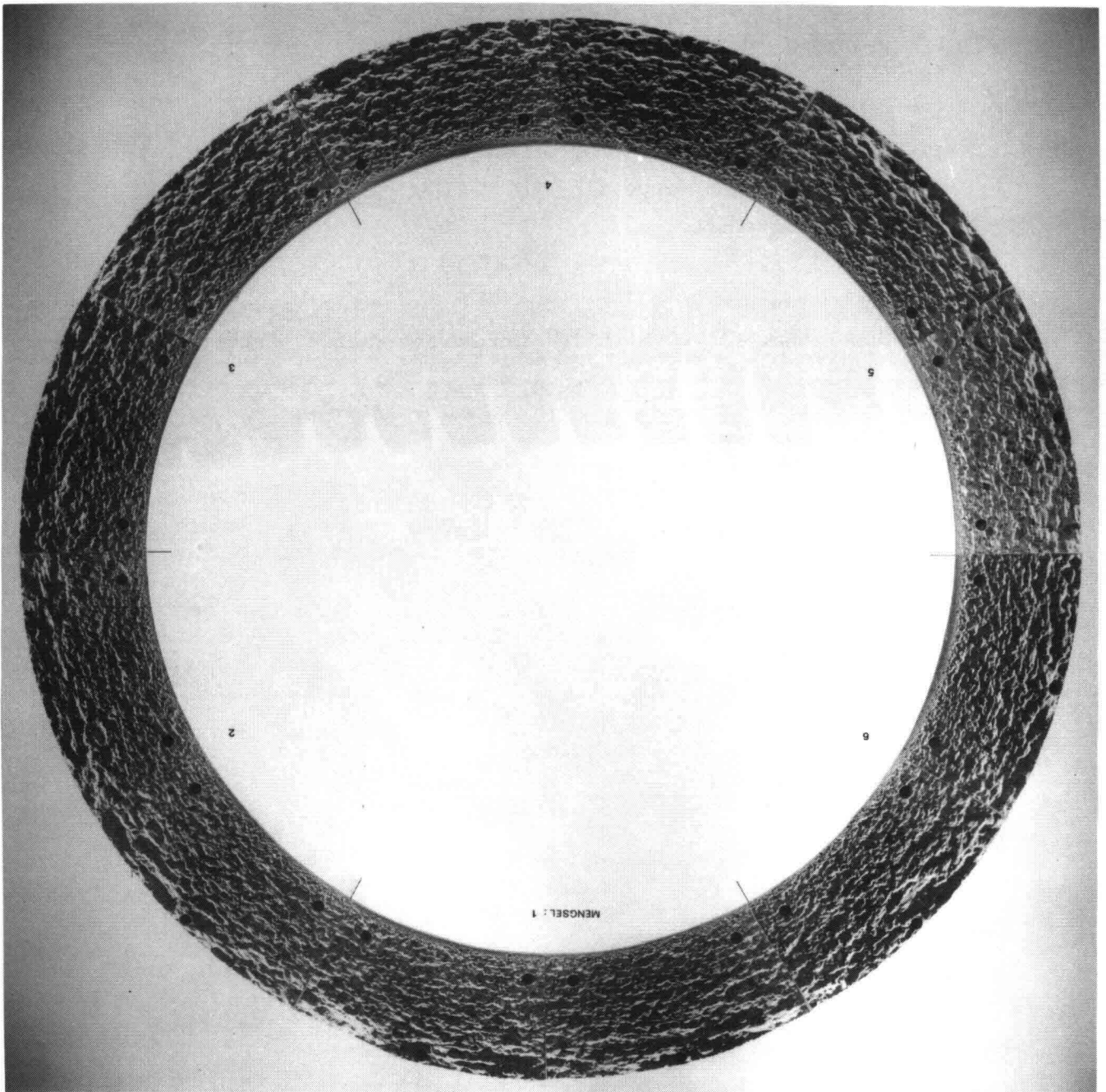


Foto 5 Proefstukken na de aantasting door erosie.

Aan de buitenkant van de goot is de invloed van de erosie het duidelijkst zichtbaar; Aan de binnenkant is weinig erosie opgetreden. Dit hangt samen met de stroming in de goot die niet gelijkmatig over de doorsnede is verdeeld. Door de grotere afstand t.o.v. het middelpunt is de stroming aan de buitenkant groter dan aan de binnenkant.

Eveneens ontstaat door centripetale krachten een hogere waterstand aan de buitenzijde waarvan een aan de bodem naar binnen en aan het wateroppervlak naar buiten gerichte spiraalvormige stroming het gevolg is. Grind zal dus aan de binnenkant opgenomen worden en aan de buitenzijde neerstorten.

Zonder op details te letten is een spoorvorming zichtbaar die hoofdzakelijk evenwijdig aan de gootwanden loopt. De sporen worden wél telkens weer door schuine geulen gesneden. Behalve deze lokale verdiepingen is over de gehele oppervlakte een aantasting, dus een verwijdering van materiaal ontstaan.

De werking van de erosie kan men zich als volgt voorstellen: de vaste deeltjes zover zij niet in suspensie zijn, zullen langs de oppervlakte schuren, soms rollen of springen.

Bij oneffenheden zullen de deeltjes tegen het beton aanbotsen en punten of kanten eraf kunnen stoten. Tevens kan bij hoge snelheden als gevolg van turbulentie een onderdruk in het water ontstaan die trekkrachten op het beton uitoefent. Hoe ruwer het oppervlak hoe eerder een dergelijk verschijnsel kan optreden. De belasting van het oppervlak is dus veelvoudig: schurend, stotend, trekkend. Elke komponent van het beton is aan deze belasting blootgesteld. Cementsteen en toeslagmateriaal. Bij de proeven in de goot waren de proefstukken zo geplaatst dat het bekiste oppervlak met het water en grind in aanraking kwam. Aan het bekiste oppervlak is de structuur van een beton anders dan middenin een doorsnede. Er zullen meer cementsteen en fijne bestanddelen van het toeslagmateriaal aanwezig zijn naarmate de afstand tot dit oppervlak kleiner wordt. De buitenhuid van het beton zal in hoofdzaak uit cementsteen en fijn materiaal bestaan.

De kans op de aanwezigheid van scheurtjes t.g.v. krimp en afkoeling is in deze zone het grootst.

Het verloop van de erosie in de tijd kan er dan zo uit zien: doordat de sterkte en dichtheid van de matrix (cementsteen plus fijne deeltjes) minder is dan die van het toeslagmateriaal valt te verwachten dat de buitenhuid sneller slijt dan een deel uit het midden van een stuk beton. Is de buitenhuid eenmaal verwijderd, dan moet, als de mate van erosiebelasting konstant blijft, de erosie met gelijkblijvende snelheid door blijven gaan. Anderzijds is het oppervlak glad waardoor de erosie minder sterk kan aangrijpen. Na een bepaalde tijd is het oppervlak opgeruwd en kunnen de grindkorrels beter tegen de blootgestelde toeslagkorrels aanbotsen waardoor de erosie wordt bevorderd. Er zijn dus tegenstrijdige effecten aan de gang. Uit de grafiek, fig. 6, blijkt echter dat het eerste effect (sterkte en dichtheid) meer invloed moet hebben gehad dan het tweede (gladheid).

In hoeverre de aantasting van een constructie in zee op dezelfde wijze verloopt als van de proefstukken in de goot is niet met zekerheid te zeggen. Doordat de grootte van de door het water meegevoerde materiaal in zee en dus de massa en de draagheid veel kleiner zijn zal de werking hoofdzakelijk schurend zijn en veel minder stotend. Kanten en hoeken van vrij gelegd toeslagmateriaal zullen dan waarschijnlijk niet afspringen, zij zullen echter langzaam afgesleten worden. De mate van afslijting en de kans of überhaupt een afslijting op gang kan komen hangt dan sterk af van de hardheid van het abrasief materiaal en het aangetaste materiaal. Het is aan te nemen dat cementsteen minder hard is dan het in zee meegevoerde materiaal maar dat het toeslagmateriaal (kwarts) even hard is als het materiaal in zee. Dit was ook bij de proeven in de goot het geval, alleen de grootte van de korrels verschilde.

Veronderstelt men dat in beide gevallen de cementsteen eerder aangetast wordt dan zou in zee de aantasting van het cementsteen sneller blijven gaan dan van het toeslagmateriaal doordat alleen scherpende werking optreedt, terwijl in de goot het zo kan zijn dat cementsteen én toeslagmateriaal even snel afslijten doordat de botsende werking de toeslagkorrels sneller doen afslijten dan schurende werking alleen.

Voordat men de proefresultaten t.a.v. grootte en tijdelijk verloop naar de werkelijkheid wil vertalen dan moeten de erosiemechanismen nog beter bestudeerd en onderzocht worden.

Op dit moment laten de resultaten alleen een onderlinge rangschikking toe, in de veronderstelling dat de mechanismen bij de proef en in werkelijkheid ongeveer overeen zullen komen.

8. EVALUATIE VAN DE RESULTATEN

8.1. Invloed van de betonkwaliteit

Ter bepaling van eventuele relaties tussen de betonsterkte en samenstelling op de toename van de erosie moeten eerst enige waarden worden berekend.

In onderstaande tabel 29 zijn de verschillende mengsels aangegeven met de daarbij toegepaste hoeveelheden cement alsmede de water/cementfactor en de met behulp van een 8 liter-vat gemeten volumieke massa van de verse specie. Uit deze waarden kan dan het gewichtsdeel toeslag per m³ beton worden berekend volgens $\text{vol. massa-cement} \times (1 + \text{wcf}) = \text{gew. toeslag}$. Eveneens is de gemiddelde betondruksterkte aangegeven.

TABEL 29 SAMENVATTING KENMERKEN PER MENGSEL

Mengsel	Series	Stortdat.	Code	Vol. massa	Cem. hoeve.	Wcf.	hoev. toesl.	f'_{b28}
1	1	2-9-77	3228155 HA	2371	281	0,55	1935	37,2
2	1	9-9-77	3229648 HAS	2364	296	0,48	1926	37,9
3	1	5-9-77	3230750 HB	2378	307	0,50	1918	43,1
4	1	6-9-77	3230350 HBS	2351	303	0,50	1897	41,3
5	1	12-9-77	8030637 HAS	2433	306	0,37	2014	48,0
6	1	8-9-77	3236837 HBS	2330	368	0,37	1826	47,7
7	2	5-12-77	3226663 HA	2371	266	0,63	1938	31,2
7	2	7-12-77	3226663 HA	2366	266	0,63	1933	24,1
8	2	9-12-77	3233542 HAS	2301	335	0,42	1825	39,2
8	2	12-12-77	3233242 HAS	2284	332	0,42	1813	40,1
9	2	14-12-77	3238543 HAS	2333	385	0,43	1782	44,4
9	2	16-12-77	3238343 HAS	2324	383	0,43	1776	39,1
10	3	13-6-78	8030338 HAS	2417	303	0,38	1999	46,3
11	3	16-6-78	3226363 HA	2376	263	0,63	1948	22,7
12	3	20-6-78	3233441 HAS	2321	334	0,41	1850	40,5
13	3	23-6-78	3238043 HAS	2308	380	0,43	1790	35,4
14	3	27-6-78	3227063 HA	2361	270	0,63	1922	21,0
15	3	30-6-78	3222563 HA	2364	225	0,63	1999	21,9
eenheid:				kg/m ³	kg/m ³	m/m	kg/m ³	N/mm ²

Voor de verschillende proefstukken zijn in de volgende tabel 24 het afslijtverschil, de druksterkte en de hoeveelheid toeslag samengevat. Voor serie 1 is het afslijtverschil per uur berekend uit de metingen bij 80 en 260 uur, voor serie 2 uit de metingen bij 80 en 240 uur. De codering W of N bij serie 2 duidt op een wel of niet nabehandeld proefstuk. De waarden zijn berekend als gemiddelden van de rijen 3+4.

TABEL 30 PARAMETERS RELATIE EROSIE-DRUKSTERKTE-HOEVEELHEID-TOESLAG

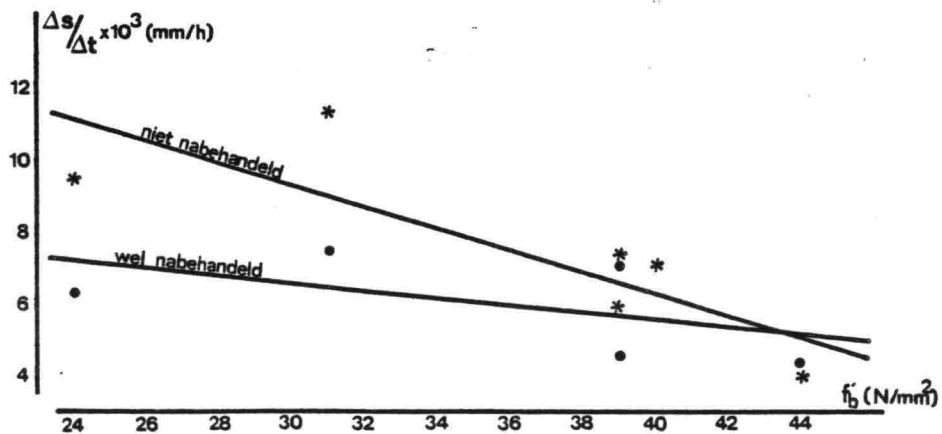
Proef- stuk	Meng- sel	Hoev. toesl.	Druk- sterkte	$\Delta s(80/260)$	$(\Delta s/\Delta t) \times 10^3$	Opmer- kingen
SERIE 1						
1.1	1	1935	37,2	3,23-1,98	6,94	
5.1	2	1926	37,9	3,08-1,80	7,11	
2.1	3	1918	43,1	4,27-2,06	12,28	
3.1	4	1897	41,3	3,39-1,82	8,69	
6.1	5	2014	48,0	3,62-2,30	7,31	
4.1	6	1826	47,7	2,52-1,63	4,94	
1.2	1	1935	37,2	2,44-2,11	1,81	
5.2	2	1926	37,9	2,76-2,03	4,03	
2.2	3	1918	43,1	2,80-1,99	4,50	
3.2	4	1897	41,3	2,88-1,84	5,78	
6.2	5	2014	48,0	3,41-2,26	6,39	
4.2	6	1826	47,7	3,44-2,04	7,78	
SERIE 2				$\Delta s(80/240)$		
2.1.1	7W	1938	31,2	3,90-2,69	7,56	
2.2.1	7W	1933	24,1	3,08-2,08	6,25	
2.3.1	8W	1825	39,2	2,66-1,45	7,56	
2.4.1	8W	1813	40,1	(2,97-1,55	8,88)	wordt genegeerd
2.5.1	9W	1782	44,4	2,08-1,39	4,31	
2.6.1	9W	1776	39,1	2,06-1,34	4,50	
2.1.2	7N	1938	31,2	5,12-3,30	11,40	
2.2.2	7N	1933	24,1	5,60-4,08	9,50	
2.3.2	8N	1825	39,2	2,74-1,60	7,13	
2.4.2	8N	1813	40,1	2,40-1,27	7,06	
2.5.2	9N	1782	44,4	2,00-1,36	4,00	
2.6.2	9N	1776	39,1	2,45-1,53	5,75	

- Vervolg: Tabel 30 Parameters relatie erosie- etc. etc.

Proef- stuk	Meng- sel	Hoev. toesl.	Druk- sterkte	$\Delta s(80/240)$	$(\Delta s/\Delta t) \times 10^3$	Opmer- kingen
SERIE 3						
3.1.1	10	1999	46,3	2,06	12,9	
3.2.1	11	1948	22,7	2,30	14,4	
3.3.1	12	1850	40,5	2,07	12,9	
3.4.1	13	1790	35,4	1,97	12,3	
3.5.1	14	1922	21,0	1,70	10,6	
3.6.1	15	1999	21,9	3,84	24,0	
3.1.2	10	1999	46,3	1,45	9,06	
3.2.2	11	1948	22,7	1,00	6,25	
3.3.2	12	1850	40,5	1,23	7,69	
3.4.2	13	1790	35,4	1,71	10,7	
3.5.2	14	1922	21,0	0,83	5,19	
3.6.2	15	1999	21,9	2,22	13,9	
eenheid:	kg/m^3	N/mm^2	mm	$(\text{mm/h}) \times 10^3$		

Voor serie 2 is in figuur 8 de erosietoename uitgezet tegen de kubusdruksterkte.

Wegens het sterke afwijken van het gemiddelde beeld van de waarde van proefstuk 2.4.1 wordt deze verder genegeerd.



Figuur 8 Toename van erosie versus betonsterkte

Via regressieanalyse zijn de volgende vergelijkingen voor bovenstaande lijnen opgesteld.

Voor de relatie tussen de erosie en de druksterkte van niet-nabehandelde proefstukken (opslag bij $\pm 20^{\circ}\text{C}$ en 40% RV-serie 2)

$$\begin{aligned}\text{lijn 1: } \Delta s / \Delta t &= 18,3 - 298 \times 10^{-3} \times f_b^{28} \quad \text{correlatiecoëff. } r^2 = \\ &= 681 \times 10^{-3} = 0,681\end{aligned}$$

Idem voor nabehandelde proefstukken (opslag bij 20°C en 98% RV-serie 2)

$$\begin{aligned}\text{lijn 2 } \Delta s / \Delta t &= 9,45 - 96 \times 10^{-3} \times f_b^{28} \quad \text{correlatiecoëff. } r^2 = \\ &= 231 \times 10^{-3} = 0,231\end{aligned}$$

Zonder al te veel de spreiding in resultaten in de beoordeling te betrekken kan onder voorbehoud worden geconcludeerd dat de erosie-toename afneemt bij hogere sterkte van het beton. Dit verschijnsel is sterker bij de niet-nabehandelde dan bij de wel-nabehandelde betonsoorten.

Een sterke goed-nabehandelde beton is dus minder gevoelig voor erosie.

Worden voor de series 1 t/m 3 de gemiddelden van de getallen uit de vorige tabel 30 berekend (met weglating van de resultaten van de niet-nabehandelde proefstukken) dan ontstaat de volgende tabel 31 voor de mengsels 1 t/m 15.

TABEL 31 SAMENVATTING STERKTE, HOEVEELHEID TOESLAG EN EROSIE-TOENAME PER MENGSEL.

Mengsel	f'_{28}	toeslag(T)	$\Delta s/\Delta t \times 10^3$
1	37,2	1935	4,38
2	37,9	1926	5,57
3	43,1	1918	8,39
4	41,3	1897	7,24
5	48,0	2014	6,85
6	47,7	1826	6,36
7	27,6	1935	6,91
8	39,6	1819	7,56
9	44,7	1779	4,41
10	46,3	1999	10,98
11	22,7	1948	10,33
12	40,5	1850	10,30
13	35,4	1790	11,50
14	21,0	1922	7,90
15	21,9	1999	18,95
eenheden:	N/mm^2	kg/m^3	mm/h

Voor grafische voorstelling van deze tabel zie figuur 9 en 10.

Via lineaire regressieberekening levert dit de volgende relaties (met bijbehorende correlatiecoëfficiënten).

$$\Delta s/\Delta t = 15,1 - 177 \times 10^{-3} \times f'_{28} \quad r^2 = 209 \times 10^{-3} = 0,209$$

$$\Delta s/\Delta t = -20,1 + 15 \times 10^{-3} \times T \quad r^2 = 97 \times 10^{-3} = 0,097$$

$$\Delta s/\Delta t = -4,98 - 157 \times 10^{-3} \times f'_{28} + 0,0101T \quad r^2 = 251 \times 10^{-3} = 0,251$$

Door de lage correlatiecoëfficiënten kunnen echter geen betrouwbare conclusies worden getrokken.

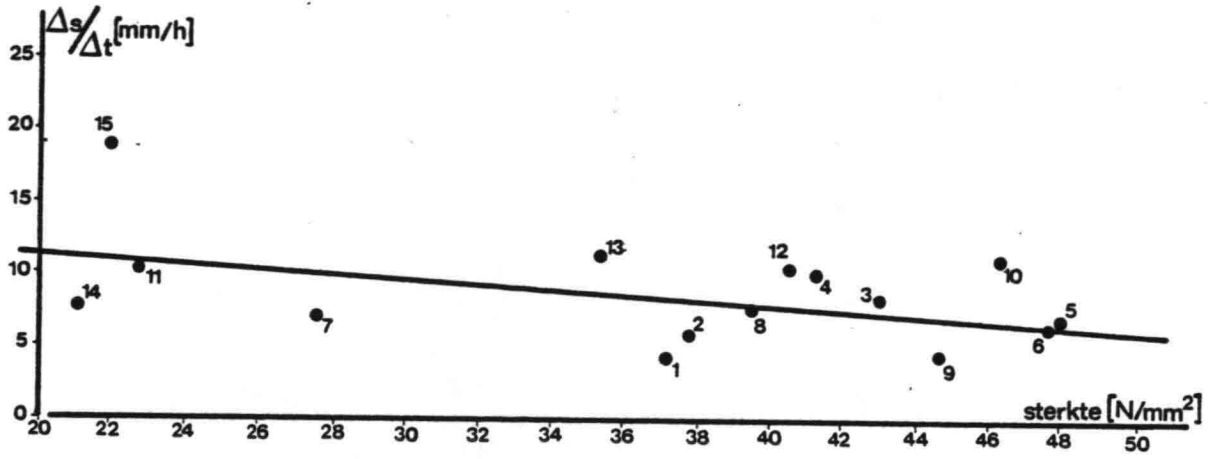


Fig. 9 Relatie toename erosie ($\Delta s/\Delta t$) met 28-daagse druksterkte.

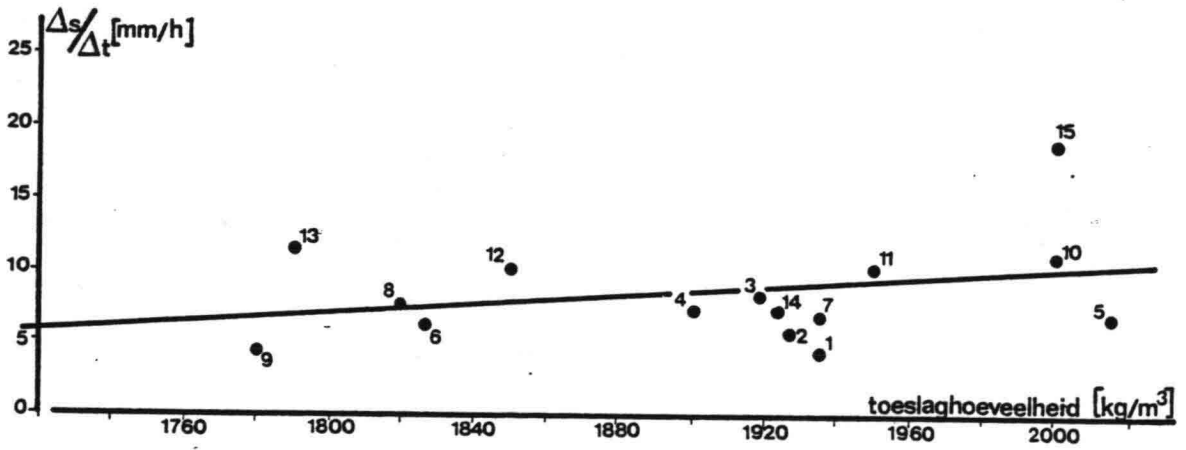


Fig. 10 Relatie toename erosie ($\Delta s/\Delta t$) met hoeveelheid toeslag per m³.

Voor serie 2 is de toename van de erosie voor het gebied rond de rijen 3 en 4 voor verschillende tijdstippen berekend. Dit levert de volgende tabel. Duidelijk is te zien dat de toename het grootst is in het begin en daarna nadert naar een limietwaarde zoals ook uit de figuren in de bijlagen blijkt.

TABEL 32 TOENAME EROSIË $\frac{\Delta s}{\Delta t} \times 10^3$ IN /mm/uur/ VOOR DE RIJEN 3+4

Mengsel	t1/t2=0/10	10/20	20/40	40/80	80/160	160/240	40/240	80/240
7W	118	27	23	12	11	3	8	7
7N	161	17	38	29	12	9	14	10
8W	64	7	21	10	8	8	8	8
8N	58	14	17	10	7	7	8	7
9W	68	12	14	7	5	4	5	4
9N	84	11	14	6	5	5	5	5

8.2. Invloed nabehandeling (alleen serie 2)

Ter bepaling van de invloed van de nabehandeling van de proefstukken zijn de volgende toetsen uitgevoerd:

- a) invloed kubusdruksterkte op de erosie van zowel nabehandelde als niet nabehandelde proefstukken;
- b) invloed nabehandeling op de mate van erosie bij 240 uur;
- c) mate van erosie op bepaalde tijdstippen en haar relatie tussen wel en niet nabehandelde proefstukken.

Voor het onder a) gestelde wordt verwezen naar de vorige paragraaf en het figuur 8. Hierin wordt onder voorbehoud geconcludeerd dat de toename van erosie bij niet nabehandelde proefstukken groter is dan bij wel nabehandelde. Dit verschijnsel is sterker naarmate de sterkte van het beton geringer is.

De invloed van de nabehandeling op de mate van aantasting op het tijdstip $t=240$ uur na de start van de proef, kan worden uitgedrukt in percentages. Wordt hierbij de erosie van een proefstuk op het tijdstip $t=240$ uur voor de rijen 3+4 op 100% gesteld dan kan de slijtage van de niet-nabehandelde proefstukken in procenten, worden berekend. Voor de niet-nabehandelde proefstukken lag dit erosieverschil gemiddeld ca. 20% hoger. Een en ander is samengevat in onderstaande tabel 27.

TABEL 33 AFSLIJTING IN mm (RIJEN 3+4) $\times 10^2$ EN TOETS NABEHANDELINGSINVLOED

Proef- stuk	Meng- sel	10	20	40	80	160	240 h	Toets	
2.1.1	7W	139	175	215	269	389	390	390 = 100%	
2.2.1	7W	96	115	167	208	262	308	308 = 100%	
2.3.1	8W	57	71	105	145	207	266	266 = 100%	
2.4.1	8W	72	90	120	155	227	297	297 = 100%	
2.5.1	9W	64	79	115	139	185	208	208 = 100%	
2.6.1	9W	72	80	99	134	169	206	206 = 100%	
2.1.2	7N	121	130	220	330	447	512	131%	
2.2.2	7N	200	227	283	408	489	560	182%	157%
2.3.2	8N	64	81	119	160	223	274	103%	
2.4.2	8N	52	62	92	127	183	240	81%	92%
2.5.2	9N	88	98	114	136	177	200	96%	
2.6.2	9N	80	91	129	153	198	245	119%	108%

CONCLUSIE: NABEHANDELING HEEFT INVLOED BIJ SLECHT MENGSEL (Nr. 7)
NABEHANDELING HEEFT GEEN INVLOED BIJ MENGSELS 8 EN 9.

Wordt gesteld dat de afslijting bij 240 uur 100% is dan kan de afslijting op eerdere tijdstippen in percentages worden uitgedrukt. Vergelijking van de gemiddelde percentages van de wel-of niet-nabehandelde proefstukken leert dat de slijtage, door wel of niet een nabehandeling bij het verharden van het beton toe te

passen, in de tijd niet afhankelijk is. Er mag hierdoor echter niet worden geconcludeerd dat niet nabehandeld beton altijd meer zal blijven slijten dan wel nabehandeld beton, de nabehandeling heeft immers op de sterkte van het beton binnenin veel minder invloed dan aan de buitenzijde. Voor deze vergelijking zie verder tabel 34.

TABEL 34 AFSLIJTING IN % (RIJEN 3+4) EN TOETS TIJDSAFHANKELIJKHEID NABEHANDELINGSINVLOED

Proefstuk	Mengsel	10	20	40	80	160	240 h	
2.1.1	7W	36	45	55	69	100	100%	
2.2.1	7W	31	37	54	68	85	100	
2.3.1	8W	21	27	39	55	78	100	
2.4.1	8W	24	30	40	52	76	100	
2.5.1	9W	31	38	55	67	89	100	
2.6.1	9W	35	39	48	65	82	100	
	\bar{x}_w	30	36	49	63	85	100	
	s	6.0	6.5	7.4	7.3	8.7	0	$\frac{\bar{s}}{s} = 7,2$
2.1.2	7N	24	25	43	64	87	100	
2.2.2	7N	36	41	51	73	87	100	
2.3.2	8N	23	30	43	58	81	100	
2.4.2	8N	22	26	38	53	76	100	
2.5.2	9N	44	49	57	68	89	100	
2.6.2	9N	33	37	53	62	81	100	
	\bar{x}_n	30	35	48	63	84	100	
	s	8.8	9.4	7.3	7.1	5.0	0	$\frac{\bar{s}}{s} = 7,5$

CONCLUSIE: INVLOED NABEHANDELING IS NIET TIJDSAFHANKELIJK
 nl. $\bar{x}_w = \bar{x}_n$

9. RESULTATEN VAN DE AFSLIJPPROEVEN.

De resultaten van de afslijpproeven voor wat betreft gemiddelde waarden en standaardafwijkingen zijn verzameld, tezamen met sterktecijfers en samenstellingsgrootheden in de tabellen 35 en 36.

Uitgaande van deze basisgegevens zijn diverse statistische bewerkingen zoals het bepalen van gemiddelden, standaardafwijkingen, toetswaarden, regressievergelijkingen en betrouwbaarheidsgrenzen uitgevoerd, met als parameters de afslijpwaarde, druksterkte, water-cement-factor, toeslag-cement-verhouding en de toeslaghoeveelheid. Een uitgebreide verhandeling is neergelegd in het rapport van P. Stroeven - Onderzoek naar de slijpweerstand van enige betonmengsels; Statistische evaluatie, Stevin-rapportnr. 1-79-1, jan. 1979 /48/.

Hierbij is uitgegaan van de gegevens en conclusies welke zijn samengevat in het rapport van L. Donker - Onderzoek naar de slijpweerstand van enige betonmengsels, Stevin-rapportnr. 1-78-1, nov. 1978 /47/.

In de volgende figuren zijn de afslijpwaarde-druksterkte-relatie (fig. 11), de afslijpwaarde-watercementfactor-relatie (fig. 12), de afslijping-toeslagcementverhouding-relatie (fig. 13) en de afslijping-toeslaghoeveelheid-relatie (fig. 14) samengevat.

Voor een getalmatige samenvatting zie de volgende tabel 37.

TABEL 35 BASISGEGEVENS; BETONKWALITEIT EN AFSLIJPING

Mengsel nummer	Aantal proefstukken n=3		Aantal proefstukken n=12 of \bar{x} n=24		
	f'_{28} (N/mm ²)	$s(f'_{28})$ (N/mm ²)	d (mm)	s(d) (mm)	$s(d)/\sqrt{n}$
1	37,2	0,61	1,45	0,08	0,023
2	37,9	0,68	1,38	0,11	0,032
3	43,1	0,27	1,49	0,16	0,046
4	41,3	1,32	1,45	0,12	0,035
5	48,0	2,67	1,44	0,22	0,064
6	47,7	1,38	1,27	0,12	0,035
7	31,2 en 24,1	1,07 en 0,79	1,47 [±]	0,18 [±]	0,037 [±]
8	39,2 en 40,1	2,33 en 0,32	1,35 [±]	0,16 [±]	0,033 [±]
9	44,4 en 39,1	1,08 en 0,78	1,36 [±]	0,19 [±]	0,039 [±]
10	46,1	1,18	1,35	0,17	0,049
11	22,7	0,32	1,67	0,16	0,046
12	40,5	0,16	1,79	0,18	0,052
13	35,4	0,91	1,66	0,19	0,055
14	21,0	0,62	2,17	0,19	0,055
15	21,9	0,37	1,95	0,12	0,035

TABEL 36 BASISGEGEVENS; MENGSELKARAKTERISTIEKEN

Mengsel	vol. massa kg/m ³	cem. hoev. kg/m ³	wcf. m/m	toesl. hoev. kg/m ³
1	2371	281	0,55	1935
2	2364	296	0,48	1926
3	2378	307	0,50	1918
4	2351	303	0,50	1897
5	2433	306	0,37	2014
6	2320	368	0,37	1826
7	2371	266	0,63	1938
7	2366	266	0,63	1933
8	2301	335	0,42	1825
8	2284	335	0,42	1813
9	2333	332	0,43	1782
9	2324	332	0,43	1776
10	2417	303	0,37	2002
11	2376	263	0,63	1947
12	2321	334	0,42	1892
13	2308	380	0,43	1765
14	2361	270	0,63	1921
15	2364	225	0,63	1997

TABEL 37 OVERZICHT VAN RELATIES TUSSEN DE AFSLIJPWAARDE
d EN DE VERSCHILLENDE BETONMENGSELPARAMETERS.

Relatie	fig.	a	b	$s_{\bar{d} x}$	$s_{d x}$
$d-f'_{28}$	12	2,3091	-0,0206	0,19	0,23
d-wcf	13	0,8086	1,5109	0,22	0,25
d-t/c	14	0,8898	0,1042	0,23	0,26
d - t	15	0,2693	0,0007	0,23	0,26

waarin:

d = afslijpwaarde in mm

a = factor uit regressievergelijking $d = a + bx$

b = regressiecoëfficiënt uit $d = a + bx$

$s_{\bar{d}|x}$ = halve 68% betrouwbaarheidsinterval voor mengsel-
gemiddelden (bestaande uit 12 proefresultaten)

$s_{d|x}$ = halve 68% betrouwbaarheidsinterval voor individuele
proefresultaten.

Van de in /47/ gegeven conclusies kan nu nader gepreciseerd worden, dat van de daar onderzochte relaties, slechts die van afslijpwaarden met respectievelijk de betondruksterkte, de w/c-factor en de t/c-verhouding een onderlinge afhankelijkheid laten zien. Dat wil zeggen, de regressiecoëfficiënt is voldoende groot ten opzichte van de breedte van het betrouwbaarheidsinterval om als significant te kunnen worden aangemerkt. Van de relatie afslijpwaarden versus toelaghoeveelheid moet daarentegen erkend worden dat geen onderlinge afhankelijkheid is aangetoond; de breedte van het betrouwbaarheidsinterval wettigt niet de verwachting dat een bescheiden gunstig effect zal uitgaan van een verlaging van de toelaghoeveelheid.

Vergelijking van de figuren (13 en 14) maakt nu de conclusie mogelijk, dat een daling van de hoeveelheid cement bij toename van de t/c-verhouding (uitsluitend) debet moet zijn aan de toename in de afslijpwaarden. Daling van de betonkwaliteit gaat min of meer hand in hand met een afname van de cementhoeveelheid bij de gebruikte "praktijkmengsels". De druksterkte versus afslijpwaardegrafiek toont dan ook het verwachte verloop: daling van de betonkwaliteit resulteert in een toenemende afslijping.

Evident is nu dat het effect van toevoeging van een plastificeerder (fig. 15) niet significant is. De afstand tussen de regressielijnen van de mengsels met en zonder plastificeerder is kleiner dan $s_{d|x}$.

Aan de textuur van de geslepen oppervlakken valt nog het volgende te ontlenuen. Een afnemende matrixkwaliteit (hogere w/c-factor, lagere cementhoeveelheid) veroorzaakte bij het slijpen een toenemende ongelijkmatigheid in de textuur van het matrixoppervlak; kleine zandkorrels raakten los, langs de randen van de grotere (grind)korrels werd de (nog slechtere?) matrix uitgeslepen. Dit verschijnsel is zelfs zichtbaar bij vergelijking van twee niet zo extreme mengsels als 3 (C=300, w/c=0,5) en 6 (C=375; w/c=0,37).

Veel duidelijker was deze ongelijkmatige afslijping zichtbaar bij bijvoorbeeld mengsel 14 (C=270; w/c=0,63). Het zo vrijkomende afgeslepen materiaal zal ongetwijfeld de afslijping vergroot hebben. Mengsel 14 valt danook onevenredig ongunstig ten opzichte van de gemiddelde trends in de grafieken van de figuren 12-14 (in alle gevallen buiten de 68% betrouwbaarheidsintervallen).

Mengsel 11, met dezelfde samenstelling als 14, valt goed. In dit geval zijn de proefstukken evenwel tweemaal zolang getrild (60 sec. in plaats van 30 sec.). De grotere verdichting compenseert de kwaliteitsvermindering ten gevolge van een daling van de cementhoeveelheid of een stijging van de w/c-factor. Opvallend is dat alle korter (30 sec.) getrilde mengsels (12 t/m 15) aan de ongunstige kant van de regressielijnen vallen (zie figuren 11-13).

De resultaten van de grofgrindbetonmengsels (5 en 10) vallen zeer dicht bij de regressielijnen. Dit materiaal gedraagt zich analoog aan de andere mengsels.

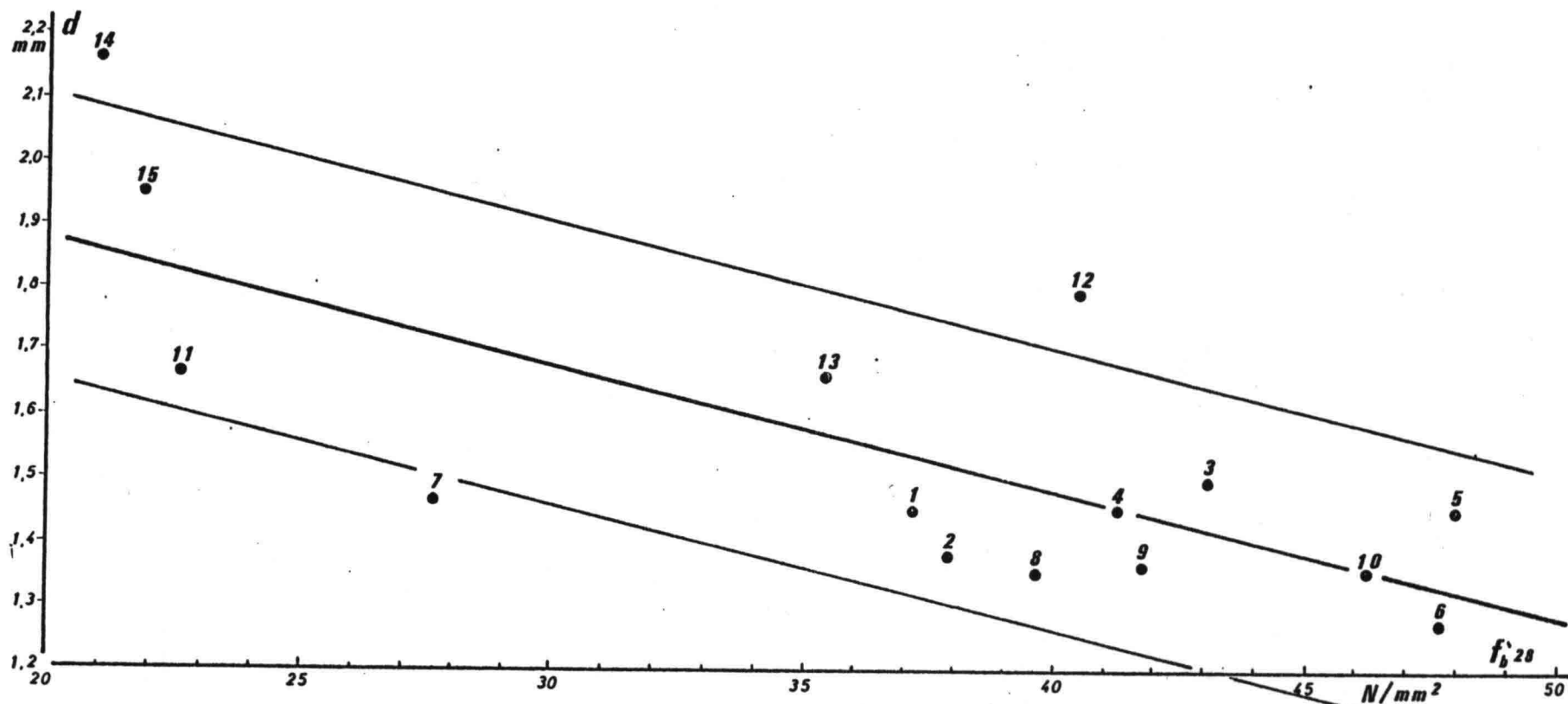


Fig. 11 Relatie betonkwaliteit (f'_{28}) en afslijping (d).

De regressielijn en de 68% betrouwbaarheidsgrenzen zijn aangegeven. De punten representeren gemiddelde waarden voor de respectieve mengsels.

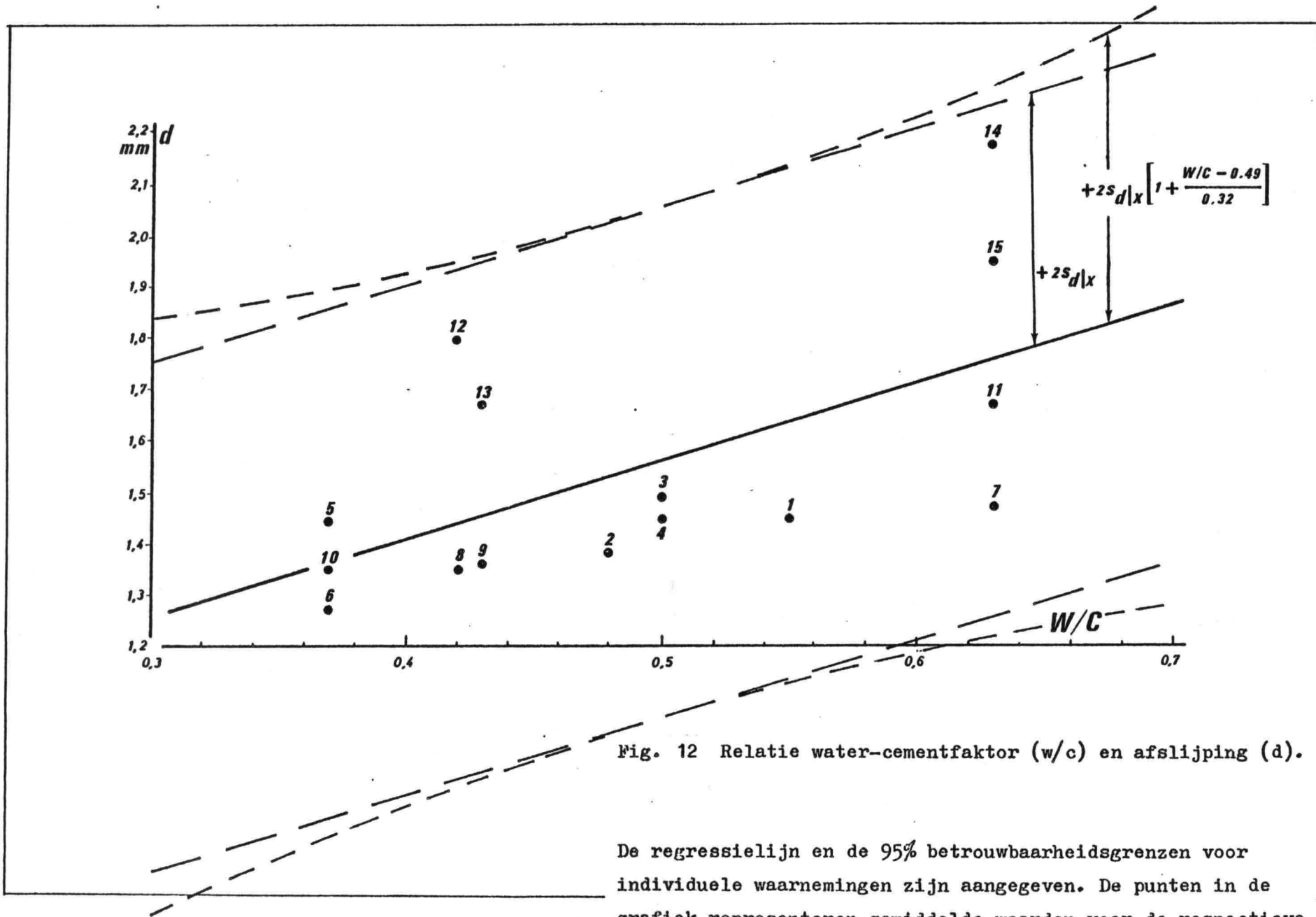


Fig. 12 Relatie water-cementfaktor (w/c) en afslijping (d).

De regressielijn en de 95% betrouwbaarheidsgrenzen voor individuele waarnemingen zijn aangegeven. De punten in de grafiek representeren gemiddelde waarden voor de respectieve mengsels.

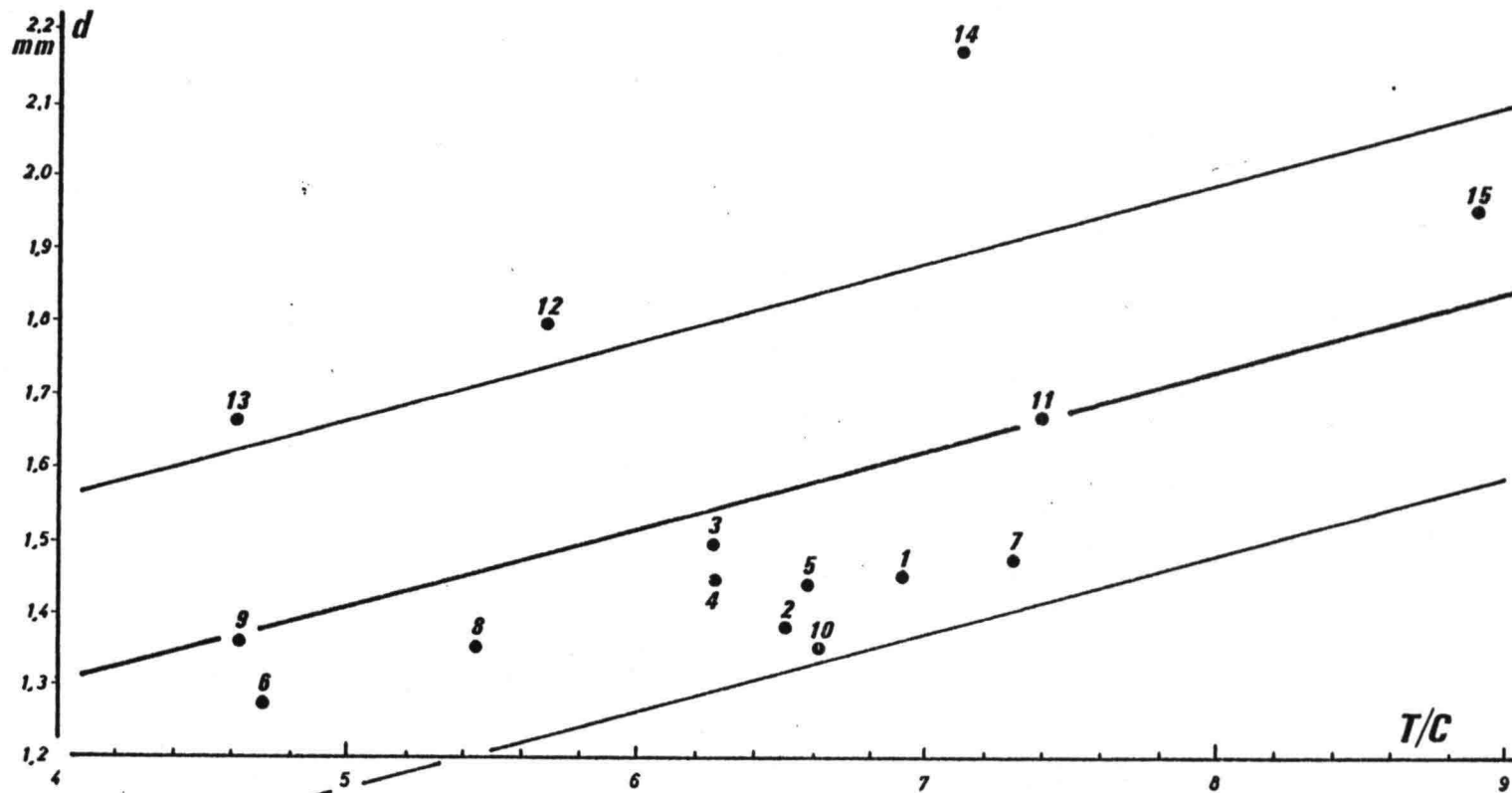


Fig. 13 Relatie toeslag-cementverhouding ($\frac{T}{C}$) en afslijping (d).

De regressielijn en de 68% betrouwbaarheidsgrenzen zijn aangegeven. De punten representeren gemiddelde waarden voor de respectieve mengsels.

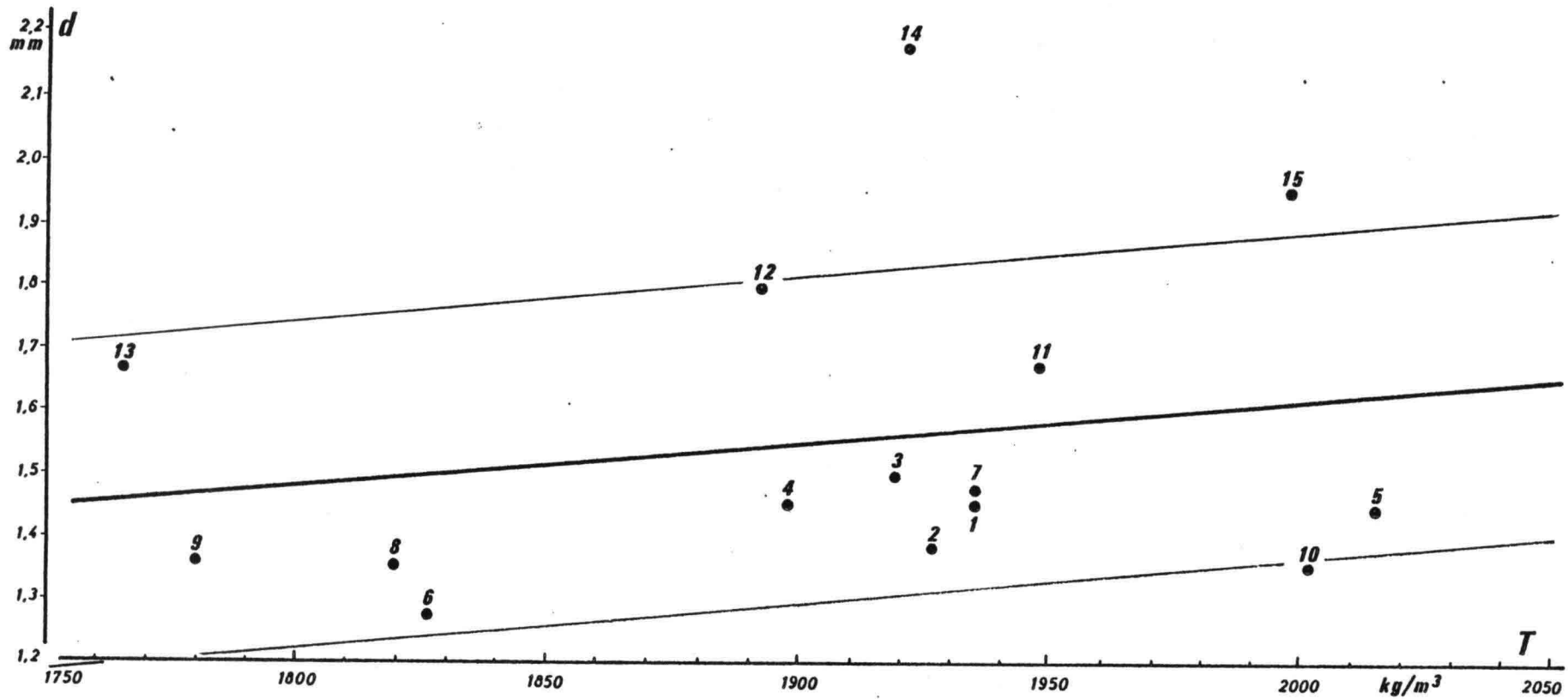


Fig 14 Relatie toelaghoeveelheid (T) en afslijping (d) voor alle mengsels.

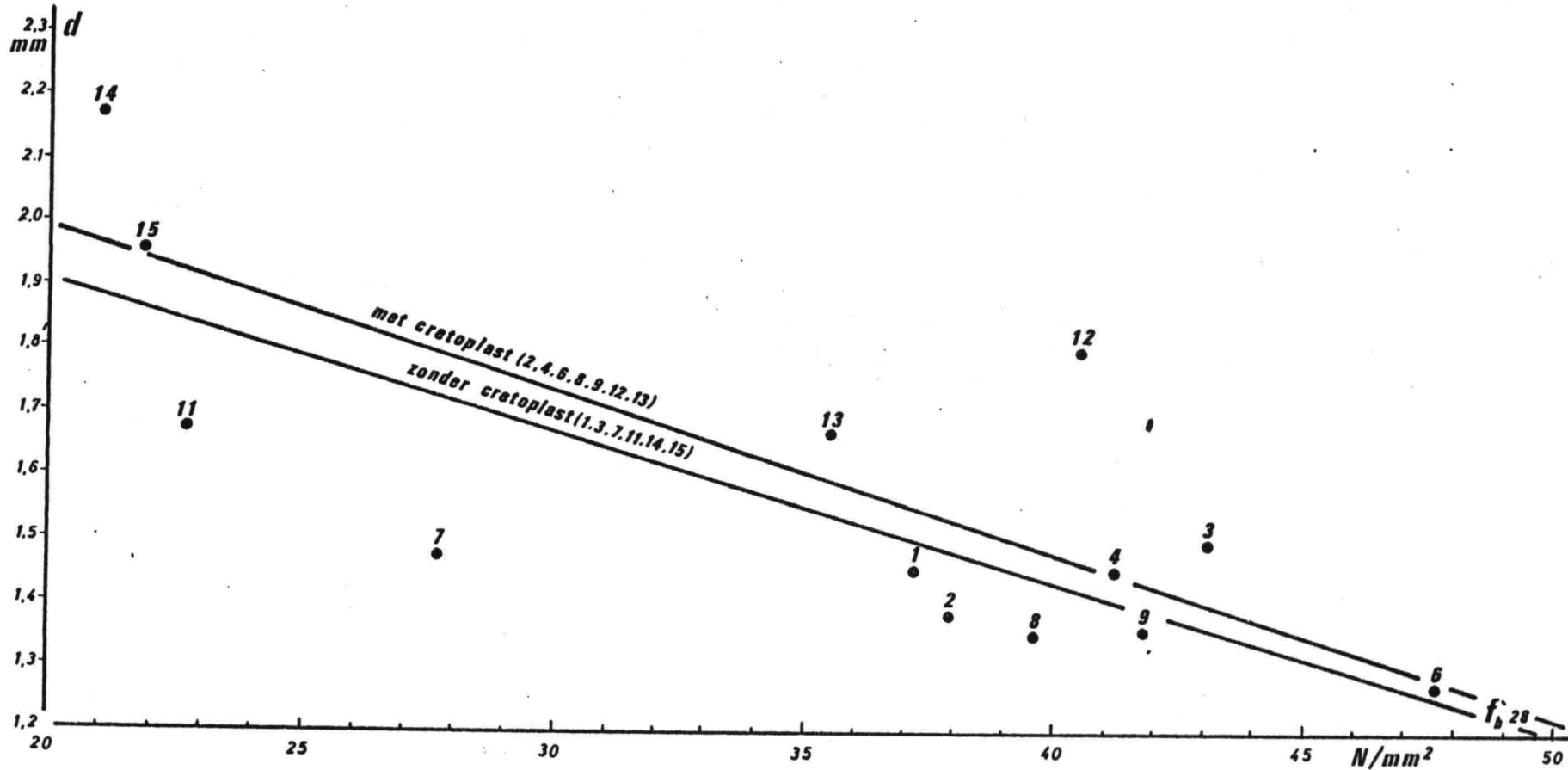


Fig. 15 Invloed van de toevoeging van een plastificeerder op de afslijping (d) van de proefstukken van mengsels met normale korrelgrootte van 32 mm.

10. VERGELIJKING VAN DE RESULTATEN TUSSEN DE VERSCHILLENDE PROEVEN.

Doordat de mate van erosie in mm uitgedrukt door het verschil in meettijd (260 en 240h) niet voor alle vijftien mengsels gelijk gedefinieerd is, kan op deze waarden geen relatie-analyse met de resultaten van de slijptafel worden uitgevoerd.

Indien echter lineaire interpolatie wordt toegepast, kan voor ieder mengsel de erosie na 240 uur worden berekend. De erosie-toename, berekend als de toename van de afslijting in mm per uur beproeving, kan echter door het lineaire karakter (zie de bijlagen) wel vergeleken worden met de slijptafel-resultaten.

In onderstaande tabel wordt dit samengevat.

TABEL 38 VERGELIJKING RESULTATEN

Mengsel	Erosie na 240h	Erosie toename	Afslijping na 500 m	Erosie na 20 h	Afslijting weegmethod
1	2,75	4,38	1,45	1,35	5,76
2	2,81	5,57	1,38	1,07	4,00
3	3,38	8,39	1,49	1,10	4,79
4	3,00	7,24	1,45	0,98	4,65
5	3,38	6,85	1,44	1,03	3,93
6	2,86	6,36	1,27	0,85	4,80
7W	3,49	6,91	1,47	1,45	7,51
8W	2,81	7,56	1,35	0,71	4,42
9W	2,07	4,41	1,36	0,80	5,37
10	3,27	10,98	1,35	0,71	5,85
11	3,60	10,33	1,67	1,09	4,54
12	3,44	10,30	1,79	0,90	8,79
13	3,49	11,50	1,66	0,98	5,47
14	3,97	7,90	2,17	1,47	8,58
15	5,66	18,95	1,95	1,41	6,03
eenheid:	mm	mm/1000h	mm	mm	mm

Voor de bepaling van de erosie in mm per 240 uur is uitgegaan van de getallen van tabel 14 voor de wel-nabehandelde mengsels 7, 8 en 9 bij 240 uur en van de getallen uit tabel 15b. bij 260 uur onder aftrek van een erosietoename van 20 uur. Het betreft hier steeds gemiddelden over de rijen 3 en 4. Voor de erosietoename is gebruik gemaakt van de getallen uit tabel 31.

Doordat de invloed van de variaties in de methode van beproeving per serie moet worden uitgeschakeld om tot een goede vergelijking te geraken is steeds het gemiddelde per serie op 100% gesteld. Samengevat levert dit tabel 39.

TABEL 39 VERGELIJKING RESULTATEN (PERCENTAGES PER SERIE).

Mengsel	Erosie na 240h	Erosie toename	Afslijping na 500 m	Erosie na 20 h	Afslijping weegmethode
1	90,8	67,7	103	127	124
2	92,7	86,2	97,6	101	85,9
3	112	130	105	103	103
4	99,0	112	103	92,2	99,9
5	112	106	102	96,9	84,4
6	94,4	98,4	89,9	79,9	103
7	125	110	106	147	130
8	101	120	96,9	72	76,6
9	74,2	70,1	97,6	81,1	93,1
10	83,7	94,2	76,5	64,9	89,4
11	92,2	88,6	94,6	99,7	69,4
12	88,1	88,3	101	82,3	134
13	89,4	98,6	94,1	89,6	83,6
14	102	67,8	123	134	131
15	145	163	110	129	92,2
eenheid:	%	%	%	%	%

Bovenstaande getallen zijn onderworpen aan een regressie-analyse met behulp van de methode der kleinste kwadraten. Als afhankelijke is steeds de afslijping als ordinaat gekozen.

Regressie erosie-afslijping (percentages)

$$d = 70 + 0,300 \times s \quad r^2 = 0,270 \quad \text{lineair (fig. 16)}$$

Regressie erosietoename-afslijping

$$d = 96,6 + 0,0337 \times \Delta s / \Delta t \quad r^2 = 0,00705 \quad \text{lineair (fig. 17)}$$

hierin is: d = afslijping in mm na 500 m slijpweg

s = erosie in mm na 240 uur beproeving

$\Delta s / \Delta t$ = erosietoename in mm/h

r = correlatiecoëfficiënt

Uit deze analyse valt af te leiden dat steeds een positieve relatie aanwezig is, hoewel gezien de grootte van de correlatiecoëfficiënten de overeenstemming niet strak genoemd kan worden.

De regressie is het beste bij een lineaire benadering zodat mag worden geconcludeerd dat de overeenstemming in resultaten zo mogelijk moet worden gezocht bij absolute slijtagecijfers en wel binnen een lineair verband.

In verband met het bovenstaande is het zinvol ook lineaire regressie toe te passen op de slijptafelproefresultaten en de gemiddelde resultaten van de erosieproeven van de 3e en 4e rij na 20 uur beproeving, om na te gaan of de relatie in dit eerste gebied beter wordt.

Tenslotte zijn ook de resultaten verkregen met behulp van de weegmethode (zie tabel 39) gecorreleerd met die van de slijpbeurt.

Een en ander is hieronder samengevat.

Regressie erosie na 20 h - afslijping

$$d = 68,1 + 0,319 \times s_{20} \quad r^2 = 0,577 \quad \text{(fig. 18)}$$

Regressie erosie via weegmethode

$$d = 75 + 0,250 \times s_w \quad r^2 = 0,260 \quad \text{(fig. 19)}$$

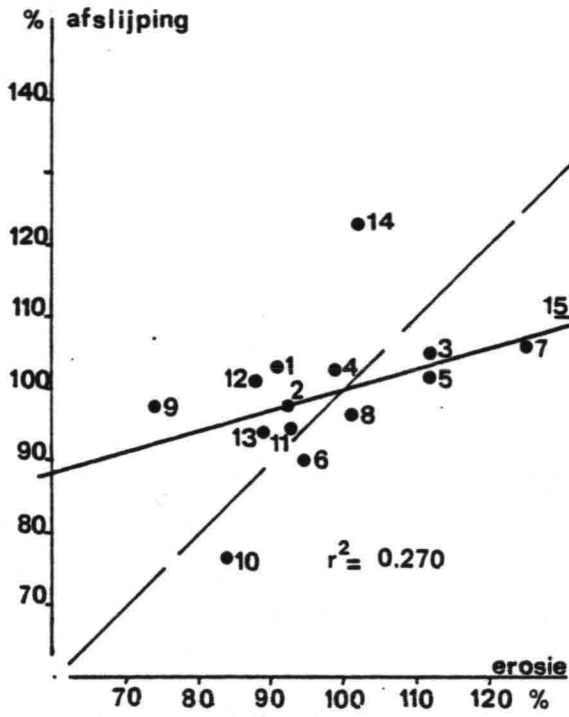


fig 16

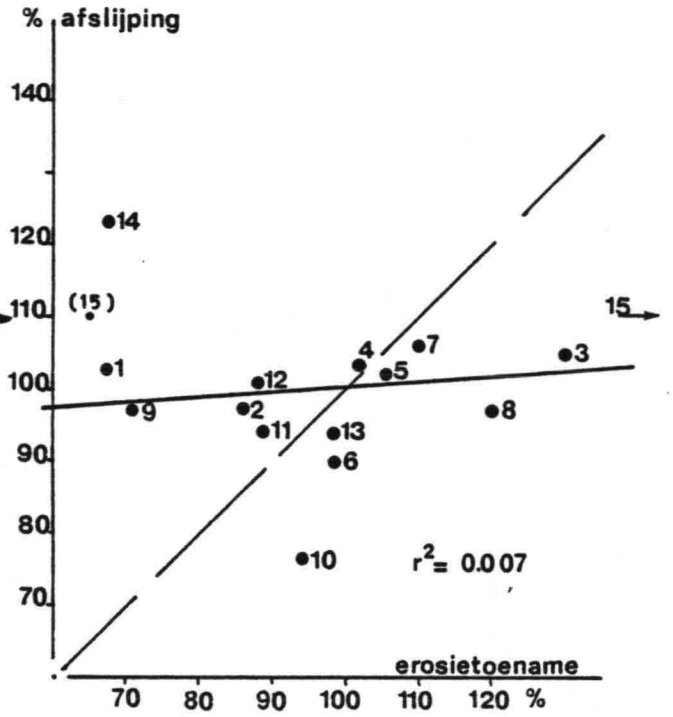


fig 17

— = lijn bij volledige correlatie (x=y)%

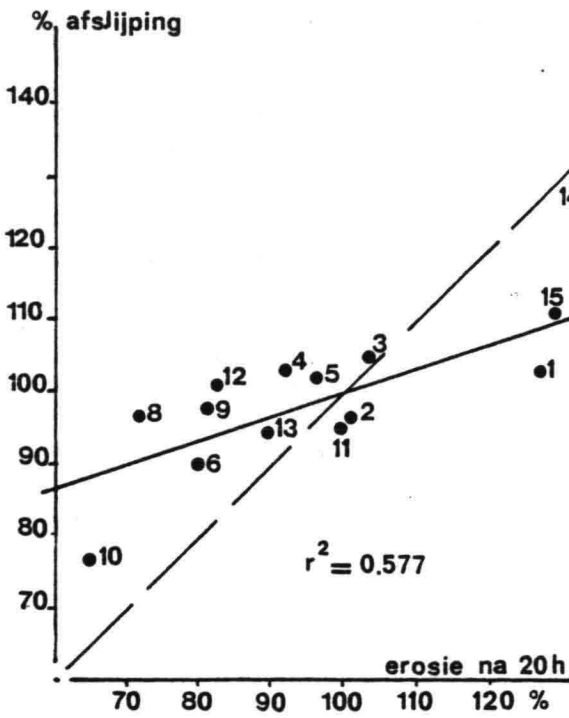


fig 18

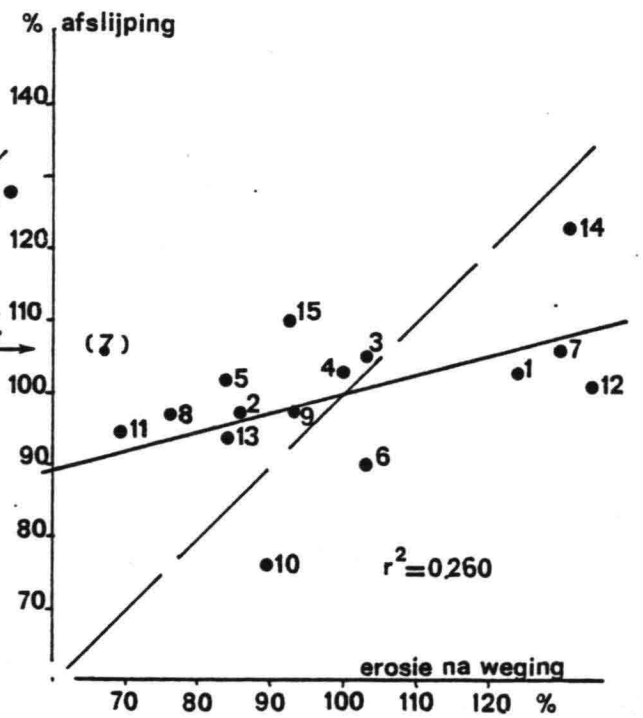


fig 19

De beste correlatie bestaat tussen de erosieproefmethode en de proef met de slijpweg van Amsler bij de metingen na 20 uur en 500 m slijpweg. De erosieproefmethode geeft gezien de tijdsafhankelijkheid van aantastingsverschijnselen een beter beeld van het voortschrijden van de erosie dan de slijptafelproef. Dit is te verklaren door het verschil in slijtagebelasting op het beton. Bij de slijptafelproef wordt namelijk het beton statisch aan slijtage onderworpen, terwijl het bij de erosieproef mogelijk is dat na een zekere tijd over bepaalde gebieden hele korrels kunnen worden uitgerukt.

De erosietoename per uur zou dus een betere grondslag voor in de toekomst te verwachten erosie zijn, maar bij deze parameter is de correlatie met de proef van Amsler niet sterk. Bij het ontwerpen van betonconstructies met een lange levensduur waarbij gezocht wordt naar het beste betonmengsel is daarom de proef met de erosiegoot als middel van onderzoek te prefereren.

11. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Binnen dit onderzoek wordt onder erosie het afslijten van een oppervlak door water en de daarin meegevoerde sedimenten verstaan. Bij bouwwerken in zee kan erosie een verschijnsel van aantasting zijn als water met zand en slib regelmatig langs de konstruktie heen en weer stroomt. De bouw van de pijlerdam in de Oosterschelde was de aktuele aanleiding voor dit onderzoek.

In het literatuuroverzicht zijn de bekende proefmethoden beschreven waarmee de weerstand van beton tegen eroderende werking bepaald kan worden. Zonder op details in te gaan vertonen alle methoden eenzelfde eigenschap: het zijn allemaal versnelde proeven, d.w.z. dat de eroderende werking in de proef vele malen groter wordt aangehouden dan in werkelijkheid het geval zal zijn. Zou men bij deze proef dezelfde erosiebelasting toepassen zoals in werkelijkheid, dan zou de proef veel te lang duren of de slijtage zou onmeetbaar klein zijn.

Deze versnelling van de erosie is er de oorzaak van dat de resultaten van de proeven het nauwelijks toelaten om een voorspelling te doen t.a.v. de kwantitatieve grootte en het tijdelijke verloop van de erosie van een werkelijke konstruktie. Echter is een onderlinge vergelijking van materialen mogelijk wat een hulp kan zijn bij de keuze van in de praktijk toe te passen materialen en uitvoeringstechnieken.

In dit onderzoek werden een tweetal proefmethoden toegepast, te weten abrasieproeven op een slijptafel en erosieproeven in een daarvoor ontworpen en gebouwde cirkelvormige goot. Alhoewel de erosieproeven in de goot veel overeenkomsten met de werkelijkheid vertonen (stromend water met abrasief materiaal) valt toch aan te merken dat vooral het abrasief materiaal niet met datgene in zee overeenstemt.

In de versnelde proef werd grind met een maximale korrel van 31,5 mm toegepast terwijl in zee de korrelgrootte gemiddeld $150\mu\text{m}$ zal zijn. Het mechanisme van aantasting kan dan ook in beide gevallen verschillend zijn. In het onderzoek wordt er wél van uitgegaan dat de gevonden rangschikking van de betonsoorten ook in de praktijk zal gelden.

Wat de proeven op de slijptafel betreft valt op te merken dat deze standaardproef de werkelijkheid van stromend water helemaal verlaat. Uit de statistische verwerking van de resultaten blijkt echter dat in de eerste fase van de erosie een duidelijk aantoonbare correlatie tussen de resultaten van deze twee proefmethoden bestaat.

Het onderzoek omvatte 15 betonmengsels met als variabelen het cementgehalte, de water-cement-factor, het toeslagmateriaal, de nabehandeling en het al dan niet toepassen van een hulpstof. De kubusdruksterkten na 28 dagen lagen tussen 21 en 48 N/mm^2 .

De erosieproeven leidden alle tot een soortgelijk erosieverloop: in het begin (in de eerste 40 uur) een sterke slijtage van de buitenhuid (enkele millimeters), daarna een verminderde toename van de slijtage en daarop aansluitend (na 80 uur) een tamelijk konstante slijtagesnelheid tot aan het eind van de proef (240 uur). Voor een beoordeling van het gedrag van een constructie met een lange levensduur leek juist het laatste gedeelte van de proef het meest geschikt.

De conclusies uit de resultaten van de slijpproeven en van de erosieproeven zijn gelijk alhoewel verschillen in kwantitatieve zin optraden.

Echter moet worden opgemerkt dat de spreiding van de resultaten groot was waardoor de conclusies niet zeer hard genoemd kunnen worden.

Als belangrijkste conclusies zijn aan te geven:

- De druksterkte van het beton heeft een duidelijke invloed. Naarmate de druksterkte toeneemt neemt ook erosiebestendigheid toe. Een beton met slechte kwaliteit, ook al zou die slechts plaatselijk aanwezig zijn, zal eerder door erosie aangetast worden.
- De nabehandeling is vooral bij een lage druksterkte van invloed. Goede nabehandeling verbetert de erosiebestendigheid, waardoor de invloed van de druksterkte in mindere mate optreedt.
Bij hoge betonkwaliteiten was de invloed van de nabehandeling niet aantoonbaar.
- Het al dan niet toepassen van een hulpstof ver-
toonde naast de variatie in druksterkte geen extra invloed.
- Een tendentieuze relatie was aanwezig tussen de hoeveelheid toeslagmateriaal en de erosiebestendigheid. Deze tendens was duidelijk voor het beton met weinig cement (waardoor de water-cement-factor hoger en dus de sterkte minder was) terwijl voor het beton met grof grind als toeslagmateriaal de uitkomsten minder duidelijk zijn. Betreft men in de conclusies alleen de betonsoorten met ongeveer dezelfde druksterkte dan is de invloed van de hoeveelheid toeslagmateriaal op de erosieweerstand niet meer aantoonbaar.
Grof grindbeton onderscheidt zich dan niet meer van beton met kleinere korrels.

Deze conclusies zijn in overeenstemming met de gegevens uit de literatuur. Ook daar wordt de druksterkte als voornaamste factor voor het erosiegedrag vermeld.

Over de samenstelling van het beton is men in de literatuur niet eensluidend; door sommigen wordt aangeraden grof toeslagmateriaal te gebruiken (steenslagbeton) terwijl anderen de maximale korreldiameter klein willen houden voor een betere homogeniteit van het beton. De resultaten van dit onderzoek kunnen deze vraag niet beantwoorden omdat bij kubusdruksterktes van circa 40 N/mm^2 geen invloed van de maximale korrel geconstateerd werd. Een goede nabehandeling wordt in de literatuur aanbevolen. Ook in dit onderzoek werd de positieve invloed van een goede nabehandeling gevonden.

De omvang van het onderzoek was te beperkt om fundamentele uitspraken mogelijk te maken. Ook is het niet mogelijk - in verband met de vertaalproblemen van de versnelde proef naar de werkelijkheid - een optimale betonsamenstelling aan te geven. Wél moet erop gewezen worden dat beton met een kubusdruksterkte van 21 N/mm^2 vaak een grotere afslijting én spreiding in de resultaten vertoonde dan een beton met 40 N/mm^2 druksterkte. Uit het onderzoek blijkt dat een goede betonkwaliteit wenselijk is voor een goede erosiebestendigheid.

12. LITERATUUR

- /1/ - DIN 1045, Beton-und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung, Januar 1972.
- /2/ - Recommendations for the design of concrete sea structures.
Fédération Internationale de la Précontrainte, London, Oct. 1973.
- /3/ - W.H. Price (chairman): 'Erosion resistance of concrete in hydraulic structures, reported by ACI Committee 210, Journ. of the American Concrete Institute, Proc. Vol. 52, Nov. 1955, title no. 52-18, pp. 259-271.
- /4/ - W.C. Carey: Discussion on: R.H. Berryhill-'Experience with prototype energy dissipators'-, (Proc. ASCE, 89, 1963, no. HY3, pp. 181-201), Proc. ASCE, 89, 1963, no. HY5, pp. 179-180.
- /5/ - M.A. Jabare, Discussion on: R.H. Berryhill- 'Experience
W.E. Wagner with prototype energy dissipators'-, (Proc. ASCE 89, 1963, no. HY3, pp. 181-201), Proc. ASCE, 90, 1964, No. HY1, pp. 293-298.
- /6/ - A. Gardet, M. Dysli : 'Essais à l'abrasion de revêtements d'ouvrages hydrauliques', Bulletin Technique de la Suisse Romande, 91, 1965, no. 4, pp. 45-49.
- /7/ - Y. Iwasa, H. Nagakawa : 'Historical development and some experiences of energy dissipators at multiple-purpose projects in Japan', Bull. Disaster Prevention Res. Inst., 15, 1965, no. 3, pp. 65-81.
- /8/ - H. Woods : 'Durability of concrete construction', ACI Monograph No. 4, 1968, Detroit.
- /9/ - B.C. Gerwick : 'Marine concrete', in 'Handbook of ocean and underwater engineering' (J.J. Myers, C.H. Holm, R.F. Mc-Allister, eds), McGraw-Hill Book Com-

- pany, New York, 1969.
- /10/ - E.Kriegel : 'Verschleiss und Abrieb bei hydraulischem Transport', Industrie-Anzeiger, 91, 1969, Nr 47, pp. 19-22.
- /11/ - K.Walz, 'über den Widerstand von Beton gegen die G.Wischers: mechanische Einwirkung von Wasser hoher Geschwindigkeit', Betontechnische Berichte, H.9-1969, pp. 403-405, H.10-1969, pp. 457-460.
- /12/ - H.Woods : 'Durability of concrete in service', reported (chairman) by ACI Committee 201, ACI Manual of Concrete Practice, Part. 1, 1970: Materials and properties of concrete, pp. 201-1/201-38, title no. 59-57.
- /13/ - W.H.Price : 'Erosion resistance of concrete in hydraulic (chairman) structures' reported by ACI Committee 210, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1970: Materials and properties of concrete, pp. 210-1/210-10, title no. 52-18.
- /14/ - W.Wieden- : 'The influence of sand and gravel on the charoeth characteristics of centrifugal pump, some aspects of wear in hydraulic transportation installations', Proc. of Hydrotransport 1, First Int. Conf. on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Sept. 1970, BHRA, Cranfield, Bedford, U.K., pp. E1-E25, Z67-Z69
- /15/ - A.Röhnisch, 'A method for the uniform evaluation of resistance to erosion of materials used for hydraulic structures'. Proc. of Hydrotransport 1, First Int. Conf. on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Sept. 1970, BHRA, Cranfield, Bedford, U.K., pp. E2-29/E2-40, Z69-Z70.
- /16/ - A.M.Neville 'Hardened concrete: physical and mechanical aspects', ACI Monograph no. 6, 1971, Detroit.

- /17/ - H.O. Lamprecht : 'Mechanische en chemische invloeden van water op betonconstructies', Cement, jaargang XXIV, nr. 12, dec. 1972, pp. 521-524.
- /18/ - A.K. Shreiber : 'Possibility of using stone concrete M.M. Milyukovski in shore protection structures', Hydrotechnical Construction, no. 11, Nov. 1971, pp. 913,915.
- /19/ - D.F. Orchard : 'Concrete Technology, Vol. 1: Properties of materials Applied Science Publishers Ltd, London, 1973.
- /20/ - A. Malasiewics : 'Abrasion of impervious concrete sample by water borne rock debris at various angles of incidence', Polska Akademia Nauk, Instytut Budownictwa Wodnego w Gdańsku, Rozprawy Hydrotechniczne-Zeszyt 32, 1973, pp. 239-246.
- /21/ - A.M. Neville : 'Properties of concrete', Pitman Publishing, London, 1975.
- /22/ - Anonymus : 'über die Abnützung von Beton durch fließendes Wasser', Cementbulletin, April 1975, Jahrgang 42, Nr. 16.
- /23/ - D.K. Lysne, : 'Erosion of sewers', Proc. XVith Congr. of the IAHR, July/Aug. 1975, São Paulo, Vol. 5, pp. 204-209.
T. Tekle,
I. Schei
- /24/ - R.T.L. Allen : 'Durability of concrete in coast protection works', Paper 97, pp. 9-12.
F.L. Terrett
- /25/ - F. Rozinski : 'Betontechnologische Voruntersuchung und überwachung', ÜZE, Jng. 26, H.10, pp. 440-447.
- /26/ - H. Huber, : 'Durotec-GF-EP-Platten als Schutzverkleidung für abrasion-und kavitationbeanspruchte Bauteile'.
F. Rozinski
Energiewirtschaft Heft 49 (1976), Wien.

- /27/ A.P. Davis : 'Safe velocities of water on concrete',
Engineering News, Jan. 4, 1912, pp. 20-21.
- /28/ K.B. Keener : 'Spillway erosion at Grand Coulee dam',
Engineering News-Record, July 13, 1944,
Vol. 133, Nr. 2, pp. 95-101.
- /29/ W.H. Price : 'Erosion of concrete by cavitation and
solids in flowing water', Proc. ACI, Journ.
of the ACI, Vol. 43, 1947, pp. 1009-1023,
Title no. 43-31. Discussion on id.: pp.
1023-1024, Disc. no. 43-31.
- /30/ R.R. Clark : 'Effects of high-velocity water on Bonne-
ville Dam Concrete', Proc. ACI, Vol. 46,
June 1950 Journal, pp. 821-839, Title
no 46-60.
- /31/ L.V. Downs : 'Repair of Grand Coulee spillway bucket',
Civil Engineering, Vol. 20, 1950, pp. 255-
259.
- /32/ W.H. Price : 'Erosion resistance of concrete in hydraulic
(chairman) structures', reported by ACI Committee 210,
Journ. of the ACI, Proc. Vol. 52, Nov. 1955,
Title no. 52-18, pp. 259-271.
- /33/ R.R. Clark : 'Bonneville dam stilling basin repaired
after 17 years' service', Proc. ACI, Vol.
52, April 1956 Journal, pp. 821-837, Title
no. 52-52. Disc. no. 52-52, Proc. ACI, Vol.
53, Dec. 1956 Journal part. 2, pp. 1417-1418.
- /34/ B. Mather : 'Factors affecting durability of concrete
in coastal structures', Beach Erosion Board,
Office of the Chief of Engineers, Techn.
Memo., No. 96, 1957, Washington D.C.
- /35/ W.C. Carey : Discussion on: R.H. Berryhill - 'Experience
with prototype energy dissipators'-(Proc.
ASCE, 89, 1963, no. HY3, pp. 181-201), Proc.
ASCE, 89, 1963, no. HY5, pp. 179-180.

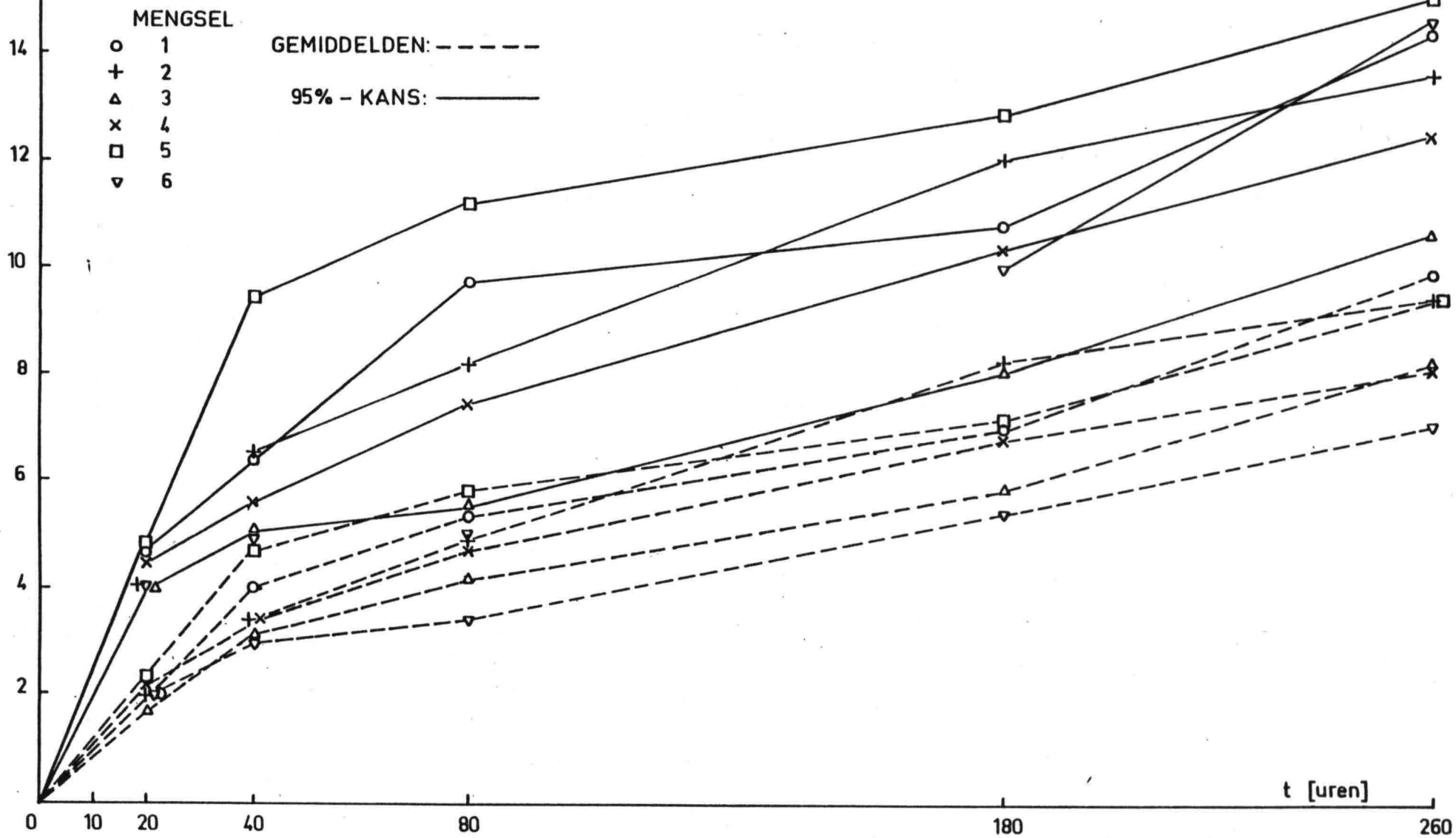
- /36/ M.A. Jabara, : Discussion on: R.H. Berryhill - 'Experience
W.E. Wagner with prototype energy dissipators' - ,
(Proc. ASCE, 89, 1963, no. HY3, pp. 181-201),
Proc. ASCE, 90, 1964, no. HY1, pp. 293-298.
- /37/ Y. Iwasa : 'Historical development and some experiences
H. Nagakawa of energy dissipators at multiple-purpose
projects in Japan', Bull. Disaster Preven-
tion Res. Inst., 15, 1965, no. 3, pp. 65-81.
- /38/ R.T.L. Allen : 'Durability of concrete in coast protection
F.L. Terrett works', Proc. 11th Conf. on Coastal Engineering,
London, Sept. 1968, Vol. 2, New York, ASCE,
pp. 1200-1210.
- /39/ W.H. Price : 'Erosion resistance of concrete in hydraulic
(chairman) structures', reported by ACI Committee 210,
ACI Manual of Concrete Practice, Part. 1,
1970: Materials and properties of concrete,
pp. 210-1/210-10, Title no. 52-18.
- /40/ A. Malasiewicz : 'Abrasion of impervious concrete sample by
water borne rock debris at various angles
of incidence', Polska Akademia Nauk, In-
stytut Budownictwa Wodnego w Gdańsku,
Rozprawy Hydrotechniczne - Zeszyt 32, 1973,
pp. 239-246.
- /41/ G. Mauboussin : Les pertuis de vanuage de l'usine marémotrice
L. Duhoux de la rance. Edition "le génie civil",
1 sept. 1964, pp. 28-34.
- /42/ L.B. Bernstein : Russian tidal power station is precast off-
site, floated into place. Civil-Engineering-
ASCE 44 (1974), Nr. 4, pp. 46-49.
- /43/ E.K. Schrader : Outlet repairs at Dwarshak Dam. The Military
R.A. Kaden Engineer (68), No. 443, May-June 1976.
- /44/ E.K. Schrader, : Stilling basin repairs at Dwarshak Dam.
R.A. Kaden The Military Engineer (68), No. 444, July-
August 1976.

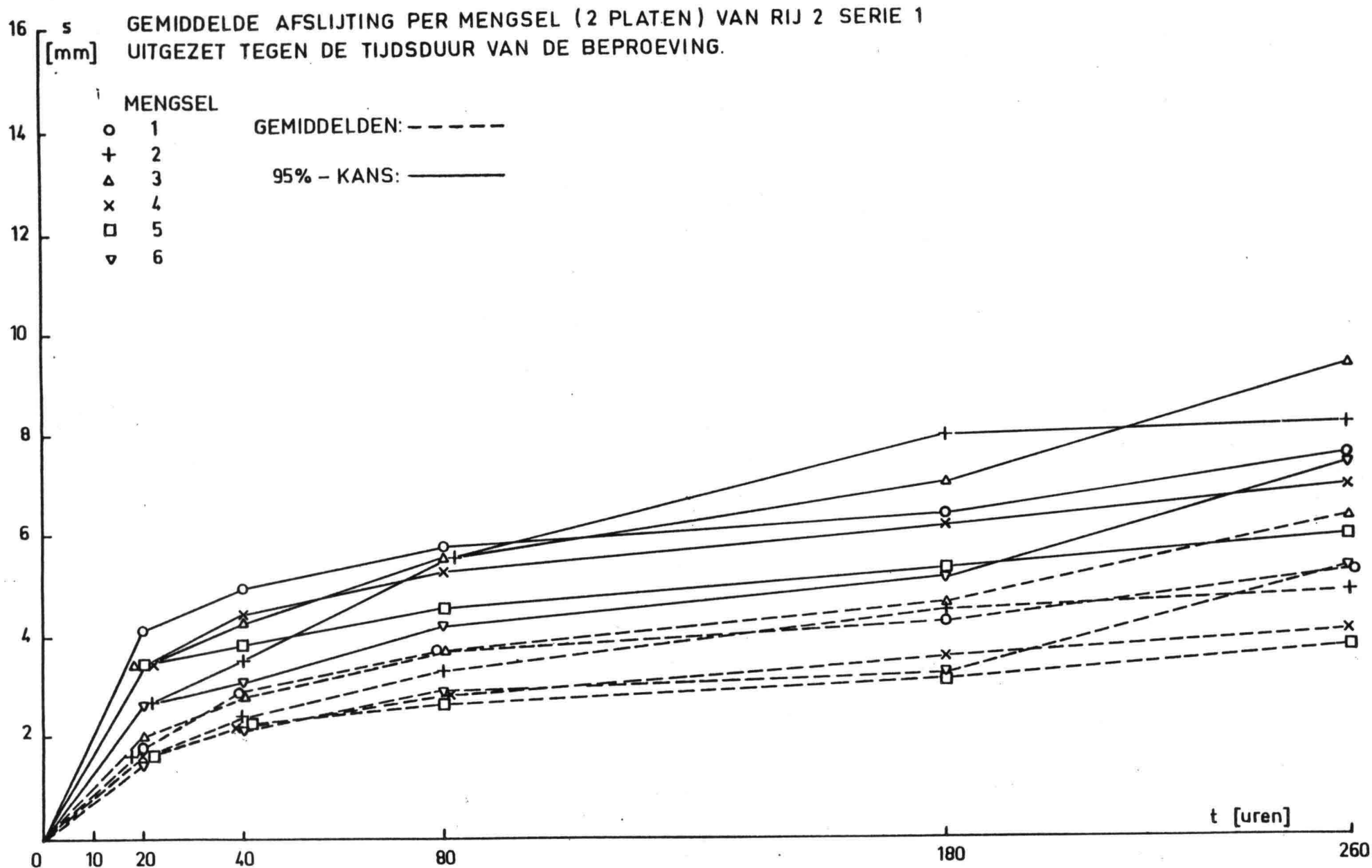
- /45/ A. Röhnisch, : Ein Beitrag zur einheitlichen Beurteilung
E. Vollmer der Abriebfestigkeit der in Wasserbau und
Rohrleitungsbau verwendeten Baustoffe.
Schriftenreihe des Ingenieurbüros Röhnisch,
Stuttgart-Vaihingen 1970
- /46/ Crow E.L. : Statistics Manual, Dover Inc., New York, 19
et al blz. 57
- /47/ L. Donker : Onderzoek naar de slijpweerstand van enige
betonmengsels. Stevinrapp.nr. 1-78-1, nov.
1978.
- /48/ P. Stroeven : Onderzoek naar de slijpweerstand van enige
betonmengsels, Statistische evaluatie.
Stevinrapp.nr. 1-79-1, jan. 1979.
- /49/ Houghton, D.L., : Cavitation Resistance of Some Special
O.E. Borge, Concretes. J. ACI 75 (1978), no. 12, p. 664/
J.A. Paxton

13. BIJLAGEN (19x)

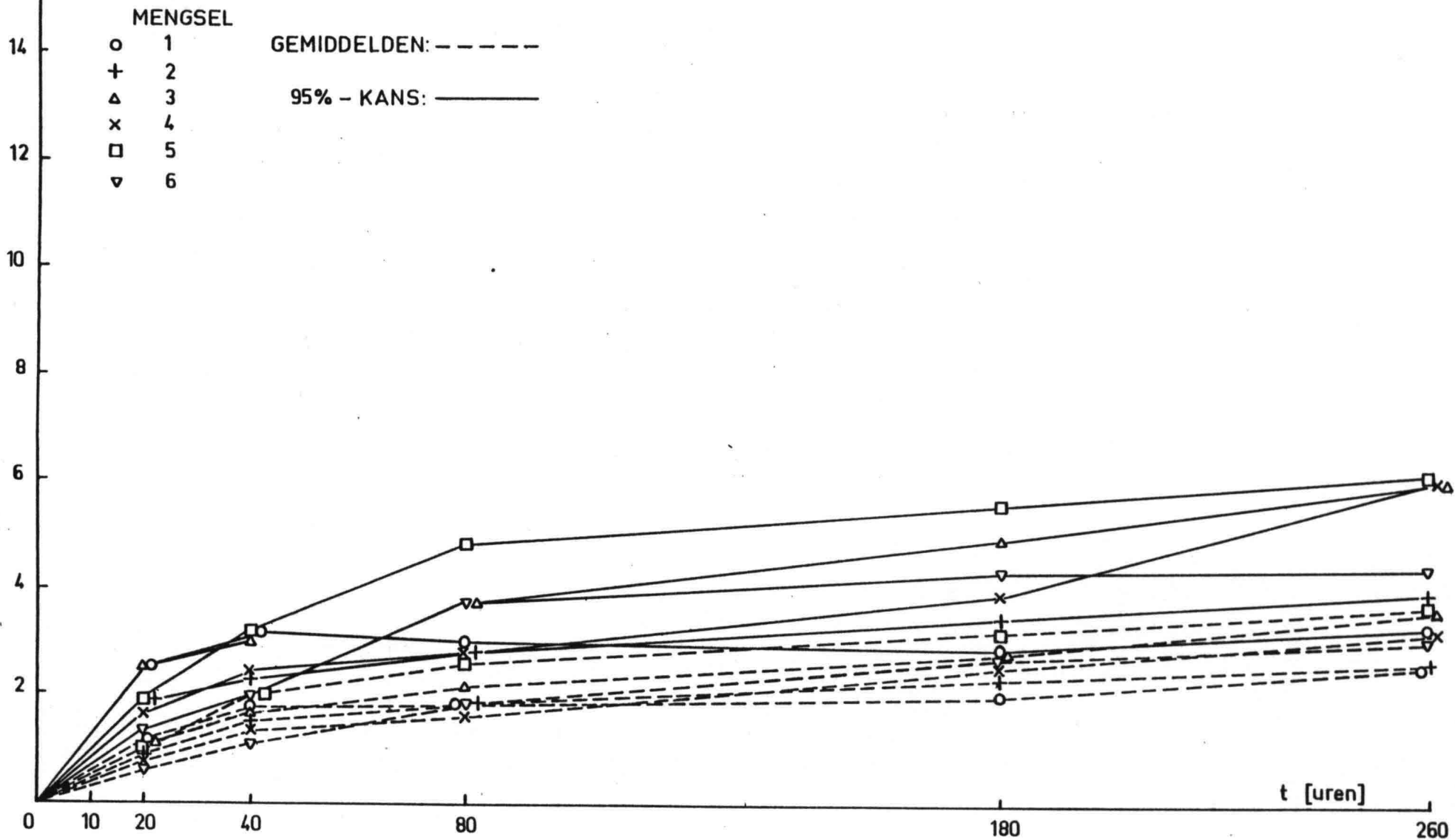
Grafische voorstellingen van de gemiddelde afslijting
per mengsel per doorsnede en per serie.

16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 1 SERIE 1
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.





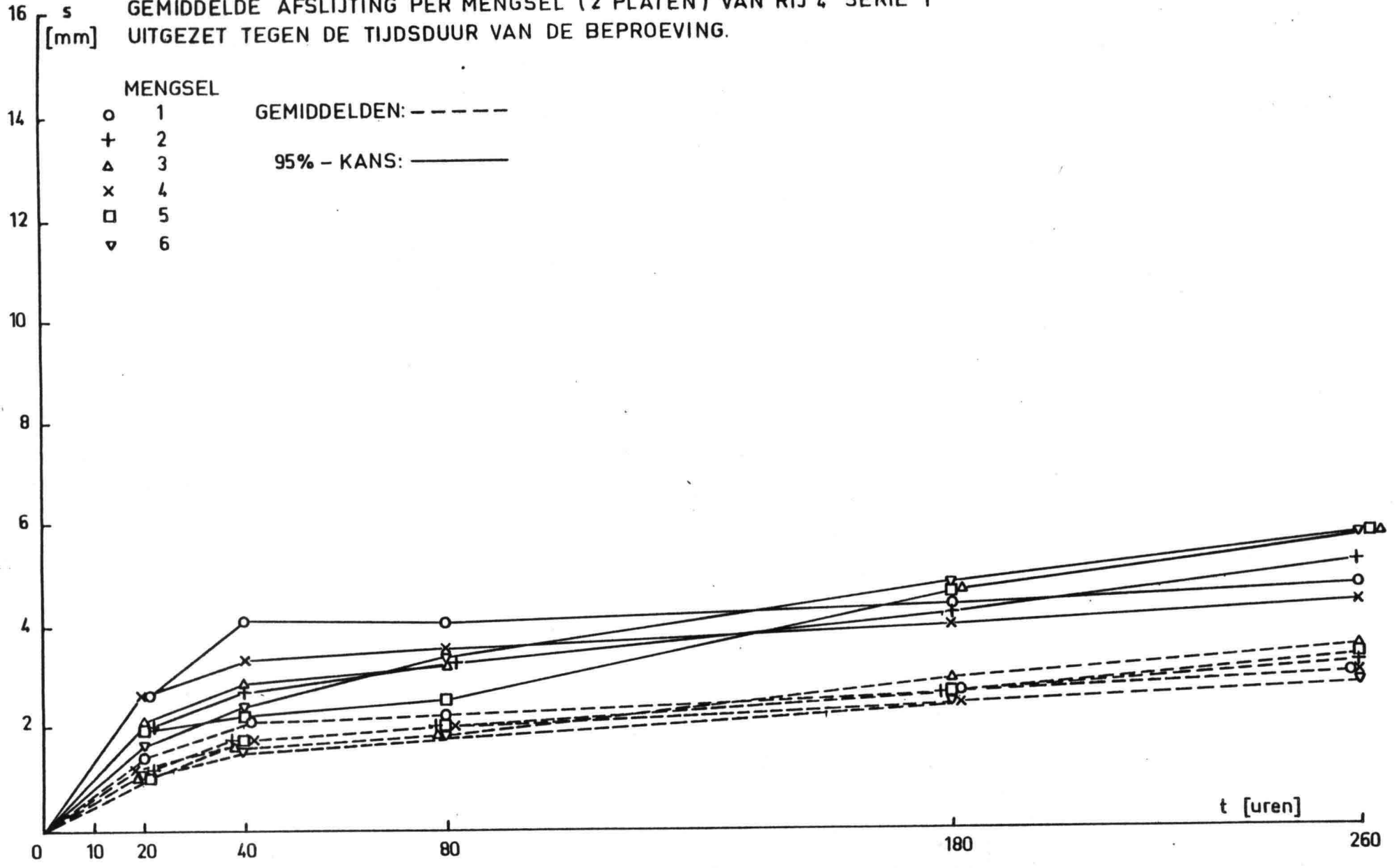
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 3 SERIE 1
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.



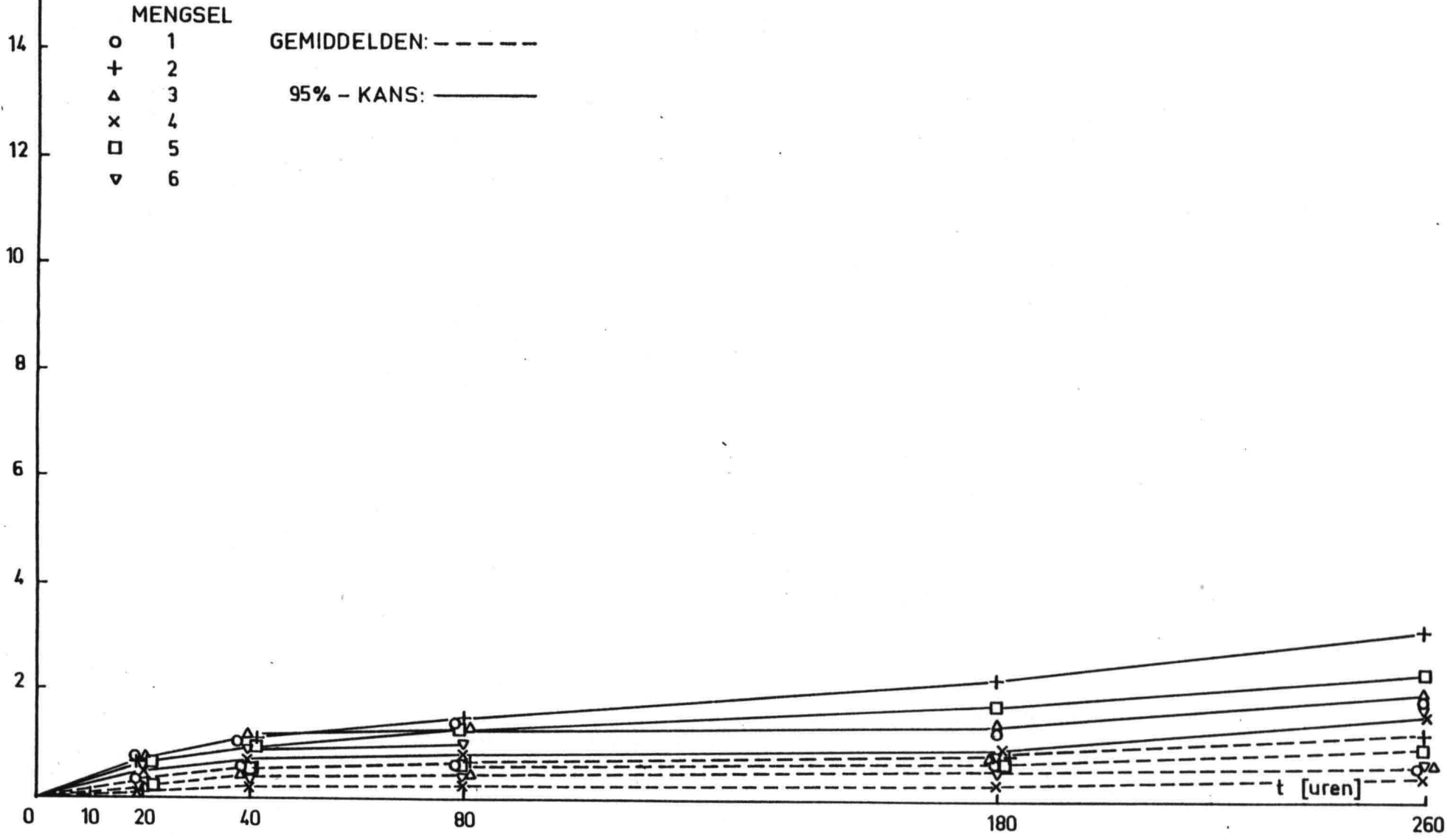
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 4 SERIE 1
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.

MENGSEL
 o 1
 + 2
 Δ 3
 x 4
 □ 5
 ▽ 6

GEMIDDELDEN: - - - -
 95% - KANS: ————

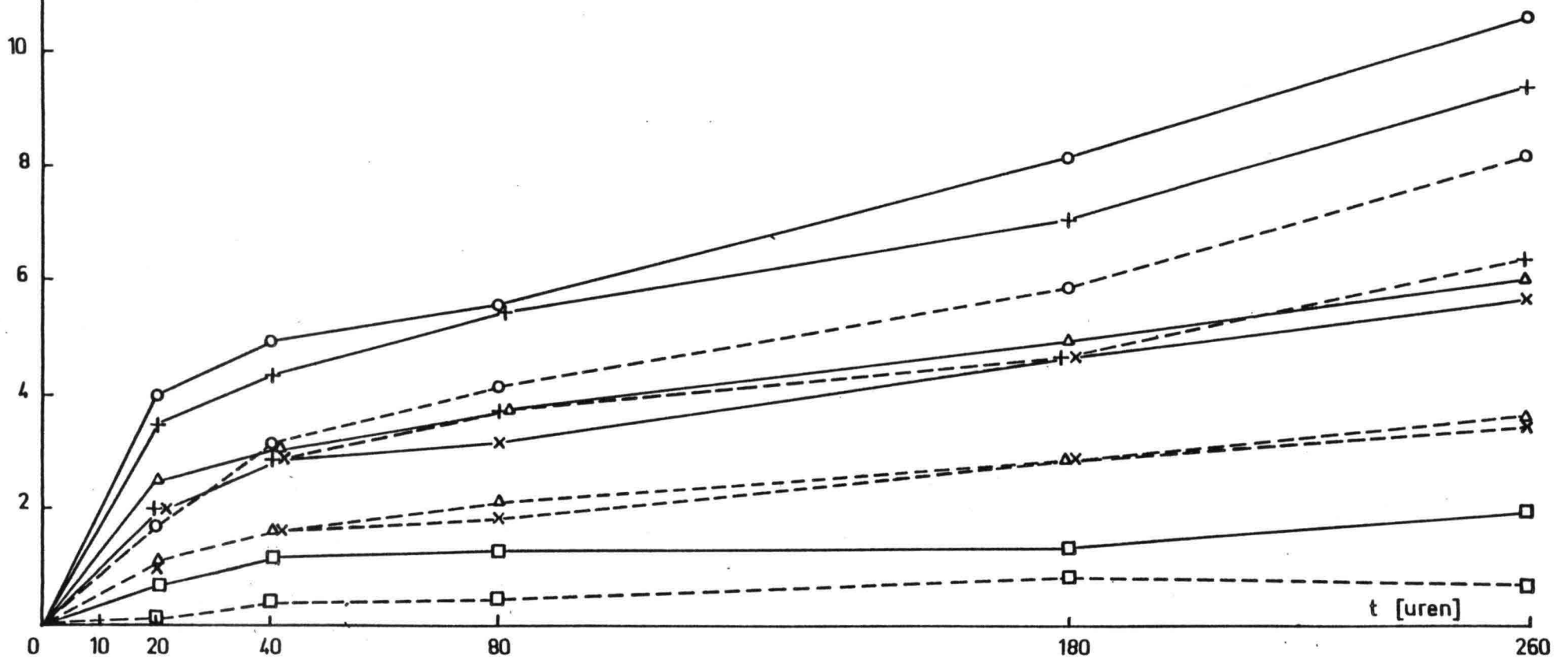


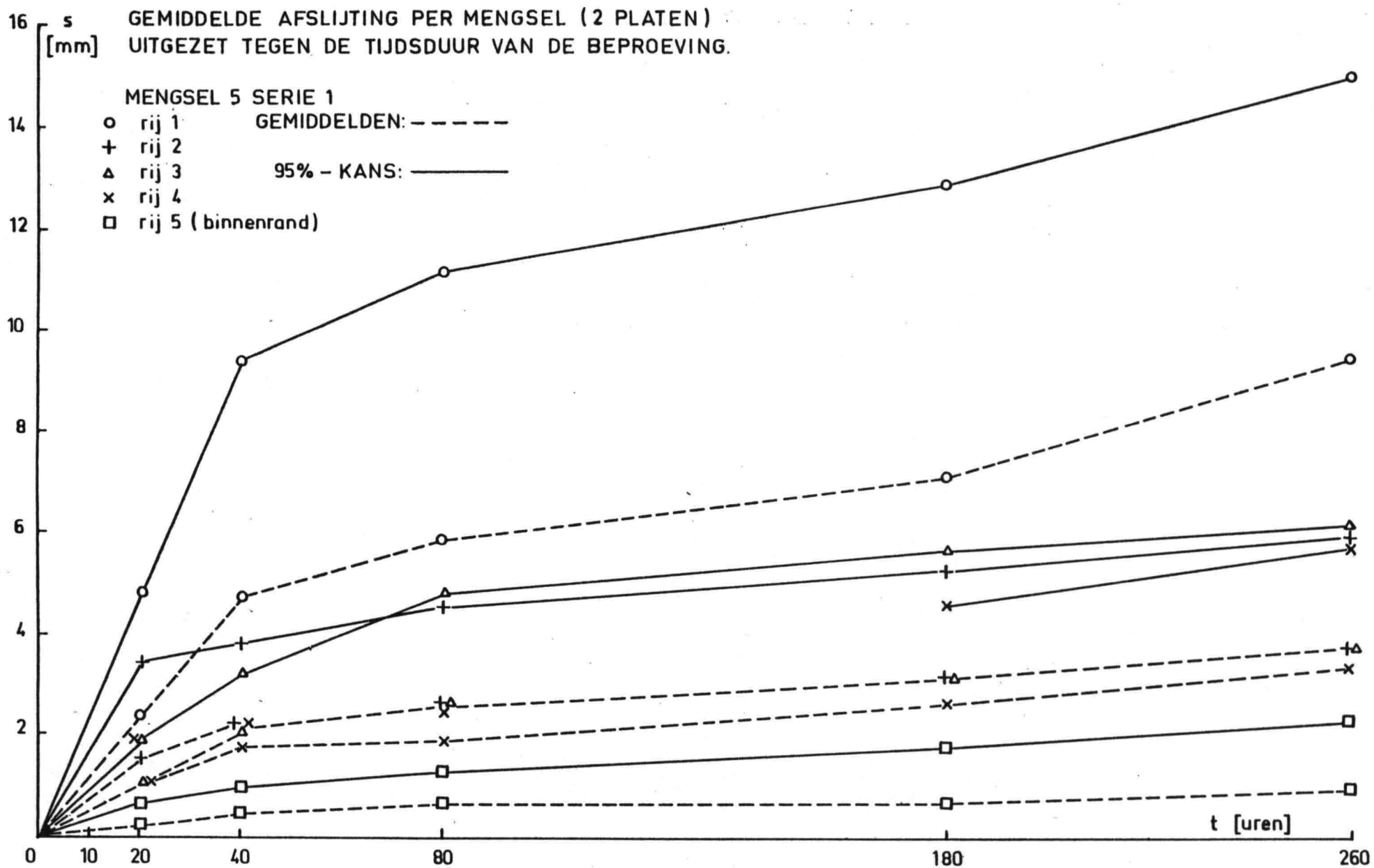
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 5 SERIE 1
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.



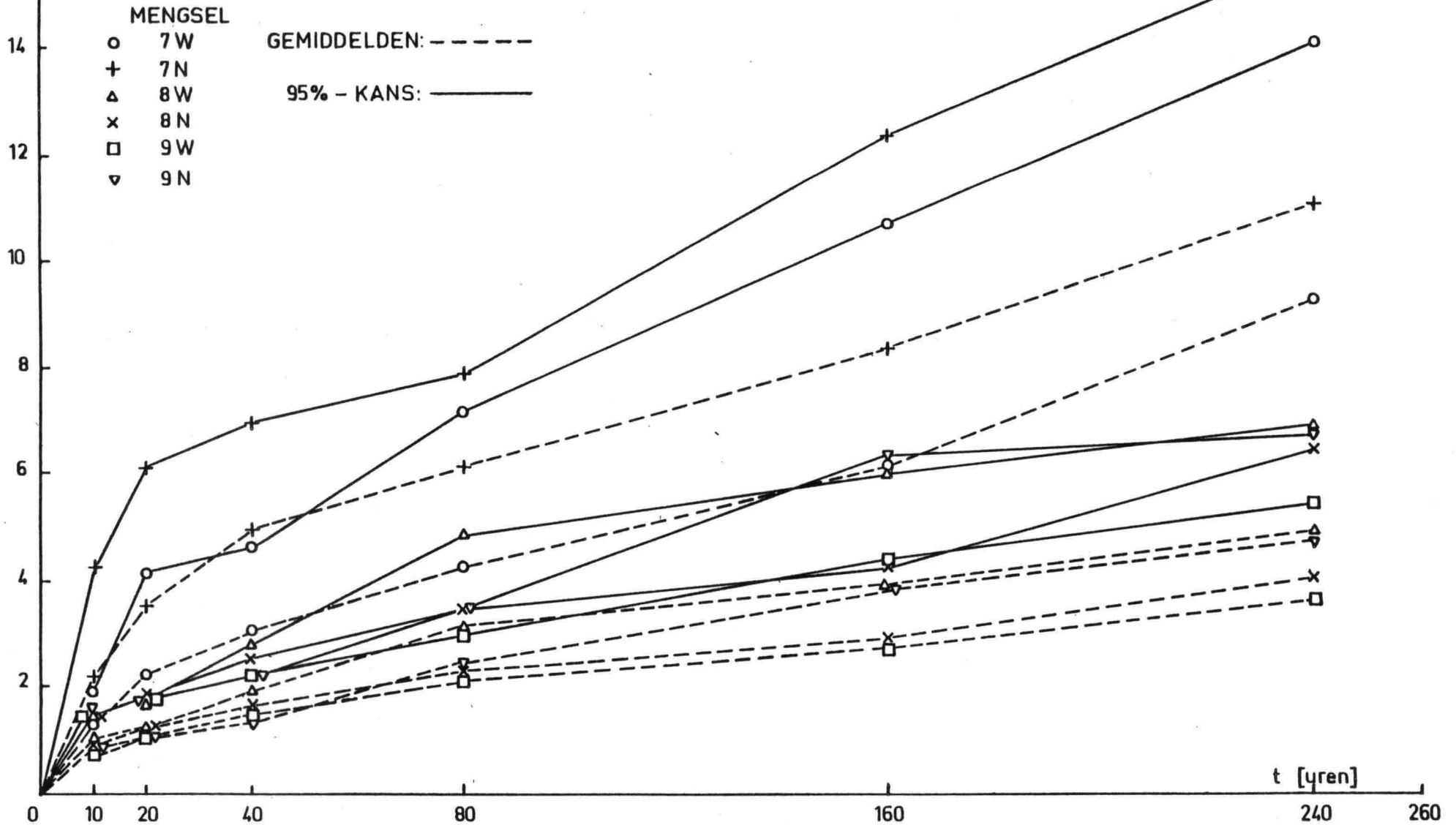
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.

MENGSEL 3 SERIE 1
 o rij 1 GEMIDDELDEN: - - - -
 + rij 2 95% - KANS: ————
 Δ rij 3
 x rij 4
 □ rij 5 (binnenrand)

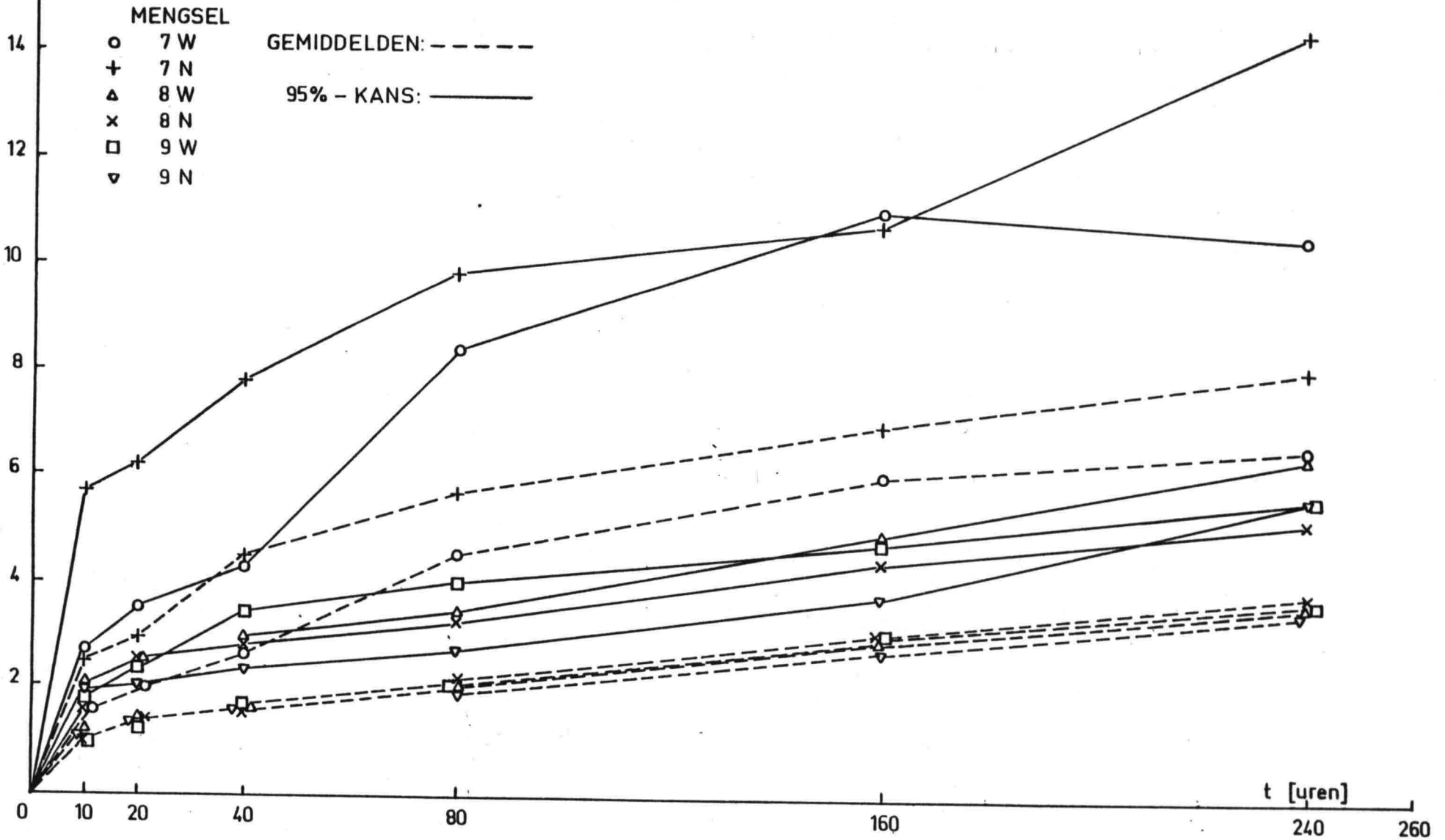




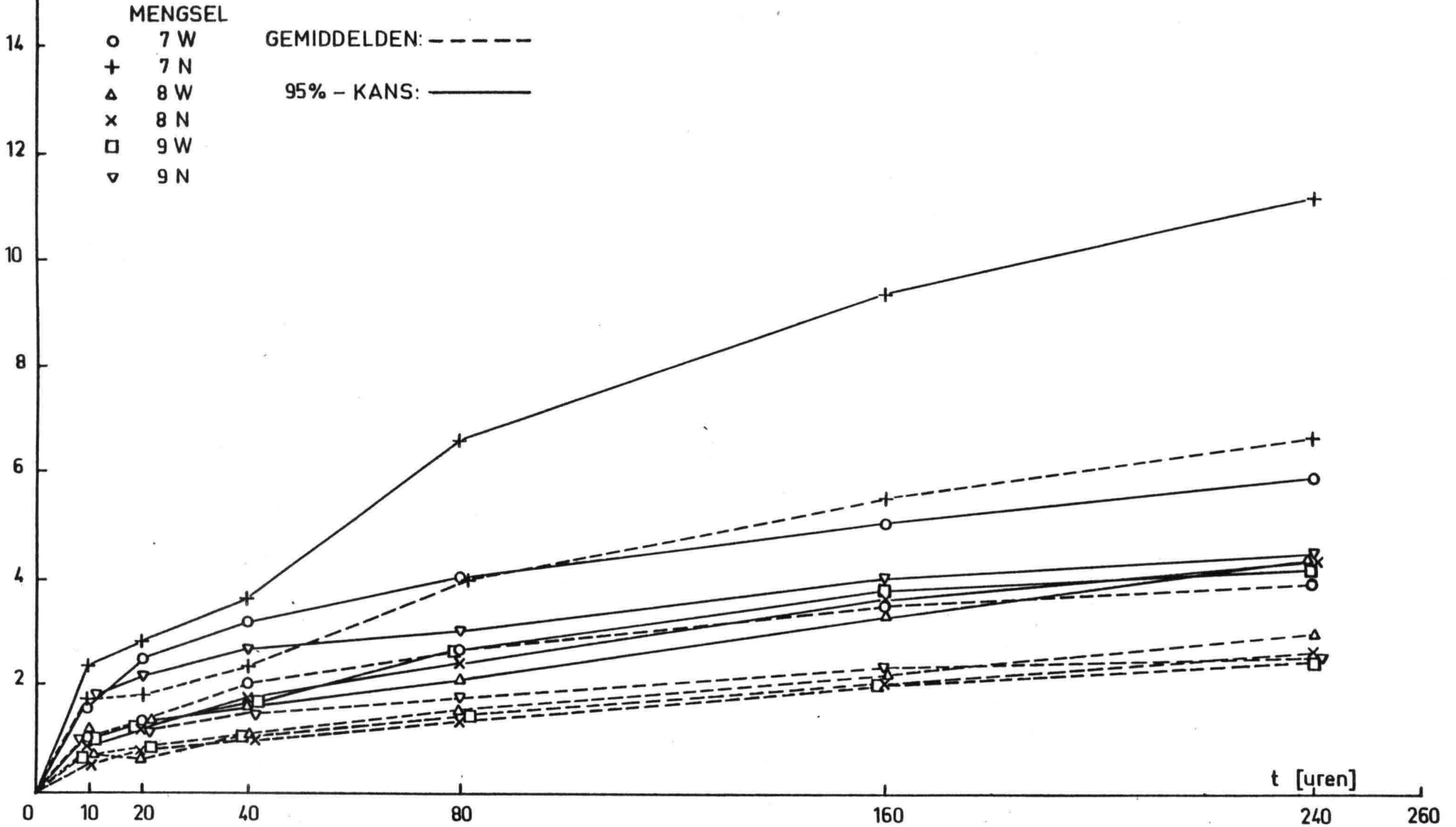
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 1 SERIE 2
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.



5 GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 2 SERIE 2
 UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.



5 GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 3 SERIE 2
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.



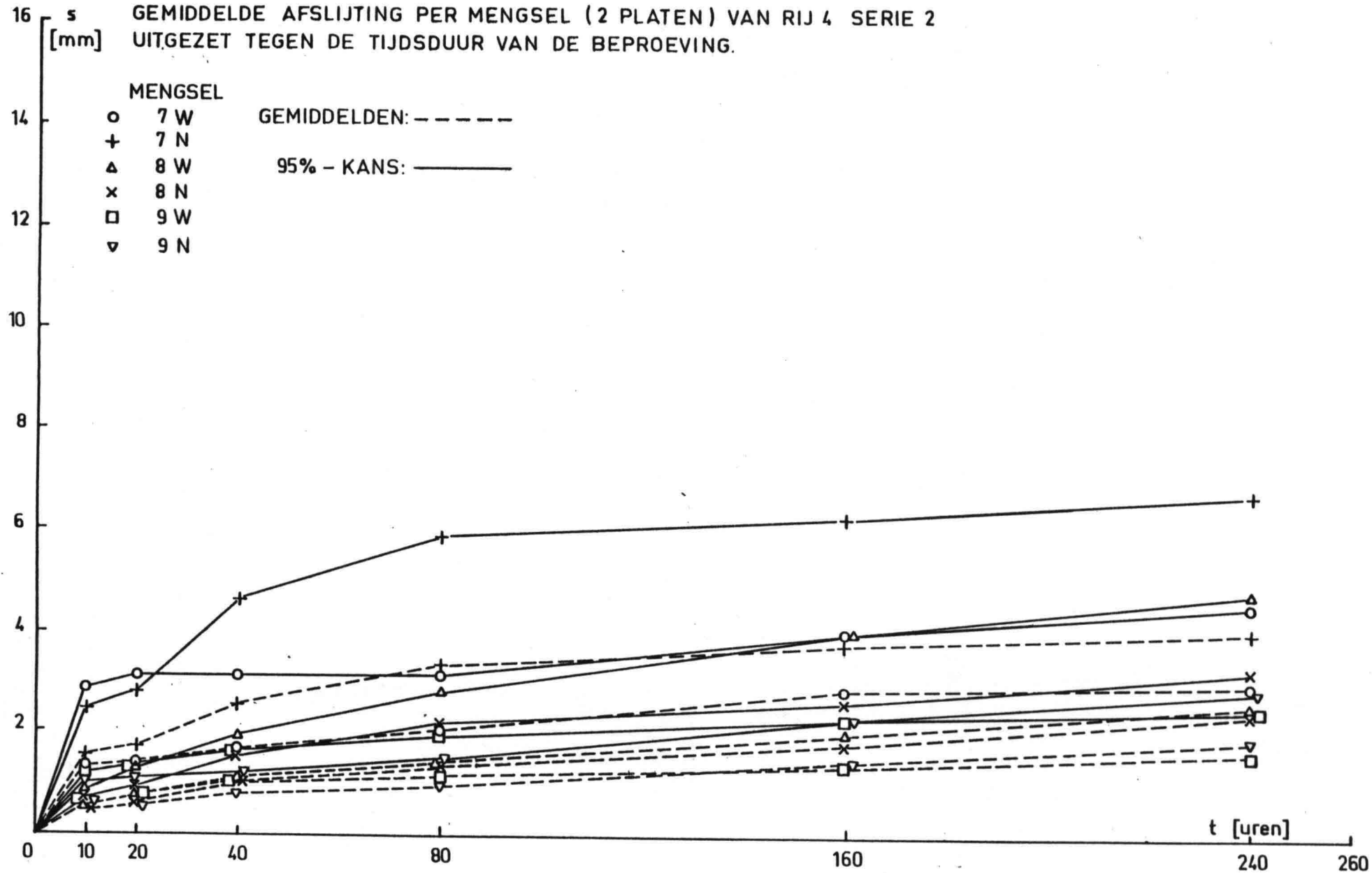
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 4 SERIE 2
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.

MENGSEL

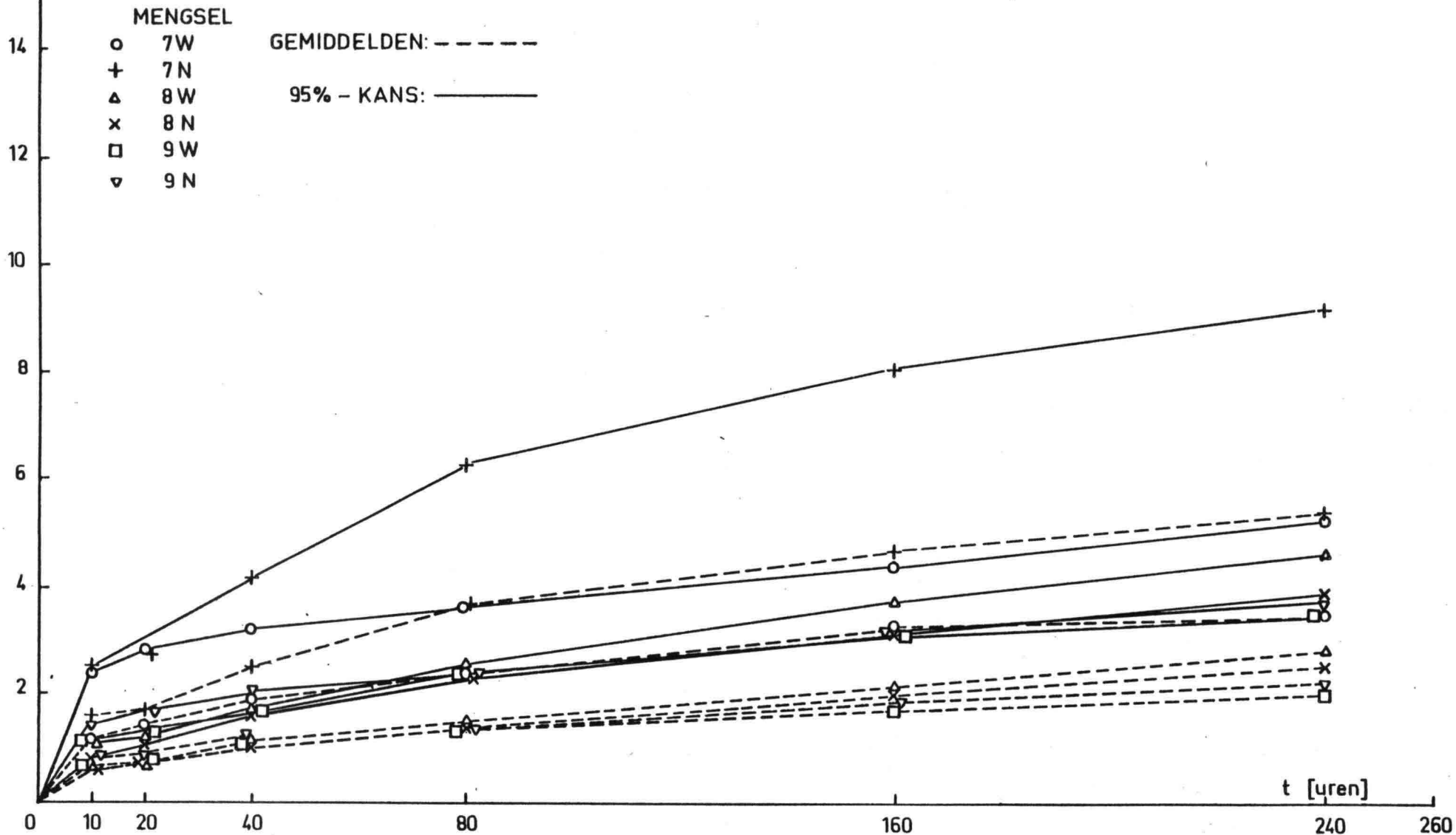
- o 7 W
- + 7 N
- △ 8 W
- x 8 N
- 9 W
- ▽ 9 N

GEMIDDELDEN: - - - -

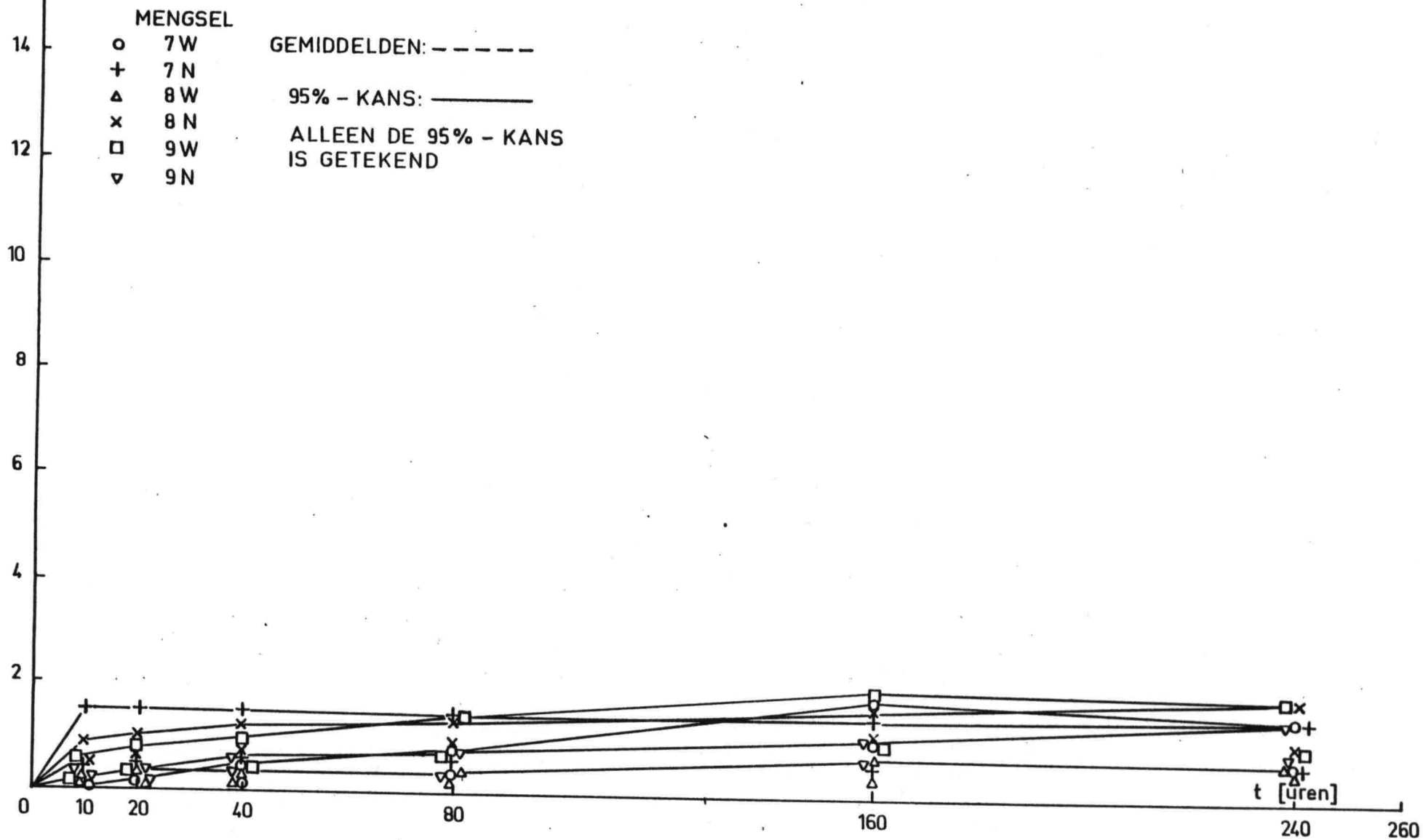
95% - KANS: ————

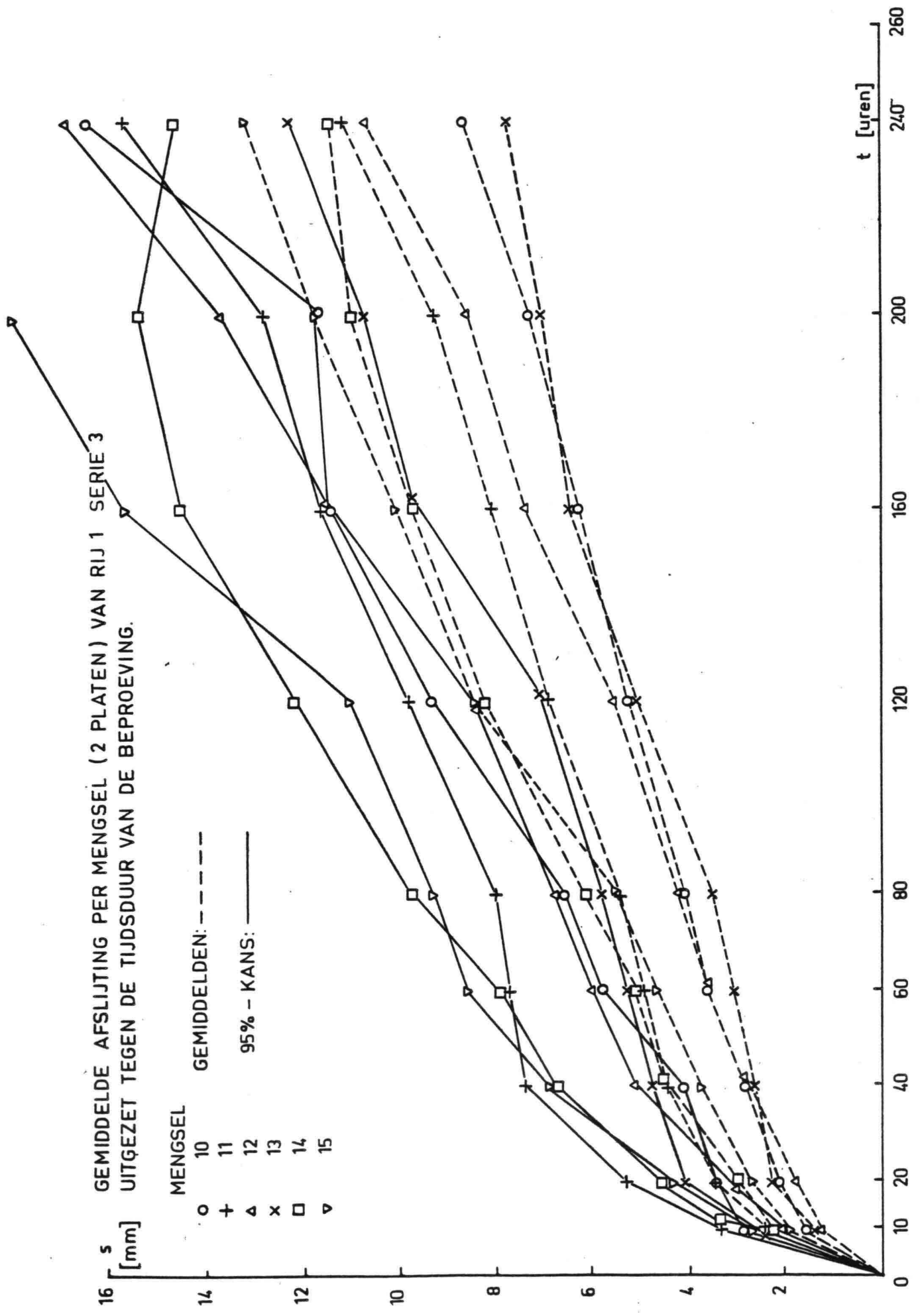


16 s GEMIDDELTE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 3 + RIJ 4 SERIE 2
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.

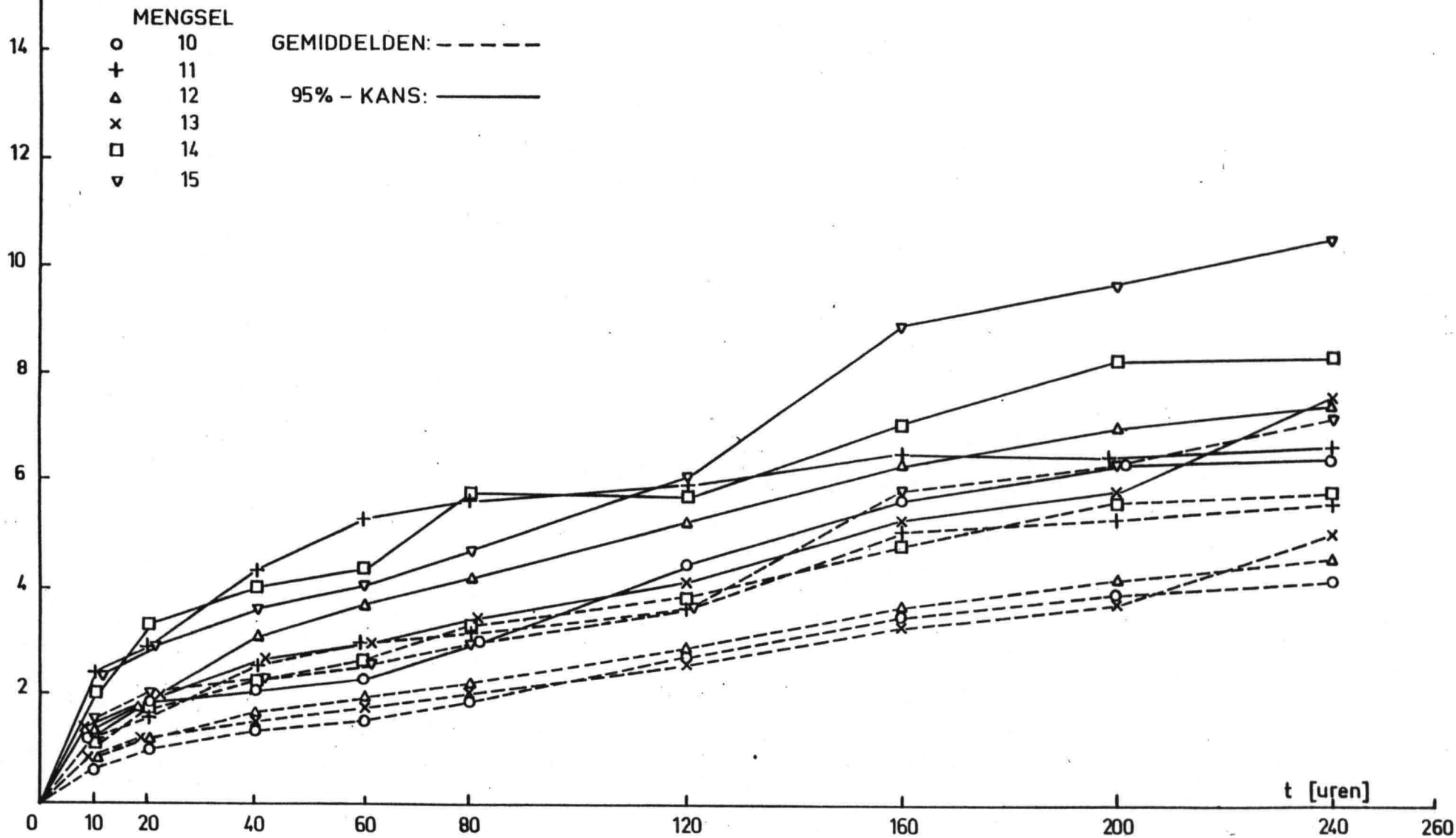


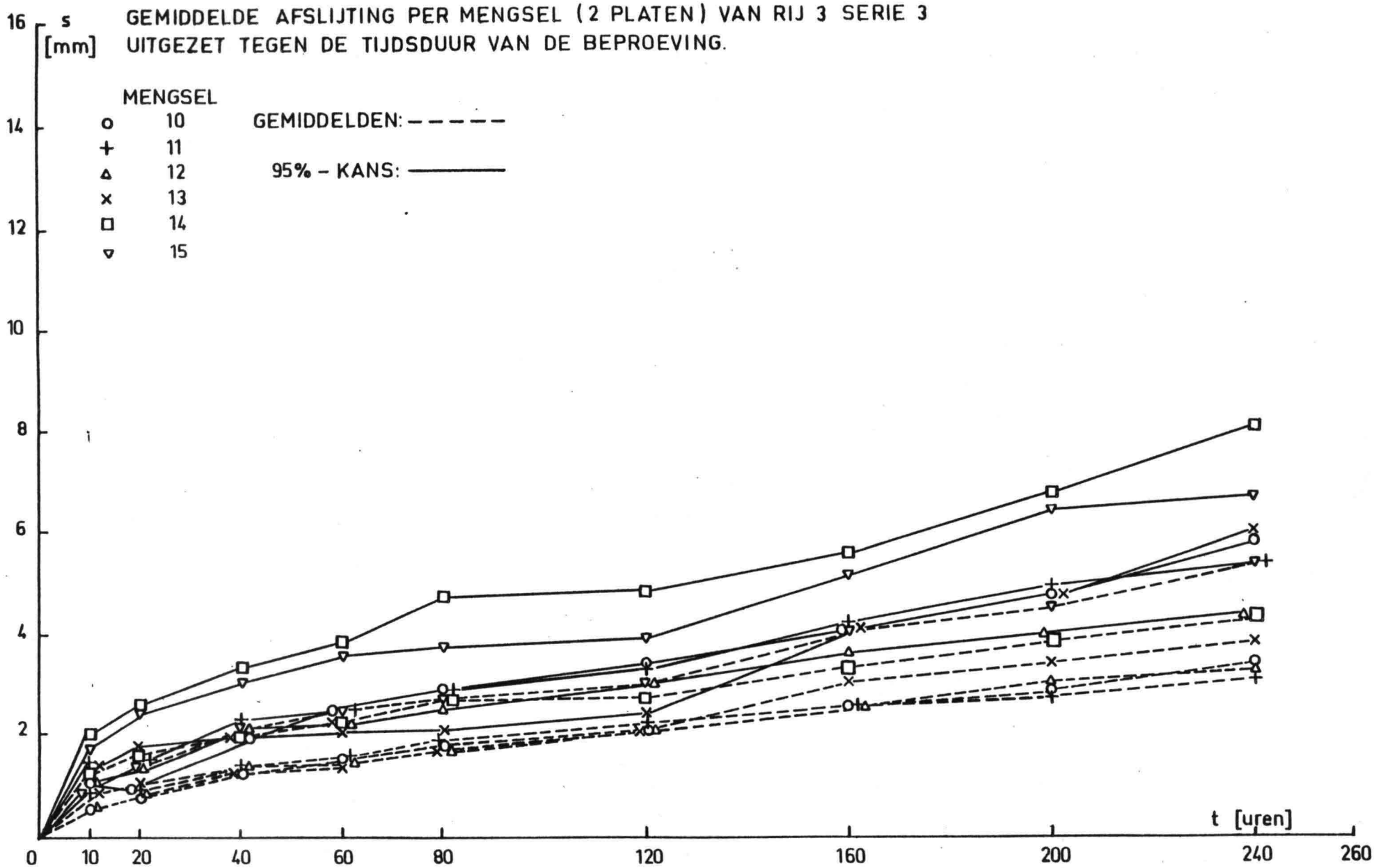
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 5 SERIE 2
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.



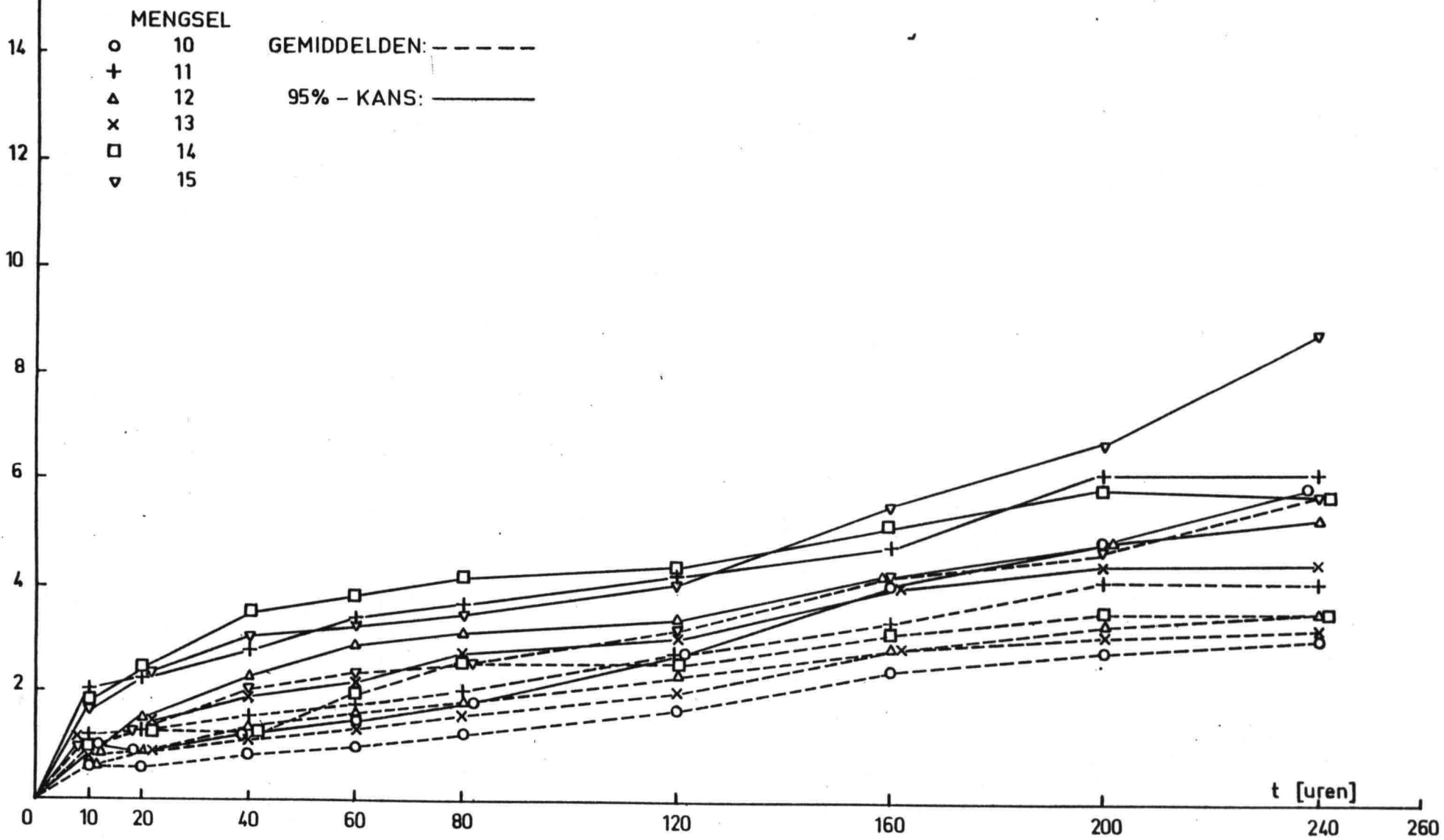


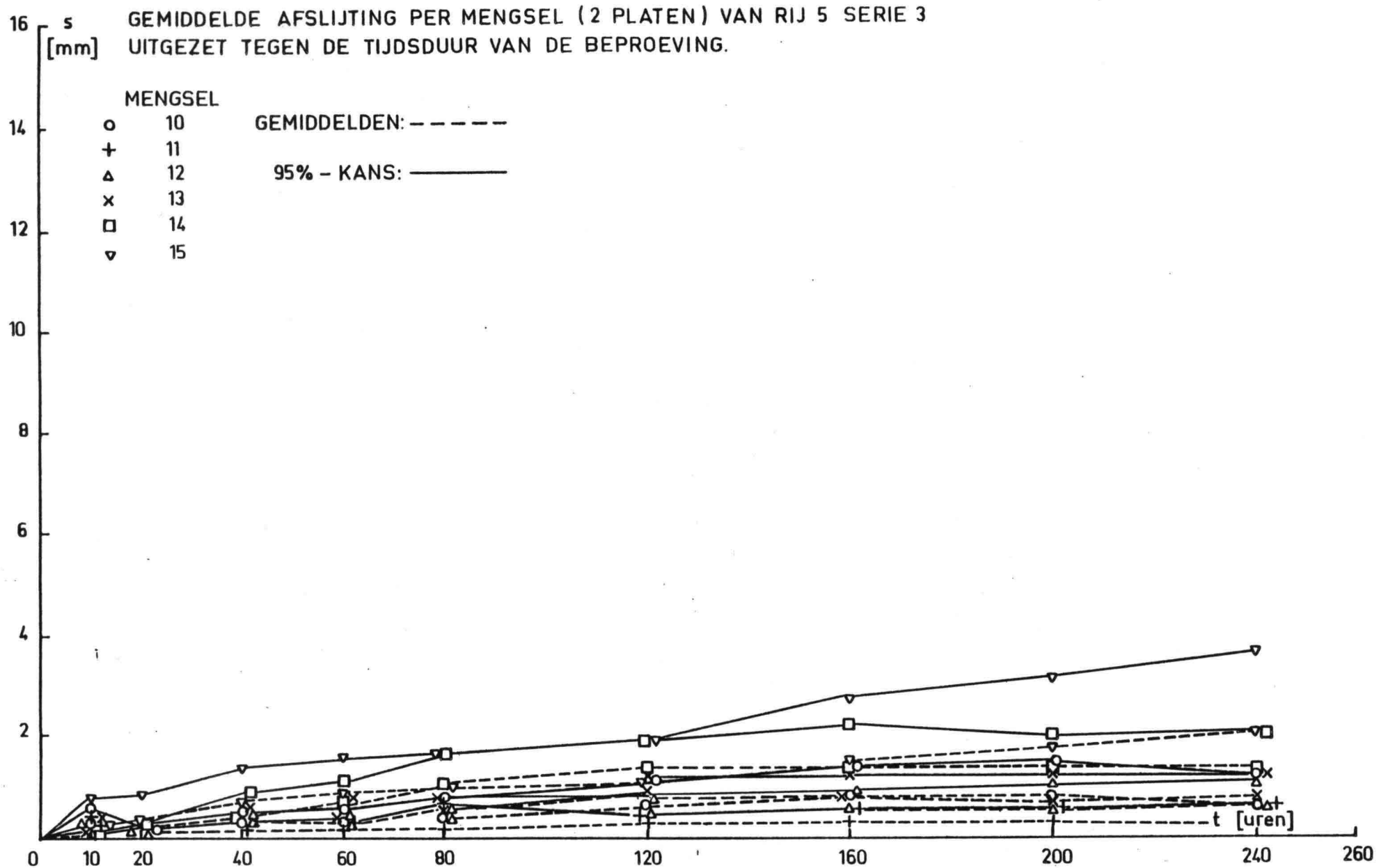
16 s GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 2 SERIE 3
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.





5 GEMIDDELDE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 4 SERIE 3
 UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.





16 s GEMIDDELTE AFSLIJTING PER MENGSEL (2 PLATEN) VAN RIJ 3 + 4 SERIE 3
 [mm] UITGEZET TEGEN DE TIJDSDUUR VAN DE BEPROEVING.

