

**Probabilistische gevoelig-
heidsanalyse heaving-
ontwerpregels**
Fase 4: Probabilistische analyses
CO-370250/51
juni 1998

Probabilistische gevoeligheidsanalyse heavingontwerpregels

Definitief

CO-370250/51

juni 1998

Spi/Best/Cl

Opgesteld in opdracht van:
DIRECTORAAT-GENERAAL RIJKSWATERSTAAT
DIENST WEG- EN WATERBOUWKUNDE
POSTBUS 5044
2600 GA DELFT

AFDELING SOFTWARE ONTWIKKELINGSGROEP
projectleider: dr. ir. S.E.J. Spierenburg
projectbegeleider: ir. E.O.F. Calle

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00

Telefax (015) 261 08 21

Postbank 234342

Bank MeesPierson NV

Rek.nr. 25.92.35.911

Rapport nr.: CO-370250/51		Datum rapport: juni 1998			
Titel en sub-titel: Probabilistische gevoeligheidsanalyse heavingontwerpregels		Behandelende afdeling: Strategisch Onderzoek			
		Projectnaam:			
Projectleider(s): dr.ir. S.E.J. Spierenburg		Projectbegeleider(s): GD: ir. E.O.F. Calle; DWW: ir. M. van de Paverd, drs. B.L. Lassing			
Naam en adres opdrachtgever: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		Referentie opdrachtgever:			
		Verzonden in: 10 - voude			
		Type rapport: eindrapport			
Samenvatting rapport: Zie rapport.					
Opmerkingen:					
Trefwoorden:			Verspreiding: DWW 10 ex.		
Opgeslagen op onder titel: d:\so\project\370250.51				Aantal blz.: 80	
Versie:	Datum:	Opgesteld door:	Paraaf:	Gecontroleerd door:	Paraaf:
1	januari 1998	S.E.J. Spierenburg		E.O.F. Calle	
2	juni 1998	S.E.J. Spierenburg	<i>SP</i>	E.O.F. Calle	<i>EL</i>

INHOUDSOPGAVE

1	Projectdefinitie	1
1.1	Inleiding	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Fasering van het project (Fase 2 t/m 5) en afbakening van de werkzaamheden in Fase 4	3
1.4	Gevolgde werkwijze in fase 4	4
1.5	Beschikbare informatie	7
1.6	Leeswijzer	7
2	Definitie van de case-studies	11
2.1	Geometrie van de case-studies en vaststellen parameters	11
2.2	Uitgangspunten voor de definitie van de case-studies	14
2.3	Deterministische parameters	15
2.4	Stochastische parameters	16
2.4.1	Vaststellen van de stochastische parameters	16
2.4.2	Correlatie van parameters	18
2.4.3	Spleet onder een sluis door zettingen	23
2.4.4	Lekkage van een kwelscherm door een gat als gevolg van corrosie	23
2.4.5	Lokale lekkage door de sloten	26
2.4.6	Lokale lek als gevolg van 'uit het slot lopen'	27
2.5	Overzicht van de definitie van de case-studies en het uitvoeren van de probabilistische analyses	29
3	Opzet van de probabilistische analyses	35
3.1	Methode voor het uitvoeren van de probabilistische analyses	35
3.1.1	Overzicht van methoden	35
3.1.2	Keuze van de probabilistische methode: Monte-Carlo simulaties	35
3.1.3	Benodigd aantal Monte Carlo simulaties	36
3.1.4	Berekening van de faalkans, het ontwerppunt en de invloed van parameters uit de resultaten van de probabilistische analyses	36
3.1.5	Overzicht van uitgangspunten voor de probabilistische analyses	40
3.1.6	Stapsgewijze opzet van de probabilistische berekeningen	40
3.2	Betrouwbaarheidsfuncties en wijze van berekenen van de betrouwbaarheidsfuncties	41
3.2.1	Definitie van de betrouwbaarheidsfuncties	41
3.2.2	Programmeren en wijze van berekenen van de betrouwbaarheidsfuncties	43
4	Resultaten van de probabilistische berekeningen	45
4.1	Wijze van presenteren van de resultaten	45
4.2	Berekende faalkansen en globale interpretatie van de invloed van de parameters lek, gat en spleetvorming door zetting	45
4.3	Invloedsfactoren α van de stochastische parameters: verval, geometrie, lek gat-grootte, spleet en bodemeigenschappen en conclusies ten aanzien van de bijdrage van de parameters aan het falen van een kwelscherm	48
4.4	Ontwerpgrafieken voor de benodigde relatieve inbedding, partiële factoren en conclusies ten aanzien van de invloed van de stochastische parameters lek, gat-grootte en spleet op de benodigde inbedding	53
4.5	Traditionele veiligheidsfactor, vergelijking met de probabilistische berekeningen en conclusies ten aanzien van het traditioneel geaccepteerde betrouwbaarheidsniveau	57
4.6	Alternatieve presentatie en interpretatie van de resultaten via een weerstandsfactor	61

4.7	Algemene conclusies uit de probabilistische berekeningen	65
5	Foutenboomanalyse	67
5.1	Achtergrond van de foutenboomanalyse	67
5.2	Opstellen foutenboom	67
5.2.1	Hoofdfuncties van een kwelscherm	67
5.2.2	Mogelijke faalmechanismen, algemene foutenboom van een kwelscherm en oorzaken die kunnen leiden tot heave	68
5.3	Uitgangspunten voor de foutenboomanalyses op basis van de resultaten van de probabilistische berekeningen	70
5.4	Foutenboomanalyses	71
5.4.1	Case 2: Kwelscherm in rivierdijk en Case 4: kwelscherm in buitenhoofd	71
5.4.2	Case 3: Sluis met dichte bodem in zeedijk	72
5.4.3	Analyse van de volledige foutenboom	75
5.5	Invloed van uit het slot lopen	76
5.6	Lengte-effecten	78
6	Vertaling naar de praktijk	81
6.1	Aanzet voor het opstellen van een probabilistische ontwerpregel	81
6.2	Invloed van een spleet onder een kunstwerk	84
7	Algemene conclusies van de probabilistische berekeningen en de foutenboomanalyses	87
	Literatuur	89

BIJLAGEN:

Bijlage 1:	Resultaten faalkansberekening case 4
Bijlage 2:	Resultaten faalkansberekening case 2: dicht
Bijlage 3:	Resultaten faalkansberekening case 2: lek
Bijlage 4:	Resultaten faalkansberekening case 2: gat
Bijlage 5:	Resultaten faalkansberekening case 3: geen spleet
Bijlage 6:	Resultaten faalkansberekening case 3: spleet
Bijlage 7:	Resultaten faalkansberekening case 2: 10*gem. lek
Bijlage 8:	Resultaten faalkansberekening case 2: gem. gat/10
Bijlage 9:	Resultaten faalkansberekening case 2: V laagdikte *3
Bijlage 10:	Resultaten faalkansberekening case 2: V porositeit *3
Bijlage 11:	Resultaten faalkansberekening case 2: evaluatie invloed lek
Bijlage 12:	Resultaten faalkansberekening case 2: evaluatie invloed gat
Bijlage 13:	Resultaten faalkansberekening case 2: evaluatie invloed laagdikte en porositeit
Bijlage 14:	Resultaten faalkansberekening case 3: evaluatie invloed spleet
Bijlage 15:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 4
Bijlage 16:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: dicht
Bijlage 17:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: lek
Bijlage 18:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: gat
Bijlage 19:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 3: geen spleet
Bijlage 20:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 3: spleet
Bijlage 21:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: 10*gem. lek
Bijlage 22:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: gem. gat/10
Bijlage 23:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: V laagdikte *3
Bijlage 24:	Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: V porositeit *3

- Bijlage 25: Ontwerpgrafiek case 4
- Bijlage 26: Partiële factor op de sterkte case 4
- Bijlage 27: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 4
- Bijlage 28: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 4
- Bijlage 29: Ontwerpgrafiek case 2: dicht
- Bijlage 30: Partiële factor op de sterkte case 2: dicht
- Bijlage 31: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: dicht
- Bijlage 32: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: dicht
- Bijlage 33: Ontwerpgrafiek case 2: lek
- Bijlage 34: Partiële factor op de sterkte case 2: lek
- Bijlage 35: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: lek
- Bijlage 36: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: lek
- Bijlage 37: Ontwerpgrafiek case 2: gat
- Bijlage 38: Partiële factor op de sterkte case 2: gat
- Bijlage 39: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: gat
- Bijlage 40: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: gat
- Bijlage 41: Ontwerpgrafiek case 3: geen spleet
- Bijlage 42: Partiële factor op de sterkte case 3: geen spleet
- Bijlage 43: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 3: geen spleet
- Bijlage 44: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 3: geen spleet
- Bijlage 45: Ontwerpgrafiek case 3: spleet
- Bijlage 46: Partiële factor op de sterkte case 3: spleet
- Bijlage 47: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 3: spleet
- Bijlage 48: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 3: spleet
- Bijlage 49: Partiële factor op de sterkte case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 50: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 51: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 52: Partiële factor op de sterkte case 2: gem. gat/10
- Bijlage 53: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: gem. gat/10
- Bijlage 54: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: gem. gat/10
- Bijlage 55: Partiële factor op de sterkte case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 56: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 57: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 58: Partiële factor op de sterkte case 2: V porositeit *3
- Bijlage 59: Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: V porositeit *3

- Bijlage 60: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D : case 2: V porositeit *3
- Bijlage 61: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 1$
- Bijlage 62: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 2$
- Bijlage 63: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 3$
- Bijlage 64: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 4$
- Bijlage 65: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 5$
- Bijlage 66: Totale veiligheidsfactor case 4
- Bijlage 67: Totale veiligheidsfactor case 2: dicht
- Bijlage 68: Totale veiligheidsfactor case 2: lek
- Bijlage 69: Totale veiligheidsfactor case 2: gat
- Bijlage 70: Totale veiligheidsfactor case 3: geen spleet
- Bijlage 71: Totale veiligheidsfactor case 3: spleet
- Bijlage 72: Totale veiligheidsfactor case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 73: Totale veiligheidsfactor case 2: gem. gat/10
- Bijlage 74: Totale veiligheidsfactor case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 75: Totale veiligheidsfactor case 2: V porositeit *3
- Bijlage 76: Weerstandsfactor: alle cases
- Bijlage 77: Weerstandsfactor: invloed spreiding porositeit en laagdikte
- Bijlage 78: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 4
- Bijlage 79: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: dicht
- Bijlage 80: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: lek
- Bijlage 81: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: gat
- Bijlage 82: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 3: geen spleet
- Bijlage 83: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 3: spleet
- Bijlage 84: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 85: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: gem. gat/10
- Bijlage 86: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 87: Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: V porositeit *3
- Bijlage 88: Foutenboomanalyse case3
- Bijlage 89: Literatuur over correlatie, kopie uit [Hogg and Craig, 1971]
- Bijlage 90: Invloed van een spleet op de faalkans bij kleine L/D
- Bijlage 91: Invloed van een spleet op de faalkans bij grote L/D
- Bijlage 92: Invloed van een spleet op de betrouwbaarheidsindex bij kleine L/D
- Bijlage 93: Invloed van een spleet op de betrouwbaarheidsindex bij grote L/D

1 Projectdefinitie

1.1 Inleiding

Dit rapport is opgesteld in het kader van het project 'Probabilistische gevoeligheidsanalyse heaving-ontwerpregels fase 2 t/m 5', uitgevoerd in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat. De werkzaamheden worden uitgevoerd in het kader van het onderzoek van de TAWB met verplichtingnummer 3100.0302. Met overeenkomst DWW-1317 is opdracht verleend tot het uitvoeren van de werkzaamheden. De werkzaamheden worden uitgevoerd volgens het projectplan van de DWW, [DWW 1996] en de offerte van Grondmechanica Delft CO-370250/27. Het voorliggende rapport betreft Fase 4: Probabilistische gevoeligheidsanalyses uit het projectplan.

De doelstelling van het onderzoek is te komen tot een inschatting van de invloed van de onzekerheden van een aantal parameters op het ontwerp van een kwelscherm ten aanzien van het mechanisme heave. De te onderzoeken parameters volgens het projectplan zijn:

1. De invloed van een spleet door zetting van de ondergrond op de stromingsweerstand van damwanden en de betrouwbaarheid van de damwanden.
2. De invloed van onvolkomenheden (gaten en lokale lek) op de stromingsweerstand van damwanden en op de betrouwbaarheid van de damwanden.
3. De invloed van de stochastische onzekerheid van de verschillende parameters in de uiteindelijke veiligheid van de constructie (bezwijken ten gevolge van heaving).

In Fase 4 worden probabilistische berekeningen uitgevoerd en de resultaten daarvan geïnterpreteerd. De probleemstelling is omschreven in § 1.2. De samenhang van de hier gerapporteerde Fase 4 met de andere fasen van het onderhavige project alsmede de afbakening van Fase 4 zijn beschreven in § 1.3. De gevolgde werkwijze voor Fase 4 is omschreven § 1.4. Een overzicht van de beschikbare informatie is verzameld in § 1.5. Paragraaf 1.6 bevat een leeswijzer bij dit rapport.

1.2 Probleemstelling

Bij het ontwerp van een kwelscherm ten aanzien van heave dient de benodigde inbeddingsdiepte te worden bepaald waarbij aan het gestelde veiligheids criterium voor heave wordt voldaan.

Voor het ontwerp en de toetsing van een kwelscherm worden in het projectplan [DWW 1996] rekeninghoudend met de huidige theorievorming ten aanzien van piping en heave drie stappen onderscheiden:

1. Een toetsing met de eenvoudige ontwerpregels 'Bligh en Lane' (beheerders).
2. Een gedetailleerde toetsing, (beheerders).

Voor de toetsing van een uitgekierder ontwerp ten aanzien van piping, bij afwezigheid van schermen, is de regel van Sellmeijer beschikbaar.

Voor de toepassing van kwelschermen is een ontwerpinstrumentarium ontwikkeld. In deze methode wordt de grondwaterstroming berekend met behulp van de ontwikkelde fragmentenmethode.

3. Een geavanceerde toetsing (ingenieursbureaus).

Hierbij wordt de grondwaterstroming inclusief het effect van een kwelscherm berekend met behulp van numerieke grondwaterstromingsanalyses.

De toepassing van bovenstaande methoden voor het ontwerp van een primaire waterkering binnen de bestaande probabilistische veiligheidsfilosofie is maar ten dele mogelijk. Met name voor de toepassing van het ontwikkelde ontwerpinstrumentarium heaving door beheerders is geen semi-probabilistische methodiek, bijvoorbeeld in de vorm van partiële factoren, beschikbaar. Traditioneel wordt bij het toetsen van heaving een totale veiligheidsfactor op het toelaatbaar verhang gehanteerd.

Bij het gebruik van een geavanceerde methode zal de te hanteren probabilistische filosofie op ad hoc basis ontwikkeld moeten worden. De toetsing volgens de regels van Bligh en Lane is uitgewerkt in de Leidraad rivierdijken. Toetsing volgens de methode Sellmeijer op basis van een probabilistisch concept is vastgelegd in een uitgave van de TAW.

De doelstelling van het onderhavige onderzoek ten behoeve van het mechanisme heave is het ontwikkelen van een toetsings- en ontwerpprocedure voor heave die toegepast kan worden door beheerders. Een mogelijke praktische uitwerking daarvan is een procedure voor het uitvoeren van een fragmentenberekening waarbij de (in te voeren) rekenwaarden van de parameters worden bepaald aan de hand van een set partiële veiligheidsfactoren. Een dergelijke methode dient te zijn afgestemd op de bestaande systematiek van het ontwerp van primaire waterkeringen. De nieuwe methode dient ook zo afgestemd te zijn op de bestaande ontwerppraktijk dat er geen trendbreuk optreedt.

De afgeleide doelstelling van de hier gerapporteerde Fase 4 is het onderzoeken van de invloed van een aantal stochastische parameters, het presenteren van de resultaten en het vertalen van de resultaten in veilige ontwerpgrafieken. De benodigde inbeddingdiepte dient bij gegeven spreiding en gewenst betrouwbaarheidsniveau in die grafieken afgelezen te kunnen worden..

In Fase 5 worden de resultaten van Fase 2 t/m 4 geëvalueerd en wordt een voorstel gemaakt voor een praktische ontwerpprocedure voor beheerders waarbij het benodigde inbeddingsniveau wordt bepaald aan de hand van berekeningen met de fragmentenmethode. In een volgend project wordt deze ontwerpprocedure nader uitgewerkt.

De in Fase 4 uit te voeren werkzaamheden omvatten:

- het maken van een inschatting van de invloed de gevoeligheid van de heavingontwerpregels voor spreiding als gevolg van:
 - * een spleet onder een kunstwerk door zetting van de ondergrond

- * onvolkomenheden (gaten en lokale lek)
- * stochastische onzekerheid door ruimtelijke spreiding van de verschillende parameters
- het berekenen van het betrouwbaarheidsniveau, uitgedrukt in de faalkans c.q. de betrouwbaarheidsindex, dat overeenkomt met de traditionele waarde van de totale veiligheidsfactor gelijk aan 2.0
- het genereren van veilige ontwerpgrafieken
- het onderzoeken van een alternatieve wijze van presenteren en interpreteren van de resultaten via een weerstandsfactor
- het maken van een opzet voor het inpassen van de resultaten in de bestaande filosofie voor het ontwerp van primaire waterkeringen en het definiëren van het eventueel benodigde vervolg onderzoek.

Om de effecten van zettingen in de ondergrond en onvolkomenheden van de damwand op het ontwerp van een kwelscherm te kunnen analyseren met het ontwerpinstrumentarium heaving zijn in het kader van Fase 2 van het onderhavige project speciale fragmenten ontwikkeld. In Fase 3 wordt een inverse procedure voor het bepalen van de weerstand van een kwelscherm uit in-situ metingen ontwikkeld. In Fase 4 worden de invloed van de kans van optreden van de parameters en de invloed van de statistische spreiding van de parameters geanalyseerd aan de hand van probabilistische berekeningen voor een aantal karakteristieke situaties. Deze vier case-studies zijn in het projectplan [DWW 1996] gedefinieerd.

De fasering van het project en de afbakening van de werkzaamheden in fase 4 is beschreven in § 1.3. De gevolgde werkwijze in Fase 4 is beschreven in 1.4. De evaluatie van resultaten, het opstellen van een voorstel voor de inpassing in de bestaande ontwerpsystematiek van primaire waterkeringen en het definiëren van het benodigd onderzoek voor de inpassing worden uitgevoerd in Fase 5.

1.3 Fasering van het project (Fase 2 t/m 5) en afbakening van de werkzaamheden in Fase 4

In het projectplan is de uitvoering van het project gefaseerd. De werkzaamheden in de fase kunnen als volgt worden samengevat:

1. Opstartfase
Beschrijven van de probabilistische methode met behulp van AFDA in FORM. Definiëren van de betrouwbaarheidsfuncties voor 'opdrijven' en 'heave'. Opstellen van foutenbomen voor het functioneren van een kwelscherm. Inventariseren van de benodigde fragmenten.
2. Fragmenten afleiden
Afleiden van de benodigde fragmenten.
3. Indirecte weerstandsbepaling uit metingen
Het doel van fase 3 is het ontwikkelen van een methode voor de inverse bepaling van de weerstand van een kwelscherm uit in-situ metingen.

4. Probabilistische gevoeligheidsanalyse
Case-studies: uitvoeren van probabilistische analyses voor een aantal karakteristieke situaties. Foutenboomanalyses en de interpretatie van de resultaten.
5. Eindrapportage
Opstellen van de samenvattende eindrapportage, opstellen van een voorstel voor een praktische ontwerpprocedure rekeninghoudend met de bestaande ontwerpfilosofie en de ontwikkelingen in de Marsroute, definiëren van het benodigd onderzoek voor de invulling van de voorgestelde ontwerpprocedure.

Fase 1, 2 en 3 zijn afgerond en gerapporteerd [GD 1996a], [GD 1997a] en [GD 1997b]. Het voorliggende rapport betreft Fase 4.

In het projectplan zijn voor de probabilistische analyses vier case-studies gedefinieerd, te weten

1. Rivierdijk met opdrijvend achterland.
2. Rivierdijk zonder opdrijvend achterland
- 3 Sluis met dichte kolkvloer.
4. Binnen- en buitenhoofd van een sluis met open kolkvloer.

De geometrie van de cases is weergegeven in figuur 2.1 op pagina 10 en 11.

Afbakening van het onderzoek.

Het oorspronkelijke projectplan [DWW 1996] is opgezet voor de bestudering van de invloed van de stochastische parameters op de mechanismen: 'piping'; 'heave' en 'opdrijven'. In de opstartfase is voor die mechanismen een betrouwbaarheidsfunctie gedefinieerd. In de opdracht van Fase 4 is gekozen om voorlopig alleen de mechanismen 'heave' en 'opdrijven' te bestuderen. Voor het mechanisme 'piping' is nog geen adequaat fragment beschikbaar.

Tijdens de uitvoering van Fase 4 is besloten om case 1 wel te programmeren maar de analyses voor deze case te laten vervallen in dit project vanwege niet voorziene extra programmeerwerkzaamheden voor dit mechanisme en mogelijke lange reketijden in de Monte Carlo analyses.

1.4 Gevolgde werkwijze in fase 4

De werkzaamheden voor fase 4 zijn:

1. Nadere definitie van de cases
De nadere definitie van de cases omvat:
 - het vaststellen van deterministische parameters en de mogelijke range van waarden
 - het vaststellen van de stochastische parameters en de bijbehorende kansverdelingsfuncties
 - het vaststellen van de spreiding van parameters

- het vaststellen van de onderlinge correlatie tussen stochastische parameters.

2. Programmeren van de Z-functies

In fase 2 zijn de oplossingen voor de benodigde fragmenten in formulevorm uitgewerkt en voor een aantal gevallen geprogrammeerd. De werkzaamheden ten behoeve van de probabilistische analyses van de case-studies zijn:

- per case: het assembleren en programmeren van de benodigde fragmenten
- per case: een programma ontwikkelen waarmee bij gegeven parameterwaarden de waarde van de in fase 1 gedefinieerde betrouwbaarheidsfuncties voor 'opdrijven' en 'heave' wordt berekend
- het koppelen van het ontwikkelde programma voor de berekening van de betrouwbaarheidsfunctie aan een probabilistisch pakket. Beschikbare methoden voor een probabilistische methode zijn de eerste orde tweede moment methode (AFDA) met behulp van FORM of het uitvoeren van Monte Carlo simulaties. In het projectplan [DWW 1996] en de offerte van Grondmechanica Delft is de te hanteren methode bewust vrijgelaten. Tijdens de uitvoering is in overleg met de opdrachtgever gekozen voor de methode van Monte Carlo simulaties. De belangrijkste argumenten hiervoor zijn de robuustheid van de methode. De methode is ongevoelig voor discontinuïteiten en lokale minima. Om de rekentijd te beperken is ervoor gekozen om de waarde van de betrouwbaarheidsfunctie voor een deel via interpolatie te bepalen.

3. Het uitvoeren van de berekeningen en presenteren van de resultaten

De resultaten worden als volgt gepresenteerd:

1. Presenteren van berekende faalkansen en globale interpretatie van de invloed van de parameters lek, gat en spleetvorming door zetting.
2. Berekenen van de invloedsfactoren α van de stochastische parameters : verval, geometrie, lek gatgrootte, spleet en bodemeigenschappen en opstellen van conclusies ten aanzien van de bijdrage van de parameters aan het falen van een kwelscherm.
3. Genereren van ontwerpgrafieken voor de benodigde relatieve inbedding, partiële factoren en opstellen van conclusies ten aanzien van de invloed van de stochastische parameters lek, gatgrootte en spleet op de benodigde inbedding.
4. Berekenen van de traditionele veiligheidsfactor, vergelijking met de probabilistische berekeningen en opstellen van conclusies ten aanzien van het traditioneel geaccepteerde betrouwbaarheidsniveau.
5. Uitwerken van een alternatieve presentatie en interpretatie van de resultaten via een weerstandsfactor en evalueren of een rekenregel kan worden geformuleerd via de weerstandsfactor.
6. Opstellen van algemene conclusies uit de probabilistische berekeningen.

4. Het doorrekenen van de foutenboom van de cases
Uit de evaluatie van de resultaten blijkt het belang van heaving ten opzicht van andere mechanismen
5. Een inschatting van de invloed van de correlatielengte ten aanzien van het lengte-effect.

De nadere definitie van de cases is uitgewerkt in hoofdstuk 2. De opzet van de probabilistische berekeningen is vastgelegd in hoofdstuk 3. De resultaten van de probabilistische berekeningen zijn beschreven in hoofdstuk 4. De foutenboomanalyses zijn beschreven in hoofdstuk 5. Een aanzet voor de vertaling van de resultaten naar een probabilistische ontwerpregel is gegeven in hoofdstuk 6. Algemene conclusies zijn verzameld in hoofdstuk 7.

1.5 Beschikbare informatie

Bij het uitvoeren van de werkzaamheden is gebruik gemaakt van de volgende bronnen:

- Het projectplan van de DWW, [DWW 1996].
- Het rapport van de case-studie naar piping en heave bij het sluisencomplex IJmuiden [DWW 1995].
- De rapporten van fase 1 en fase 2 van het project, [GD 1996a], [GD 1997a].
- Informatie omtrent corrosie van damwanden is ontleend aan [VOM 1988].
- Informatie omtrent het falen van damwanden door uit het slot lopen is ontleend aan [RWS 1981].
- Informatie omtrent hoogwateroverschrijdingsverdeling voor rivieren en extreme getijstanden zijn ontleend aan beschikbare informatie van het RIZA.
Daarnaast is gebruik gemaakt van informatie uit het project 'Veiligheid kunstwerken natte infrastructuur', [Bouwdienst 1998].
- Afmetingen van sluisen zijn bepaald aan de hand van beschikbare informatie uit het project 'Veiligheid kunstwerken natte infrastructuur' en ontwerpnota's van bestaande sluisen waaronder de ontwerprapporten ten behoeve van de Renovatie Zuider- en Kleine Sluis IJmuiden [Bouwdienst 1996].

De verwijzingen naar deze en overige bronnen zijn opgenomen in de tekst. De bronnen zijn verzameld in het hoofdstuk Literatuur.

1.6 Leeswijzer

De opzet en indeling van het rapport sluit aan bij de in § 1.4 geschetste werkwijze. In hoofdstuk 2 is de nadere definitie van de cases uitgewerkt. De definitie van de cases is samengevat in de volgende tabellen:

- tabel 2.5 met de deterministische en stochastische parameters van de cases 'heave' (case 2, 3, en 4), de statistische verdelingsfuncties van de stochastische parameters en de gekozen waarden van de parameters in de verdelingen
- tabel 2.6 met de definitie van de variantberekeningen voor de cases 'heave'
- tabel 2.7 met de deterministische en stochastische parameters van de cases 'heave', de statistische verdelingsfuncties van de stochastische parameters.

In hoofdstuk 3 is de opzet van de probabilistische berekeningen vastgelegd. De keuze van de gehanteerde methode: Monte Carlo simulaties wordt in § 3.1 toegelicht alsmede de procedure voor het uitvoeren en uitwerken van de berekeningen. De betrouwbaarheidsfuncties voor 'heave' en 'opdrijven' -

worden in § 3.2 gedefinieerd en in het bijzonder de functie 'heave' in het geval van lek door de sloten en lek door een gat. In § 3.2.2 wordt de wijze waarop de betrouwbaarheidsfunctie in de probabilistische berekeningen wordt berekend toegelicht.

In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de probabilistische berekeningen gepresenteerd en geïnterpreteerd aan de hand van de berekende faalkansen en invloedsfactoren van de parameters, zie § 4.2 en § 4.3. Kenmerkende waarden van de invloedsfactoren zijn verzameld in tabel 4.3 en 4.4

Uit de resultaten worden in § 4.4 de gedefinieerde ontwerpgrafieken afgeleid. De ontwerpgrafieken van de configuraties zijn afgeleid voor verschillende waarden van betrouwbaarheidsindex β . De ontwerpgrafieken van de verschillende berekeningen bij $\beta=5$ zijn verzameld in figuur 4.3.

De grootte van de totale veiligheidsfactor volgens de traditionele methodiek wordt voor elke configuratie in § 4.5 berekend. De grootte van de totale veiligheidsfactor wordt uitgezet als functie van het betrouwbaarheidsniveau.

Bij de interpretatie wordt in § 4.6 een weerstandsfactor gedefinieerd. De grootte van de weerstandsfactor wordt voor elke configuratie berekend en de resultaten van alle configuraties worden uitgezet als functie van het betrouwbaarheidsniveau. De weerstandsfactoren zijn uitgezet in figuur 4.5 en 4.6.

Conclusies op basis van de resultaten van de probabilistische berekeningen zijn verzameld in § 4.7.

Hoofdstuk 5 bevat de resultaten van de foutenboomanalyses. De foutenboom wordt afgeleid in § 5.2. Uitgangspunten voor de foutenboomanalyse op basis van de resultaten van de probabilistische berekeningen zijn verzameld in § 5.3. Voor de cases wordt in § 5.4 een foutenboomanalyse van het mechanisme heave uitgevoerd. De algemene foutenboom van een kwelscherm wordt in § 5.4.3 geanalyseerd. De invloed van uit het slot lopen wordt in § 5.5 apart beoordeeld. Als laatste worden § 5.6 lengte-effecten van heave geïnventariseerd.

In hoofdstuk 6 is een aanzet voor de vertaling van de resultaten naar een semi-probabilistische ontwerpregel gegeven.

In hoofdstuk 7 zijn algemene conclusies verzameld.

De resultaten van de berekeningen zijn verzameld in de bijlagen bij dit rapport. De bijlagennummers zijn verzameld in Tabel 1.1.

Resultaten probabilistische berekeningen	paragraaf	bijlage
Faalkansberekeningen	4.2	1 t/m 14
Faalkans als functie van relatieve inbedding	4.2	78 t/m 87
Invloedsfactoren	4.3	15 t/m 24
Ontwerpgrafieken, materiaalfactor, relatie ontwerpwaarden en karakteristieke waarden van de belasting	4.4	25 t/m 60
Combinatie van ontwerpgrafieken bij vaste waarden van de betrouwbaarheidsindex	4.4	61 t/m 65
Totale veiligheidsfactor	4.5	66 t/m 75
Weerstandsfactor	4.6	76 t/m 77
Faalkansanalyse	5.4.2	88
Literatuur over correlatie	2.4.2	89
Invloed van een spleet	6.2	90 t/m 93

Tabel 1.1 Bijlagennummers

2 Definitie van de case-studies

2.1 Geometrie van de case-studies en vaststellen parameters

De invloed van de stochastische parameters (spleet, gat en lokale lek, ruimtelijke spreiding van grootheden) is onderzocht door het uitvoeren van probabilistische analyses voor een aantal karakteristieke situaties. In het projectplan [DWW 1996] zijn de volgende case-studies gedefinieerd:

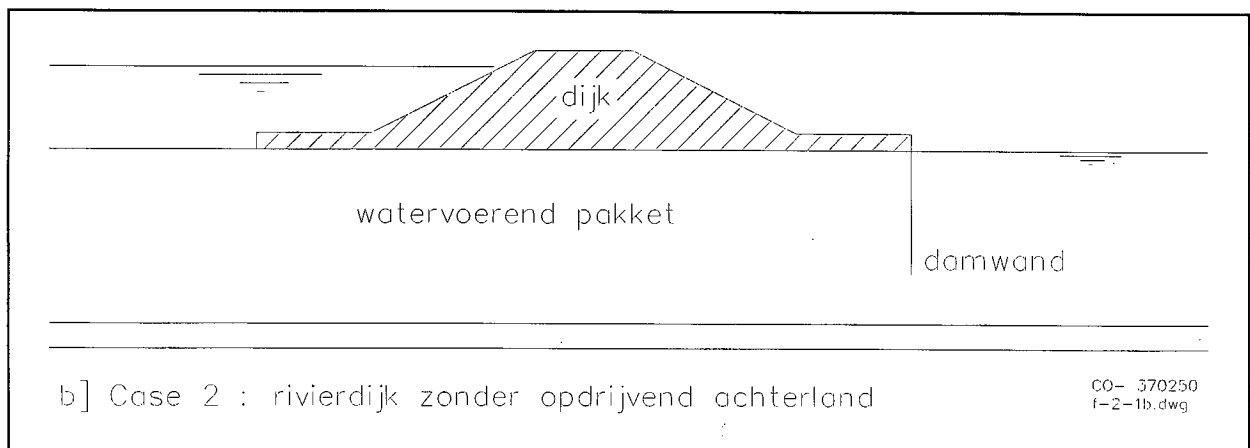
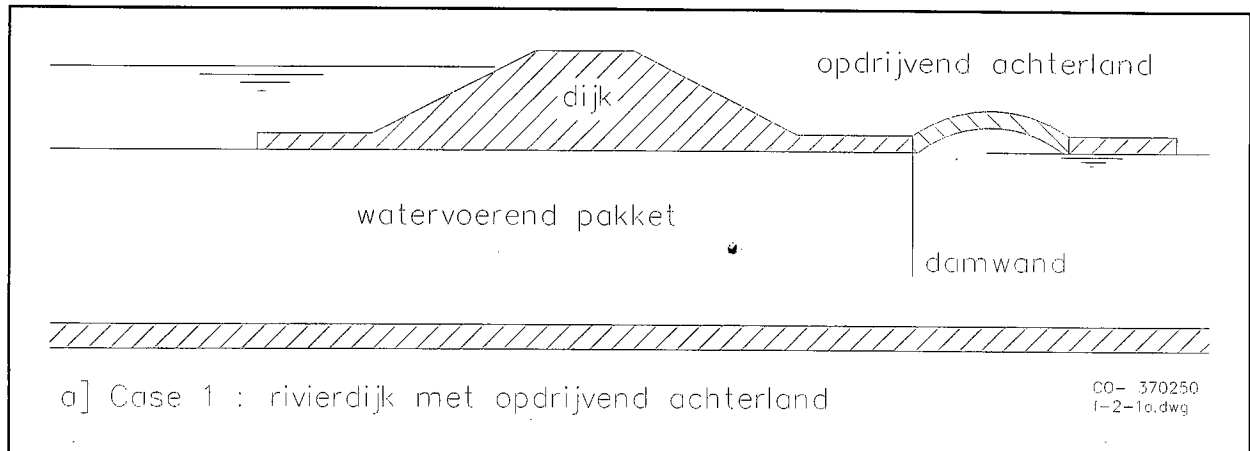
1. Rivierdijk met opdrijvend achterland.
2. Rivierdijk zonder opdrijvend achterland.
3. Sluis met dichte kolkvloer.
4. Binnen- en buitenhoofd van een sluis met open kolkvloer.

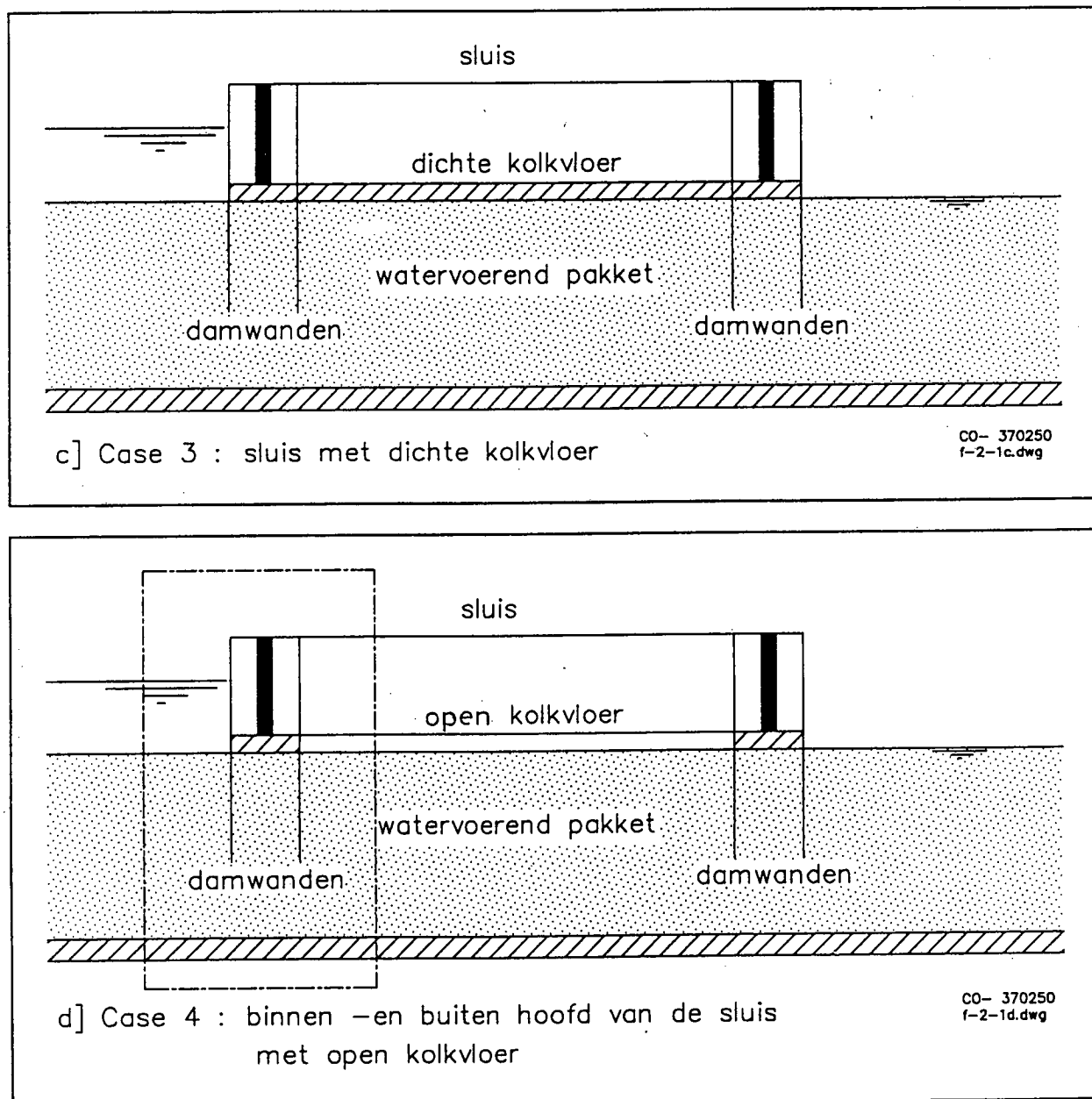
De geometrie van de cases is weergegeven in figuur 2.1.

De effecten van de spreiding van de parameters op het functioneren van het kwelscherm zijn geanalyseerd met behulp van speciale fragmenten (zetting, gat en lokale lek) of door het evalueren van de invloed van spreiding van de grootheden. De benodigde fragmenten zijn afgeleid in fase 2, zie [GD 1997]. Het functioneren van een kwelscherm volgt in een probabilistische analyse uit de grootte van de betrouwbaarheidsfunctie. De betrouwbaarheidsfuncties zijn gedefinieerd in fase 1 [GD 1996]. De opzet probabilistische analyse met o.a. de betrouwbaarheidsfuncties is uitgewerkt in hoofdstuk 3. Parameters die in de systematiek van de fragmentenmethode de grootte van de betrouwbaarheidsfunctie bepalen zijn:

- H_{bui} het niveau van de buitenwaterstand
- H_{bi} het niveau van de binnenwaterstand
- D de dikte van het watervoerend pakket
- K de doorlatendheid van het watervoerend pakket
- K_{afdek} de doorlatendheid van het afdekkend pakket
- γ_{afdek} het eigen gewicht van een slecht doorlatend afdekkend pakket in het achterland. Deze grootte bepaalt de weerstand tegen opdrijven
- L de afmeting van de kering in dwarsdoorsnede uitgedrukt in de lengte van de kering
- L_{h} de lengte van het buiten- c.q. binnenhoofd, dat wil zeggen de afstand tussen de (overige) damwandschermen in het buiten- en binnenhoofd
- d de inbeddingsdiepte van het kwelscherm
- d_{overig} de inbeddingsdiepte van eventuele overige schermen
- n de porositeit van het watervoerend pakket. Deze grootte bepaalt het verhang achter het kwelscherm waarbij heave optreedt
- γ_{k} het soortelijk gewicht van het korrelmateriaal van grond in de uitdrukking van het kritieke verhang
- γ_{w} het soortelijk gewicht van water

- P_{spleet} de kans van optreden van een spleet onder het kunstwerk door zettingen
- G_{gat} de lek door het kwelscherm als gevolg van een gat
- K_{scherm} de lek door het kwelscherm als gevolg van lokale lek als gevolg van lekkage door de sloten en de invloed van uit het slot lopen van een damwandplank tijdens het installeren





Figuur 2.1 Casestudies

2.2 Uitgangspunten voor de definitie van de case-studies

Door de opdrachtgever zijn in overleg met Grondmechanica Delft de volgende algemene uitgangspunten voor het uitvoeren van de probabilistische analyses gekozen:

- Om de invloed van de spreiding van het verval over de kering op de faalkans en met name op de grootte van de invloedsfactor van het verval te kunnen evalueren zijn de cases als volgt gedefinieerd:
 - In de cases met een rivierdijk wordt voor de hydraulische randvoorwaarden uitgegaan van een dijk in een bovenrivierengebied.
 - In de cases met een sluis wordt voor de hydraulische randvoorwaarden uitgegaan van een sluis die een onderdeel vormt van een primaire zeekering.
- In de berekeningen is een scheiding tussen deterministische grootheden en stochastische variabelen. In de berekeningen wordt de gevoeligheid van een aantal parameters onderzocht, te weten verval over de kering, dikte van het watervoerend pakket, doorlatendheid van het watervoerend pakket, doorlatendheid van de sloten van het kwelscherm, grootte van een gat in het kwelscherm, porositeit van het watervoerend pakket. In de berekeningen zijn dit de stochasten. De overige parameters: lengte van de kering, soortelijk gewicht van korrels en water zijn vaste, deterministische parameters. De inbeddingsdiepte van het kwelscherm bepaalt de betrouwbaarheid bij gegeven spreiding etc. De deterministische parameters zijn beschreven in 2.3. De stochastische parameters zijn nader gedefinieerd in 2.4.
- De invloed van een spleet zettingen onder een sluis wordt geanalyseerd in case 3. Het optreden van een spleet door zettingen onder een sluis en de kans van optreden is beschreven in 2.4.3.
- De invloed van lek door de sloten van een damwandscherm en de invloed van een gat in een damwandscherm kunnen met de beschikbare fragmenten worden geëvalueerd voor een configuratie met één scherm. Voor de onderzochte cases geldt dit voor case 2.

Lekkage in een kwelscherm als gevolg van een gat treedt op door corrosie (doorroesten) van het kwelscherm. In de berekeningen is de positie van het gat bovenin in de damwand. Corrosie van een damwand en de kans op doorroesten is nader uitgewerkt in 2.4.4

Lokale lekkage door een damwand treedt op als gevolg van lekkage door de sloten. Daarnaast beïnvloedt het slot lopen van een damwandplank de stijghoogten achter het kunstwerk. De kans van optreden van lekkage door de sloten is uitgewerkt in 2.4.5. Lokale lek door uit het slot lopen is uitgewerkt in 2.4.6.
- De variatie van het inbeddingsniveau van het kwelscherm wordt in de probabilistische analyses zo gekozen dat de berekende faalkansen in de orde liggen van in de praktijk geldende waarden. De richtwaarde voor de kleinste faalkans voor heave is in de berekeningen gelijk aan $1 \cdot 10^{-6}$. In het projectplan [DWW 1996] is uitgegaan van een mogelijke variatie van het (relatieve) inbeddingsniveau inbeddingsniveau/dikte watervoerend pakket van 0.05 - 0.95.

2.3 Deterministische parameters

Deterministische parameters hebben in een probabilistische berekening een vaste waarde. Voor een aantal deterministische parameters is een range van waarden onderzocht door het uitvoeren van variant berekeningen.

Deterministische parameters zijn:

- L de afmeting van de kering in dwarsdoorsnede uitgedrukt in de lengte van de kering. De invloed van de lengte van de kering wordt bepaald door het uitvoeren van een aantal berekeningen voor varianten van de constructie waarbij de lengte over een range van waarden wordt gevarieerd. Voor het vaststellen van de range van waarden wordt het quotiënt van de dikte van het watervoerend pakket en de lengte van de kering gevarieerd over een range van 0.25 - 2 à 3
- L_h de lengte van het buiten- c.q. binnenhoofd, dat wil zeggen de afstand tussen de (overige) damwandschermen in het buiten- en binnenhoofd
- d de inbeddingsdiepte van het kwelscherm
De invloed van de inbeddingsdiepte wordt bepaald door het uitvoeren van variant berekeningen met verschillende inbeddingsniveaus van het kwelscherm. De keuze van de te analyseren range van waarden wordt bepaald door de kleinste faalkans die in de praktijk kan voorkomen. Uitgangspunt voor het ontwerp van een primaire waterkering is de norm overschrijdingskans p_{norm} voor het betreffende gebied als gevolg van falen van de kering door overloop en overslag. In de huidige filosofie is de toelaatbare faalkans als gevolg van 'overige mechanismen' waaronder heave 0.01 van p_{norm} . De waarde van p_{norm} is afhankelijk van het beschermde gebied en ligt in de praktijk tussen $8 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-4}$. De kleinste toelaatbare faalkans voor heave is in de praktijk derhalve gelijk aan $1 \cdot 10^{-6}$. De variatie van het inbeddingsniveau van het kwelscherm wordt in de probabilistische analyses zo gekozen dat de berekende faalkansen in de orde liggen van in de praktijk geldende waarden.
- d_{overig} de inbeddingsdiepte van eventuele overige schermen
Bij case 3 en 4 zijn er meerdere schermen in het buitenhoofd en het binnenhoofd. Het inbeddingsniveau van deze schermen is in overleg met de opdrachtgever als volgt gekozen:
 - case 3: relatief inbeddingsniveau overige schermen 0.1
 - case 4: relatief inbeddingsniveau overige schermen 0.2.
- γ_k het soortelijk gewicht van het korrelmateriaal van grond in de uitdrukking van het kritieke verhang (26 kN/m³)
- γ_w het soortelijk gewicht van water.

2.4 Stochastische parameters

2.4.1 Vaststellen van de stochastische parameters

De grootte van stochastische parameters is niet vast, maar ligt met een bepaalde kans van optreden binnen een zeker gebied. De spreiding kan het gevolg zijn van ruimtelijke spreiding of het feit dat de parameter niet in alle situaties optreedt maar met een bepaalde kans van optreden. De spreiding van stochastische parameters wordt vastgelegd met het type verdelingsfunctie, de daarbij behorende parameters (gemiddelde, spreiding etc.) en eventuele onderlinge correlatie tussen parameters. Verschillende parameters zijn per fragment ongecorrleerd. De correlatie van een parameter tussen fragmenten onderling is nader uitgewerkt in § 2.4.2.

Stochastische parameters zijn:

- H_{biii} het niveau van de buitenwaterstand
Variaties van de buitenwaterstand worden bepaald door de kans van optreden van een hoogwatersituatie. De kans van optreden van een hoogwatersituatie wordt beschreven met een Gumbel extreme waarden verdeling. In de Gumbel verdeling wordt de grootte van de mogelijk variaties ten opzichte van het gemiddelde bepaald door de decimeringshoogte. De decimeringshoogte hangt af van de randvoorwaarden in het gebied (bovenrivier, of zeesluis).
- H_{bi} het niveau van de binnenwaterstand
Bij een sluis wordt de spreiding van de binnenwaterstand bepaald door het type waterweg aan de binnenzijde. Dit is een vaarweg met een vrije watrespiegel: rivier of kanaal. Bij de cases 3 en 4 voor een zeesluis is voor de variaties van de binnenwaterstand een standaard normale verdeling aangenomen.
Bij case 2 is de binnenwaterstand gelijk aan het slootpeil. In de fragmentenmethode is het watervoerend pakket volledig verzadigd. Om te voorkomen dat in de probabilistische berekeningen het slootpeil lager zou kunnen worden dan de bovenrand van het watervoerend pakket is het slootpeil constant (deterministisch) gehouden.
- D de dikte van het watervoerend pakket
In de praktijk varieert het niveau van een laagscheiding. In de fragmenten methode is de dikte van de watervoerende laag constant over de lengte van het fragment. Bij de probabilistische berekeningen is een standaard normale verdeling voor spreidingen van de dikte van de laag aangehouden.
- K de doorlatendheid van het watervoerend pakket K en de doorlatendheid van het afdekkend pakket K_{afdek}
In principe is de doorlatendheid van het watervoerend pakket gemodelleerd als lognormaal verdeelde grootheid. In de fragmentenmethode is de doorlatendheid van het watervoerendpakket homogeen dat wil zeggen voor alle fragmenten gelijk. Aangezien een stationaire analyse van de stroming in een homogeen pakket wordt uitgevoerd heeft de (homogene) doorlatendheid geen effect op het verhang achter het kwelscherm. Daarentegen is het debiet lineair

afhankelijk van de doorlatendheid.

Indien gerekend zou worden met de doorlatendheid per fragment dan hebben het gemiddelde en de spreiding van de doorlatendheid per fragment invloed op de stroming en daarmee op het verhang achter het kwelscherm. Bij het inventariseren van de correlatie tussen parameters is gekeken naar de grootte van de correlatie van de doorlatendheid in de praktijk, zie § 2.4.2. Op basis daarvan wordt gerekend met volledige correlatie van de doorlatendheid tussen fragmenten onderling.

Voor het mechanisme 'heave' beïnvloedt de doorlatendheid van het watervoerend pakket het verhang achter het kwelscherm derhalve alleen in de gevallen waarbij sprake is van inhomogene doorlatendheid of doorlatendheidsverschillen. De modellering van de doorlatendheid is als volgt:

- * in de analyses met homogene doorlatendheid en zonder doorlatendheidsverschillen als gevolg van lek heeft de doorlatendheid geen invloed op het verhang over het scherm. In die berekeningen is de doorlatendheid geen stochast.
- * verandering van de weerstand als gevolg van een spleet door zettingen
Bij de stroming door een spleet is de doorlatendheid van het watervoerend pakket in de fragmentenmethode verwaarloosbaar klein ten opzichte van de doorlatendheid van de spleet. De grootte van de spleet is geen parameter in het gekozen model. De doorlatendheid van het pakket is derhalve geen stochast in de analyse.
- * lokale lekkage als gevolg van lekkage door een gat
Bij de analyse van een gat in een kwelscherm is de doorlatendheid van het watervoerend pakket verwaarloosbaar klein ten opzichte van de doorlatendheid van het gat. In de berekeningen is de grootte van het gat als stochast meegenomen. De doorlatendheid van het watervoerend pakket is geen stochast in de analyse.
- * lokale lekkage door de sloten
Bij lekkage door de sloten is sprake van een inhomogene doorlatendheid. In de analyses met lek is gerekend met een lognormaal verdeelde (homogene) doorlatendheid van het watervoerend pakket en een lognormaal verdeelde lek door de sloten.

De doorlatendheden van het watervoerend pakket en het afdekkend pakket zijn gemodelleerd als lognormaal verdeelde stochastische parameters.

- de porositeit van het watervoerend pakket
De porositeit bepaalt het verhang achter het kwelscherm waarbij heave door fluïdisatie optreedt. De porositeit is bij de berekeningen beschouwd als standaard normaal verdeelde grootte.
- γ_{afdek} het soortelijk gewicht van een slecht doorlatend afdekkend pakket in het achterland
Het soortelijk gewicht van een afdekkend pakket bepaalt de weerstand tegen opdrijven.
- p_{spleet} het optreden van zettingen onder de sluis
De berekeningen inclusief het effect van zettingen onder de sluis zijn conditionele analyses, dat wil zeggen een berekening gegeven dat er zetting heeft plaatsgevonden. Het optreden van zettingen is uitgewerkt in § 2.4.3. Deze berekening geeft antwoord op de vraag: Hoe groot moet de correlatie coëfficiënt zijn opdat sprake is van merkbare correlatie tussen de realisaties

- van twee gevoelsmatig sterk gecorreleerde grootheden.
- G_{gat} de lek door het kwelscherm als gevolg van een gat zie § 2.4.4
Bij de analyses wordt gerekend met een lognormale spreiding van de grootte van het gat G. Het optreden van een gat door corrosie is geschat op basis van gegevens uit de literatuur, zie § 2.4.4.
- K_{schem} de lek door het kwelscherm als gevolg van lokale lek als gevolg van lekkage door de sloten, zie § 2.4.5. Uit het slot lopen van een damwandplank tijdens het installeren is uitgewerkt in § 2.4.6.

2.4.2 Correlatie van parameters

Per fragment is er geen onderlinge correlatie tussen verschillende parameters. Er is in principe wel correlatie tussen de waarden van een parameter in verschillende fragmenten. Dit geldt voor:

- de doorlatendheid van het watervoerend pakket
- de dikte van het watervoerend pakket.

Bij het definiëren van de verdelingsfuncties van deze grootheden wordt de onderlinge correlatie bepaald door de correlatiecoëfficiënt. De correlatiecoëfficiënt ρ van twee statistische variabelen x en y met verwachtingswaarde $\mu(x)$ en $\mu(y)$ en standaardafwijking σ_x en σ_y is als volgt gedefinieerd

$$\rho = \frac{COV[x,y]}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[[x-\mu(x)].[y-\mu(y)]]}{\sigma_x \sigma_y}$$

hierin is COV de co-variantie tussen de grootheden x en y . E is de operator voor de mathematische verwachting (expectation).

De correlatie-coëfficiënt wordt bij de invoer van de Monte Carlo-berekeningen opgegeven. Een probleem is het geven van een juiste schatting van de grootte van de correlatie-coëfficiënt.

Indicatieve schattingen voor de correlatiecoëfficiënt van de betreffende parameters zijn als volgt vastgesteld:

1. Een berekening van de benodigde correlatie uitgaande van twee gecorreleerde normaal verdeelde variabelen.
 2. Een schatting van de correlatie op basis van een theoretisch model voor de ruimtelijke spreiding van de variabelen.
- ad 1 Een berekening van de benodigde correlatie uitgaande van twee gecorreleerde normaal verdeelde variabelen om merkbare correlatie te realiseren.

In deze analyse worden de realisaties van een parameter in twee fragmenten beschouwd als twee gecorreleerde normaal verdeelde variabelen z_1 en z_2 , beiden met dezelfde verwachtingswaarde μ en standaardafwijking σ . De correlatiecoëfficiënt van de twee variabelen wordt genoteerd met ρ .

Gegeven een realisatie Z_1 van z_1 zijn de conditionele verwachtingswaarde van z_2 (dit is de verwachting van z_2 gegeven de realisatie $z_1=Z_1$) en de conditionele standaardafwijking van z_2 gelijk aan, zie [Hogg and Craig 1971]. Een overdruk van het betreffende hoofdstuk is opgenomen in bijlage 89.

$$E[z_2 | z_1 = Z_1] = \mu + \rho(Z_1 - \mu)$$

$$\sigma^2(z_2 | z_1 = Z_1) = \sigma^2(1 - \rho^2)$$

Voor de limietgevallen 'ongecorreleerde variabelen' en 'volledige correlatie' is de conditionele verwachtingswaarde van z_2 eenvoudig te geven. Wanneer de variabelen z_1 en z_2 ongecorrleerd zijn ($\rho=0$) dan is de conditionele verwachtingswaarde van z_2 gelijk aan μ : de verwachtingswaarde van de verdeling. Wanneer z_1 en z_2 volledig gecorreleerd zijn ($\rho=1$) dan is de conditionele verwachtingswaarde van z_2 gelijk aan de realisatie Z_1 van z_1 .

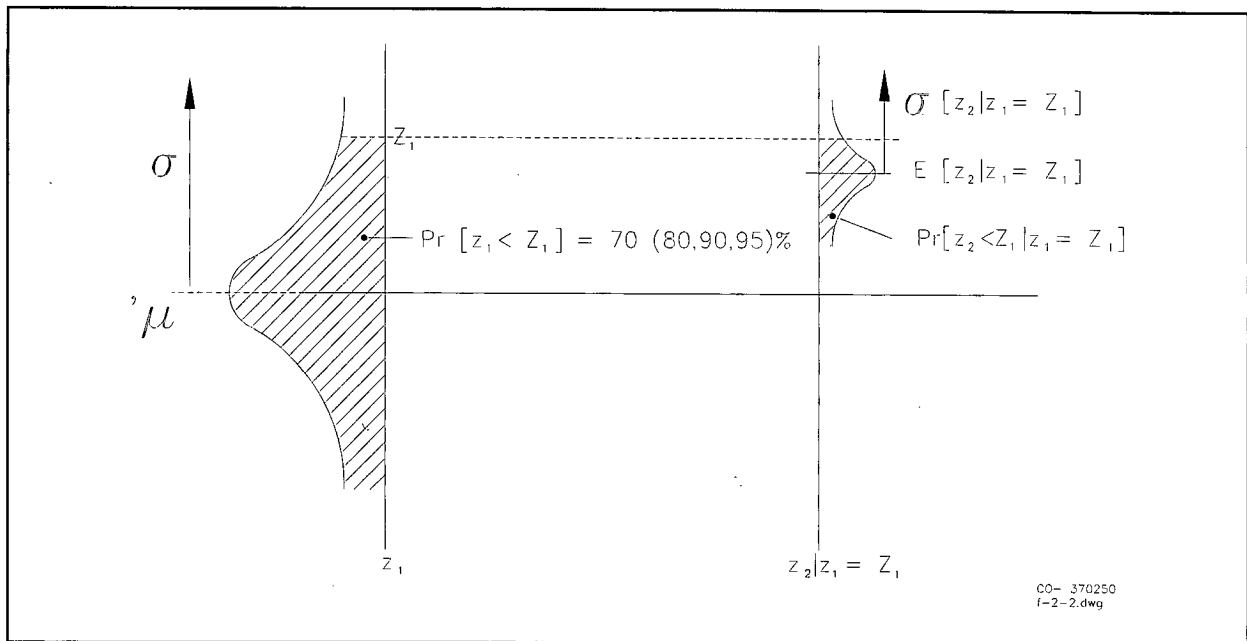
In de praktijk verwacht men bij correlatie een klein verschil tussen de verwachtingswaarde van z_2 en de realisatie Z_1 van z_1 . In dat geval zijn er geen grote verschillen tussen de waarden van de parameter in twee fragmenten. De invloed van de correlatie kan worden beoordeeld uit een berekening van de onderschrijdingskans van de realisatie Z_1 volgens de conditionele verdeling van z_2 :

$$Pr[z_2 < Z_1 | z_1 = Z_1]$$

Met de parameters van de conditionele verdeling van Z_2 kan bij gegeven correlatie tussen z_1 en z_2 de onderschrijdingskans van de realisatie Z_1 van z_1 worden berekend. Omgekeerd kan de benodigde correlatie worden berekend uitgaande van een bepaalde onderschrijdingskans van de realisatie van Z_1 in de conditionele verdeling van z_2 . In tabel 2.1 zijn deze laatste resultaten verzameld. Voor drie waarden van Z_1 uitgedrukt in de onderschrijdingskans volgens de verdeling van z_1 is de benodigde correlatie uitgerekend als functie van de onderschrijdingskans van de realisatie Z_1 van z_1 in de conditionele kansverdeling van z_2 . De onderschrijdingskans van Z_1 in de verdeling van z_1 is gelijk aan:

$$Pr[z_1 < Z_1]$$

De berekening is schematisch weergegeven in figuur 2.2



Figuur 2.2 Berekening van de onderschrijdingskans

De realisatie Z_1 van z_1 wordt geschreven als:

$$Z_1 = \mu + T\sigma$$

T is een standaard normaal verdeelde grootheid. De onderschrijdingskans van Z_1 hangt af van T ($T = 1,28$ bij 90% en 1,64 bij 95%).

Een realisatie Z_2 van de met z_1 gecorreleerde variabele z_2 kan worden geschreven als:

$$Z_2 = \mu(z_2|z_1) + t\sigma(z_2|z_1 = Z_1)$$

Gebruikmakend van de formules voor de conditionele verwachtingswaarde en spreiding wordt de realisatie Z_2 gelijk aan:

$$Z_2 = \mu + (\rho T + t\sqrt{1-\rho^2})\sigma$$

De mate waarin de realisaties gelijk zijn wordt bepaald door de correlatie-coëfficiënt ρ . Door de realisaties Z_1 en Z_2 gelijk te stellen wordt de volgende relatie gevonden:

$$\frac{t}{T} = \frac{\sqrt{1-\rho^2}}{1-\rho}$$

De correlatie-coëfficiënt is gelijk aan:

$$\rho = \frac{1 - \left(\frac{t}{T}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^2}$$

Indien de variabelen sterk zijn gecorreleerd is de realisatie van z_2 in verwachting (bijna) gelijk aan Z_1 . In dat geval is t gelijk aan nul. De correlatie-coëfficiënt is dan gelijk aan 1.0 indien de variabelen niet gecorreleerd zijn is de realisatie van z_2 in verwachting gelijk aan de verwachtingswaarde μ van de verdeling van Z_2 . In dat geval is t gelijk aan T . De correlatie-coëfficiënt is dan gelijk aan nul.

Bij gevoelsmatig sterk gecorreleerde grootheden is de realisatie Z_2 min of meer gelijk aan Z_1 . Dit betekent een overschrijdingskans van 50%-60% (bij 50% zijn de realisaties exact gelijk). Bij 60% is t gelijk aan 0,25. Uitgaande van een realisatie van Z_1 met een overschrijdingskans van 95% is T gelijk aan 1.64. De correlatie is nu gelijk aan:

$$\rho = \frac{1 - \left(\frac{0.25}{1.64}\right)^2}{1 + \left(\frac{0.25}{1.64}\right)^2} = 0,955$$

Voor verschillende waarden in t en T is in tabel 2.1 de waarde in de correlatie-coëfficiënt verzameld.

Benodigde correlatie				
$Pr[z_2 < Z_1 z_1 = Z_1]$	$Pr[z_1 < Z_1]$			
	70%	80%	90%	95%
50%	1	1	1	1
55%	0.899	0.960	0.983	0.989
60%	0.625	0.837	0.927	0.955
65%	0.304	0.660	0.838	0.898
70%	0	0.446	0.717	0.817
75%	-	0.237	0.580	0.721
80%	-	0	0.398	0.584
90%	-	-	0	0.243
95%	-	-	-	0

Tabel 2.1 Inschatting van de invloed van correlatie

De resultaten van tabel 2.1 kunnen voor de limietwaarden van de correlatiecoëfficiënt als volgt worden gecontroleerd:

- bij volledige correlatie is de conditionele verwachtingswaarde van z_2 gelijk aan de realisatie Z_1 van z_1 . De onderschrijdingskans van de realisatie Z_1 volgens de conditionele kansverdeling van z_2 is dan 50 %. Uit tabel 2.1 blijkt dat bij 50 % de benodigde correlatie inderdaad gelijk is aan 1.0.
- bij ongecorreleerde variabelen z_1 en z_2 is de verwachtingswaarde van z_2 gelijk aan μ en de standaardafwijking gelijk aan σ . De onderschrijdingskans van Z_1 volgens de conditionele verdeling van z_2 is dan gelijk aan de onderschrijdingskans van Z_1 volgens de verdeling van z_1 . Uit tabel 2.1 blijkt inderdaad dat de benodigde correlatie 0 is, wanneer de onderschrijdingskans van de realisatie Z_1 volgens de conditionele verdeling van z_2 gelijk is aan de onderschrijdingskans van Z_1 volgens de verdeling van z_1 .

Indien er sprake is van correlatie is het verschil tussen realisaties van z_1 en z_2 in de praktijk naar verwachting niet groot. Het verschil tussen de conditionele verwachtingswaarde van z_2 en de realisatie Z_1 van z_1 neemt af naarmate de onderschrijdingskans van Z_1 volgens de verdeling van z_2 nadert tot 50%. Om aan te sluiten bij de verwachting dat realisaties van gecorreleerde parameters z_1 en z_2 niet sterk verschillen dient de conditionele onderschrijdingskans van de realisatie Z_1 van z_1 volgens de conditionele verdeling van z_2 in de orde ligt van 50 - 70%. Uit tabel 2.1 blijkt de benodigde correlatiecoëfficiënt te liggen in de orde van 0.8 - 0.9.

ad 2 Een schatting van de correlatie op basis van een theoretisch model voor de ruimtelijke spreiding van de variabelen.

De schatting van de grootte van een parameter per fragment is een zogenaamd blokgemiddelde dat wil zeggen gemiddeld over de doorsnede van het gehele fragment. Door middeling van de parameter over het fragment treedt uitmiddeling op. In een geostatistisch model (Vanmarcke model) wordt de parameter beschouwd als ruimtelijk stationair proces dat wil zeggen constant verwachtingswaarde in het gebied, zie [GD 1996b]. De ruimtelijke spreiding wordt daarbij gemodelleerd volgens een theoretisch variogram model. De grootte van het blokgemiddelde per fragment en de correlatie tussen blokgemiddelden van verschillende fragmenten worden binnen dat model bepaald door:

- a. De spreiding van het gemiddelde als gevolg van de steekproef
De grootte van de parameter wordt bepaald door het uitvoeren van een steekproef van beperkte omvang. De metingen zijn ruimtelijk verspreid in het dwarsprofiel. Uit de metingen volgt het gemiddelde, de (punt)spreiding en de spreiding van het gemiddelde.
De spreiding van het gemiddelde betreft de spreiding van het gemiddelde als gevolg van de grootte van de steekproef. Deze spreiding geldt voor elk fragment en is ruimtelijk gezien gecorreleerd.
- b. De uitmiddeling van spreiding binnen een fragment

Bij het berekenen van het blokgemiddelde per fragment treedt uitmiddeling van de gemeten puntspreiding op. De mate van uitmiddeling hangt af van de grootte van het fragment en de schaal waarop de fluctuaties van de parameter ruimtelijk gecorreleerd zijn. De ruimtelijke correlatie wordt in de geostatistiek gemodelleerd met een variogrammodel.

De correlatielengte van de dikte van het watervoerend is in de praktijk groter dan de correlatielengte van de doorlatendheid. In de limiet betekent dit dat de dikte van het pakket van fragmenten onderling volledig gecorreleerd is.

Concluderend kan worden gesteld:

1. Om een correlatie te realiseren blijkt uit de berekeningen van gecorreleerde variabelen de benodigde correlatiecoëfficiënt te liggen in de orde van 0.8 - 0.9. Dit komt overeen met de ervaring van probabilistische berekeningen. Bij probabilistische berekeningen is de invloed van correlatie merkbaar bij een correlatiecoëfficiënt groter dan 0.6.
2. De blokgemiddelde doorlatendheid is ruimtelijk sterk gecorreleerd is. De spreiding wordt bepaald door de spreiding van het gemiddelde als gevolg van de omvang van de steekproef.
3. Het blokgemiddelde van de dikte van het watervoerend pakket is ruimtelijk gezien sterk gecorreleerd. De spreiding wordt bepaald door de totale gemeten (punt) spreiding.

Door de opdrachtgever is in overleg met Grondmechanica Delft gekozen voor de volgende uitgangspunten voor de correlatie in de berekeningen:

- in de probabilistische berekeningen wordt bij gecorreleerde parameters gerekend met een volledige correlatie ($\rho=1$)
- in het programma wordt de optie ingebouwd om een willekeurige waarde van de correlatiecoëfficiënt in te voeren.

2.4.3 Spleet onder een sluis door zettingen

Als gevolg van verschillende oorzaken waaronder andere fouten tijdens de uitvoering kan spleetvorming onder een kunstwerk optreden. Een spleet tussen de bodem van het kunstwerk en het massief leidt tot een toename van het verhang achter het kwelscherm.

In de praktijk wordt aangenomen dat spleetvorming onder alle omstandigheden optreedt. Door de Bouwdienst zijn in het verleden metingen uitgevoerd naar het potentiaalverloop bij sluisen. Bij de evaluatie konden de metingen niet gesimuleerd worden met een numeriek grondwaterstromingsmodel. Voor het meenemen van een spleet onder het kunstwerk in de fragmentenmethode is een speciaal fragment ontwikkeld, zie [GD 1997]. De grootte van de spleet is geen parameter in het fragment. Binnen het gekozen model voor het effect van een spleet heeft de grootte van de spleet geen effect op de weerstand van het fragment. De analyse met het zettingsfragment is derhalve een conditionele berekening. Bij de interpretatie wordt de invloed beoordeeld aan de hand van schattingen van de kans van optreden van een spleet door zettingen.

2.4.4 Lekkage van een kwelscherm door een gat als gevolg van corrosie

Een gat in het kwelscherm leidt tot een afname van de hydraulische weerstand van het kwelscherm. In de studie wordt aangenomen dat gaten kunnen ontstaan als gevolg van corrosie (doorroesten) van het kwelscherm. Voor het bepalen van de invloed van een gat is een speciaal fragment ontwikkeld, zie [GD 1997]. In deze paragraaf wordt een schatting van de kans van optreden van doorroesten bepaald aan de hand van beschikbare literatuur.

Gegevens omtrent corrosie van damwanden zijn ontleend aan [VOM 1988]. In het rapport worden metingen van de corrosiesnelheid in de praktijk gepresenteerd en wordt een methode gegeven voor het bepalen van de corrosiesnelheid ten behoeve van een ontwerp. De mate van corrosie hangt af van de agressiviteit van het milieu. Eigenschappen die de agressiviteit bepalen zijn de elektrische weerstand, de chemische samenstelling en het vochtgehalte. De agressiviteit van het milieu is ingedeeld in 4 klassen. De klasseindeling is gegeven in Tabel 2.2 Dit is een theoretisch indeling op basis van de gemiddelde corrosiesnelheid. In het rapport zijn een aantal bodemsoorten ingedeeld in de klassen, zie Tabel 2.3.

Bodemagressiviteit	Prognose corrosiesnelheid [mm/jaar]
praktisch niet-agressief	tot 0.01
gematigd agressief	tot 0.02
agressief	tot 0.05
zeer agressief	meer dan 0.05

Tabel 2.2 Bodemagressiviteit

Bodemsoort	Specifieke weerstand [Ω cm]	Bestanddelen	Agressiviteit
Zand	10.000-500.000	hoofdzakelijk SiO_2	in erg vochtige toestand anaeroob, niet-agressief
Kalk	20.000-300.000	moeilijk oplosbaar CaCO_3 , $\text{pH} \approx 9$	meestal niet agressief, echter in combinatie met sulfide zeer agressief
Steenslag	40.000-200.000	meestal Si-verbindingen	mechanische beschadiging mogelijk meer corrosie dan bij dichte lagen
Leem	3.000-10.000	klei, zand, ijzerverbindingen	anaeroob, in homogene sulfidevrije vorm zwak agressief
Mergel	3.000-10.000	30-60 % klei, CaSO_4 , CaSO_3	hoe meer klei het bevat, hoe agressiever
Veen	8.000-12.000	plantenresten, $\text{pH} \approx 5$	zeer agressief, hoog vochtgehalte
Klei met plantenresten	3.000-5.000	half verteerde organische bestanddelen, FeS_2	agressiviteit stijgt bij toename van het FeS_2 aandeel omdat FeS_2 zeer goed elektrisch geleidt, zeer agressief
Klei	500-2.000	Al_2O_3 met Si ₂ en Mg-Fe-hydrosilicaten	bij aanwezigheid van sulfaatreducerende bacteriën agressief tot zeer agressief

Tabel 2.3 Bodemsoorten met diverse eigenschappen

In het rapport worden voor de onderscheiden klassen van milieu karakteristieke waarden van de corrosiesnelheid voor het ontwerp en in de praktijk gemeten waarden van de corrosiesnelheid. De karakteristieke waarde, in het rapport aangeduid als richtwaarde, wordt in het kader van de probabilistische gevoeligheidsanalyse beschouwd als gemiddelde.

In niet-agressieve milieus (zand) is de richtwaarde van de corrosiesnelheid ≤ 0.01 mm/jaar. De in de praktijk gemeten corrosiesnelheid in die klasse is nihil ('niet noemenswaard'). Uitgaande van een levensduur van 50 jaar is de corrosie na 50 jaar gelijk aan 1 mm. De kans dat in een profiel ingebed in dit milieu (zand) een gat ontstaat als gevolg van corrosie is derhalve nihil.

De richtwaarde van de corrosiesnelheid in agressieve tot zeer agressieve milieus is ≥ 0.05 mm/jaar. De gemeten corrosiesnelheid varieert van 0.1 - 0.20 mm/jaar. In zeer agressieve milieus is een maximale corrosiesnelheid van 0.5 mm/jaar gemeten.

Voor de schatting van de kans van optreden wordt uitgegaan van een gemiddelde corrosiesnelheid van 0.15 mm/jaar met een standaardafwijking van 0.05 mm/jaar. De corrosie bedraagt na 50 jaar 7.5 mm met een standaardafwijking van 2.5 mm..

Uitgaande van een geplande levensduur van 50 jaar dient de ontwerpdikte te worden vermeerderd met de corrosie in 50 jaar. Uitgaande van een benodigde dikte van 5 mm wordt de ontwerpdikte van de damwand 12.5 mm. Met de spreiding van de corrosiesnelheid volgt de kans dat er een gat door corrosie ontstaat. De kans dat een gat ontstaat in het eerste jaar is nihil, immers de totale dikte is dan 12.5 mm. De kans dat na 50 jaar door corrosie is ontstaan volgt met de inverse standaardnormale verdeling Φ^{-1} en is gelijk aan $\Phi^{-1}((12.5-7.5)/2.5)=2.3 \cdot 10^{-2}$. Uitgaande van een evenredige kans over de levensduur is dit een kans van $4.6 \cdot 10^{-4}$ per jaar. In de praktijk dragen de eerste jaren niet bij tot de kans op lekkage door corrosie. Indien de helft van de levensduur gekozen wordt als relevante periode dan wordt de kans per jaar twee maal zo groot $9.2 \cdot 10^{-4}$ per jaar.

In de analyse wordt gerekend met een gat bovenin de damwand. Lekkage door corrosie treedt op aan het eind van de geplande levensduur. De kans van voorkomen wordt derhalve geschat op $9 \cdot 10^{-4}$ per jaar. In de berekeningen wordt voor de grootte van een gat een lognormale verdeling aangehouden. Deze analyse is een conditionele berekeningen dat wil zeggen een analyse gegeven doorroesten. De invloed is mede afhankelijk van de kans van optreden van doorroesten. De gemiddelde grootte van een gat is klein in geval van een kleine kans van optreden van doorroesten. Bij een grote kans van optreden van doorroesten ontstaan in verwachting grotere gaten. Bij de interpretatie kan er rekening mee worden gehouden dat de gemeten waarden van de corrosiesnelheid in agressieve milieus gemeten zijn in zeer extreme situaties (zout water en zeer agressieve bestanddelen). De daaruit berekende kansen kunnen derhalve voor een binnendijks kwelscherm als bovengrens worden beschouwd. De positie van het gat is bovenin het kwelscherm. Bij de analyse met gat wordt het gemiddeld verhang over het deel hoogte van het kwelscherm onder het gat berekend (dit is gemiddeld vanaf de teen van het kwelscherm tot de onderkant van het gat), zie § 3.2.1.

2.4.5 Lokale lekkage door de sloten

Als gevolg van speling in de damwandsloten treedt bij een stijghoogte verschil voor en achter een kwelscherm lekkage door het slot op. Lekkage door de sloten leidt mogelijk tot een toename van het verhang achter het kwelscherm. Voor het analyseren van de invloed van lek door de sloten is een speciaal fragment ontwikkeld, zie [GD 1997]. In deze paragraaf wordt de grootte van de lek geschat op basis van beschikbare literatuur.

Door Grondmechanica Delft [Sellmeijer et al 1995] is onderzoek verricht naar lekkage door damwandsloten. Hierbij zijn metingen verricht van de lekkage door damwandsloten in de praktijk. Onderdeel van die studie was een vergelijking van de invloed van verschillende vulmiddelen (bitumineuze, waterzwell middelen) op de lekkage door sloten. Het doel van vulmiddelen is een reductie van de lekkage door het slot.

De lekkage wordt uitgedrukt in een weerstandsfactor ρ die als volgt is gedefinieerd

$$\rho = \frac{b q}{\Delta\phi}$$

waarin $\Delta\phi$ het stijghoogte verschil is, b de breedte van de plank en q de lek per m^2 . Waarden voor de lekfactor zijn gegeven in tabel 2.4.

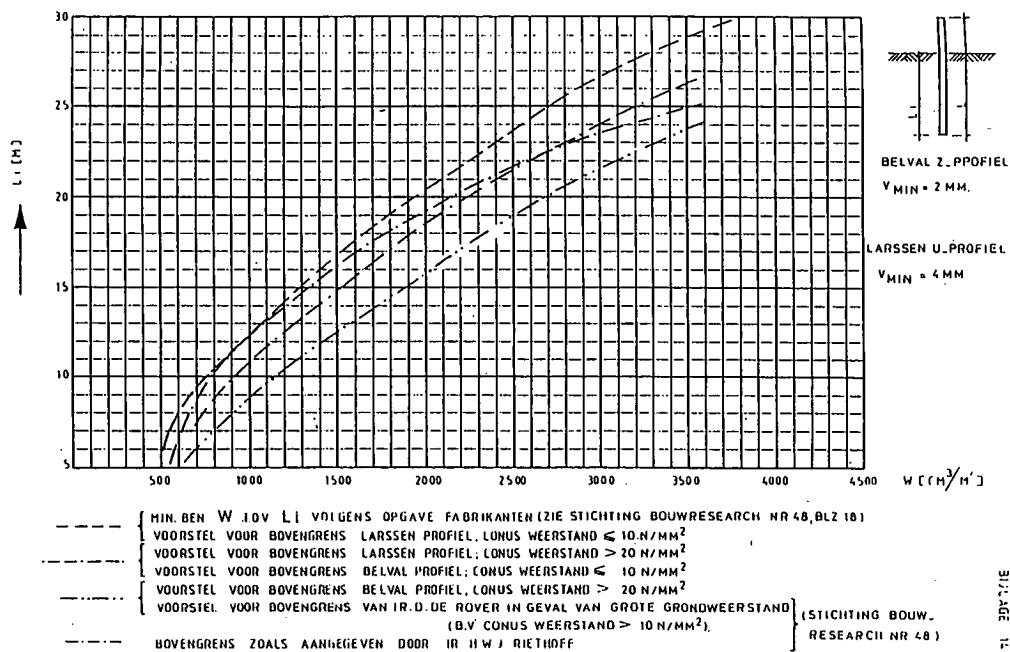
Weerstandsfactor van damwandsloten [10^{-9} m/s] bij een stijghoogte verschil van 5 m		
	gemiddelde	variatiecoëfficiënt
sloten zonder vulmiddel	133.5	
sloten met bitumineus vulmiddel	0.0702	2.72
sloten met water-zwel vulmiddel	0.0372	1.48

Tabel 2.4 Weerstandsfactor van damwandsloten

Lekkage door het slot zal in de praktijk altijd optreden. In de probabilistische analyses wordt de invloed van lekkage onderzocht. De lekkage is gemodelleerd volgens een lognormale verdeling. In de analyse is gerekend met een gemiddelde lek van $3.72 \cdot 10^{-7}$ m/s met een variatiecoëfficiënt van 3.5. Gezien de gemeten waarden uit tabel 2.4 is dit een bovengrens.

2.4.6 Lokale lek als gevolg van 'uit het slot lopen'

De waterdichtheid van een damwandscherm wordt bepaald door de constructie van de sloten, mogelijke fouten tijdens de uitvoeringsfase en de gekozen methode voor het installeren van de planken (heien, trillen etc). Eén van de fouten die leiden tot lokale lek en een afname van de hydraulische weerstand is uit het slot lopen van een damwandplank tijdens de installatie. De kans van optreden van 'uit het slot lopen' hangt af van de constructie van het slot, het weerstandsmoment van de plank, de inbeddingsdiepte en de conusweerstand. In de praktijk worden grafieken gebruikt met het verband tussen de inbeddingsdiepte en het benodigd weerstandsmoment. Een voorbeeld van zo'n grafiek is gegeven in figuur 2.3



Figuur 2.3 Ontwerpgrafiek: Verband inbeddingsdiepte en benodigd weerstandsmoment

Door Rijkswaterstaat is in 1980 onderzoek verricht naar ervaringen bij werken met enkelvoudig verankerde damwanden, [RWS 1981]. Uit het onderzoek bleek dat 'uit het slot lopen' van de plank vaker optrad bij Belval planken dan bij Larssen planken.

In de studie is gekeken naar de invloed van de volgende parameters op het optreden van uit het slot lopen bij verschillende type planken (Belval, Larssen, Hoesch):

- de verhouding van het weerstandsmoment en het gewicht van de plank
- de buig- en wringstijfheid
- de constructie van het slot, uitgedrukt in de 'Verhakung'.

De belangrijkste parameter blijkt de 'Verhakung' van het slot te zijn. Naar aanleiding van o.a. deze resultaten is het Belval profiel aangepast en worden tegenwoordig alle damwandplanken uitgevoerd met een Larssenslot.

Aangezien thans de meeste profielen worden uitgevoerd met een Larssenslot kan de kans van optreden van uit het slot lopen van het Larssen profiel als maatgevend worden beschouwd voor de huidige praktijk. Van de in de studie geïnventariseerde werken trad van 100 ton Larssenprofielen in 2 % van de gevallen uit het slot lopen op. Dit percentage komt overeen met 0.3 % van het totaal geïnventariseerde gewicht aan Larssenprofielen. Het in de studie geïnventariseerde gewicht aan damwandplanken bedroeg totaal 97.000 ton. Dit is maar een fractie van het totaal in Nederland geïnstalleerde gewicht aan damwandplanken. Het is niet bekend of de gevonden percentages relevant zijn voor alle damwandtoepassingen. Dit betekent dat een redelijke schatting van de kans van optreden van uit het slot lopen uit het beschikbare materiaal moeilijk is te bepalen. Voor een betere schatting is nader onderzoek noodzakelijk. Het effect van uit het slot lopen wordt geanalyseerd in § 5.5

2.5 Overzicht van de definitie van de case-studies en het uitvoeren van de probabilistische analyses

De definitie van de cases omvat:

- de scheiding tussen deterministische en stochastische parameters
- voor welke deterministische parameters een range van waarden wordt onderzocht en het aangeven van de onderzocht range
- type kansverdelingsfunctie, grootte van parameters in de verdeling en correlatie van parameters
- eventuele varianten.

Parameters in de berekeningen zijn:

- deterministische parameters:
 - * L de afmeting van de kering in dwarsdoorsnede uitgedrukt in de lengte van de kering
 - * L_h de lengte van de buiten- en c.q. binnenhoofd
 - * d de inbeddingsdiepte van het kwelscherm
 - * d_{overig} de inbeddingsdiepte van eventuele overige schermen
 - * γ_k het soortelijk gewicht van het korrelmateriaal van grond in de uitdrukking van het kritieke verhang (26 kN/m^3)
 - * γ_w het soortelijk gewicht van water
- stochastische parameters zijn:
 - * H_{bui} het niveau van de buitenwaterstand
 - * H_{bi} het niveau van de binnenwaterstand
 - * D de dikte van het watervoerend pakket
 - * K de doorlatendheid van het watervoerend pakket K en de doorlatendheid van het afdekkend pakket K_{afdek}
 - * n de porositeit van het watervoerend pakket.
 - * γ_{afdek} het eigen gewicht van een slecht doorlatend afdekkend pakket in het achterland.
 - * p_{spleet} het optreden van een spleet onder de sluis door zettingen. In de foutenboom-analyse van case 3 is de kans van optreden van een spleet gevarieerd, zie § 5.4.2.
 - * G_{gat} de grootte van het gat
 - * K_{scherm} de weerstand van het scherm.
 - * p_{slot} de kans van optreden van uit het slot lopen van een damwandplank tijdens het installeren. Uit het slot lopen is geanalyseerd in § 5.5.

De geometrie van de cases is weergegeven in figuur 2.1.

Uitgangspunten voor de definitie van de cases zijn

- Bij de probabilistische analyses worden een aantal deterministische parameters gevarieerd in een range van waarden. De grootte van deze range is gebaseerd op de grootte van de dimensioneloze parameters L/D (lengte van de kering/dikte watervoerend pakket), H/L (verval over de kering/lengte van de kering) in de praktijk.
- De parameter die in de praktijk het ontwerp van een kwelscherm ten aanzien van heave bepaalt is de relatieve inbeddingsdiepte d/D . De dikte van het watervoerend pakket wordt genoteerd met D en de inbeddingsdiepte met d . Bij het ontwerp dient de inbeddingsdiepte te worden bepaald zodat aan de gestelde eis ten aanzien van heave wordt voldaan. Bij de probabilistische analyses is de relatieve inbedding d/D zodanig gevarieerd dat de berekende betrouwbaarheidsindex overeenkomt met in de praktijk geldende waarden. De voor de praktijk relevante waarden van de betrouwbaarheidsindex zijn $\beta = 2 - 5$ (maximaal 4.80 bij een faalkans $1 \cdot 10^{-6}$). Op deze wijze worden berekeningen uitgevoerd over een (relevante) range van de relatieve inbedding. In het projectplan was uitgegaan van een variatie van de relatieve inbedding over een range van 0.05 - 0.95.
- De doorlatendheid van het watervoerend pakket is een stochast bij de analyse met lekkage door een gat en de analyse met lekkage door de sloten
- De invloed van een spleet is in case 3 onderzocht door het uitvoeren van twee analyses één met en één zonder spleet
- In case 2 is de grootte van het gat een stochastische parameter. De positie van het gat is bovenin de damwand. In de betrouwbaarheidsfunctie voor heave wordt gerekend met het gemiddeld verhang onder het gat, zie § 3.2.1.
- Voor het bepalen van de invloed van lekkage door de sloten zijn in case 2 analyses met en zonder lek uitgevoerd. Het debiet door de sloten en de doorlatendheid van het watervoerend pakket zijn in de analyse met lek LogNormaal verdeeld. In de betrouwbaarheidsfunctie voor heave wordt gerekend met het gemiddeld verhang over de hoogte van het scherm, zie § 3.2.1.
- In case 4 is een analyse uitgevoerd voor het buitenhoofd. Bij de analyse van het buiten en binnenhoofd van een sluis met open bodem is ervan uitgegaan dat de hoogte van de deuren in het buiten- en binnenhoofd allemaal berekend zijn op hoogwater. Falen van de sluis bij hoogwater is nu niet afhankelijk van het falen van de sluitoperatie van de buitendeuren aangezien altijd een stel hoogwaterkerende deuren gesloten zijn. De analyses van het buiten en binnenhoofd worden apart uitgevoerd dat wil zeggen dat bij de analyse van het binnenhoofd geen rekening wordt gehouden met de grondwaterstroming onder sluis. De faalkans van het buiten- en binnenhoofd zijn nu gelijk omdat de geometrie en de randvoorwaarden gelijk zijn. Aan de buitenzijde geldt de verdeling van extreme hoogwaterstanden en aan de binnenzijde geldt het kanaalpeil en variaties daarvan. Bovendien is ervan uitgegaan dat de bodem in de kolk gelijk is aan de kanaalbodem.

In tabel 2.5 is de definitie van de cases voor 'heave' verzameld. De variantberekeningen van de cases voor 'heave' zijn verzameld in tabel 2.6. In tabel 2.7 is de definitie van de cases voor 'opdrijven' verzameld.

Deterministische parameters					
Parameter		case 1	case 2	case 3	case 4
lengte van de kering:	L/D	+	0.25 - 3	0.5 - 3	0.2 - 2
lengte buiten/binnenhoofd:	L _q /D		nvt	0.25	0.25
inbeddingsdiepte van het kwelscherm:	d/D	+	0.05 - 0.4	0.05 - 0.2	0.05 - 0.3
inbeddingsdiepte overige schermen:	d _{overig}	nvt	nvt	0.1	± 0.2
soortelijk gewicht korrels:	γ _k [kN/m ³]	26	26	26	26
soortelijk gewicht water:	γ _w [kN/m ³]	9.8	9.8	9.8	9.8
Stochastische parameters					
Parameter		case 1	case 2	case 3	case 4
Type verdelingsfunctie					
buitenwaterstand:	H _{buiten} [m]	+	u = 8.24 α = 1.92	u = 2.15 α = 3.07	u = 2.15 α = 3.07
GUMBEL					
binnenwaterstand:	H _{binnen} [m]	vast	vast: 5.5	μ = -0.46 σ = 0.10	μ = -0.46 σ = 0.10
Normaal					
dikte watervoerend pakket:	D [m]	+	μ = 10 ²⁾ σ = 1	μ = 10 σ = 1	μ = 10 σ = 1
Normaal					
doorlatendheid watervoerend pakket:	K [m/s]	+	μ = -9.2 ¹⁾ σ = 0.9	geen invloed	geen invloed
LnNormaal					
doorlatendheid afdekkend pakket:	K _{afde} [m/s] _k	+	nvt	nvt	nvt
LnNormaal					
porositeit watervoerend pakket:	n [-]	+	μ = 0.33 ²⁾ σ = 0.03	μ = 0.33 σ = 0.03	μ = 0.33 σ = 0.03
Normaal					
soortelijk gewicht afdekkend pakket:	γ _{afdek} [kN/m ³]	nvt	nvt	nvt	nvt
optreden van zettingen:	p _{spleet} [-]	nvt	nvt	2 varianten, 1 met en 1 zonder spleet invloed p _{spleet} in foudenboomanalyse	nvt
gatgrootte:	G [m]	nvt	μ = -5.3 ²⁾ σ = 0.53	nvt	nvt
LnNormaal					
lekkage sloten:	K _{scherm} [m/s]	nvt	μ = -16.1 ²⁾ σ = 1.61	nvt	nvt
LnNormaal					

1) de doorlatendheid van het watervoerend pakket is een stochast bij de analyse met lekkage door de sloten

2) voor deze parameter is een variantberekening uitgevoerd, zie tabel 2.4

+ parameters zijn geprogrammeerd, de analyse is niet uitgevoerd, zie § 1.4

Bij LogNormaal verdeelde grootheden zijn μ en σ de parameters van de Normale verdeling van de Ln-waarde van de grootheid. Bij waarden van de grootheid kleiner dan 1.0 is het gemiddelde kleiner dan nul.

Tabel 2.5 Definitie van de cases 'heave'

Varianten van de probabilistische berekeningen		
case	parameter	aangepaste verdeling
case 2	lek: gemiddelde * 10	$\mu = -13.8$ $\sigma = 1.61$
case 2	gatgrootte: gemiddelde/10	$\mu = -7.6$ $\sigma = 0.76$
case 2	laagdikte spreiding*3	$\mu = 10$ $\sigma = 3$
case 2	porositeit: spreiding*3	$\mu = 0.33$ $\sigma = 0.09$

Tabel 2.6 Variantberekeningen

Deterministische parameters	
Parameter	case 1
lengte van de kering, L	+
lengte buiten/binnenhoofd: L_b/D	+
inbeddingsdiepte van het kwelscherm, d	+
inbeddingsdiepte overige schermen d_{overig}	+
soortelijk gewicht korrels, γ_k [kN/m ³]	26
soortelijk gewicht water, γ_w [kN/m ³]	9.8
Stochastische parameters	
Parameter	case 1
buitenwaterstand, H_{buiten} GUMBEL	+
binnenwaterstand, H_{binnen} Normaal	vast
dikte watervoerend pakket, D Normaal	+
doorlatendheid watervoerend pakket, K LnNormaal	+
doorlatendheid afdekkend pakket, K_{afdek} LnNormaal	+
porositeit watervoerend pakket, n Normaal	nvt
soortelijk gewicht afdekkend pakket, γ_{afdek}	+
optreden van zettingen	nvt
gatgrootte LnNormaal	nvt
doorlatendheid sloten LnNormaal	nvt

- 1) de doorlatendheid van het watervoerend pakket is een stochast bij de analyse met lekkage door een gat en de analyse met lekkage door de sloten
- + parameters zijn geprogrammeerd, de analyse is niet uitgevoerd, zie § 1.4

Tabel 2.7 Definitie van de case 'opdrijven'

3 Opzet van de probabilistische analyses

3.1 Methode voor het uitvoeren van de probabilistische analyses

3.1.1 Overzicht van methoden

In de probabilistische analyses wordt de invloed bepaald van de stochastische parameters op het functioneren van het kwelscherm. Het functioneren van het kwelscherm wordt beschreven door de betrouwbaarheidsfunctie Z . Falen van het kwelscherm treedt binnen deze context op wanneer de Z -functie kleiner is dan nul. Het resultaat van een probabilistische analyse is de faalkans van de constructie, dat wil zeggen de kans dat de betrouwbaarheidsfunctie kleiner is dan nul alsmede de invloed van de verschillende parameters op de grootte van de faalkans.

De betrouwbaarheidsfuncties van een kwelscherm voor de mechanismen 'piping', 'heave' en 'opdrijven' zijn gedefinieerd in de opstartfase [GD 1996a]. De in Fase 4 geëvalueerde betrouwbaarheidsfuncties zijn gedefinieerd en beschreven in § 3.2.

Methoden voor het uitvoeren van een probabilistische analyse zijn:

1. Een exacte methode. Hierbij wordt de faalkans met behulp van een analytische of numerieke methode exact bepaald door integratie van de kansdichtheidsfuncties in het gebied waar de betrouwbaarheidsfunctie kleiner dan nul is.
2. Een benaderingsmethode.
Beschikbare benaderingsmethoden zijn onder andere:
 - 2.1 Monte-Carlo simulaties voor het bepalen van de faalkans. Dit is een exacte methode. De nauwkeurigheid hangt af van het aantal simulaties.
 - 2.2 de eerste orde tweede moment methode. Hierbij wordt gerekend met een lineaire benadering van de betrouwbaarheidsfunctie rond het ontwerppunt. Het ontwerppunt wordt iteratief bepaald.
 - 2.3 Monte-Carlo simulaties voor het bepalen van de kansdichtheidsverdeling van de betrouwbaarheidsfunctie en daaruit afleiden van de faalkans.

3.1.2 Keuze van de probabilistische methode: Monte-Carlo simulaties

In het projectplan en de offerte van Grondmechanica Delft is geen keuze voor de probabilistische methode vastgelegd. Mogelijke methoden die genoemd worden zijn de eerste orde tweede moment methode en Monte Carlo simulaties.

Een voor de hand liggende keuze is de implementatie van de eerste orde tweede moment methode volgens AFDA in het programmapakket FORM. De AFDA methode is daarom beschreven in het rapport van Fase 1, [GD 1996a]. Het nadeel van deze methode is de gevoeligheid voor lokale minima. Er is in FORM geen voorziening waarmee getoetst wordt of de gevonden oplossing het absolute

minimum is en daarmee de grootste faalkans oplevert. In het verleden is gebleken dat dit fenomeen kan optreden en dat de berekende faalkans in zo'n geval onjuist is. Een oplossing daarvoor is het uitvoeren van meerdere FORM berekeningen uitgaande van verschillende startwaarden van de parameters.

In overleg met de opdrachtgever is gekozen voor het uitvoeren van Monte-Carlo simulaties, methode 2.1. zie § 3.1.1. De reden hiervoor is de robuustheid van de methode en het feit dat de methode niet gevoelig is voor lokale minima. Een nadeel is dat de rekentijd sterk kan toenemen bij een kleine faalkans en (relatief) grote rekentijd voor een modelanalyse met de fragmentenmethode. Om de rekentijd te beperken is ervoor gekozen om de waarde van de betrouwbaarheidsfunctie te bepalen via interpolatie in een grid van berekende punten, zie § 3.2.2.

3.1.3 Benodigd aantal Monte Carlo simulaties

Het aantal benodigde Monte Carlo simulaties hangt af van de grootte van de faalkans. Het totaal aantal simulaties dient zo groot te zijn dat het aantal simulaties waarbij falen optreedt (=de betrouwbaarheidsfunctie kleiner dan nul is) voldoende groot is zodat de faalkans met zekere nauwkeurigheid wordt bepaald. Indien een faalkans van 1/1000 is berekend met 1000 simulaties dan is het aantal simulaties waarbij falen optreedt 1. Dit levert een onnauwkeurige schatting van de faalkans. In [TU 1984] wordt het volgende criterium voor het aantal simulaties gegeven:

$$N \geq 400 \left(\frac{1}{P_f} - 1 \right)$$

Rekeninghoudend met dit criterium wordt de faalkans P_f met 95% nauwkeurigheid bepaald.

In 2.3 is de minimale faalkans voor heave in de praktijk afgeleid namelijk $1 \cdot 10^{-6}$. Volgens het criterium betekent dit $400 \cdot 10^6$ simulaties. Afhankelijk van de rekentijd per simulatie kan dit leiden tot een aanzienlijke rekentijd. Bij een simulatie van parameter waarden wordt de grootte van de betrouwbaarheidsfunctie in principe bepaald met een modelanalyse met de fragmentenmethode. Om de rekentijd te beperken is ervoor gekozen om de betrouwbaarheidsfunctie niet voor elke simulatie te berekenen. In plaats daarvan wordt bij het berekenen van de betrouwbaarheidsfunctie gebruik gemaakt van interpolatie zie § 3.2.2.

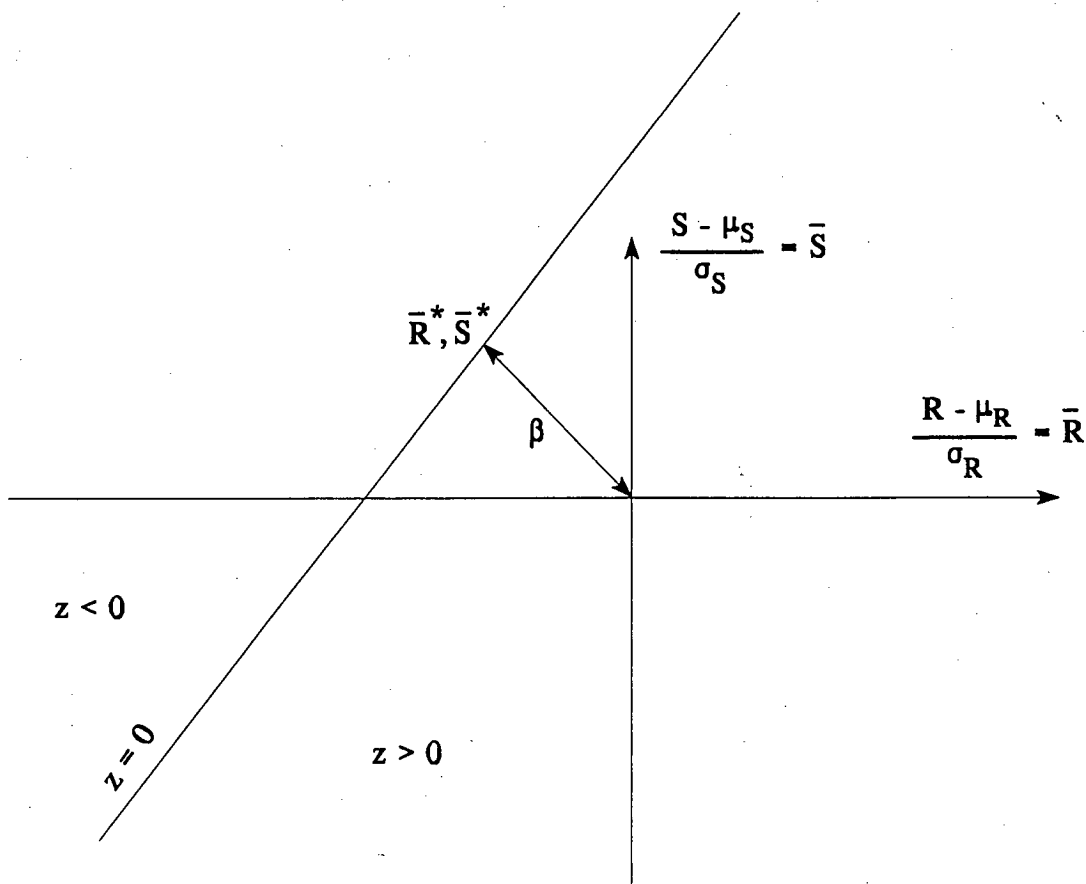
3.1.4 Berekening van de faalkans, het ontwerppunt en de invloed van parameters uit de resultaten van de probabilistische analyses

Het resultaat van de probabilistische analyse is de faalkans van de berekende variant. In de Monte-Carlo methode is de faalkans gelijk aan het quotiënt van het aantal simulaties waarbij de betrouwbaarheidsfunctie kleiner is dan nul M en het totaal aantal simulaties N_{totaal} .

$$P_f = \frac{M(Z < 0)}{N_{\text{totaal}}}$$

Speciale onderdelen van een FORM analyse zijn het ontwerppunt en de invloedscoëfficiënten α_i , zie [TU 1984]. Het ontwerppunt en de invloedscoëfficiënten zijn belangrijk voor het interpreteren van de resultaten en het opzetten van een ontwerpsystematiek voor beheerders alsmede het inpassen daarvan in de bestaande methodiek voor het ontwerp van primaire waterkeringen. Het ontwerppunt en de invloedscoëfficiënten volgen niet rechtstreeks uit een Monte Carlo-simulatie, maar worden als volgt berekend:

- het ontwerppunt, aangeduid met X_i^* ($i=1..N$)
Binnen de FORM methode is het ontwerppunt de projectie van de oorsprong op de gelineariseerde betrouwbaarheidsfunctie in de getransformeerde meerdimensionale parameterruimte. De faalkans is in FORM gelijk aan de afstand van de oorsprong tot de gelineariseerde Z-functie (zie figuur 3.1).



Figuur 3.1 Ontwerppunt in getransformeerde parameterruimte

Het berekenen van het ontwerp punt is één van de uitgangspunten in de eerste orde tweede moment methode. In de Monte Carlo-analyses wordt het ontwerp punt niet berekend. Voor het evalueren van de resultaten is er wel behoefte aan een verwerking volgens de systematiek van de eerste orde tweede moment methode. Het programma voor het uitvoeren van Mont Carlo-berekeningen is aangepast voor het berekenen van het ontwerp punt. Een schatting voor het ontwerp punt is de combinatie van parameterwaarden met de grootste gezamenlijke kansdichtheid waarbij de betrouwbaarheidsfunctie kleiner dan nul is. Bij het uitvoeren van de Monte Carlo-simulaties wordt derhalve van simulaties waarbij de Z-functie kleiner is dan nul de gezamenlijke kansdichtheid van de parametercombinaties berekend. Hierbij wordt rekening gehouden met eventuele correlatie tussen parameters, conform de uitgangspunten wordt de correlatie meegenomen, zie 2.2 en 2.4.2. Dit betreft de correlatie van standaard normaal verdeelde parameters.

Bij ongecorrleerde parameters is de gezamenlijke kansdichtheid gelijk aan:

$$Pr = \prod_{i=1}^N p_i$$

waarin p_i de kansdichtheid van de parameter X_i is.

Van gecorreleerde standaard normaal verdeelde parameters is de gezamenlijke kansdichtheid gelijk aan:

$$Pr(\prod_{j=1}^m p_j) = \frac{\sqrt{|U|}}{2\pi^{m/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}[X_j - \mu_j]^T U [X_j - \mu_j]\right]$$

Hierin is U de inverse van de co-variantiematrix van de gecorreleerde variabelen. $[X_j - \mu_j]$ is een vector met het aantal gecorreleerde variabelen en met T wordt de getransponeerde vector aangeduid.

de invloedscoëfficiënten α_i , ($i=1$ N)

De invloedscoëfficiënten worden per stochastische parameter berekend en reflecteren de invloed van de betreffende parameter op de spreiding van de betrouwbaarheidsfunctie. Binnen de context van de eerste orde tweede moment methode is de invloedsfactor van een parameter gelijk aan de richtingscosinus van de projectie van de oorsprong op de gelineariseerde Z-functie in de getransformeerde parameterruimte en gemeten ten opzichte van de as van de betreffende parameter. De grootte van de invloedsfactor van een parameter is gelijk aan de (relatieve) partiële afgeleide van de betrouwbaarheidsfunctie naar de betreffende parameter

$$\alpha_i = \frac{\frac{\partial Z}{\partial X_i} \sigma_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \sigma_j\right)^2}}$$

De relatie tussen het ontwerp punt, de invloedsfactoren α en de kansdichtheidsverdeling is als volgt:

$$X_i^* = \mu_i - \alpha_i \beta \sigma_i$$

Hierin is β de met de faalkans overeenkomende waarde van de betrouwbaarheidsindex en μ_i en σ_i zijn het gemiddelde en de standaardafwijking van een standaardnormale verdeling van de stochastische parameter X_i .

De betrouwbaarheidsindex volgt met de inverse van de cumulatieve Gaussverdeling Φ^{-1}

$$\beta = \Phi^{-1}(-P_f)$$

In FORM wordt gerekend met standaard normale verdelingen. Voor parameters met een afwijkende verdelingsfunctie wordt het resultaat getransformeerd naar een standaard normale verdeling. Dit is de AFDA benadering in FORM. Bij een gegeven ontwerpwaarde X_i^* met kansdichtheid p_i en cumulatieve onderschrijdingskans P_i volgens het type kansverdeling van de parameter dan worden de parameters van de getransformeerde standaard normale verdeling als volgt berekend:

$$\begin{aligned} u_i &= \Phi^{-1}(P_i) \\ \sigma_N &= \frac{1}{2\pi p_i} e^{-\frac{1}{2}u_i^2} \\ \mu_N &= X_i^* - u_i \sigma_N \end{aligned}$$

Hierin is Φ^{-1} de inverse van de cumulatieve Gaussverdeling

Op bovenstaande wijze worden invloedsfactoren berekend met het in de Monte-Carlo simulaties gevonden ontwerp punt Met de parameters van de standaard normale verdeling berekend volgens de bovenstaande procedure, de waarde van de parameter in het ontwerp punt en de betrouwbaarheidsindex β is de invloedsfactor gelijk aan:

$$\alpha_i = \frac{\mu_N - X_i^*}{\beta \sigma_N}$$

Binnen de eerste orde tweede moment methode wordt gerekend met een lineaire benadering van de betrouwbaarheidsfunctie. De invloedsfactoren volgen uit de gradient van de benaderingsfunctie. De som van de kwadraten van de invloedsfactoren is per definitie gelijk aan 1.

Met de Monte Carlo-simulaties wordt niet gerekend met een lineaire benadering van de Z-functie, maar met een (rekeninghoudend met het aantal simulaties) exacte berekening van de faalkans Dit kan ertoe leiden dat de som van de kwadraten van de invloedsfactoren berekend uit de Monte Carlo simulaties niet gelijk is aan 1.

Ten behoeve van de interpretatie worden de invloedsfactoren achteraf verschaald zodanig dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1.

3.1.5 Overzicht van uitgangspunten voor de probabilistische analyses

Resumerend worden bij het uitvoeren van de probabilistische analyses de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- voor het berekenen van de faalkans worden Monte-Carlo simulaties uitgevoerd. De faalkans is gelijk aan het aantal simulaties waarbij de betrouwbaarheidsfunctie kleiner of gelijk is aan nul gedeeld door het totaal aantal simulaties. Het aantal simulaties wordt gekozen dat de faalkans met 95 % nauwkeurigheid wordt berekend. Simulaties van de stochastische parameters worden berekend met behulp van een random generator.
- voor het berekenen van de waarde van de betrouwbaarheidsfunctie bij een bepaalde parametercombinatie met de fragmentenmethode. wordt gebruik gemaakt van interpolatie, zie § 3.2.2
- de invloed van de stochastische parameters op de spreiding van de betrouwbaarheidsfunctie wordt uitgedrukt volgens de systematiek van de eerste orde tweede moment methode. Bij het bepalen van de gezamenlijke kansdichtheid van parametercombinaties van een simulatie wordt eventuele onderlinge correlatie tussen parameters in rekening gebracht. In de analyses is er sprake van correlatie bij een aantal standaard normaal verdeelde parameters.

3.1.6 Stapsgewijze opzet van de probabilistische berekeningen

De stapsgewijze opzet van de probabilistische berekeningen is als volgt:

1. Genereer een simulatie van de stochastische parameters.
2. Bereken de betrouwbaarheidsfunctie Z .
3. Indien $Z < 0$, dan berekening van de gezamenlijke kansdichtheid Pr van de parametercombinatie X_i .
4. Resultaten van de probabilistische analyse:
 - de faalkans is gelijk aan:

$$P_f = \frac{M}{N_{\text{totaal}}}$$

hierin is M het aantal simulaties waarbij de betrouwbaarheidsfunctie kleiner dan nul is en N_{totaal} het totaal aantal simulaties.

- de betrouwbaarheidsindex is gelijk aan:

$$\beta = \Phi^{-1}(-p_f)$$

- de schatting voor het ontwerp punt is de parametercombinatie van de M simulaties waarbij $Z < 0$ met de grootste gezamenlijke kansdichtheid.

- de invloedscoëfficiënten worden berekend volgens de procedure in § 3.1.4. De invloedsfactoren zijn gelijk aan:

$$\alpha_i = \frac{\mu_N - X_i^*}{\beta \sigma_N}$$

Hierbij wordt gerekend met de parameters μ_N en σ_N van de getransformeerde verdelingen, zie § 3.1.4.

5. Verschalen van de invloedsfactoren zodanig dat de som van de kwadraten gelijk is aan 1.

3.2 Betrouwbaarheidsfuncties en wijze van berekenen van de betrouwbaarheidsfuncties

3.2.1 Definitie van de betrouwbaarheidsfuncties

In de probabilistische analyses wordt de invloed van de stochastische parameters op het functioneren van een kwelscherm onderzocht. Het functioneren van een kwelscherm wordt beschreven door de betrouwbaarheids- of Z-functie. Falen van het kwelscherm treedt op wanneer de Z-functie kleiner is dan nul. Zoals gesteld in § 1.4 betreffen de te analyseren c.q. implementeren Z-functies het functioneren van het kwelscherm ten aanzien van 'heave' en 'opdrijven'. De Z-functie voor 'opdrijven' wordt in case 1 geïmplementeerd. Naast 'heave' en 'opdrijven' kan een kwelscherm nog door andere oorzaken falen. Het functioneren van een kwelscherm is beschreven in een foutenboom, zie [GD 1996a]. De analyse van de foutenboom is beschreven in hoofdstuk 5.

De betrouwbaarheidsfunctie voor heave is als volgt gedefinieerd:

$$\text{heave: } Z = 1 - \frac{i}{i_{\text{fluid}}}$$

Hierin is i het optredende verhang gemiddeld over het kwelscherm en i_{fluid} het verhang waarbij heave door fluïdisatie optreedt. Het optredend verhang i en het verhang i_{fluid} worden als volgt berekend:

- het optredende verhang i voor een bepaalde geometrie en parameterscombinatie volgt uit een modelanalyse met de fragmentenmethode [GD 1997]. De stochastische parameters die de grootte van het berekende verhang bepalen zijn vastgesteld in § 2.4.1.
 - * voor een dicht kwelscherm (zonder gat of lek) is het gemiddelde verhang gelijk aan het quotiënt van het stijghoogteverschil boven en onderaan het scherm en de inbeddingsdiepte van het scherm.
 - * voor een kwelscherm met lek door de sloten wordt dezelfde definitie gehanteerd. De invloed van lek is gemodelleerd met een vast aantal brontermen verdeeld over de hoogte van het scherm.
 - * de invloed van een gat in het scherm hangt af van de positie van het gat ten opzichte van het maaiveld. Bij een gat in het scherm ontstaat een verhang in de grondmoot boven het

gat en een verhang in de grondmoot onder het gat. In beide grondmooten kan fluïdisatie optreden. Of het scherm instabiel wordt bij fluïdisatie in één van de grondmooten, hangt af van de positie van het gat en de passieve weerstand van het deel waar geen fluïdisatie optreedt. De passieve weerstand hangt af van de hoogte van de grondmoot en de schuifsterkte van de grondlaag.

In de analyses is gerekend met een gat bovenin het kwelscherm. Er is dan geen grondmoot boven het gat. Bij fluïdisatie van de grond onder het gat zal heave optreden.

Het gemiddeld verhang i dat wordt gehanteerd in de betrouwbaarheidsfunctie is gelijk aan het quotiënt van het verschil van de stijghoogte onder het gat en de stijghoogte onderaan het scherm en de afstand van het gat tot de teen van het scherm.

- het verhang i_{fluid} is het verhang waarbij 'heave' door fluïdisatie van de grond achter de damwand optreedt. De grootte van het verhang i_{fluid} volgt uit een evenwichtsbeschouwing. Voor een uniforme laag met constant opwaarts verhang is het verhang gelijk aan:

$$i_{fluid} = \frac{(1-n) \cdot (\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w}$$

hierin is n de porositeit, γ_k het soortelijk gewicht van het korrelmateriaal en γ_w het soortelijk gewicht van water, zie [Rossum et al 1959]. Het soortelijk gewicht van de korrels en water zijn deterministische parameters. In de probabilistische berekeningen is de porositeit een stochastische variabele.

De betrouwbaarheidsfunctie voor 'opdrijven' is als volgt gedefinieerd:

$$opdrijven: Z = 1 - \frac{\Phi}{\Phi_{grens}}$$

De grenspotential Φ_{grens} is een stochastische grootte en wordt bepaald door de dikte van het afdekkende laag en het eigen gewicht.

$$\Phi_{grens} = z_{grens} + D \cdot \gamma_n$$

hierin is z_{grens} de locatie van de onderkant van het afdekkende pakket, D de dikte en γ_n het volume gewicht van het afdekkende pakket.

Bij de analyse van case 1 wordt de kans op heave bij opdrijven bepaald. Voor het analyseren van de stroming bij opdrijven is een speciaal fragment ontwikkeld [GD 1997]. Bij de berekening van de stroming bij opdrijven inclusief het bepalen van de oprijfzone wordt de methodiek uit de Leidraad rivierdijken gevolgd. Het resultaat van de analyse is een conditionele kans dat wil zeggen de faalkans heave gegeven opdrijven

$$Pr[heave | opdrijven]$$

In een aparte analyse wordt de faalkans opdrijven bepaald.

De benodigde uitdrukkingen van de fragmenten voor het berekenen van het verhang over het kwel-scherm zijn ten dele in het verleden en in Fase 2 afgeleid, zie [GD 1997a]. Voor het berekenen van de betrouwbaarheidsfunctie in de Monte Carlo-methode zijn subroutines ontwikkeld. Hierbij is gebruik gemaakt van de bestaande programmatuur uit Fase 2, zie paragraaf 3.2.2.

3.2.2 Programmeren en wijze van berekenen van de betrouwbaarheidsfuncties

Bij een gegeven parametercombinatie volgt de waarde van het verhang i of de grootte van de stijghoogte ϕ onder het afdekkend pakket uit een analyse met de fragmentenmethode. De oplossingen van de fragmenten zijn ten dele in het verleden en in Fase 2 afgeleid, zie [GD 1997a]. De oplossingen van de fragmenten zijn geprogrammeerd waar mogelijk is gebruik gemaakt van beschikbare routines, onder andere de routines die in Fase 2 zijn ontwikkeld. Per case zijn de benodigde fragmenten geassembleerd en is een routine geschreven waarmee de waarde van de betrouwbaarheidsfunctie wordt berekend. Deze routines zijn gekoppeld aan het programma voor de Monte Carlo-simulatie.

In § 3.1.3 is een criterium afgeleid voor het benodigd aantal simulaties. In 2.3 is de minimale faalkans voor heave in de praktijk afgeleid namelijk $1 \cdot 10^{-6}$. Volgens dit criterium zijn voor de kleinste faalkans $400 \cdot 10^6$ simulaties noodzakelijk. Afhankelijk van de rekentijd per simulatie kan dit leiden tot een aanzienlijke rekentijd.

Om de rekentijd te beperken is ervoor gekozen om de betrouwbaarheidsfunctie niet voor elke simulatie te berekeningen. De berekening omvat de volgende uitgangspunten:

- 1 De betrouwbaarheidsfunctie wordt vooraf in een veld van discrete punten in een gekozen interval van parameterwaarden berekend.
- 2 De grootte van het discrete veld is gelijk aan het 95% betrouwbaarheidsinterval volgens de verdeling van de parameters.
- 3 Voor parametersimulaties binnen het discrete veld van punten wordt de waarde van de betrouwbaarheidsfunctie bepaald via interpolatie tussen de berekende waarden in het discrete veld.
- 4 Voor parametersimulaties buiten het veld wordt geen gebruik gemaakt van de waarden in het veld van discrete punten. Om fouten bij extrapolatie te vermijden wordt de betrouwbaarheidsfunctie voor parametersimulaties buiten het veld bepaald met een modelanalyse met de fragmentenmethode.

4 Resultaten van de probabilistische berekeningen

4.1 Wijze van presenteren van de resultaten

De resultaten worden als volgt gepresenteerd

1. Presenteren van berekende faalkansen en globale interpretatie van de invloed van de parameters lek, gat en spleetvorming door zetting.
2. Berekenen van de invloedsfactoren α van de stochastische parameters : verval, geometrie, lek gatgrootte, spleet en parameters en opstellen van conclusies ten aanzien van de bijdrage van de parameters aan het falen van een kwelscherm.
3. Genereren van ontwerpgrafieken voor de benodigde relatieve inbedding, partiële factoren en opstellen van conclusies ten aanzien van de invloed van de stochastische parameters lek, gatgrootte en spleet op de benodigde inbedding.
4. Berekenen van de traditionele veiligheidsfactor, vergelijking met de probabilistische berekeningen en opstellen van conclusies ten aanzien van het traditioneel geaccepteerde betrouwbaarheidsniveau.
5. Uitwerken van een uniforme presentatie en interpretatie van de resultaten via een weerstandsfactor.
6. Opstellen van algemene conclusies uit de probabilistische berekeningen.

4.2 Berekende faalkansen en globale interpretatie van de invloed van de parameters lek, gat en spleetvorming door zetting

De resultaten van de berekeningen zijn verzameld in bijlage 1 tot en met 10. De bijlagen bevatten per case de volgende gegevens:

- de waarde van de relatieve lengte van de kering L/D
- kolom 1 de waarde van de relatieve inbedding van het kwelscherm d/D
- kolom 2 de berekende faalkans van de betreffende configuratie
- kolom 3 de met de faalkans overeenkomende waarde van de betrouwbaarheidsindex
- kolom 4 en verder de grootte van de invloedsfactoren van de onderzochte stochastische parameters

In Tabel 4.1 zijn de bijlagennummers verzameld. In bijlage 78 - 87 is per case de berekende faalkans uitgezet als functie van de relatieve inbedding d/D.

case	type kering	configuratie	variant	bijlage	
				A	B
4	zeedijk	buitenhoofd van sluis met open bodem	dicht	1	78
2	rivierdijk	kwelscherm in binnentalud	dicht	2	79
			lek	3	80
			gat	4	81
			10*lek	7	84
			gat/10	8	85
			VD=0.3	9	86
			Vn=0.3	10	87
3	zeedijk	sluis met dichte bodem dicht kwelscherm	geen spleet	5	82
			spleet	6	83

bijlage A: faalkans per configuratie, invloedsfactoren

bijlage B: grafiek van logaritme van de faalkans als functie van relatieve inbedding

Tabel 4.1 Bijlagennummers per configuratie

Uit de resultaten blijken de volgende globale conclusies:

1. Zoals verwacht leidt een toename van de relatieve inbedding tot een afname van de faalkans. **Uit bijlage 78 tot en met 87 blijkt bij een relatieve inbedding > 0.1 een lineair verband tussen de logaritme van de berekende faalkans en de relatieve inbedding.** Bij kleine relatieve inbedding wordt een ander lineair verband gevonden.
2. De invloed van lek door de sloten is onderzocht in case 2: kwelscherm in rivierdijk. Uit de resultaten blijkt dat **lek door de sloten een gering effect heeft op de faalkans.** De verschillen in bijlage 79, 80 en 84 zijn gering. In paragraaf 4.4 zal blijken dat de ontwerpgrafieken voor de configuraties met lek en zonder nauwelijks verschillen. De invloed hangt af van de relatieve inbedding van het kwelscherm. Bij een kleine relatieve inbedding leidt lek door de sloten tot een geringe toename van de faalkans. Bij een grote relatieve inbedding leidt lek door de sloten tot een geringe afname van de faalkans. De grootte van de relatieve inbedding waarbij de toename van de faalkans omslaat in een afname hangt af van de relatieve lengte van de kering. Een variantberekening is uitgevoerd bij een gemiddeld 10 maal zo groot lekdebiet. De resultaten van de vergelijking zijn verzameld in bijlage 11. In kolom 5 en 6 van bijlage 11 zijn de relatieve verandering van de faalkans bij lek gegeven. In kolom 5 zijn de resultaten met de oorspronkelijke verdelingen gegeven in kolom 6 van de variantberekening. Bij de oorspronkelijke verdeling is de toename van de faalkans maximaal 6% en de afname maximaal 20%. Bij een gemiddeld 10 maal zo grote lek is de toename van de faalkans maximaal 6% en de afname maximaal 40%, zie kolom 6 van bijlage 11.

3. De invloed van een gat boven in het kwelscherm is onderzocht in case 2: kwelscherm in een rivierdijk. **Een gat boven in het kwelscherm heeft een grote invloed op de faalkans. De invloed van een gat is gunstig. Een gat leidt tot een afname van de faalkans.** Het verhang achter het kwelscherm wordt door een gat kleiner.
- De afname is in bijlage 12 uitgedrukt in het quotiënt van de faalkans van een kwelscherm met een gat en de faalkans van een dicht kwelscherm. Uit kolom 4 in bijlage 12 blijkt dat de relatieve afname toeneemt bij een grotere relatieve inbedding. De invloed van een gat neemt af bij een toename van de lengte van de kering.
- De invloed van de grootte van een gat is onderzocht met een variantberekening met een gemiddeld 10 maal zo klein gat. De afname van de faalkans is dan minder sterk, zie kolom 5 van bijlage 12.
4. De invloed van de spreiding van de laagdikte D en de porositeit n is onderzocht met twee variantberekening voor case 2 met een dicht kwelscherm. In de eerste berekening is de spreiding van de laagdikte vergroot met een factor 3 en in de tweede berekening is de spreiding van de porositeit vergroot met een factor 3. De resultaten zijn verzameld in bijlage 13. De spreiding wordt uitgedrukt in de variatiecoëfficiënt; gelijk aan het quotiënt van de standaardafwijking en het gemiddelde. In de oorspronkelijke verdelingen is de variatiecoëfficiënt van de laagdikte en de porositeit gelijk aan 0.1.
- In kolom 4 van bijlage 13 is de relatieve verandering van de faalkans gegeven door een toename van de variatiecoëfficiënt van de laagdikte. De invloed van een toename van de variatiecoëfficiënt van de laagdikte van 0.1 naar 0.3 op de berekende faalkans is in de meeste gevallen klein. Bij een kleine relatieve lengte van de kering ($L/D < 0.5$) is de relatieve verandering van de faalkans klein. Bij kleine relatieve inbedding neemt de faalkans af en bij grote relatieve inbedding neemt de faalkans toe. De relatieve verandering ligt in orde van 2% tot maximaal 15%. Bij een grote relatieve lengte van de kering ($L/D > 0.5$) neemt de faalkans toe, maximaal met een factor 2.
- Een toename van de variatiecoëfficiënt van de porositeit leidt tot een toename van de faalkans.** In kolom 6 van bijlage 13 is het quotiënt uitgezet van de faalkansen met variatiecoëfficiënt 0.3 en 0.1. De toename van de variatiecoëfficiënt van 0.1 tot 0.3 leidt tot een maximale toename van de faalkans met een factor 160. Dit is bij een lang kunstwerk, bij waterkeringen is de toename kleiner
5. De invloed van een spleet onder een dichte vloer van een kunstwerk is onderzocht in case 3: Sluis met dichte vloer. **De invloed van een spleet op de berekende faalkans is groot. Een spleet onder de vloer leidt tot een toename van de faalkans.** De invloed van een spleet neemt toe bij een toename van de lengte van de kering. De toename van de faalkans is groter bij een grotere lengte van de kering. Aangezien de spleetlengte gelijk is aan de lengte van de kering is dit een logisch resultaat. Uit bijlage 83 blijken de geringe verschillen tussen de faalkansen bij grote relatieve lengte ($L/D=2-3$). Bij de faalkansanalyses dient rekening gehouden te worden met de kans van optreden van een spleet. In paragraaf 6.2 wordt de invloed van een spleet nader uitgewerkt.

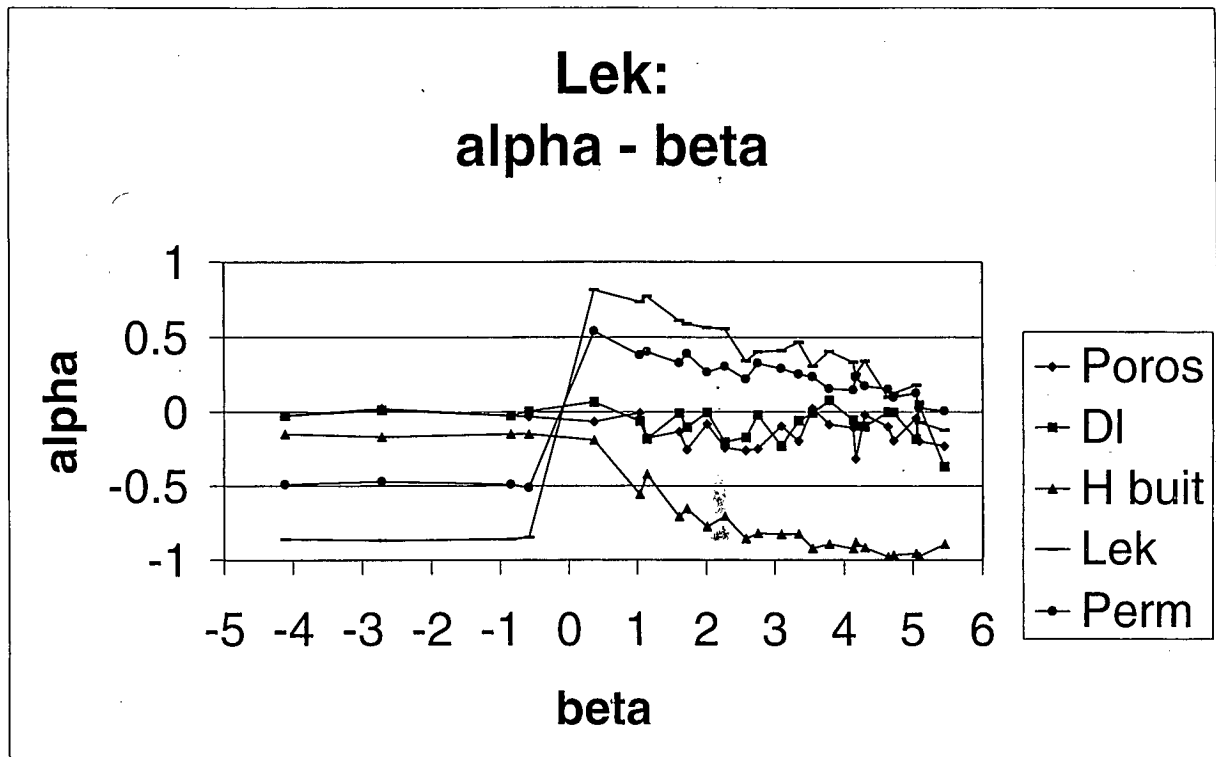
4.3 Invloedsfactoren α van de stochastische parameters: verval, geometrie, lek gatgrootte, spleet en bodemeigenschappen en conclusies ten aanzien van de bijdrage van de parameters aan het falen van een kwelscherm

Uit de resultaten van de probabilistische analyses zijn de invloedsfactoren α berekend volgens de methodiek beschreven in § 3.1.4. Achteraf zijn de berekende invloedsfactoren zodanig verschaald dat de som van kwadraten gelijk is aan 1.0, zie § 3.1.4. Bij kleine waarden van de betrouwbaarheidsindex β en met name in de berekeningen met lek en gat voor case 2 is de verandering van de invloedsfactoren door verscalen groot. Dit is een gebied met niet-relevante waarden van β ($\beta < 0$). In die berekeningen met kleine betrouwbaarheidsindex is de relatieve inbeddingsdiepte klein. Voor waarden van $\beta > 0$ is de verandering van de invloedsfactoren door verscalen klein. Dit laatste is het gevolg van de definitie van de invloedsfactoren. Binnen de eerste orde tweede moment methode wordt gerekend met een lineaire benadering van de betrouwbaarheidsfunctie. De invloedsfactoren volgen uit de gradient van de benaderingsfunctie. Met de Monte Carlo simulaties wordt niet gerekend met een lineaire benadering van de Z-functie, maar een (rekeninghoudend met het aantal simulaties) met een exacte berekening van de faalkans.

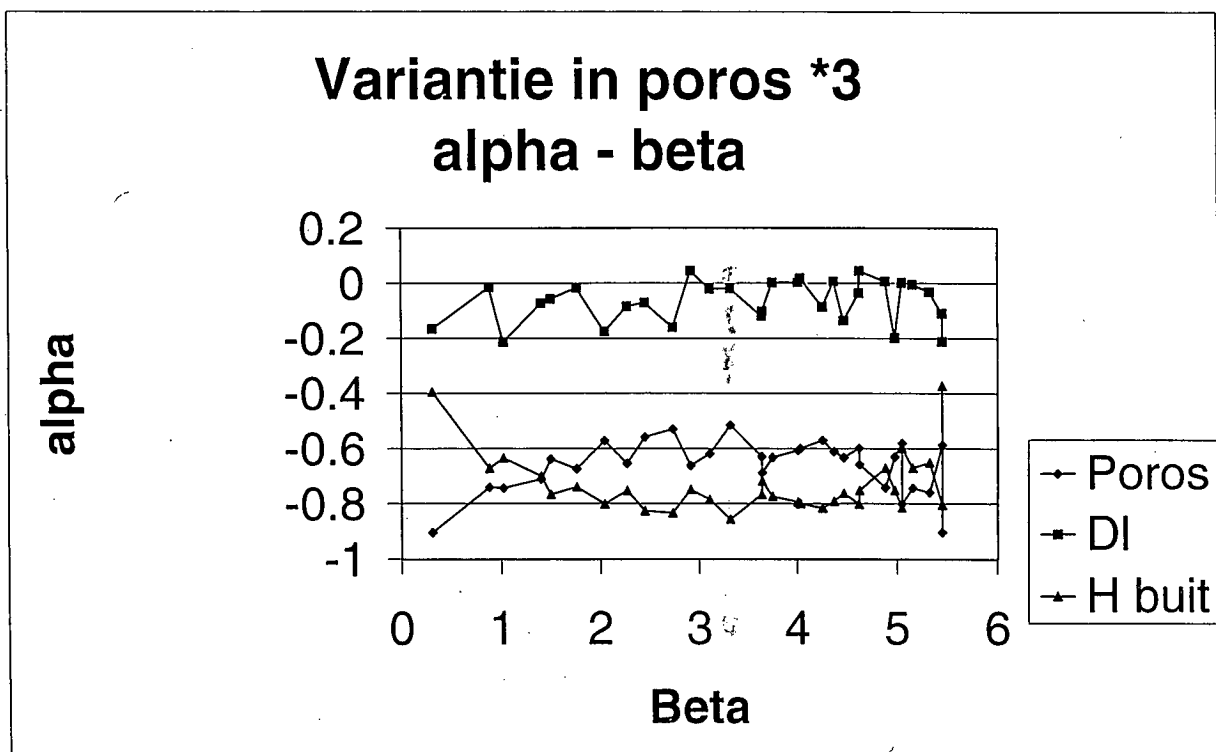
De invloedsfactoren zijn grafisch weergegeven in de bijlage 15 tot en met 24. In de grafieken zijn de invloedsfactoren per case uitgezet als functie van de betrouwbaarheidsindex β . De waarden van de invloedsfactoren zijn verzameld in de bijlagen 1 tot en met 14. De bijlagen zijn verzameld in tabel 4.2. Voor de interpretatie belangrijke resultaten zijn weergegeven in figuur 4.1 (case 2: $V_n = 0.3$) en figuur 4.2 (case 2: lek)

case	type kering	configuratie	variant	bijlage
4	zeedijk	buitenhoofd van sluis met open bodem	dicht	15
2	rivierdijk	kwelscherm in binnentalud	dicht	16
			lek	17
			gat	18
			10*lek	21
			gat/10	22
			VD=0.3	23
			Vn=0.3	24
3	zeedijk	sluis met dichte bodem dicht kwelscherm	geen spleet	19
			spleet	20

Tabel 4.2 Bijlagennummers van de invloedsfactoren per configuratie



Figuur 4.1 Invloedsfactoren: Case 2: lek



Figuur 4.2 Invloedsfactoren: Case 2: dicht kwelscherm variatiecoëfficiënt porositeit $V_n = 0.3$

De berekeningen bij kleine β en daarmee kleine relatieve inbedding van het kwelscherm blijken onnauwkeurig. Het verloop van de invloedsfactoren vertoont een sprong in de buurt van $\beta = 0.0$. Gezien de aanwezige trends in de overige uitkomsten is het niet waarschijnlijk dat de resultaten voor $\beta < 0.0$ juist zijn. De sprong in het verloop treedt op bij berekeningen waarbij de verandering van de invloedsfactoren door verschalen groot is. Dit kan worden verklaard door instabiel gedrag van de respons bij kleine relatieve inbeddingsdiepte. De invloed van het kwelscherm en eventuele lek of gat zijn dan klein. Een mogelijke oplossing is het uitvoeren van meer Monte Carlo-simulaties in die gevallen.

Het gebied van β -waarden kleiner dan nul is voor de praktijk niet interessant. Het voor de praktijk relevante gebied ligt in de orde van $\beta = 2$ à 5 . Per case zijn de voor een berekening kenmerkende waarde van de invloedsfactoren in het gebied $\beta > 2$ zijn verzameld in tabel 4.3. (case 2 en case 4) en in tabel 4.4 (case 3).

Kenmerkende waarden van de invloedsfactoren in case 2 en case 4				
parameter	dicht kwelscherm		kwelscherm met lek	kwelscherm met gat
	case 4: sluis in zeedijk	case 2: rivierdijk	case 2: rivierdijk	case 2: rivierdijk
buitenwaterstand	-0.94 à -0.98	Vn=0.1: -0.92 à -0.99 Vn=0.3: -0.67 à -0.86	-0.775 à -0.978	-0.91 à -0.99
binnenwaterstand	0.21 à 0.02	nvt	nvt	nvt
porositeit	-0.29 à -0.12	Vn=0.1: -0.13 à -0.25 Vn=0.3: -0.53 à -0.74	-0.02 à -0.26	-0.07 à -0.31
laagdikte	-0.19 à -0.09	Vn=0.1: -0.03 à -0.30 Vn=0.3: -0.045 à -0.21	-0.004 à -0.23	0.009 à -0.25
doorlatendheid	geen invloed	geen invloed	0.33 à 0.008	geen invloed
lek	nvt	nvt	0.56 à -0.12	nvt
gat	nvt	nvt	nvt	0.27 à 0.11

Vn Variatiecoëfficiënt van de porositeit

Tabel 4.3 Kenmerkende waarden van de invloedsfactoren voor $\beta > 2$, case 2 en case 4

Kenmerkende waarden van de invloedsfactoren in case 3		
parameter	dicht kwelscherm onder sluis in zeedijk	
	dichte vloer zonder spleet	dichte vloer met spleet
buitenwaterstand	-0.95 à -0.97	-0.95 à -0.99
binnenwaterstand	0.14 à -0.03	0.14 à -0.014
porositeit	-0.14 à -0.25	-0.61 à 0.10
laagdikte	-0.27 à -0.13	-0.18 à -0.045
doorlatendheid	geen invloed	geen invloed

Tabel 4.4 Kenmerkende waarden van de invloedsfactoren voor $\beta > 2$, case 3

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies ten aanzien van de invloed van de stochastische parameters: verval, geometrie en bodemeigenschappen worden getrokken:

- dit betekent dat het verval een belastingparameter is. De waarde in het ontwerppunt is groter dan het gemiddelde. **Het verval over de kering is de belangrijkste stochastische parameter.** Het verval is een belastingparameter. De invloedsfactor is negatief. In case 2 wordt het verval bepaald door de buitenwaterstand en de spreiding erin. In case 3 en 4 wordt het verval bepaald door de buiten- en binnenwaterstand en de spreidingen daarvan. De invloedsfactor van het verval ligt voor de meeste situaties in de orde van -0.90. Dit betekent dat de faalkans voor 80% door het verval wordt bepaald. Dit geldt bij een variatiecoëfficiënt van 0.1 van de porositeit. Bij een variatiecoëfficiënt van 0.3 van de porositeit neemt de invloedsfactor van het verval in de analyse van de dichte wand af tot -0.75. Bij verschillende spreiding van het verval wordt ongeveer dezelfde invloedsfactor van het verval gevonden (case 4 en case 2: dicht). Voor de situatie met lek door de sloten hangt de invloedsfactor van het verval af van de betrouwbaarheidsindex c.q. het relatieve inbeddingsniveau. Bij een toename van de betrouwbaarheidsindex van 0.0 - 5.0 neemt de invloedsfactor van het verval geleidelijk toe van -0.55 tot -0.98. Voor de situatie met een gat is de invloedsfactor van het verval ook afhankelijk van de betrouwbaarheidsindex c.q. het relatieve inbeddingsniveau, echter minder sterk als bij lek.
- **in geval van lek door de sloten van het kwelscherm zijn naast het verval de lek en de doorlatendheid van het massief de belangrijkste parameters.** De waarde van de invloedsfactoren van de doorlatendheid van het massief en de lek door de sloten zijn positief. Deze parameters zijn derhalve volgens de definitie sterkte parameters. De ontwerpwaarde is kleiner dan het gemiddelde. Dit blijkt ook uit bijlage 11.

Lek door de sloten leidt tot een geringe verandering van de faalkans ten opzichte van de faalkans van een dicht kwelscherm.

De invloedsfactoren van de lek en de doorlatendheid zijn afhankelijk van het betrouwbaarheidsniveau. Bij een toename van de betrouwbaarheidsindex van 0.0 - 5.0 neemt de invloedsfactor van de lek geleidelijk af van 0.81 tot 0.01. De invloedsfactor van de doorlatendheid neemt daarbij geleidelijk af van 0.54 naar 0.15.

De spreiding van de lek is in de berekeningen groot. In de berekeningen is gerekend met een spreiding van 1.61 voor de log van de lek. Dit betekent een variatiecoëfficiënt van 3.5. Ook de spreiding van de doorlatendheid is in de berekeningen groot. In de berekeningen is gerekend met een spreiding van 1.0 voor de log van de doorlatendheid van het pakket. Dit betekent een variatiecoëfficiënt van 1.3.

- in geval van een gat heeft naast het verval de grootte van het gat de grootste invloedsfactor. De invloedsfactor van een gat is positief. Dit betekent dat de grootte van het gat een sterke parameter is. Hoe kleiner het gat hoe groter de faalkans. Het ontstaan van een gat leidt tot een afname van de faalkans. Dit is het gevolg van de verandering van de stijghoogten achter het kwelscherm als gevolg van een gat.

De invloedsfactor van het gat is afhankelijk van het betrouwbaarheidsniveau c.q. de relatieve inbedding en neemt af bij een toename van de betrouwbaarheidsindex. Dit effect is minder sterk dan bij de invloed van lek.

De spreiding van de grootte van een gat is in de berekeningen groot. In de berekeningen is gerekend met een spreiding van 0.53 voor de log van de grootte van het gat. Dit betekent een variatiecoëfficiënt van 0.56.

- in de situatie met een spleet onder de vloer van een constructie is de volgorde van de invloedsfactoren gelijk aan die in de berekening zonder spleet. De belangrijkste parameter is het verval en vervolgens de porositeit en de laagdikte. Een spleet leidt tot een toename van de faalkans. De invloedsfactoren zijn afhankelijk van het betrouwbaarheidsniveau c.q. de relatieve inbedding. Bij een toename van de betrouwbaarheidsindex van 0 tot 3 neemt de invloedsfactor van de buitenwaterstand in negatieve zin toe van -0.66 tot -0.97. Bij een grotere betrouwbaarheidsindex neemt de invloedsfactor verder toe tot -0.99. Bij een toename van de betrouwbaarheidsindex van 0 tot 3 neemt de invloedsfactor van de binnenwaterstand af 0.33 tot 0.147. Bij een grotere betrouwbaarheidsindex neemt de invloedsfactor verder af tot 0.04.
- de porositeit n bepaalt o.a. de weerstand tegen heaving. De invloedsfactor is negatief aangezien de sterkte van het pakket afhankelijk is van $1-n$. Volgens de definitie is de porositeit een belastingparameter. De invloedsfactor van de porositeit hangt sterk af van de variatiecoëfficiënt van de porositeit.

De invloedsfactor is min of meer constant in de verschillende berekeningen en gelijk aan -0.20 à -0.30. Dit geldt bij een variatiecoëfficiënt gelijk aan 0.1. Bij een variatiecoëfficiënt van 0.3 van de porositeit neemt de invloedsfactor van de porositeit in de analyse van de dichte wand in negatieve zin toe tot -0.60.

Bij een sluis met een spleet onder de dichte bodem is de invloedsfactor afhankelijk van het betrouwbaarheidsniveau c.q. de relatieve inbedding. Bij een toename van de betrouwbaarheids-

index van 0 - 5 neemt de invloedsfactor af van -0.61 tot -0.10.

- de invloedsfactor van de laagdikte is negatief. De laagdikte is daarmee een belastingparameter. Een toename van de laagdikte leidt tot een afname van de relatieve inbedding en hiermee tot een toename van de faalkans. De invloedsfactor van de laagdikte is min of meer constant en gelijk aan -0.20 à -0.30. De variatiecoëfficiënt van de laagdikte heeft geen grote invloed op de invloedsfactor van de laagdikte.

Bij een sluis met een spleet onder de dichte bodem is de invloedsfactor afhankelijk van het betrouwbaarheidsniveau c.q. de relatieve inbedding. Bij een toename van de betrouwbaarheidsindex van 0 - 5 neemt de invloedsfactor (absoluut) af van -0.40 tot -0.11.

4.4 Ontwerpgrafieken voor de benodigde relatieve inbedding, partiële factoren en conclusies ten aanzien van de invloed van de stochastische parameters lek, gatgrootte en spleet op de benodigde inbedding

Definitie van de ontwerpgrafieken

Eén van de doelstellingen van de voorliggende studie is het genereren van ontwerpgrafieken voor het bepalen van de benodigde inbeddingsdiepte van een kwelscherm. Deze ontwerpgrafieken zijn gedefinieerd als het verband van de verhouding van het verhang over het scherm en het verhang over de kering Iwand/Ikering en de relatieve inbedding van het kwelscherm d/D . De relatieve inbedding is gelijk aan het quotiënt van de inbeddingslengte d en de laagdikte D .

Het af te leiden verband geldt bij een gewenst betrouwbaarheidsniveau van het kwelscherm tegen heave. Uitgangspunt is om grafieken te genereren voor een aantal waarden van de betrouwbaarheidsindex β ($\beta = 1, 2, 3, 4, 5$). De ontwerpgrafieken dienen per case gegenereerd te worden. Vervolgens dienen lijnen van gelijke β -waarde van verschillende configuraties en de effecten van stochastische parameters (lek, gat, spleet) gecombineerd te worden.

De ontwerpgrafieken dienen als basis voor het opstellen van een voorstel voor een probabilistische ontwerpregel. Dit wordt uitgevoerd in Fase 5.

Procedure voor het genereren van de ontwerpgrafieken

De resultaten van de berekeningen geven de betrouwbaarheidsindex bij een gegeven inbeddingsniveau. De ontwerpgrafieken kunnen worden gegenereerd door de resultaten van de berekeningen uit te zetten volgens de gedefinieerde assen (x-as: relatieve inbedding d/D ; y-as: Iwand/Igloabaal). Dit levert een 'wolk' van punten met daaraan gekoppeld de waarde van de betrouwbaarheidsindex. Vervolgens kunnen de gewenste lijnen worden gevonden door in het veld van β -waarden contourlijnen van gelijke β (iso- β lijnen) te genereren met behulp van een contourlijnen programma, bijvoorbeeld SURFER. Per configuratie zijn ongeveer 20 berekeningen uitgevoerd. Bij de uitwerking blijken de contourlijnen dicht bij elkaar te lopen. Hierdoor blijkt de methode met een contourlijnenprogramma niet te werken.

Bij het uitwerken van de resultaten is de volgende inverse procedure toegepast:

1. De resultaten van de probabilistische berekeningen geven per case een verband van het inbeddingsniveau en de faalkans, zie bijlage 78 tot en met 87. Dit blijken per relatieve lengte van de kering L/D bij benadering lineaire verbanden te zijn op logaritmische schaal.
2. Door middel van interpolatie in de gevonden relatie is het inbeddingsniveau bepaald voor een gewenst betrouwbaarheidsniveau behorende bij de iso- β lijnen.
3. Met behulp van een modelberekening met de fragmentenmethode is het verhang over het kwelscherm I_{wand} voor de gegeven inbedding bepaald bij gemiddelde waarden van de parameters.
4. Het verhang over de kering $I_{globaal}$ bij gemiddelde parameters volgt uit de invoer van de probabilistische berekeningen.
5. Met de resultaten van de bovenstaande stappen worden punten van de iso- β lijnen bepaald. Vervolgens zijn de punten met gelijke β door lijnstukken verbonden.

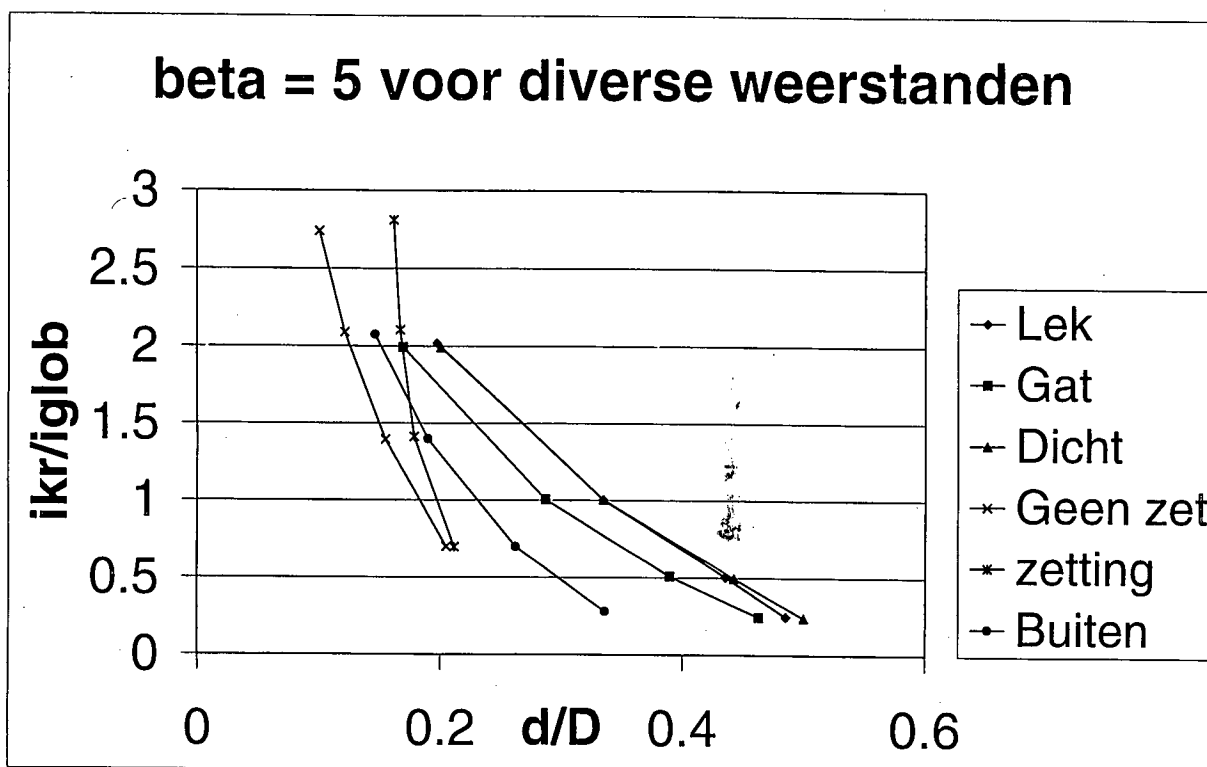
Naast de ontwerpgrafieken bij gemiddelde waarden van de parameters dienen voor het opstellen van een probabilistische ontwerpregel de volgende gegevens te worden gepresenteerd:

1. De partiële factor op de sterkte. Voor de partiële factor zijn twee definities gehanteerd:
 1. Het quotiënt van het verhang achter het kwelscherm berekend met gemiddelde waarden van de parameters en de ontwerpwaarde van het verhang achter het kwelscherm uit de probabilistische berekeningen.
 2. Het quotiënt van het verhang achter het kwelscherm berekend met karakteristieke waarden van de parameters en de ontwerpwaarde van het verhang achter het kwelscherm uit de probabilistische berekeningen.
2. Het verband tussen gemiddelde - en ontwerpwaarden van d/D en het verband tussen karakteristieke -en ontwerpwaarden van d/D .
3. Het verband tussen gemiddelde - en ontwerpwaarden van $I_{wand}/I_{globaal}$ en het verband tussen karakteristieke -en ontwerpwaarden van $I_{wand}/I_{globaal}$.

De laatste twee grafieken geven de relatie tussen de ontwerpgrafieken bij gemiddelde waarden en ontwerpgrafieken bij karakteristieke waarden en het verband met ontwerpgrafieken bij ontwerpwaarden van de parameters.

Resultaten

De gegenereerde ontwerpgrafieken en overige gegevens zijn weergegeven in bijlage 25 tot en met 60. De ontwerpgrafieken van de cases van bijlage 25, 29, 33, 37, 41 en 45 zijn per (iso- β) waarde van de betrouwbaarheidsindex gecombineerd in bijlage 61 ($\beta=1$), 62 ($\beta=2$), 63 ($\beta=3$), 64 ($\beta=4$) en 65 ($\beta=5$). In figuren 4.3 is de combinatie van de ontwerpgrafieken van de verschillende configuraties bij $\beta=5$ gegeven. In tabel 4.5 zijn de bijlage nummers verzameld.



Figuur 4.3 Ontwerpgrafieken van de configuraties voor $\beta = 5$ bij gemiddelde waarden

case	type kering	configuratie	variant	bijlagen ¹⁾			
				A	B	C	D
4	zeedijk	buitenhoofd van sluis met open bodem	dicht	25	26	27	28
2	rivierdijk	kwelscherm in binnentalud	dicht	29	30	31	32
			lek	33	34	35	36
			gat	37	38	39	40
			10*lek	²⁾	49	50	51
			gat/10	-	52	53	54
			VD=0.3	-	55	56	57
			Vn=0.3	-	58	59	60
3	zeedijk	sluis met dichte bodem dicht kwelscherm	geen spleet	41	42	43	44
			spleet	45	46	47	48

¹⁾ A: ontwerpgrafiek bij gemiddelde waarden
 B: partiële factor op de sterkte
 C: verband $I_{wand}/I_{globaal}$
 D: verband d/D

²⁾ geen ontwerpgrafiek gegenereerd

Tabel 4.5 Bijlagennummers van de ontwerpgrafieken en additionele gegevens

Conclusies

De conclusies uit de ontwerpgrafieken komen gedeeltelijk overeen met de algemene conclusies van de faalkansberekeningen.

- **De ontwerpgrafieken van een dicht kwelscherm zijn consistent.** Voor de toepassing van deze grafieken in de praktijk dient de invloed van de spreiding van het verval gedefinieerd te worden via een partiële veiligheidsfactor.
- lek
De invloed van lek door de sloten is bij de onderzochte gemiddelde lek gering. Het benodigd inbeddingsniveau van een dicht kwelscherm en een kwelscherm met lek is vrijwel gelijk.
- gat
De invloed van een gat is groot. Echter een gat (bovenin) de wand leidt tot een afname van de faalkans van een kwelscherm. De benodigde inbeddingsdiepte is voor een kwelscherm met een gat kleiner dan voor een dicht scherm. Echter in geval van een gat kan piping optreden.
- spleet door zetting
De invloed van een spleet door zetting is groot. Een spleet onder de vloer van de sluis leidt tot een sterke toename van de faalkans. De invloed van een spleet neemt toe naarmate de lengte van de constructie toeneemt dat wil zeggen dat de toename van de faalkans door een spleet groter is naarmate de lengte van de constructie toeneemt.
Dit geldt ook voor porositeit. De invloed van de lengte wordt nader onderzocht in § 6.2 bij de vertaling naar de praktijk.
De betrouwbaarheid wordt in de analyses bepaald door de lengte van het buiten en binnenhoofd en de inbeddingsniveaus van de schermen in het buiten en binnenhoofd. Deze hoofden hebben in de berekening geen spleet onder de vloer.
- buiten- binnenhoofd
Bij de analyse van het buiten en binnenhoofd van een sluis met open bodem is ervan uitgegaan dat de hoogte van de deuren in het buiten- en binnenhoofd allemaal berekend zijn op hoogwater. Falen van de sluis bij hoogwater is nu niet afhankelijk van het falen van de sluitoperatie van de buitendeuren aangezien altijd een stel hoogwaterkerende deuren gesloten zijn. De analyses van het buiten en binnenhoofd worden apart uitgevoerd dat wil zeggen dat bij de analyse van het binnenhoofd geen rekening wordt gehouden met de grondwaterstroming onder sluis. De faalkans van het buiten- en binnenhoofd zijn nu gelijk omdat de geometrie en de randvoorwaarden gelijk zijn. Aan de buitenzijde geldt de verdeling van extreme hoogwaterstanden en aan de binnenzijde geldt het kanaalpeil en variaties daarvan. Bovendien is ervan uitgegaan dat de bodem in de kolk gelijk is aan de kanaalbodem.
- **De spreiding van de porositeit heeft een grote invloed op de partiële factor op de sterkte.** Een toename van de variatiecoëfficiënt van de porositeit leidt tot een toename van de factor voor het verhang berekend met gemiddelde parameters van 1.02 tot 1.5.

4.5 Traditionele veiligheidsfactor, vergelijking met de probabilistische berekeningen en conclusies ten aanzien van het traditioneel geaccepteerde betrouwbaarheidsniveau

Traditionele werkwijze

In de traditionele ontwerpmethodiek wordt een totale veiligheidsfactor gehanteerd op het verhang over de hoogte van het scherm. Het toelaatbaar verhang over de hoogte van het scherm wordt aangeduid met het kritieke verhang. Heave door fluïdisatie treedt op wanneer de korrelspanningen nul worden als gevolg van de opwaartse grondwaterstroming. In dit rapport wordt het verhang bij fluïdisatie aangeduid met i_{fluid} . Het verhang i_{fluid} volgt uit een evenwichtsbeschouwing en is gelijk aan, zie § 3.2.1,

$$i_{fluid} = \frac{(1-n) \cdot (\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w}$$

hierin is n de porositeit, γ_k het soortelijk gewicht van het korrelmateriaal en γ_w het soortelijk gewicht van water. Het soortelijk gewicht van de korrels en water zijn deterministische parameters. In de probabilistische berekeningen is de porositeit een stochastische variabele.

Het kritieke verhang dat in het ontwerp wordt toegepast is gelijk aan

$$i_{kritiek} = \frac{i_{fluid}}{\gamma_T}$$

hierin is γ_T de totale veiligheidsfactor.

Traditioneel wordt voor de totale veiligheidsfactor een waarde van 2.0 gehanteerd.

De veiligheidsfactor is een totale veiligheidsfactor omdat er bij het ontwerp verder geen andere veiligheidsfactoren worden toegepast.

De toetsing van het kwelscherm vindt plaats rekenend met het voor de kering geldende Maatgevend Hoogwater. Maatgevend Hoogwater is voor een dijkkringgebied afhankelijk van de voor het gebied geldende overschrijdingsfrequentie. De overschrijdingsfrequentie varieert van 1/1250 - 1/10000. Dit betekent dat de ontwerpwaarde van de waterstand die in de toetsing van heave wordt gebruikt afhankelijk is van de overschrijdingsfrequentie.

Doelstelling

Het doel van dit onderdeel van de onderhavige studie omvat:

- het vergelijken van de berekende faalkansen met de grootte van de traditionele veiligheidsfactor
- het afleiden van het betrouwbaarheidsniveau dat overeenkomt met een traditionele veiligheidsfactor van 2.0.

Uitgaande van de huidige veiligheidsfilosofie zou de toelaatbare faalkans door heave gelijk zijn aan 1/100 van de overschrijdingsfrequentie. De toelaatbare faalkans voor heave varieert dan van $8 \cdot 10^{-6}$ (bij een overschrijdingsfrequentie van 1/1250) tot $1 \cdot 10^{-6}$ (bij een overschrijdingsfrequentie van 1/10000) De hiermee overeenkomende waarden van de betrouwbaarheidsindex zijn respectievelijk gelijk aan 4.3 en 4.75.

Berekening van de totale veiligheidsfactor

De ontwerpvariabele is in de definitie van de ontwerpgrafieken gelijk aan de verhouding van het verhang over het scherm en het verhang over de kering: $I_{wand/Igloobaal}$. Voor elke inbeddingsdiepte en opgegeven verdelingen van stochastische parameters resulteert een probabilistische berekening in de faalkans c.q. de betrouwbaarheidsindex van de configuratie alsmede de ontwerpwaarden van de parameters. Met de ontwerpwaarden kan de grootte van de ontwerpvariabele $I_{wand/Igloobaal}$ worden berekend. De ontwerpwaarde wordt aangeduid met een superscript *.

Uitgangspunt voor het ontwerp zijn de karakteristieke waarden van de parameters. Voor de hoogte c.q. het verval zijn dit Maatgevend Hoogwater en de karakteristieke binnenwaterstand. Voor het verhang waarbij fluïdisatie optreedt volgt de karakteristieke waarde met een representatieve waarde van de porositeit. Maatgevend Hoogwater volgt met de geldende overschrijdingsfrequentie uit de verdeling van hoogwater.

De karakteristieke waarde van het verhang bij fluïdisatie is als volgt berekend

$$i_{fluid, kar} = \frac{(1 - \bar{n}) * (\gamma_k - \gamma_w)}{\gamma_w}$$

De karakteristieke waarde van de porositeit is hier gelijk aan het gemiddelde gekozen.

De karakteristieke waarde van het globale verhang is als volgt berekend:

$$I_{gloobaal, kar} = \frac{H_{buiten, kar} - H_{binnen, kar}}{L} = \frac{MHW - [\overline{H_{binnen}} - 1.64 * \sigma_{binnen}]}{L}$$

De lengte van de kering is aangeduid met L. In case 3 en 4 wordt gerekend met variaties van de binnenwaterstand volgens een standaard normale verdeling. In case 2 is de binnenwaterstand constant.

De grootte van de totale veiligheidsfactor volgt uit de probabilistische berekeningen. De grenstoestand heave is per configuratie vastgelegd met de ontwerpparameters. De ontwerpwaarden worden aangeduid met superscript *. De waarden die bij de toetsing worden gehanteerd worden berekend met karakteristieke waarden van de parameters. De toetsing is nu als volgt:

$$\frac{I_{wand, kar} / \gamma_T \leq I_{wand}^*}{I_{globaal, kar} \quad I_{globaal}^*}$$

De totale veiligheidsfactor is gelijk aan:

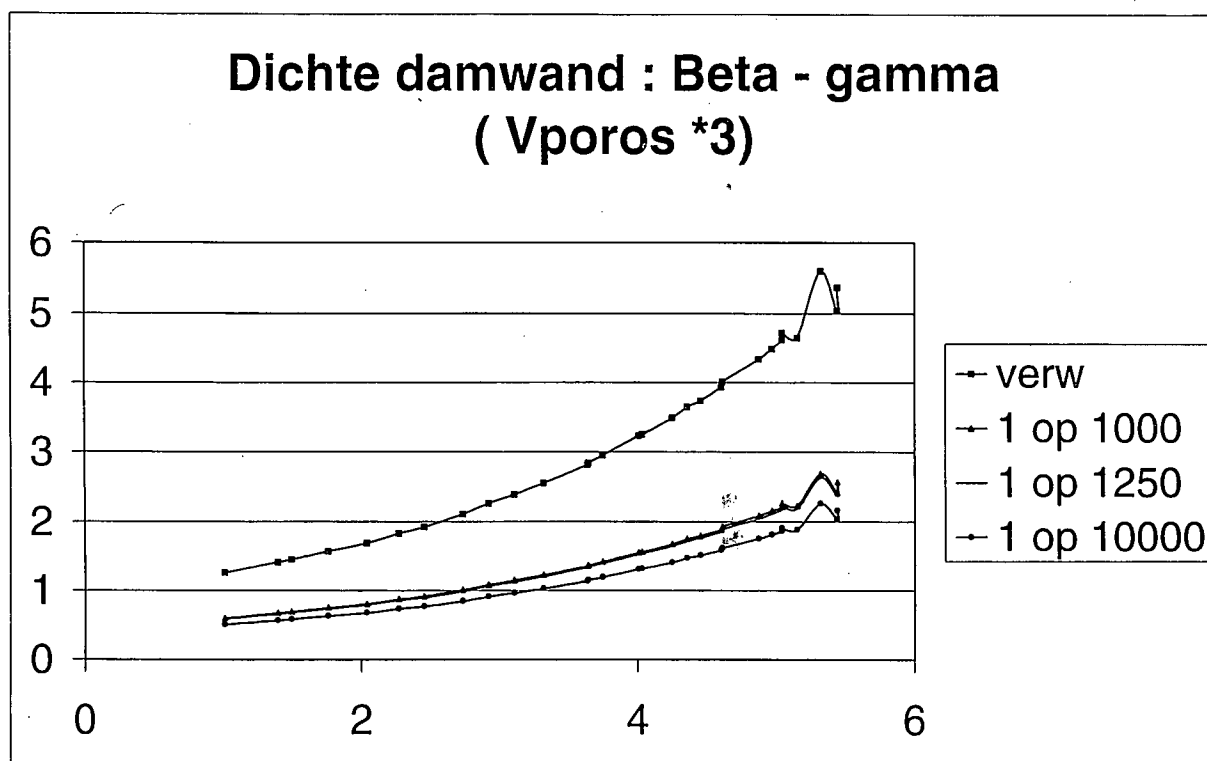
$$\gamma_T = \frac{I_{wand, kar} / I_{globaal, kar}}{I_{wand}^* / I_{globaal}^*}$$

Resultaten

De resultaten van de probabilistische berekeningen zijn uitgewerkt volgens bovenstaande definitie van de totale veiligheidsfactor. De resultaten zijn grafisch weergegeven in bijlage 66 tot en met 75. In de grafiek is de totale veiligheidsfactor uitgezet als functie van de betrouwbaarheidsindex β . De resultaten van de berekening voor een dichte wand bij een variatiecoëfficiënt van de porositeit gelijk aan 0.3 zijn weergegeven in figuur 4.4 (bijlage 75). Bij de uitwerking zijn voor de karakteristieke waarde aan de buitenwaterstand verschillende overschrijdingsfrequenties gehanteerd, namelijk 0.50 (de verwachtingswaarde in de grafieken aangeduid met verw), 1/1000, 1/1250 en 1/10000. De bijlagennummers zijn verzameld in tabel 4.6.

case	type kering	configuratie	variant	bijlage
4	zeedijk	buitenhoofd van sluis met open bodem	dicht	66
2	rivierdijk	kwelscherm in binnentalud	dicht	67
			lek	68
			gat	69
			10*lek	72
			gat/10	73
			VD=0.3	74
			Vn=0.3	75
3	zeedijk	sluis met dichte bodem dicht kwelscherm	geen spleet	70
			spleet	71

Tabel 4.6 Bijlagennummers voor de totale veiligheidsfactor per configuratie



Figuur 4.4 Totale veiligheidsfactor case 2: dicht kwelscherm variatiecoëfficiënt porositeit $V_n = 0.3$

Conclusies

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies worden gesteld:

- de resultaten van de verschillende configuraties geven een uniform beeld
- uit de analyse van het buitenhoofd zijn de volgende waarden bij een variatiecoëfficiënt van de porositeit $V_n = 0.1$ berekend:
 - * bij een betrouwbaarheidsniveau van 4.8 ($p=1/1250$) à 5.6 ($p=1/10000$) is de totale veiligheidsfactor gelijk aan 1.5.
 - * het betrouwbaarheidsniveau voor een totale veiligheidsfactor gelijk aan 2.0 is gelijk aan 6.1 ($p=1/1250$) a 6.9 ($p=1/10000$).
- een kleinere overschrijdingsfrequentie resulteert in een afname van de totale veiligheidsfactor bij een gegeven betrouwbaarheidsindex. Andersom leidt de toepassing van dezelfde totale veiligheidsfactor bij een afname van de overschrijdingsfrequentie tot een toename van de betrouwbaarheidsindex. De reden hiervoor is de toename van het karakteristieke verval bij een afname van de overschrijdingsfrequentie en daarmee een afname van het verschil tussen de karakteristieke en de ontwerpwaarde van het verval.
- de variatiecoëfficiënt van de porositeit heeft een grote invloed op de totale veiligheidsfactor. De invloed van de porositeit volgt uit bijlage 67 en 75. De resultaten zijn verzameld in tabel 4.7. Bij de grote spreiding van de porositeit is de totale veiligheidsfactor gelijk aan 2.0 bij een

betrouwbaarheidsindex gelijk aan 5.0. Bij de grote spreiding van de porositeit komt het veiligheidsniveau behorende bij de traditionele waarde van de totale veiligheidsfactor min of meer overeen met het gewenst veiligheidsniveau volgens de huidige veiligheidsfilosofie. De conclusie is dat mogelijk enige optimalisatie mogelijk is maar dat de spreiding van de porositeit in de praktijk nader dient te worden onderzocht.

Om de optimalisatie te kunnen kwantificeren zijn nadere gegevens noodzakelijk omtrent de volgende aspecten:

- * de invloed van gelaagdheid van de het pakket en heterogeniteit als gevolg van preferente stroombanen op de spreiding van de porositeit
- * de invloed van gelaagdheid en heterogeniteit op het verhang achter het scherm
- * de invloed van gelaagdheid en heterogeniteit op het optreden van fluidisatie.

Uit de literatuur en uit onderzoek in het verleden is gebleken dat de porositeit en de spreiding daarvan niet eenvoudig te modelleren is. De mogelijke optimalisatie is daardoor niet eenvoudig te realiseren. Het ligt daarom voor de hand voorlopig een grote spreiding van de porositeit aan te houden.

Invloed van de spreiding van de porositeit op de betrouwbaarheidsindex		
totale veiligheidsfactor	betrouwbaarheidsindex β als functie van de spreiding van porositeit	
	$V_n = 0.1$	$V_n = 0.3$
1.5	4.65 (p = 1/1250)	3.92 (p = 1/1250)
	5.35 (p = 1/10000)	4.54 (p = 1/10000)
2.0	5.73 (p = 1/1250)	4.82 (p = 1/1250)
	6.67 (p = 1/10000)	5.24 (p = 1/10000)

Tabel 4.7 Invloed van de spreiding van de porositeit op de betrouwbaarheidsindex bij gegeven veiligheidsfactor

4.6 Alternatieve presentatie en interpretatie van de resultaten via een weerstandsfactor

Achtergrond

In § 3.3.2, § 3.3.3 en § 3.3.4 zijn de resultaten gepresenteerd en geëvalueerd door:

- het vergelijken van een type kwelscherm in verschillende omstandigheden: dicht kwelscherm in een zee- of rivierdijk.
- het vergelijken van de invloed van stochastische (lek, gat, spleet) op een kwelscherm:
 - * invloed van lek of gat op een dicht kwelscherm in een rivierdijk
 - * invloed van een spleet op een dicht kwelscherm in een sluis met dichte kolkvloer.

In § 4.4 zijn de resultaten geëvalueerd aan de hand van de bij de opdracht gedefinieerde ontwerpgrafieken. In deze paragraaf wordt een alternatieve wijze van presenteren en interpreteren onderzocht, namelijk via een weerstandsfactor. De hypothese is dat de verschillen van de onderzochte configuraties (met verschillende geometrie, lek, gat, spleet en verschillende spreiding van het verval) via een weerstandsfactor op uniforme wijze zichtbaar worden. Dit wordt ook ingegeven door de gehanteerde fragmentenmethode. De invloed van elk onderdeel in de geometrie inclusief de invloed van lek, gat of een spleet door zetting wordt in de fragmentenmethode vertaald in de grootte van de weerstand per fragment. De totale weerstand van de kering en de onderlinge verhouding van de weerstanden van de fragmenten bepalen bij gegeven verval het verhang achter het kwelscherm en daarmee het functioneren van het kwelscherm ten aanzien van heave. In deze paragraaf worden de definitie en het effect van een weerstandsfactor onderzocht. De weerstandsfactor kan de basis zijn van een ontwerpregel.

Definitie van de weerstandsfactor

De weerstandsfactor wordt in deze paragraaf als volgt gedefinieerd:

$$F_w = \frac{(W_l + W_r) * d}{W_r}$$

Hierin zijn W_l en W_r de respectievelijke weerstanden van de fragmenten link en rechts van het kwelscherm. De inbeddingsdiepte is genoteerd met d .

Het verhang over het kwelscherm wordt als volgt berekend

$$i = \frac{h}{F_w}$$

hierin is i het verhang over het scherm en h het verval over de kering.

Spreiding van het verval

De gehanteerde verdelingen voor het berekenen van het verval zijn voor het overzicht hier verzameld in tabel 4.8, zie ook tabel 2.3. Voor de buitenwaterstand wordt een extreme waarden verdeling gebruikt (Gumbel). Gebruikelijk bij de Gumbel verdeling is om de spreiding uit te drukken in de decimeringshoogte H_d . De decimeringshoogte is de toename van de ontwerpwaterstand bij een afname van de overschrijdingsfrequentie met een factor 10. De decimeringshoogte hangt af van de parameter α van de Gumbel verdeling volgens $H_d = 2.3/\alpha$. De grootte van de decimeringshoogte (en de parameter α) bepaalt de spreiding van de buitenwaterstand in de probabilistische berekeningen. Voor de binnenwaterstand is in voorkomende gevallen een standaard normale verdeling gehanteerd.

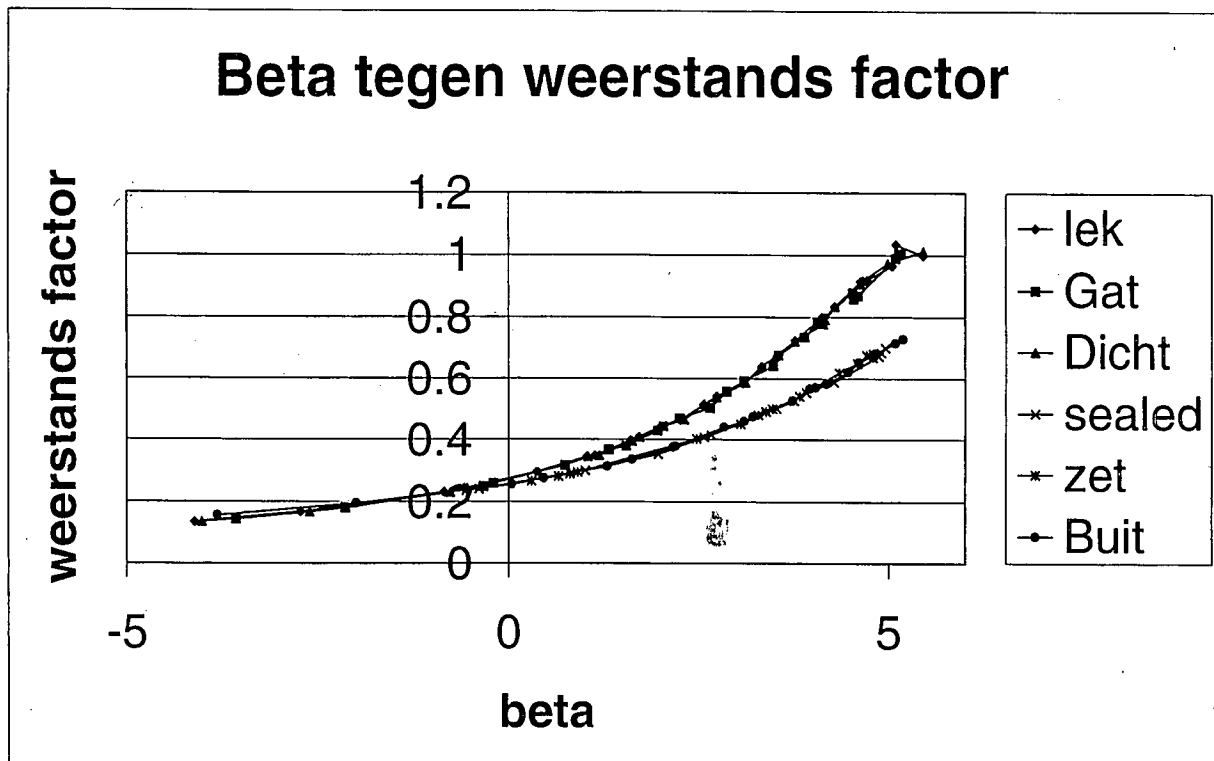
type kering	Gumbel verdeling buitenwaterstand	Normale verdeling binnenwaterstand	configuratie
rivierdijk	$u = 8.24$ $\alpha = 1.92$ $Hd = 1.20$	constant 5.5	case 2 dicht, lek, gat
zeedijk	$u = 2.150$ $\alpha = 3.07$ $Hd = 0.75$	$\mu = -0.46$ $\sigma = 0.10$	case 3 sluis met dichte kolkvloer, invloed spleet case 4 buitenhoofd

Tabel 4.8 Statistische verdelingen voor het verval

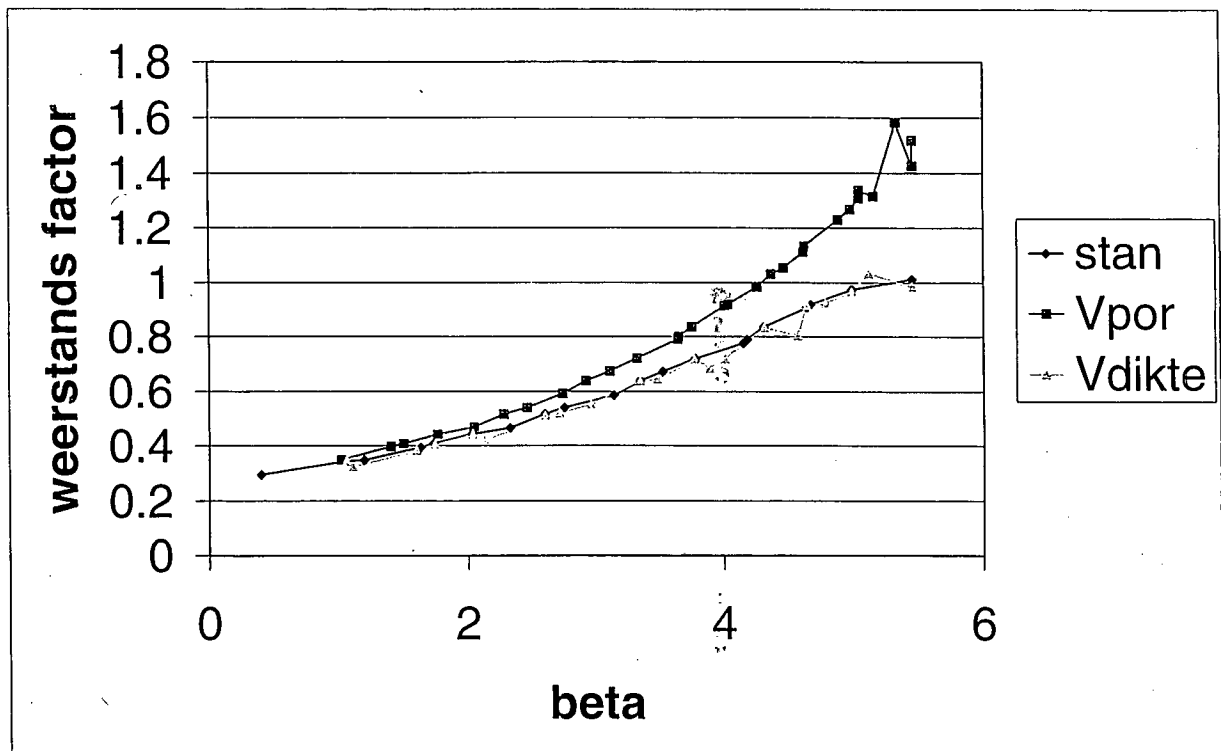
Op basis van de spreiding van het verval zijn de cases te verdelen in analyses voor een rivierdijk en voor een zeedijk. De spreiding van het verval bij de rivierdijk is groter dan bij de zeedijk. De overige invloeden zijn verdisconteerd in de weerstandsfactor. Bij een correcte definitie van de weerstandsfactor dient een systematisch verschil in de resultaten van analyses voor een rivierdijk en een zeedijk te volgen.

Resultaten

De resultaten van de berekeningen zijn uitgewerkt volgens de bovenstaande definitie van de weerstandsfactor. Van alle configuraties is de grootte van de weerstandsfactor met de ontwerpwaarden van de parameters berekend. In figuur 4.5 is de weerstandsfactor uitgezet tegen de betrouwbaarheidsindex. In figuur 4.6 zijn de resultaten van de variantberekeningen voor de invloed van de spreiding van de porositeit en de laagdikte gecombineerd met de resultaten van case 2.



Figuur 4.5 Weerstandsfactor als functie van de betrouwbaarheidsindex, alle cases



Figuur 4.6 Weerstandsfactor als functie van de betrouwbaarheidsindex, case 2: invloed van de spreiding van de porositeit en de laagdikte

Conclusies

Uit de resultaten blijkt:

- het transformeren van de resultaten van de berekeningen naar de weerstandsfactor geeft een uniform verband voor alle configuraties.
- in figuur 4.5 zijn twee verbanden één voor de berekeningen van een zeedijk en één voor de berekeningen van een rivierdijk. De verschillen zijn het gevolg van de verschillende spreiding in het verval over de kering.
Een toename van de spreiding van het verval (rivierdijk ten opzichte van zeedijk) leidt bij dezelfde weerstandsfactor tot een kleinere betrouwbaarheidsindex c.q. grotere faalkans.
Bij gegeven betrouwbaarheidsindex resulteert de grotere spreiding van het verval tot een grotere benodigde weerstand van de kering.
- uit figuur 4.6 blijkt de grote invloed van de spreiding van de porositeit. De reden hiervoor is de toename van de faalkans. Uit figuur 4.6 blijkt de afname van de betrouwbaarheidsindex bij gegeven weerstand.
- uit figuur 4.6 blijkt de geringe invloed van de spreiding van de laagdikte. De resultaten van de variantberekening met grotere spreiding van de laagdikte wijken niet af van de analyse met kleine spreiding van de laagdikte

De weerstandsfactor is in deze paragraaf als volgt gedefinieerd:

$$F_w = \frac{(W_l + W_r) * d}{W_r}$$

Hierin zijn W_l en W_r de respectievelijke weerstanden van de fragmenten link en rechts van het kwelscherm. De inbeddingsdiepte is genoteerd met d en de laagdikte met D .

4.7 Algemene conclusies uit de probabilistische berekeningen

Uit de probabilistische analyses kunnen de volgende algemene conclusies worden getrokken:

- De belangrijkste stochastische parameters die het functioneren van een kwelscherm beïnvloeden zijn het verval, de porositeit en eventuele spleetvorming onder een kunstwerk. De grootte van de invloedsfactoren van het verval en de porositeit zijn verzameld in tabel 4.9.
De belangrijkste parameter is het verval over de kering. De invloedsfactor van het verval is in de uitgevoerde berekeningen onafhankelijk van de spreiding van het verval.

Invloed van de spreiding van de porositeit op de invloedsfactoren van het verval en de porositeit		
parameter	invloedsfactor als functie van de spreiding van porositeit	
	$V_n = 0.1$	$V_n = 0.3$
verval	-0.90	-0.75
porositeit	-0.20	-0.65

Tabel 4.9 Invloed van de spreiding van de porositeit op de invloedsfactoren van het verval en de porositeit

- De te bepalen ontwerpgrootte die het functioneren bepaalt is de inbeddingsdiepte.
- Lek door de sloten van een kwelscherm heeft een gering effect op de faalkans
- Een gat bovenin een kwelscherm heeft een groot effect op de faalkans. Echter de faalkans neemt af door het ontstaan van een gat als gevolg van een gunstiger potentiaal verdeling achter het kwelscherm.
Bij de definitie van de analyses is door de opdrachtgever in overleg met Grondmechanica Delft gekozen voor een gat bovenin de wand. De kans van optreden van heave is berekend met het gemiddeld verhang beneden het gat. Voor het bepalen van de invloed van een dieper gelegen gat is een nadere analyse van de stabiliteit van het scherm noodzakelijk, namelijk:
 - * een analyse van heave door fluïdisatie van grond boven het gat rekening houdend met de passieve weerstand van de grondmoot beneden het gat
 - * een analyse van heave door fluïdisatie van grond beneden het gat rekening houdend met de passieve weerstand van de grondmoot boven het gat
- Een spleet onder een kunstwerk heeft een groot effect op de faalkans van een kwelscherm. Als gevolg van een spleet neemt de faalkans toe, maximaal met een factor 2000
- De gedefinieerde ontwerpgrafieken geven een consistent verband tussen de benodigde inbeddingsdiepte d/D en de verhouding van het verhang over het scherm en het globale verhang over de kering $I_{wand}/I_{globaal}$. Voor de toepassing van deze grafieken in de praktijk dient de invloed van de spreiding van het verval meegenomen te worden bij het bepalen van de maatgevende belasting, via een partiële veiligheidsfactor.
- Interpretatie via de weerstandsfactor geeft een uniform verband tussen de betrouwbaarheidsindex en de weerstandsfactor.
- De voorkeur voor de ontwerpregel gaat uit naar een definitie via de weerstandsfactor vanwege de directe relatie met de betrouwbaarheidsfunctie. Met de weerstandsfactor wordt het verhang over het kwelscherm berekend.

5 Foutenboomanalyse

5.1 Achtergrond van de foutenboomanalyse

In het kader van Fase 4 zijn probabilistische berekeningen uitgevoerd voor het mechanisme 'heave'. Naast falen door heave zijn er nog andere mogelijke ongewenste gebeurtenissen die kunnen leiden tot falen van een kwelscherm. De mogelijke ongewenste gebeurtenissen zijn geïdentificeerd in Fase 1 [GD 1996a]. Het functioneren van een kwelscherm is daarbij systematisch ondergebracht in een foutenboom. In § 5.2 worden ongewenste gebeurtenissen gerecapituleerd wordt een algemene foutenboom opgesteld. In § 5.3 worden uitgangspunten voor de foutenboomanalyses opgesteld op basis van de resultaten van de probabilistische analyses.

In dit hoofdstuk wordt voor de 3 cases een foutenboomanalyse uitgevoerd. Uit deze analyse volgt de faalkans heave. Daarnaast wordt de algemene foutenboom geanalyseerd. De resultaten van de foutenboomanalyses zijn beschreven in § 5.4..

5.2 Opstellen foutenboom

5.2.1 Hoofdfuncties van een kwelscherm

Als falen van een kwelscherm wordt gedefinieerd: niet meer vervullen van één of meerdere hoofd-functies.

De hoofdfuncties van een kwelscherm zijn:

- het vergroten van de hydraulische weerstand van het watervoerend pakket met als doel het beperken van het uittreeverhang.
- het keren van water. Door het drukverschil tussen de boven- en benedenstroomse zijde van het scherm is er een belasting op de wand.

Nevenfuncties van een kwelscherm kunnen zijn:

- het beperken van het kweldebiet, in het bijzonder ter plaatse van een kunstwerk.
Falen leidt tot waterbezwaar in het achterland in het bijzonder in geval van een kunstwerk.
- het keren van grond.
In het algemeen is het maaiveld ter plaatse van een kwelscherm horizontaal en worden er geen belastingen door het grondmassief op de wand uitgeoefend. Het is mogelijk dat het scherm geplaatst is binnen een potentieel totaal (Bishop) bezwijkmechanisme van de dijk. In dat geval wordt er een belasting op het scherm uitgeoefend. Een kwelscherm kan tevens de functie hebben van stabiliteitsscherm met als doel het realiseren van een aanvaardbaar veiligheidsniveau van de stabiliteit van een bepaald dijkprofiel. In de laatste gevallen dient het falen van

het scherm bijvoorbeeld uitgevoerd als damwandscherm te worden opgenomen bij het beoordelen van de totale stabiliteit.

5.2.2 Mogelijke faalmechanismen, algemene foutenboom van een kwelscherm en oorzaken die kunnen leiden tot heave

Falen van een constructie

Falen van een constructie treedt op als gevolg van mogelijke ongewenste gebeurtenissen. In de NEN 6700 voor bouwconstructies worden twee typen ongewenste gebeurtenissen onderscheiden, te weten:

- IA het optreden van een uiterste grenstoestand.
- IB het optreden van te grote vervormingen.

Een uiterste grenstoestand beschrijft een mogelijk bezwijkmechanisme. Mogelijke bezwijkmechanismen ook wel aangeduid als faalmechanismen van een damwandconstructie zijn geïdentificeerd in het kader van het Bouwdienst/CUR-onderzoek 'Veiligheid van damwandconstructies', zie [GD 1990], [CUR 166]. Het falen van een damwandconstructie is in die studie geanalyseerd aan de hand van een foutenboom. De faalmechanismen van een damwandconstructie gelden ten dele ook voor een kwelscherm. Een aantal zijn niet van toepassing omdat ze betrekking hebben op het falen van het anker. Een kwelscherm is uitgevoerd als onverankerde wand.

Uitgangspunt is dat de eisen ten aanzien van de vervormingen in de gebruikstoestand een voldoende veiligheidsniveau ten aanzien van grenstoestand IB waarborgen.

Falen van een kwelscherm

Rekeninghoudend met de indeling die in de NEN6700 wordt aangehouden zijn de mogelijke faalmechanismen van een kwelscherm:

IA: Falen van een kwelscherm als gevolg van het optreden van een uiterste grenstoestand

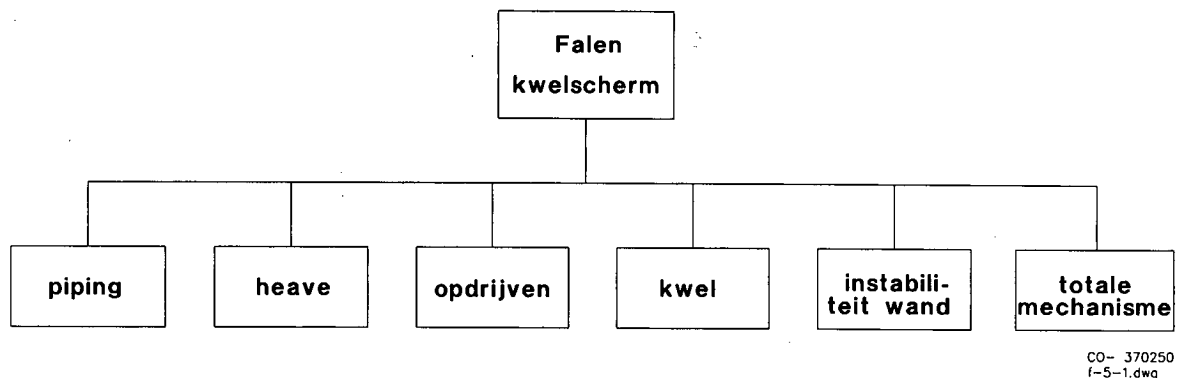
1. Piping
2. Heave
3. Opdrijven van een afdekkend kleipakket
4. Overschrijden van de toelaatbare kwel
5. Instabiliteit van de schermwand
 - 5.1 instabiliteit van de wand door onvoldoende steundruk bij de teen
 - 5.2 het optreden van een plastisch scharnier in de wand
 - 5.3 overschrijden van de toelaatbare vervorming (kopverplaatsing) van de damwand
De toelaatbare vervorming wordt bepaald door de mogelijke gevolgen van het overschrijden van de toelaatbare vervorming.
6. instabiliteit ten gevolge van een totaal (Bishop) mechanisme

IB Falen van een kwelscherm door grote vervormingen waardoor niet meer aan het veiligheidsniveau wordt voldaan.

Falen van de constructie ten aanzien van dit mechanisme wordt niet getoetst. In het algemeen garanderen de eisen ten aanzien van de toelaatbare verplaatsingen (doorbuiging) in de gebruiksfase een voldoende veiligheidsniveau ten aanzien van bezwijken door te grote vervormingen.

Algemene foutenboom

Een algemene foutenboom van een kwelscherm met de hoofdmechanismen is gegeven in figuur 5.1. Bij het analyseren van de case-studies zal de foutenboom voor elke case nader worden uitgewerkt.



Figuur 5.1 Algemene foutenboom

Betrouwbaarheidsfunctie

Falen van een kwelscherm treedt op wanneer een uiterste grenstoestand (IA) wordt overschreden. In zo'n geval is de belasting S (solicitation) groter dan de sterkte R (resistance). Het falen is vastgelegd in de betrouwbaarheidsfunctie ook wel performance- of Z -functie. Deze functie is de formele beschrijving van de uiterste grenstoestand van het mechanisme. De betrouwbaarheidsfuncties voor heave en opdrijven zijn vastgelegd in 3.2.1. Bij heave wordt de grenstoestand overschreden wanneer het optredend verhang i achter de damwand groter is dan het verhang waarbij fluïdisatie optreedt.

Oorzaken van heave

Falen kan optreden door verschillende mogelijke oorzaken. De grootte van parameters in de Z -functie en de spreiding van de parameters vertegenwoordigen de oorzaken van falen.

Voor het optreden van heave zijn de volgende oorzaken geïdentificeerd:

- overschrijden van het kritieke verhang bij gegeven belasting (buitenwaterstand), sterkte (porositeit van het watervoerend pakket) en inbeddingsdiepte (d/D)
- de invloed van lokale lekkage als gevolg van een lek in het kwelscherm door corrosie op het

- verhang achter het kwelscherm
- de invloed van lokale lekkage door het slot op het verhang achter het scherm
 - de invloed van een spleet onder een kunstwerk met dichte bodem als gevolg van zettingen op het verhang achter het kwelscherm
 - de invloed van lokale lekkage als gevolg van uit het slot lopen van een plank tijdens de uitvoeringsfase op het verhang achter het kwelscherm.

5.3 Uitgangspunten voor de foutenboomanalyses op basis van de resultaten van de probabilistische berekeningen

Het doel van de foutenboomanalyses is het bepalen van de bijdrage van de geïdentificeerde stochastische parameters lek, gat en spleet door zetting aan het falen van een kwelscherm ten aanzien van heave. Bij de foutenboomanalyse wordt rekening gehouden met de kans van optreden van de stochastische parameters. Daarnaast wordt aan de hand van de algemene foutenboom voor een kwelscherm gekeken naar de bijdrage van heave aan het falen van een kwelscherm.

Uit de probabilistische berekeningen kunnen de volgende conclusies en uitgangspunten voor de foutenboom analyses worden afgeleid:

Lek door de sloten

Kans van optreden

Onder invloed van een stijghoogteverschil voor en achter een kwelscherm treedt lekkage door de sloten op. Bij metingen in de praktijk is gebleken dat er bij stalen damwand profielen altijd lekkage door de sloten optreedt [Sellmeijer et al 1995]. Dit betekent dat de kans van optreden van lek gelijk is aan 1.0. Door het aanbrengen van vulmiddelen in de sloten wordt getracht het debiet te reduceren.

Invloed van lek op het functioneren van een kwelscherm

Uit de probabilistische berekeningen blijkt dat de invloed van lek op het functioneren van een kwelscherm klein is. Rekenend met gemeten lek voor onbehandelde sloten is de invloed van de lek op de benodigde inbedding verwaarloosbaar klein.

Conclusie

In de foutenboomanalyse wordt uitgegaan van de resultaten van een dichte wand zonder lek.

Gat door corrosie

Kans van optreden

De kans van optreden van een gat door erosie hangt af van de dikte van het profiel, de agressiviteit van het milieu waarin het scherm is geplaatst en de geplande levensduur van het kwelscherm. Een schatting van de kans op een gat door corrosie is afgeleid in § 2.4.4.

Invloed van een gat op het functioneren van een kwelscherm

Uit de probabilistische berekeningen blijkt dat de faalkans van een dicht scherm afneemt als

gevolg van een gat bovenin het kwelscherm. Een gat bovenin het kwelscherm leidt tot een gunstiger stijghoogte verdeling achter de wand.

Conclusie

Gaten door corrosie ontstaan in de loop van de tijd. De geplande levensduur is maatgevend voor de dikte van het profiel. Een gat bovenin het kwelscherm leidt tot een afname van de faalkans. Dit betekent dat het begin van de levensduur maatgevend is voor het functioneren van het kwelscherm ten aanzien van heave. Gaten door corrosie leiden in de loop van de tijd tot een afname van de faalkans. In de foutenboom wordt derhalve gerekend met de resultaten van het dichte scherm.

Spleet door zetting

Kans van optreden

De kans van optreden van een spleet onder een dichte vloer van een kunstwerk wordt door ontwerpers hoog ingeschat. In ontwerpaanbevelingen wordt ervan uitgegaan dat er rekeninghoudend met uitvoeringsfouten en de technische mogelijkheden van de huidige constructiemethoden van uitgegaan dat er 'altijd' sprake is van een spleet onder de vloer van een kunstwerk.

Invloed van een spleet op het functioneren van een kwelscherm

Een spleet leidt tot een sterke toename van de faalkans.

Conclusie

In de foutenboomanalyses is de kans van optreden van een spleet onder een kunstwerk gevarieerd van 1.0 - 0.001.

5.4 Foutenboomanalyses

5.4.1 Case 2: Kwelscherm in rivierdijk en Case 4: kwelscherm in buitenhoofd

Rekeninghoudend met de uitgangspunten voor de foutenboomanalyses uit 5.3 zijn de resultaten van een dichte wand zonder lek of gat maatgevend voor de faalkans van het kwelscherm in case 2 en in case 4. De faalkans volgt direct uit de probabilistische berekening van de dichte wand en wordt bepaald door het verval, de spreiding van de porositeit, de relatieve lengte van de kering en de relatieve inbedding van het kwelscherm. De berekende faalkans van het dichte scherm in case 2 en 4 zijn weergegeven in bijlage 78 en 79.

5.4.2 Case 3: Sluis met dichte bodem in zeedijk

De resultaten van de faalkansberekeningen van de case 3 met en zonder spleet zijn verzameld in bijlage 3. Het verloop van de berekende faalkansen als functie van de relatieve inbedding is weergegeven op bijlage 82 voor de sluis zonder spleet en op bijlage 83 voor de sluis met spleet. Een spleet leidt tot een toename van de faalkans.

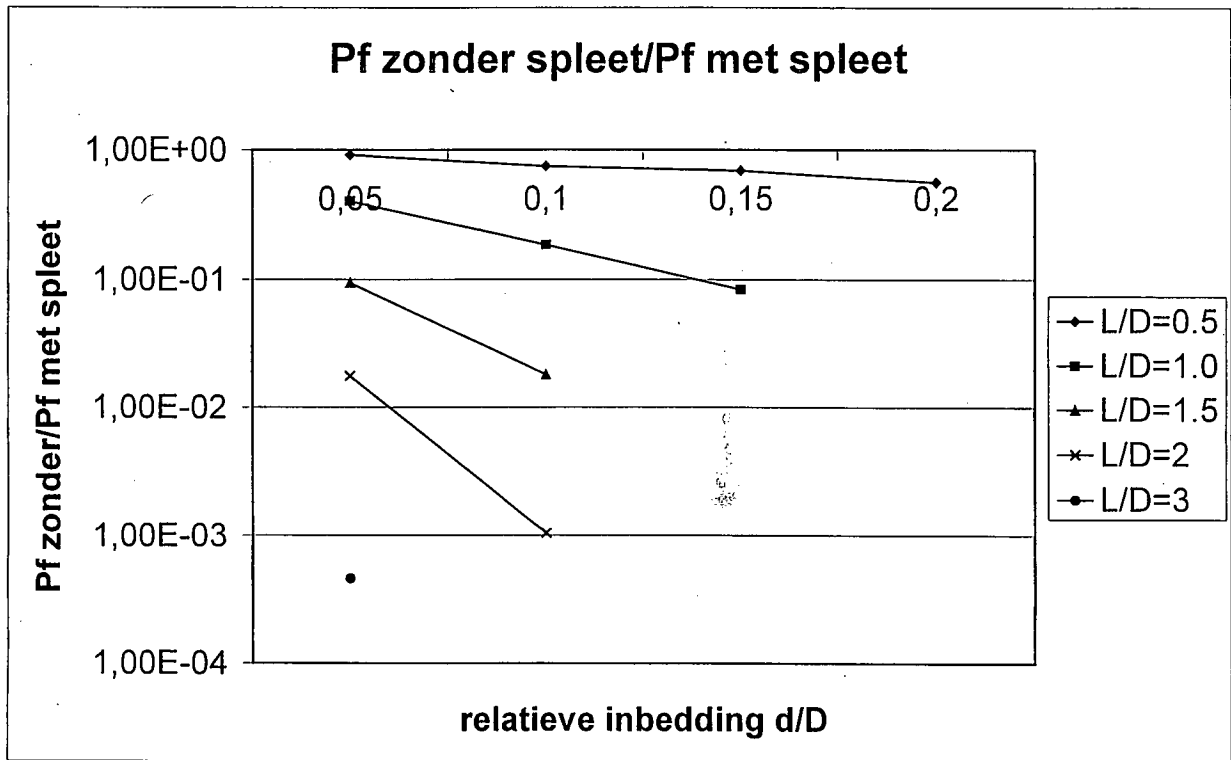
Rekeninghoudend met de uitgangspunten voor lek en gat wordt de faalkans ten aanzien van heave bepaald door twee mechanismen:

- het optreden van heave zonder spleet onder de bodem
- het optreden van heave met spleet onder de bodem.

De gebeurtenissen 'heave zonder spleet' en 'heave met spleet' zijn statistisch onafhankelijk. Heave kan optreden 'zonder' of 'met' spleet. In de foutenboom komt deze parallelwerking tot uitdrukking met een 'of' poort. Bij het doorrekenen van de foutenboom dient rekening gehouden te worden met eventuele correlatie van de mechanismen 'zonder' en 'met'. Bij 'heave zonder' of 'heave met spleet' bezwijkt dezelfde grondmoot door fluidisatie van het korrelskelet. Dit betekent dat de mechanismen volledig gecorreleerd zijn. De kans van optreden van heave is nu gelijk aan de grootste van de twee kansen. De probabilistische berekeningen voor 'heave met spleet' zijn conditionele berekeningen, dat wil zeggen een berekening van de faalkans gegeven een spleet. De kans van optreden van 'heave met spleet' is gelijk aan het product van de kans van optreden van een spleet en de kans van optreden van heave gegeven een spleet:

$$P[\textit{heave met spleet}] = P[\textit{spleet}] * P[\textit{heave} | \textit{spleet}]$$

Of falen door heave met spleet maatgevend is hangt af van de kans van optreden van een spleet. De kleinste kans van optreden van een spleet waarbij falen met spleet maatgevend is, is gelijk aan het quotiënt van de kans op 'heave zonder spleet' en de conditionele kans op heave met spleet. Bij die kans van optreden van een spleet is de kans op 'heave zonder spleet' gelijk aan de kans op 'heave met spleet'. In figuur 5.3 is het quotiënt uitgezet als functie van de relatieve inbedding. De kleinste waarde van het quotiënt is uitgezet in tabel 5.1.



Figuur 5.3 Quotiënt van P[heave zonder spleet]/P[heave met spleet]

0.5	0.566
1.0	0.08
1.5	0.018
2.0	0.00104
3.0	0.00046

Tabel 5.1 Quotiënt van P[heave zonder spleet]/P[heave met spleet]

Uit figuur 5.3 en tabel 5.1 blijkt dat de kans van optreden van een spleet waarbij 'heave met spleet' maatgevend wordt afhangt van de relatieve lengte van de sluis L/D . In de probabilistische berekeningen van case 3 is de variatie van de relatieve lengte van de sluis als volgt gekozen:

- de waarden van L/D zijn voor een deel gelijk aan de waarden in de andere cases, zodat vergelijking mogelijk is.
- de kleinste, berekende faalkans die voldoet aan de nauwkeurigheid voor het aantal Monte Carlo simulaties is gelijk aan 1.10^{-6} .

De relatieve lengte is in de berekeningen gevarieerd tussen 0.5 en 3.0.

In de praktijk worden de afmetingen van de kolk bepaald door de afmetingen van de scheepsklasse waarvoor de sluis wordt ontworpen. De lengte van de kolk is volgens een praktijkregel voor sluisen gelijk aan 1.15 maal de lengte van het maatgevende schip. In tabel 5.2 is de lengte per scheepsklasse en de daaruit afgeleide lengte van de kolk alsmede de relatieve lengte verzameld. Uit tabel 5.2 blijkt dat de relatieve lengte in de praktijk ligt tussen 1,6 à 10.

Scheepslengte, kolk lengte en relatieve lengte van de kolk voor verschillende scheepsklassen				
scheepsklasse CEMT	scheepslengte l [m]	ontwerplengte van de kolk $L = 1.15 l$ [m]	relatieve kolk lengte L/D , bij $D = 10$ m [-]	relatieve kolk lengte L/D , bij $D = 20$ m [-]
O	28	32	3.2	1.6
I	39	45	4.5	2.25
II	55	63	6.3	3.15
IIA	55 - 67	70	7.0	3.5
III	67	77	7.7	3.85
IIIA	80	92	9.2	4.6
IV	90	98	9.9	4.95
V	95	109	10.9	5.45
zeeschepen	40 - 350	46 - 400	4.6 - 40	2.3 - 20

Tabel 5.2 Scheepslengte, kolk lengte en relatieve lengte van de kolk voor verschillende scheepsklassen

De kans van optreden van een spleet in de praktijk is geëvalueerd in § 2.4.3 Aangenomen wordt dat er in de praktijk altijd een spleet ontstaat. Een schatting van de kans van optreden ligt dan in de orde van 0.5 à 1.0.

Voor de berekende configuraties is een foutenboomanalyse voor heave uitgevoerd. Hierbij is de kans van optreden van een spleet gevarieerd tussen 1.0 en 0.001. De resultaten zijn verzameld in bijlage 88. De kans van heave met spleet is berekend in de kolommen 4 tot en met 12. Gevallen waar de kans op heave zonder spleet maatgevend is, zijn aangeduid met een *.

Uit bijlage 88 volgen de volgende conclusies:

- bij kleine relatieve lengte is de invloed van een spleet gering. De toename als gevolg van een spleet is klein.
- bij grote relatieve lengte en rekenend met praktische indicaties voor het optreden van een spleet (1.0 - 0.001) wordt heave met spleet maatgevend.
Het ontstaan van een spleet betekent een grotere benodigde inbeddingsdiepte van het kwelscherm. Uitgaande van een relatieve lengte van 2 is bij een relatieve inbedding van 0.1 de berekende faalkans voor heave zonder spleet gelijk aan $3.5 \cdot 10^{-7}$. Rekenend met een kans van 0.1 voor het optreden van een spleet neemt de benodigde inbedding uitgaande van dezelfde (benodigde) faalkans 0.1 toe tot 0.15. Variatie van de kans van optreden van een spleet tussen 1.0 en 0.1 heeft bij grote relatieve lengte weinig effect op de benodigde inbeddingsdiepte. Uitgaande van een kans van optreden van 1.0 wordt in bovenstaand voorbeeld dezelfde benodigde inbeddingsdiepte gevonden.
- de invloed van de lengte van de sluis is in de analyse met spleet gering. Dit betekent dat het bovenstaand getallenvoorbeeld ook geldt voor grotere relatieve lengten.

5.4.3 Analyse van de volledige foutenboom

Voor de analyse van de volledige foutenboom dienen kansen van de overige mechanismen te worden berekend of op andere wijze bepaald te worden. Voor case 2 en 4 zijn de volgende indicatieve waarden geschat:

piping	onbekend Een nog onbekende factor is de kans op piping in de situatie met een kwelscherm en de kans op piping bij een gat
opdrijven	nihil In de configuraties 2, 3 en 4 is er geen afdekkend pakket
kwel	hangt af van de situatie Bij een sluis worden meerdere kwelschermen geïnstalleerd. Bij een sluis met open bodem kan heave van de sluisbodem maatgevend zijn voor de inbeddingsdiepte van de danwand-

schermen in het buitenhoofd. De kans op heave ter plaatse van het kwelscherm in het binnenhoofd kan daardoor verwaarloosbaar klein worden.

instabiliteit grondbreuk door verlies van steundruk aan de teen

Ervan uitgaande dat er op het kwelscherm alleen belastingen als gevolg van een stijghoogteverschil worden uitgeoefend is de kans van optreden van grondbreuk klein.

plastisch scharnier

Niet maatgevend. De dikte van de plank wordt bepaald door de (kleine) belasting op de wand met een extra marge voor de corrosie. Echter voor het functioneren ten aanzien van heave is de periode na installatie maatgevend. Door de extra dikte ten behoeve van corrosiewering is de kans van optreden van een plastisch scharnier klein.

ankerbreuk

Bij onverankerde wanden is dit niet relevant.

toelaatbare vervorming

Bij een kwelscherm in zand buiten een potentieel glijvlak van de dijk is de kans op veevorming klein. Aansluitfouten en spleten ontstaan tijdens de installatie dienen afgedicht te worden

Bij schermen in het hoofd van een kunstwerk zijn de vervormingen gering door hoge grondrukken tegen het scherm.

Bishop Voor kwelschermen buiten een potentieel mechanisme is dit niet-relevant.

Voor kwelschermen buiten potentiële bezwijkmechanismen waar piping en kwel geen rol spelen wordt de kans op falen bepaald door de kans van optreden van heave. Bij kwelschermen die tevens het kweldebiet moeten reduceren hangt de benodigde inbeddingsdiepte af van het kweldebiet en de verhangen achter het scherm.

5.5 Invloed van uit het slot lopen

Wanneer tijdens het installeren van het scherm een damwandplank uit het slot loopt, dan haken de planken over een deel van de inbeddingsdiepte niet in elkaar. Uit het slot lopen treedt op zekere diepte op en vanaf dat niveau ontstaat er een verticale spleet in de wand. Afhankelijk van de oorzaak kunnen aansluitend meerdere planken uit het slot lopen.

De invloed van uit het slot lopen kan worden onderzocht door het in rekening brengen van een lokale verkorting van het kwelscherm. Dit is een conservatieve aanpak aangezien in de praktijk maar een beperkt aantal planken uit het slot loopt. In werkelijkheid is er sprake van een driedimensionale stromingstoestand.

In bijlage 78, 79, 82 en 83 is de faalkans logaritmisch uitgezet tegen de relatieve inbeddingsdiepte (bijl 78: case 4; 79: case 2, dicht; 82: case 3, zonder spleet; 83: case 3, met spleet). Uit de figuren

volgt een lineair verband geldend per relatieve lengte van de kering L/D . Opvallend is in geval van een spleet (bijlage 83) dat de invloed van de lengte afneemt naarmate de lengte toeneemt.

In tabel 5.3 zijn de faalkansen verzameld van de cases bij een relatieve lengte van 0.5 en twee relatieve inbeddingen namelijk 0.2 en 0.15. Uit tabel 5.3 blijkt de grote invloed van een afname van de relatieve inbedding. Bij een laagdikte van 10 meter zou in de gekozen modellering uit het slot lopen van een plank over de onderste 0.5 meter een reductie van de relatieve inbedding van 0.2 tot 0.15 betekenen. Een dergelijke reductie van de inbeddingsdiepte in de twee-dimensionale berekening leidt tot een toename van de faalkans ten aanzien van heave met een factor 10 - 100, zie tabel 5.3.

Invloed van de relatieve inbedding op de faalkans bij $L/D=0.5$		
configuratie	faalkans heave bij $d/D = 0.2$	faalkans heave bij $d/D=0.15$
case 4	$2.57 \cdot 10^{-5}$	$9.30 \cdot 10^{-4}$
case 2: dicht	$4.76 \cdot 10^{-3}$	$4.17 \cdot 10^{-2}$
case 3: zonder spleet	$4.60 \cdot 10^{-7}$	$4.27 \cdot 10^{-5}$
case 4: met spleet	$8.13 \cdot 10^{-7}$	$6.16 \cdot 10^{-5}$

Tabel 5.3 Invloed van de relatieve inbedding op de faalkans ten aanzien van heave

Bij het doorrekenen van de foutenboom dient de kans van optreden meegenomen te worden. Aangezien bij uit het slot lopen ruwweg dezelfde grondmoot bezwijkt dient in de foutenboomanalyse rekening gehouden te worden met volledige correlatie (net als bij case 3) In hoeverre uit het slot lopen maatgevend wordt in de gekozen modellering hangt af van de kans van optreden. Zoals gebleken is in 2.4.5 zijn over het optreden van uit het slot lopen weinig gegevens beschikbaar. Het belang van uit het slot lopen kan als volgt worden afgewogen

- Bij een kwelscherm in een rivierdijk is de inbeddingsdiepte gering. Naar verwachting zijn de conusweerstand op het inbeddingsniveau klein. De kans op uit het slot lopen is voor dergelijke situaties naar verwachting klein.
- Bij een sluis worden de schermen veelal in een bouwput geïnstalleerd vanaf het peil van de onderkant van de kolkbodem. Dit niveau is lager dan het maaiveld. Naar verwachting is de conusweerstand groter en daarmee ook de kans van optreden van uit het slot lopen. Echter, bij een sluis met open kolkbodem kan heave van de kolkbodem maatgevend voor de inbeddingsdiepte van de damwandschermen in het buitenhoofd. De kans op heave ter plaatse van het benedenhoofd is dan mogelijk verwaarloosbaar klein. Reductie van de inbeddingsdiepte heeft in zo'n situatie alleen effect wanneer dit optreedt bij damwandschermen in het buitenhoofd.

- Drie-dimensionale effecten. De gekozen modellering is conservatief en de invloed van uit het slot lopen is groot. Echter, uit het slot lopen treedt over een beperkt deel van de strekking van de kering op. Nader onderzoek is nodig naar het effect van de lokale verstoring op het functioneren van het kwelscherm.

5.6 Lengte-effecten

Onder het lengte-effect wordt verstaan de mate waarin de kans van optreden van een mechanisme in dit geval heave afhankelijk is van de strekking van de kering, [GD 1996b], [GD 1996c]. De lengte in langsricting wordt hier aangeduid als de strekking.

Gebruikelijk is om het lengte-effect uit te drukken in een lengte-effect factor, gedefinieerd als de verhouding van de kans van optreden van een faalmechanisme in een strekking van bepaalde lengte en de faalkans in een doorsnede, dat wil zeggen een kort stukje van de kering waarin in lengterichting geen stochastische fluctuaties van de voor het mechanisme belangrijke parameters optreden.

In [GD 1996b] en [GD 1996c] worden indicaties gegeven van de grootte van de lengte-effect factor, zie tabel 5.4.

Lengte-effect factor voor een aantal mechanismen	
mechanisme	indicatie van de lengte-effect factor
afschuiven	3 - 15
piping	5 - 10
piping en opbarsten	15 - 70
duinafslag	3
micro-instabiliteit	5 - 25

Tabel 5.4 Lengte-effect factor voor een aantal mechanismen

De belangrijkste factor in het lengte-effect is de aard van het mechanisme en de eventuele uitmiddeling die optreedt. Bij een totaal glijvlak wordt gerekend met de gemiddelde schuifsterkte langs het glijvlak. Dit leidt tot uitmiddeling van de fluctuaties. De correlatie van de fluctuaties in de lengte richting langs de strekking bepalen de grootte van het lengte-effect.

Uit de probabilistische in hoofdstuk 4 is gebleken dat de kans van optreden van het mechanisme heave voor het grootste deel wordt bepaald door het verval en de spreiding van de porositeit. De porositeit bepaalt de weerstand tegen fluïdisatie.

Dit betekent dat het lengte-effect wordt bepaald door fluctuaties van de porositeit langs de strekking. Bij fluïdisatie is geen sprake van uitmiddeling zoals bij een totaal glijvlak. Het korrelskelet bezwijkt

als gevolg van waterspanning. Als gevolg daarvan kan de lengte-effect factor groot zijn.

De belangrijkste factor in het lengte-effect is de grootte van de strekking ten opzichte van de lengteschaal waarover de sterkte (in dit geval de porositeit) fluctueert. Lengte-effecten zijn belangrijk bij relatief grote strekkingen zoals bijvoorbeeld voor de grondmechanische stabiliteit van een dijkring. Kwelschermen worden toegepast bij kunstwerken en in bijzondere situaties. De grootte van de strekking is in die situaties zo klein dat er naar verwachting geen significant lengte-effect zal optreden.

6 Vertaling naar de praktijk

6.1 Aanzet voor het opstellen van een probabilistische ontwerpregel

De belangrijkste resultaten en conclusies van de probabilistische berekeningen die dienen als uitgangspunt voor het opstellen van een probabilistische regel zijn:

1. De belangrijkste parameters die de grootte van de faalkans bepalen zijn het verval over de kering en de porositeit van het watervoerend pakket.
2. De invloedsfactoren van het verval en de porositeit zijn verzameld in tabel 6.1. De invloedsfactoren hangen sterk af van de spreiding van de porositeit. In de uitgevoerde berekeningen met kleine spreiding van de porositeit was de invloedsfactor voor het verval onafhankelijk van de spreiding van het verval.

Invloed van de spreiding van de porositeit op de invloedsfactoren van het verval en de porositeit		
parameter	invloedsfactor als functie van de spreiding van porositeit	
	$V_n = 0.1$	$V_n = 0.3$
verval	-0.90	-0.75
porositeit	-0.20	-0.65

Tabel 6.1 Invloed van de spreiding van de porositeit op de invloedsfactoren van het verval en de porositeit

3. De 'overige' stochastische parameters laagdikte, doorlatendheid etc hebben weinig invloed op de grootte van de faalkans
4. Maatgevend voor het ontwerp van een kwelscherm is de analyse voor een dichte wand (zonder lek of gat). Bij een kunstwerk met dichte bodem dient rekening te worden gehouden met een spleet onder de bodem.
5. De voorkeur voor de ontwerpregel gaat uit naar een definitie via de weerstandsfactor.

Het ontwerp van een kwelscherm en met name de inbeddingsdiepte dient zodanig te zijn dat de betrouwbaarheid voldoet aan het gewenste veiligheidsniveau. Falen van het kwelscherm is vastgelegd in de uiterste grenstoestand. De uiterste grenstoestand heave is gedefinieerd als de situatie waarbij het verhang over de hoogte van het kwelscherm i_{scherm} gelijk is aan het verhang i_{fluid} waarbij fluïdisatie in het korrelskelet ontstaat, zie 3.2.1.

$$i_{\text{scherm}} = i_{\text{fluid}}$$

Het verhang achter het scherm wordt in de fragmentenmethode berekend met de weerstandsfactor F_w . In § 4.6 is de weerstandsfactor als volgt gedefinieerd:

$$F_w = \frac{(W_l + W_r)}{W_r} * d$$

Een nadeel van deze definitie is dat de inbeddingsdiepte is meegenomen. Hierdoor is de weerstandsfactor niet dimensieloos. Een alternatieve definitie is als volgt:

$$F_w = \frac{(W_l + W_r)}{W_r}$$

uiterste grenstoestand en benodigde inbeddingsdiepte

De uiterste grenstoestand heave is nu als volgt gedefinieerd

$$i_{\text{scherm}} = \frac{h}{d} \frac{1}{F_w} = i_{\text{fluid}}$$

Bij een gegeven (deterministisch) verval wordt de benodigde inbeddingsdiepte bepaald door het verval, de weerstandsfactor en het verhang waarbij fluïdisatie ontstaat.

$$d \geq \frac{h}{F_w i_{\text{fluid}}}$$

Aangezien de weerstandsfactor afhankelijk is van de inbeddingsdiepte wordt de benodigde inbeddingsdiepte iteratief gevonden.

Het ontwerp van een kwelscherm en met name de inbeddingsdiepte dient zodanig te zijn dat de betrouwbaarheid voldoet aan het vereiste veiligheidsniveau.

traditionele ontwerpmethod

In een traditionele ontwerpmethodiek wordt de veiligheid verdisconteerd met een totale veiligheidsfactor. Voor heave wordt traditioneel een veiligheidsfactor voor het verhang bij fluïdisatie gehanteerd. De berekening wordt uitgevoerd met het maatgevend verval (berekend bij maatgevend hoogwater). Een traditionele ontwerpmethodiek gebaseerd op de weerstandsfactor zou als volgt zijn gedefinieerd:

$$d \geq \frac{h_{MHW}}{F_w i_{\text{fluid}} / \gamma_T}$$

semi-probabilistische ontwerpmethod

In een probabilistische ontwerpmethodiek wordt het veiligheidsniveau uitgedrukt in de betrouwbaarheidsindex β . In een niveau I probabilistische ontwerpmethodiek wordt gerekend met partiële veiligheidsfactoren op sterkte en belasting.

De ontwerpregel voor heave wordt nu:

$$d \geq \frac{\gamma_H * H_{kar}}{(F_{W, kar} / \gamma_W) (i_{fluid, kar} / \gamma_i)}$$

hierin zijn

$i_{fluid, kar}$	karakteristieke waarde van het verhang over de kering waarbij fluïdisatie optreedt
H_{kar}	karakteristieke waarde van het verval
$F_{W, kar}$	karakteristieke waarde van de weerstandsfactor
γ_i	partiële sterktefactor voor het verhang
γ_H	partiële belastingfactor voor het verval
γ_W	partiële sterktefactor voor de weerstand

Bij het uitwerken van de probabilistische regel dient de grootte van de verschillende factoren te worden afgeleid en afgestemd op de bestaande veiligheidsfilosofie voor primaire waterkeringen. De grootte van de factoren volgt uit de resultaten van de probabilistische berekeningen. De afstemming heeft betrekking op de wijze waarop het betrouwbaarheidsniveau en de karakteristieke waarden van de parameters (en met name het verval) worden berekend. De gekozen berekening van de karakteristieke waarden heeft invloed op de partiële factoren.

Partiële factor op het verval

Uitgaande van de definitie van de invloedsfactor in 3.1.4 is de partiële factoren op het karakteristieke verval H_{kar} gelijk aan

$$\gamma_H = \frac{1 - \alpha_H \beta V_H}{H_{kar} / H_{gem}}$$

De invloedsfactor van het verval is onafhankelijk van de spreiding van het verval. De invloedsfactor van het verval wordt bepaald door de spreiding van de porositeit. Bij gegeven invloedsfactor wordt de partiële factor op het verval wordt bepaald door de spreiding van het verval en de gekozen karakteristieke waarde. Bij de uitwerking dient de grootte van de partiële factor nader te worden vastgesteld rekening houdend met het type verdelingsfunctie (Gumbel) van het verval.

Partiële factor op het verhang

De partiële factor op het karakteristieke verhang $i_{fluid, kar}$ gelijk aan

$$\gamma_i = \frac{i_{fluid, kar} / i_{fluid, gem}}{(1 - \alpha_i \beta V_i)}$$

Met de invloedsfactor van de porositeit kan de partiële factor op het verhang worden afgeleid.

Weerstandsfactor en inbeddingsdiepte

De weerstandsfactor volgt uit een modelberekening bij karakteristieke waarden van de parameters. In de weerstand zijn de invloed van eventuele lek door de sloten of een gat (voor het ontwerp van een kwelscherm zijn lek en gat niet maatgevend) en een spleet onder de dichte bodem opgenomen. De weerstandsfactor is mede afhankelijk van de inbeddingsdiepte van het kwelscherm. Dit betekent dat de benodigde inbeddingsdiepte iteratief wordt gevonden.

6.2 Invloed van een spleet onder een kunstwerk

Een eventuele spleet onder een kunstwerk met dichte bodem heeft een grote invloed op de benodigde inbeddingsdiepte.

Dit betekent dat het optreden van een spleet moet worden meegenomen bij het ontwerp van een kwelscherm onder een kunstwerk. De invloed van een spleet kan worden onderzocht met de fragmentenmethode door de keuze van het adequate fragment ('zettingsfragment').

De ontwerpprocedure omvat de volgende stappen:

- 1 Bepaal het vereiste betrouwbaarheidsniveau
- 2 Bepaal de kans van optreden van een spleet en het conditionele betrouwbaarheidsniveau. Het conditionele betrouwbaarheidsniveau is het vereiste betrouwbaarheidsniveau dat geldt in een (conditionele) berekening met de fragmentenmethode inclusief een spleet. Dit is een berekening gegeven een spleet.
- 3 Bereken de rekenwaarde van het verval over de kering en de rekenwaarde van het verhang over het scherm waarbij fluïdisatie optreedt.
- 4 Bepaal de weerstandsfactor met de fragmentenmethode inclusief de invloed van een spleet.
- 5 Bepaal met de partiële veiligheidsfactoren het benodigd inbeddingsniveau. De benodigde inbeddingsdiepte volgt uit een aantal iteratieve berekeningen waarbij de invloed van de inbeddingsdiepte op de weerstandsfactor wordt meegenomen.

Het nadeel van deze methode is dat analyses met de fragmentenmethode moeten worden uitgevoerd. De uitdrukking van het 'zettingsfragment' is dermate ingewikkeld dat een handmatige controle niet mogelijk is. De toepassing van de fragmentenmethode is geschikt voor specialistische ontwerpers. Voor de dagelijkse adviespraktijk wordt daarom gezocht naar een eenvoudiger methode.

Een mogelijk eenvoudiger methode voor het in rekening brengen van een spleet is een verhoging van het vereiste veiligheidsniveau. De verhoging dient zodanig te zijn dat de inbeddingsdiepte kan worden berekend middels een analyse zonder spleet. De invloed van een spleet is verdisconteerd in de in rekening te brengen verhoging $\Delta \beta$ van het veiligheidsniveau β .

In deze paragraaf is de grootte van de verhoging van het veiligheidsniveau onderzocht. De kans van optreden van een spleet is in de berekeningen gelijk aan 1 gekozen.

De alternatieve procedure wordt nu:

- 1 Bepaal het vereist betrouwbaarheidsniveau.
- 2 Verhoog het betrouwbaarheidsniveau voor de invloed van een spleet met een marge $\Delta\beta$.
- 3 Bereken de rekenwaarden van het verval en het verhang waarbij fluïdisatie optreedt.
- 4 Bepaal de weerstandsfactor zonder spleet.
- 5 Bepaal met de partiële veiligheidsfactoren het benodigd inbeddingsniveau. De benodigde inbeddingsdiepte volgt uit een aantal iteratieve berekeningen waarbij de invloed van de inbeddingsdiepte op de weerstandsfactor wordt meegenomen.

De grootte van de benodigde verhoging $\Delta\beta$ is afgeleid uit de resultaten van de probabilistische analyses. In bijlage 90 en 91 is het verband uitgezet tussen de logaritme van de faalkans en de relatieve inbedding met en zonder spleet. In bijlage 92 en 93 is de relatieve inbedding uitgezet tegen de met de faalkans overeenkomende waarde van de betrouwbaarheidsindex. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen korte ($L/D < 1.5$) en lange ($L/D > 2.0$) kunstwerken. Waar nodig is de gevonden relatie tussen faalkans en inbeddingsdiepte geëxtrapolerd. In de bijlagen is de extrapolatie als punt weergegeven ($L/D = 2$ ex).

Uit de resultaten blijkt:

- Bij korte kunstwerken $L/D = 0.5$ is de invloed van een spleet gering. De faalkans met en zonder spleet is ongeveer gelijk. De toename van de betrouwbaarheidsindex van een kwelscherm zonder spleet onder de bodem ten opzichte van een kwelscherm met spleet onder de bodem ligt in de orde van $\Delta\beta = 0.0$ bij $L/D = 0.5$ en $\Delta\beta = 1.0$ bij $L/D = 1.5$. Deze toename $\Delta\beta$ is gelijk aan de in rekening te brengen verhoging voor een berekening zonder spleet uitgaande van een vereist veiligheidsniveau voor een kunstwerk met spleet onder de bodem.
- Bij lange kunstwerken $L/D > 2.0$ is de invloed van een spleet groot. De toename van de betrouwbaarheidsindex van een kwelscherm zonder spleet onder de bodem ten opzichte van een kwelscherm met spleet onder de bodem ligt in de orde van $\Delta\beta = 2.0$ bij $L/D = 2.0$.

7 Algemene conclusies van de probabilistische berekeningen en de foutenboomanalyses

Uit de resultaten van de uitgevoerde probabilistische berekeningen in hoofdstuk 3 en de foutenboomanalyses in hoofdstuk 4 kunnen de volgende conclusies worden gesteld:

- uit de berekeningen volgt bij benadering een lineair verband tussen de relatieve inbeddingsdiepte en de logaritme van de berekende faalkans. Deze lineaire verbanden gelden per case en relatieve lengte van de kering. Extrapolatie van deze verbanden naar niet berekende inbeddingsdiepte leidt naar verwachting niet tot onnauwkeurige schattingen van de faalkans.
- de belangrijkste parameters die het functioneren van een kwelscherm ten aanzien van heave bepalen zijn:
 - * het verval
 - * de porositeit van het korrelskelet
 - * eventuele spleetvorming onder een kunstwerk.Door het evalueren van bestaande metingen of het uitvoeren van nieuwe metingen kan spleetvorming en de kans van optreden nader worden vastgelegd. De inbeddingsdiepte wordt bij gegeven gewenst betrouwbaarheidsniveau in de voorgesteld methode iteratief bepaald.
- lek door de sloten heeft een te verwaarlozen effect op de benodigde inbeddingslengte.
- een gat bovenin het kwelscherm door corrosie leidt tot een afname van de faalkans. Maatgevend voor het ontwerp van een kwelscherm ten aanzien van heave is de periode direct na installatie van het scherm.
- spleetvorming onder een kunstwerk leidt tot een toename van de faalkans. Spleetvorming is met name belangrijk voor relatief lange keringen $L/D > 1.5$.
- uit het slot lopen van damwandplanken tijdens de installatie kan leiden tot een afname van de faalkans. Belangrijke aspecten zijn:
 - * de kans van optreden van uit het slot lopen
 - * de gevolgen van uit het slot lopen op het kwelscherm: de grootte van een spleet c.q. het aantal planken dat tegelijk uit het slot loopt
 - * de gevolgen van uit het slot lopen op het verhang achter het kwelscherm rekeninghoudend met de driedimensionale situatie en het optreden van fluïdisatie.
- kwelschermen worden toegepast bij kunstwerken en in bijzondere situaties. De grootte van de strekking is in die situaties zo klein dat er naar verwachting geen significant lengte-effect zal optreden.
- de traditionele totale veiligheidsfactor ligt bij een betrouwbaarheidsniveau van ± 5.0 in de orde van 1.5 à 2.0 afhankelijk van de spreiding van de porositeit. Dit betekent dat wellicht enige optimalisatie van het betrouwbaarheidsniveau mogelijk is maar dat onderzoek naar de spreiding van de porositeit noodzakelijk is. De porositeit is een moeilijk te modelleren grootheid. Het ligt niet in de verwachting dat hiervoor eenvoudige modellen voor kunnen worden afge-

- leid. Aanbevolen wordt om een grote spreiding van de porositeit aan te houden.
- de bij de opdrachtverlening gedefinieerde ontwerpgrafieken resulteren in een consistente interpretatie. Voor de toepassing in de praktijk dient een partiële veiligheidsfactor voor het verval gedefinieerd te worden.
 - de alternatieve interpretatie via de weerstandsfactor geeft een uniform verband tussen betrouwbaarheidsindex en weerstandsfactor.
 - de voorkeur voor de ontwerpregel gaat uit naar een definitie via de weerstandsfactor
 - op basis van de resultaten is een probabilistische ontwerpregel voorgesteld. De grootheden hierin zijn het verval over de kering, het maximale verhang achter het kwelscherm en de weerstandsfactor. De benodigde inbedding dient iteratief bepaald te worden.
 - voor kwelshielden buiten potentiële bezwijkmechanismen waar piping en kwel geen rol spelen wordt de kans op falen bepaald door de kans van optreden van heave. Maatgevend voor het ontwerp is de situatie zonder lek als gevolg van corrosie en inclusief een spleet onder een dichte bodem.
 - in geval van gaten door corrosie dient de kans op piping als gevolg van de gaten geëvalueerd te worden
 - de invloed van een spleet dient meegenomen te worden bij het ontwerp. Dit kan door het uitvoeren van berekeningen met de fragmentenmethode. Een alternatieve methode is een verhoging van de betrouwbaarheidsindex in een analyse zonder spleet. In dit rapport is de grootte van de in rekening te brengen verhoging onderzocht.

Literatuur

[Bouwdienst 1996]

Renovatie Zuider- en Kleine Sluis

Ontwerptekeningen van Civiel-Droog Bouwkunde, behorend bij ontwerpnota RN-ZS-95.300
Bouwdienst Rijkswaterstaat, B. Nieswaag, 1996

[Bouwdienst 1998]

Richtlijn Waterkerings- en Beschikbaarheidseisen Kunstwerken NI
inclusief basisrapporten en verslagen van het project "Veilkunwat"
Bouwdienst, Fugro BV, Grondmechanica Delft, 1998

[DWW 1995]

Grondwaterproblemen bij de Zuidersluis en de Kleine Sluis van het sluizencomplex IJmuiden
Rapport Dienst Weg- en Waterbouwkunde, W-DWW-95-354, J.C. van der Burg, M. van de
Paverd, 1995

[DWW 1996]

Probabilistische gevoeligheidsanalyse heaving ontwerpregels
Uitbestedingsplan en begeleidingsplan, DWW-HOAT-8P-96084, M. van de Paverd, 1996

[GD 1996a]

Probabilistische gevoeligheidsanalyse kunstwerken
Fase 1 van het project 'Probabilistische gevoeligheidsanalyse heavingontwerpregels'
Rapport Grondmechanica Delft, CO-370250.4, H.Best, J.B. Sellmeijer, S.E.J. Spierenburg,
1996

[GD 1996b]

Probabilisme in de Geotechniek, Onderdeel Ruimtelijke Variabiliteit, inventarisatiefase
Rapport Grondmechanica Delft, CO-361410.34, E.O.F. Calle, M.T. van der Meer, 1996

[GD 1996c]

Studie lengte-effecten
Rapport Grondmechanica Delft, CO-366850.28, E.O.F. Calle, 1996

[GD 1997a]

Probabilistische gevoeligheidsanalyse heavingontwerpregels, fase 2
Rapport Grondmechanica Delft, CO-370250.13, J.B. Sellmeijer, 1997

[GD 1997b]

Probabilistische gevoeligheidsanalyse heavingontwerpregels, fase 3
Rapport Grondmechanica Delft, CO-370250.43, J.B. Sellmeijer, 1997

[Hogg and Craig 1971]

Hogg, R.V. and A.T. Craig
Introduction to Mathematical Statistics
The Macmillan Company, 3rd edition, 1971

[Rossum et al 1959]

Rossum, F. van en A. van Zanen
Onderloopsheid. Onderzoek naar de aard van het verschijnsel en methode der bepaling
van de veiligheidscoëfficiënt
De Ingenieur, No 20, 1959

[RWS 1981]

Ervaringen opgedaan bij werken waarbij enkelvoudige stalen damwand is toegepast
Rapport Directie Sluizen en Stuwen, Damwandcommissie 1979, 1981

[Sellmeijer et al 1995]

Sellmeijer, J.B., Cools, J.P.A.E., Decker, J and W.J. Post
Hydraulic Resistance of Steel Pile Joints
Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, 2, pp 105 - 110, 1995

[TU 1984]

Vrouwenvelder, A.C.W.M. en J.K. Vrijling
College dictaat b3: Probabilistisch ontwerpen
TU Delft, Afdeling der Civiele Techniek, 1984

[VOM 1988]

Literatuurstudie over corrosie van stalen damwanden in de grond
Rapport adviescentrum VOM in opdracht van Rijkswaterstaat DWW, R.I. de Jong, 1988

BIJLAGEN

- Bijlage 1: Resultaten faalkansberekening case 4
- Bijlage 2: Resultaten faalkansberekening case 2: dicht
- Bijlage 3: Resultaten faalkansberekening case 2: lek
- Bijlage 4: Resultaten faalkansberekening case 2: gat
- Bijlage 5: Resultaten faalkansberekening case 3: geen spleet
- Bijlage 6: Resultaten faalkansberekening case 3: spleet
- Bijlage 7: Resultaten faalkansberekening case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 8: Resultaten faalkansberekening case 2: gem. gat/10
- Bijlage 9: Resultaten faalkansberekening case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 10: Resultaten faalkansberekening case 2: V porositeit *3
- Bijlage 11: Resultaten faalkansberekening case 2: evaluatie invloed lek
- Bijlage 12: Resultaten faalkansberekening case 2: evaluatie invloed gat
- Bijlage 13: Resultaten faalkansberekening case 2: evaluatie invloed laagdikte en porositeit
- Bijlage 14: Resultaten faalkansberekening case 3: evaluatie invloed spleet

)

L / D := 0.20

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.999E-0001	-3.8082	0.076	0.043	-0.988	-0.129
0.1000	3.194E-0001	0.4694	-0.389	-0.041	-0.894	0.218
0.1500	1.365E-0002	2.2072	-0.194	-0.192	-0.940	0.206
0.2000	6.163E-0004	3.2313	-0.227	-0.023	-0.973	-0.029
0.2500	3.488E-0005	3.9771	-0.244	-0.024	-0.957	0.155
0.3000	1.923E-0006	4.6196	-0.192	-0.077	-0.978	0.017

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.769E-0001	-1.9933	-0.135	0.211	-0.968	0.020
0.1000	5.143E-0002	1.6311	-0.323	-0.190	-0.916	0.143
0.1500	9.298E-0004	3.1118	-0.265	-0.093	-0.956	0.089
0.2000	2.568E-0005	4.0494	-0.271	-0.165	-0.947	0.042
0.2500	6.775E-0007	4.8315	-0.217	-0.089	-0.967	0.095

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	4.832E-0001	0.0421	-0.793	-0.383	0.237	0.411
0.1000	2.193E-0003	2.8491	-0.288	-0.007	-0.950	0.117
0.1500	1.377E-0005	4.1928	-0.121	-0.224	-0.966	0.036
0.2000	1.050E-0007	5.1903	-0.142	-0.133	-0.979	0.059

L / D := 1.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.587E-0002	1.3054	-0.163	-0.318	-0.919	0.165
0.1000	8.820E-0005	3.7506	-0.230	-0.196	-0.947	0.107
0.1500	1.800E-0007	5.0890	-0.217	-0.148	-0.965	0.002

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.478E-0002	2.1759	-0.155	-0.163	-0.953	0.201
0.1000	3.783E-0006	4.4771	-0.198	-0.210	-0.949	0.127

L / D := 0.25

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.000E+0000	-4.0128	0.066	0.061	-0.996	0.000
0.1000	7.055E-0001	-0.5402	-0.050	-0.007	-0.999	0.000
0.1500	1.464E-0001	1.0521	-0.271	-0.019	-0.962	0.000
0.2000	2.129E-0002	2.0278	-0.190	-0.003	-0.982	0.000
0.3000	4.165E-0004	3.3416	-0.184	-0.061	-0.981	0.000
0.4000	8.228E-0006	4.3083	-0.171	-0.059	-0.984	0.000

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.953E-0001	-2.5977	0.012	0.002	-1.000	0.000
0.1000	3.443E-0001	0.4007	-0.213	-0.118	-0.970	0.000
0.1500	4.168E-0002	1.7315	-0.251	-0.123	-0.960	0.000
0.2000	4.755E-0003	2.5932	-0.152	-0.036	-0.988	0.000
0.3000	7.892E-0005	3.7784	-0.173	-0.049	-0.984	0.000
0.4000	1.492E-0006	4.6718	-0.184	-0.027	-0.983	0.000

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	7.775E-0001	-0.7637	0.026	0.060	-0.998	0.000
0.1000	5.132E-0002	1.6322	-0.170	-0.161	-0.972	0.000
0.1500	2.985E-0003	2.7494	-0.128	-0.100	-0.987	0.000
0.2000	2.155E-0004	3.5203	-0.237	-0.049	-0.970	0.000
0.3000	1.745E-0006	4.6396	-0.203	-0.098	-0.974	0.000

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.154E-0001	1.1978	-0.214	-0.253	-0.944	0.000
0.1000	8.585E-0004	3.1353	-0.132	-0.212	-0.968	0.000
0.1500	1.455E-0005	4.1804	-0.180	-0.183	-0.967	0.000
0.2000	3.000E-0007	4.9912	-0.204	-0.141	-0.969	0.000

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.011E-0002	2.3220	-0.177	-0.208	-0.962	0.000
0.1000	1.635E-0005	4.1538	-0.166	-0.202	-0.965	0.000
0.1500	2.500E-0008	5.4513	-0.248	-0.299	-0.921	0.000

```

L / D := 0.25
  d/D      pfaal      beta      Poros      Dl      H buit      H bin      Lek
Perm
0.0500 1.000E+0000 -4.1075 -0.026 -0.026 -0.151 0.000 -0.859
-0.488
0.1000 7.189E-0001 -0.5794 -0.035 0.005 -0.151 0.000 -0.846
-0.510
0.1500 1.500E-0001 1.0363 -0.006 -0.065 -0.554 0.000 0.736
0.382
0.2000 2.214E-0002 2.0114 -0.084 -0.004 -0.775 0.000 0.565
0.268
0.3000 4.105E-0004 3.3456 -0.196 -0.061 -0.822 0.000 0.466
0.254
0.4000 8.425E-0006 4.3030 -0.021 -0.100 -0.917 0.000 0.344
0.175
0.5000 1.750E-0007 5.0943 -0.197 0.048 -0.976 0.000 -0.073
0.026

```

```

L / D := 0.50
  d/D      pfaal      beta      Poros      Dl      H buit      H bin      Lek
Perm
0.0500 9.967E-0001 -2.7119 0.022 0.012 -0.171 0.000 -0.866
-0.469
0.1000 3.569E-0001 0.3666 -0.067 0.067 -0.192 0.000 0.814
0.539
0.1500 4.264E-0002 1.7208 -0.254 -0.105 -0.653 0.000 0.588
0.390
0.2000 4.930E-0003 2.5807 -0.260 -0.174 -0.856 0.000 0.345
0.222
0.3000 7.790E-0005 3.7816 -0.087 0.078 -0.892 0.000 0.408
0.157
0.4000 1.175E-0006 4.7207 -0.194 -0.005 -0.968 0.000 0.127
0.100

```

```

L / D := 1.00
  d/D      pfaal      beta      Poros      Dl      H buit      H bin      Lek
Perm
0.0500 7.998E-0001 -0.8408 -0.026 -0.026 -0.151 0.000 -0.859
-0.488
0.1000 5.387E-0002 1.6084 -0.135 -0.009 -0.706 0.000 0.611
0.330
0.1500 2.940E-0003 2.7544 -0.250 -0.021 -0.817 0.000 0.403
0.328
0.2000 1.960E-0004 3.5454 0.027 -0.009 -0.920 0.000 0.310
0.238
0.3000 1.750E-0006 4.6391 -0.098 -0.001 -0.978 0.000 0.099
0.155

```

```

L / D := 2.00
  d/D      pfaal      beta      Poros      Dl      H buit      H bin      Lek
Perm
0.0500 1.266E-0001 1.1424 -0.177 -0.183 -0.420 0.000 0.772
0.404
0.1000 9.720E-0004 3.0987 -0.097 -0.231 -0.826 0.000 0.411
0.293

```

0.1500	1.538E-0005	4.1678	-0.314	-0.096	-0.879	0.000	0.254
0.236							
0.2000	2.250E-0007	5.0465	-0.042	-0.183	-0.957	0.000	0.181
0.126							

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Lek
Perm							
0.0500	1.155E-0002	2.2716	-0.244	-0.205	-0.704	0.000	0.557
0.305							
0.1000	1.803E-0005	4.1314	-0.107	-0.056	-0.923	0.000	0.335
0.147							
0.1500	2.500E-0008	5.4513	-0.231	-0.369	-0.892	0.000	-0.123
0.008							

L / D := 0.25

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	9.998E-0001	-3.5642	0.072	0.013	-0.539	0.000	-0.839
0.1000	5.796E-0001	-0.2008	0.016	0.033	-0.340	0.000	-0.940
0.1500	9.375E-0002	1.3180	-0.193	0.020	-0.914	0.000	0.356
0.2000	1.182E-0002	2.2628	-0.277	-0.009	-0.924	0.000	0.265
0.3000	1.845E-0004	3.5613	-0.228	-0.051	-0.966	0.000	0.113
0.4000	2.887E-0006	4.5345	-0.128	-0.004	-0.978	0.000	0.162

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	9.836E-0001	-2.1344	-0.033	-0.040	-0.529	0.000	-0.847
0.1000	2.277E-0001	0.7465	-0.155	-0.045	-0.728	0.000	0.667
0.1500	2.062E-0002	2.0412	-0.192	-0.019	-0.967	0.000	0.164
0.2000	1.985E-0003	2.8805	-0.179	-0.120	-0.956	0.000	0.197
0.3000	2.293E-0005	4.0758	-0.158	-0.011	-0.978	0.000	0.132
0.4000	1.800E-0007	5.0890	-0.312	-0.075	-0.932	0.000	0.172

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	6.298E-0001	-0.3313	-0.079	0.026	-0.512	0.000	-0.855
0.1000	2.455E-0002	1.9677	-0.111	-0.104	-0.925	0.000	0.347
0.1500	9.348E-0004	3.1102	-0.165	-0.075	-0.974	0.000	0.135
0.2000	4.748E-0005	3.9031	-0.195	-0.149	-0.963	0.000	0.111
0.3000	1.250E-0007	5.1577	-0.067	-0.095	-0.987	0.000	0.110

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	6.007E-0002	1.5542	-0.203	-0.183	-0.855	0.000	0.441
0.1000	2.382E-0004	3.4936	-0.105	-0.247	-0.956	0.000	0.117
0.1500	2.078E-0006	4.6035	-0.191	-0.193	-0.946	0.000	0.175

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	3.822E-0003	2.6674	-0.282	-0.249	-0.913	0.000	0.159
0.1000	2.670E-0006	4.5510	-0.116	-0.162	-0.964	0.000	0.177

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	6.510E-0001	-0.3881	0.076	0.043	-0.988	-0.129
0.1000	4.817E-0003	2.5887	-0.166	-0.145	-0.965	0.144
0.1500	4.270E-0005	3.9287	-0.247	-0.132	-0.959	0.048
0.2000	4.600E-0007	4.9080	-0.160	-0.147	-0.971	0.099

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.545E-0001	1.0174	-0.357	-0.216	-0.901	0.120
0.1000	2.033E-0004	3.5358	-0.147	-0.191	-0.969	0.051
0.1500	5.450E-0007	4.8746	-0.138	-0.210	-0.963	0.096

L / D := 1.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	2.406E-0002	1.9764	-0.368	-0.339	-0.857	0.125
0.1000	8.820E-0006	4.2928	-0.177	-0.265	-0.947	0.030

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	3.662E-0003	2.6817	-0.235	-0.219	-0.946	0.054
0.1000	3.525E-0007	4.9600	-0.252	-0.132	-0.958	-0.028

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	8.247E-0005	3.7674	-0.229	-0.206	-0.949	0.069

L / D := 0.50						
d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	7.100E-0001	-0.5535	0.076	0.043	-0.988	-0.129
0.1000	6.405E-0003	2.4890	-0.271	-0.075	-0.954	0.101
0.1500	6.158E-0005	3.8398	-0.219	-0.147	-0.958	0.112
0.2000	8.125E-0007	4.7952	-0.145	-0.177	-0.971	0.075

L / D := 1.00						
d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	3.803E-0001	0.3047	-0.614	-0.266	-0.664	0.334
0.1000	1.092E-0003	3.0639	-0.217	-0.170	-0.951	0.141
0.1500	6.463E-0006	4.3614	-0.139	-0.046	-0.988	0.058

L / D := 1.50						
d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	2.538E-0001	0.6625	-0.382	-0.405	-0.810	0.185
0.1000	4.855E-0004	3.2988	-0.227	-0.087	-0.968	0.058
0.1500	2.127E-0006	4.5985	-0.099	-0.109	-0.988	0.053

L / D := 2.00						
d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	2.077E-0001	0.8145	-0.508	-0.212	-0.797	0.249
0.1000	3.392E-0004	3.3981	-0.150	-0.125	-0.976	0.097
0.1500	1.182E-0006	4.7194	-0.184	0.045	-0.981	0.042

L / D := 3.00						
d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.793E-0001	0.9180	-0.414	-0.254	-0.823	0.295
0.1000	2.475E-0004	3.4834	-0.249	-0.119	-0.961	-0.014
0.1500	7.900E-0007	4.8008	-0.299	-0.064	-0.952	0.006

L / D := 0.25

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Lek
0.0500	1.000E+0000	-4.0802	-0.026	-0.026	-0.151	0.000	-0.859
-0.488							
0.1000	7.072E-0001	-0.5451	-0.035	0.005	-0.151	0.000	-0.846
-0.510							
0.1500	1.428E-0001	1.0679	-0.171	-0.047	-0.469	0.000	0.660
0.559							
0.2000	2.044E-0002	2.0448	-0.084	-0.004	-0.775	0.000	0.565
0.268							
0.3000	3.648E-0004	3.3783	-0.196	-0.061	-0.822	0.000	0.466
0.254							
0.4000	7.075E-0006	4.3415	-0.025	-0.052	-0.900	0.000	0.311
0.299							
0.5000	1.000E-0007	5.1993	-0.458	-0.162	-0.872	0.000	0.019
0.051							

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Lek
0.0500	9.962E-0001	-2.6702	0.002	0.049	-0.197	0.000	-0.875
-0.439							
0.1000	3.465E-0001	0.3949	-0.165	-0.026	-0.154	0.000	0.756
0.614							
0.1500	3.983E-0002	1.7527	-0.124	-0.166	-0.693	0.000	0.546
0.423							
0.2000	4.245E-0003	2.6319	-0.158	0.025	-0.889	0.000	0.349
0.248							
0.3000	6.473E-0005	3.8275	-0.234	-0.048	-0.861	0.000	0.400
0.205							
0.4000	1.075E-0006	4.7388	-0.117	-0.016	-0.946	0.000	0.291
0.076							

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Lek
0.0500	7.928E-0001	-0.8161	-0.026	-0.026	-0.151	0.000	-0.859
-0.488							
0.1000	5.067E-0002	1.6383	-0.135	-0.009	-0.706	0.000	0.611
0.330							
0.1500	2.630E-0003	2.7907	-0.250	-0.021	-0.817	0.000	0.403
0.328							
0.2000	1.635E-0004	3.5929	0.027	-0.009	-0.920	0.000	0.310
0.238							
0.3000	9.500E-0007	4.7638	-0.098	-0.001	-0.978	0.000	0.099
0.155							

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Lek
0.0500	1.228E-0001	1.1607	-0.177	-0.183	-0.420	0.000	0.772
0.404							
0.1000	8.843E-0004	3.1266	-0.097	-0.231	-0.826	0.000	0.411
0.293							

Lek2

0.1500	1.322E-0005	4.2021	-0.314	-0.096	-0.879	0.000	0.254
0.236							
0.2000	1.750E-0007	5.0943	-0.042	-0.183	-0.957	0.000	0.181
0.126							

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Lek
Perm							
0.0500	1.111E-0002	2.2866	-0.244	-0.205	-0.704	0.000	0.557
0.305							
0.1000	1.585E-0005	4.1609	-0.107	-0.056	-0.923	0.000	0.335
0.147							
0.1500	2.500E-0008	5.4513	-0.231	-0.369	-0.892	0.000	-0.123
0.008							

L / D := 0.25

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	9.999E-0001	-3.7254	0.020	0.047	-0.388	0.000	-0.920
0.1000	6.219E-0001	-0.3106	-0.015	-0.093	-0.323	0.000	-0.942
0.1500	1.085E-0001	1.2344	-0.127	0.043	-0.824	0.000	0.551
0.2000	1.431E-0002	2.1885	-0.163	0.051	-0.909	0.000	0.380
0.3000	2.388E-0004	3.4931	-0.080	-0.047	-0.976	0.000	0.199
0.4000	4.700E-0006	4.4305	-0.183	0.036	-0.974	0.000	0.132
0.5000	7.500E-0008	5.2526	-0.315	-0.032	-0.938	0.000	0.138

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	9.890E-0001	-2.2888	0.043	0.004	-0.457	0.000	-0.888
0.1000	2.628E-0001	0.6349	-0.197	-0.159	-0.566	0.000	0.785
0.1500	2.558E-0002	1.9501	-0.167	-0.117	-0.934	0.000	0.294
0.2000	2.500E-0003	2.8070	-0.112	0.130	-0.950	0.000	0.262
0.3000	3.130E-0005	4.0028	-0.072	-0.103	-0.982	0.000	0.142
0.4000	3.250E-0007	4.9757	-0.117	-0.077	-0.981	0.000	0.134

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	6.847E-0001	-0.4809	-0.042	0.008	-0.443	0.000	-0.896
0.1000	3.157E-0002	1.8581	-0.156	-0.069	-0.900	0.000	0.401
0.1500	1.327E-0003	3.0051	-0.258	-0.053	-0.933	0.000	0.244
0.2000	7.480E-0005	3.7917	-0.150	-0.141	-0.963	0.000	0.173
0.3000	3.500E-0007	4.9614	-0.184	-0.158	-0.890	0.000	0.387

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	7.523E-0002	1.4379	-0.187	-0.271	-0.856	0.000	0.397
0.1000	3.653E-0004	3.3779	-0.204	-0.229	-0.915	0.000	0.260
0.1500	3.250E-0006	4.5094	-0.117	-0.133	-0.975	0.000	0.136

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin	Gat
0.0500	5.550E-0003	2.5395	-0.101	-0.205	-0.879	0.000	0.419
0.1000	5.950E-0006	4.3794	-0.171	-0.245	-0.944	0.000	0.137

L / D := 0.25

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.998E-0001	-3.5059	0.066	0.061	-0.996	0.000
0.1000	6.946E-0001	-0.5089	-0.050	-0.007	-0.999	0.000
0.1500	1.442E-0001	1.0618	-0.222	-0.147	-0.964	0.000
0.2000	2.099E-0002	2.0337	-0.190	-0.003	-0.982	0.000
0.3000	4.172E-0004	3.3411	-0.189	-0.037	-0.981	0.000
0.4000	8.075E-0006	4.3124	-0.232	-0.065	-0.971	0.000
0.5000	1.500E-0007	5.1234	-0.242	0.010	-0.970	0.000

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.847E-0001	-2.1634	0.037	0.034	-0.999	0.000
0.1000	3.336E-0001	0.4299	-0.424	-0.320	-0.847	0.000
0.1500	4.073E-0002	1.7423	-0.262	-0.205	-0.943	0.000
0.2000	4.680E-0003	2.5986	-0.182	-0.129	-0.975	0.000
0.3000	8.185E-0005	3.7693	-0.153	-0.057	-0.987	0.000
0.4000	1.725E-0006	4.6420	-0.150	-0.039	-0.988	0.000

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	7.266E-0001	-0.6027	0.031	-0.050	-0.998	0.000
0.1000	5.479E-0002	1.6001	-0.227	-0.297	-0.927	0.000
0.1500	3.365E-0003	2.7099	-0.205	-0.244	-0.948	0.000
0.2000	2.542E-0004	3.4762	-0.162	-0.233	-0.959	0.000
0.3000	2.425E-0006	4.5712	-0.255	0.505	-0.824	0.000
0.4000	2.500E-0008	5.4513	-0.281	0.368	-0.887	0.000

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.336E-0001	1.1095	-0.187	-0.627	-0.757	0.000
0.1000	1.552E-0003	2.9571	-0.116	-0.265	-0.957	0.000
0.1500	3.040E-0005	4.0097	-0.151	-0.318	-0.936	0.000
0.2000	8.500E-0007	4.7862	-0.156	-0.169	-0.973	0.000

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.688E-0002	2.1230	-0.155	-0.455	-0.877	0.000
0.1000	4.975E-0005	3.8918	-0.182	-0.349	-0.919	0.000
0.1500	3.000E-0007	4.9912	-0.248	-0.186	-0.951	0.000

L / D := 0.25

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.995E-0001	-3.2649	0.066	0.061	-0.996	0.000
0.1000	6.885E-0001	-0.4916	-0.050	-0.007	-0.999	0.000
0.1500	1.893E-0001	0.8804	-0.740	-0.015	-0.672	0.000
0.2000	3.893E-0002	1.7633	-0.673	-0.016	-0.739	0.000
0.3000	1.757E-0003	2.9187	-0.662	0.045	-0.749	0.000
0.4000	8.957E-0005	3.7467	-0.633	0.003	-0.774	0.000
0.5000	6.350E-0006	4.3652	-0.610	0.007	-0.792	0.000
0.6000	5.250E-0007	4.8820	-0.742	0.007	-0.670	0.000
0.7000	2.500E-0008	5.4513	-0.586	-0.107	-0.804	0.000

L / D := 0.50

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	9.842E-0001	-2.1504	-0.018	0.019	-1.000	0.000
0.1000	3.795E-0001	0.3069	-0.905	-0.165	-0.393	0.000
0.1500	6.674E-0002	1.5005	-0.639	-0.056	-0.767	0.000
0.2000	1.153E-0002	2.2724	-0.654	-0.083	-0.752	0.000
0.3000	4.582E-0004	3.3150	-0.515	-0.018	-0.857	0.000
0.4000	2.778E-0005	4.0310	-0.599	0.019	-0.800	0.000
0.5000	1.975E-0006	4.6140	-0.598	-0.035	-0.801	0.000
0.6000	2.250E-0007	5.0465	-0.580	0.001	-0.815	0.000

L / D := 1.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	7.509E-0001	-0.6772	0.032	-0.037	-0.999	0.000
0.1000	8.042E-0002	1.4022	-0.711	-0.071	-0.699	0.000
0.1500	7.040E-0003	2.4552	-0.558	-0.070	-0.827	0.000
0.2000	9.503E-0004	3.1054	-0.619	-0.020	-0.785	0.000
0.3000	3.068E-0005	4.0076	-0.606	0.003	-0.795	0.000
0.4000	1.900E-0006	4.6220	-0.657	0.045	-0.752	0.000
0.5000	2.250E-0007	5.0465	-0.801	0.005	-0.598	0.000
0.6000	2.500E-0008	5.4513	-0.904	-0.210	-0.372	0.000

L / D := 2.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	1.540E-0001	1.0196	-0.744	-0.212	-0.634	0.000
0.1000	3.118E-0003	2.7352	-0.529	-0.458	-0.834	0.000
0.1500	1.340E-0004	3.6444	-0.688	-0.101	-0.718	0.000
0.2000	1.047E-0005	4.2545	-0.570	-0.085	-0.817	0.000
0.3000	1.250E-0007	5.1577	-0.743	-0.004	-0.670	0.000
0.4000	5.000E-0008	5.3267	-0.759	-0.031	-0.650	0.000

L / D := 3.00

d/D	pfaal	beta	Poros	Dl	H buit	H bin
0.0500	2.057E-0002	2.0421	-0.571	-0.175	-0.802	0.000
0.1000	1.375E-0004	3.6378	-0.630	-0.118	-0.767	0.000
0.1500	4.075E-0006	4.4612	-0.633	-0.134	-0.763	0.000
0.2000	3.250E-0007	4.9757	-0.630	-0.196	-0.752	0.000

dicht		lek		lek 10	
L/D	0.25				
d/D	pdicht	plek	plek10	(pl-pd)/pd	(pl10-pd)/pd
0.05	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.1	7.06E-01	7.19E-01	7.07E-01	1.90E-02	2.41E-03
0.15	1.46E-01	1.50E-01	1.43E-01	2.46E-02	-2.46E-02
0.2	2.13E-02	2.21E-02	2.04E-02	3.99E-02	-3.99E-02
0.3	4.17E-04	4.11E-04	3.65E-04	-1.44E-02	-1.24E-01
0.4	8.23E-06	8.43E-06	7.08E-06	2.39E-02	-1.40E-01
0.5		1.75E-07	1.00E-07		

L/D		0.5				
d/D	pfaal					
0.05	9.95E-01	9.97E-01	9.96E-01	1.41E-03	9.04E-04	
0.1	3.44E-01	3.57E-01	3.47E-01	3.66E-02	6.39E-03	
0.15	4.17E-02	4.26E-02	3.98E-02	2.30E-02	-4.44E-02	
0.2	4.76E-03	4.93E-03	4.25E-03	3.68E-02	-1.07E-01	
0.3	7.89E-05	7.79E-05	6.47E-05	-1.29E-02	-1.80E-01	
0.4	1.49E-06	1.18E-06	1.08E-06	-2.12E-01	-2.79E-01	

L/D		1				
d/D	pfaal					
0.05	7.78E-01	8.00E-01	7.93E-01	2.87E-02	1.97E-02	
0.1	5.13E-02	5.39E-02	5.07E-02	4.97E-02	-1.27E-02	
0.15	2.99E-03	2.94E-03	2.63E-03	-1.51E-02	-1.19E-01	
0.2	2.16E-04	1.96E-04	1.64E-04	-9.05E-02	-2.41E-01	
0.3	1.75E-06	1.75E-06	9.50E-07	2.87E-03	-4.56E-01	

L/D		2				
d/D	pfaal					
0.05	1.15E-01	1.27E-01	1.23E-01	9.71E-02	6.41E-02	
0.1	8.59E-04	9.72E-04	8.84E-04	1.32E-01	3.01E-02	
0.15	1.46E-05	1.54E-05	1.32E-05	5.70E-02	-9.14E-02	
0.2	3.00E-07	2.25E-07	1.75E-07	-2.50E-01	-4.17E-01	

L/D		3				
d/D	pfaal					
0.05	1.01E-02	1.16E-02	1.11E-02	1.42E-01	9.89E-02	
0.1	1.64E-05	1.80E-05	1.59E-05	1.03E-01	-3.06E-02	
0.15	2.50E-08	2.50E-08	2.50E-08	0.00E+00	0.00E+00	

	gat	.1gat			
L / D	0.25				
d/D	pgat	p0.1gat	pgat/pdicht	p0.1gat/pdicht	
0.05	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
0.1	5.80E-01	6.22E-01	8.22E-01	8.82E-01	8.82E-01
0.15	9.38E-02	1.09E-01	6.40E-01	7.41E-01	7.41E-01
0.2	1.18E-02	1.43E-02	5.55E-01	6.72E-01	6.72E-01
0.3	1.85E-04	2.39E-04	4.43E-01	5.73E-01	5.73E-01
0.4	2.89E-06	4.70E-06	3.51E-01	5.71E-01	5.71E-01
0.5		7.50E-08			

L / D	0.5				
d/D					
0.05	9.84E-01	9.89E-01	9.88E-01	9.94E-01	9.94E-01
0.1	2.28E-01	2.63E-01	6.61E-01	7.63E-01	7.63E-01
0.15	2.06E-02	2.56E-02	4.95E-01	6.14E-01	6.14E-01
0.2	1.99E-03	2.50E-03	4.17E-01	5.26E-01	5.26E-01
0.3	2.29E-05	3.13E-05	2.91E-01	3.97E-01	3.97E-01
0.4	1.80E-07	3.25E-07	1.21E-01	2.18E-01	2.18E-01

L / D	1				
d/D					
0.05	6.30E-01	6.85E-01	8.10E-01	8.81E-01	8.81E-01
0.1	2.46E-02	3.16E-02	4.78E-01	6.15E-01	6.15E-01
0.15	9.35E-04	1.33E-03	3.13E-01	4.45E-01	4.45E-01
0.2	4.75E-05	7.48E-05	2.20E-01	3.47E-01	3.47E-01
0.3	1.25E-07	3.50E-07	7.16E-02	2.01E-01	2.01E-01

L / D	2				
d/D					
0.05	6.01E-02	7.52E-02	5.21E-01	6.52E-01	6.52E-01
0.1	2.38E-04	3.65E-04	2.77E-01	4.26E-01	4.26E-01
0.15	2.08E-06	3.25E-06	1.43E-01	2.23E-01	2.23E-01
0.2					

L / D	3				
d/D					
0.05	3.82E-03	5.55E-03	3.78E-01	5.49E-01	5.49E-01
0.1	2.67E-06	5.95E-06	1.63E-01	3.64E-01	3.64E-01
0.15					

dicht		VD*3		Vn*3	
L/D	0.25				
d/D	pdicht	pVD	(pD-pd)/pd	pVn	pVn/pd
0.05	1.00E+00	1.00E+00	-2.00E-04	1.00E+00	1.00E+00
0.1	7.06E-01	6.95E-01	-1.55E-02	6.89E-01	9.76E-01
0.15	1.46E-01	1.44E-01	-1.50E-02	1.89E-01	1.29E+00
0.2	2.13E-02	2.10E-02	-1.41E-02	3.89E-02	1.83E+00
0.3	4.17E-04	4.17E-04	1.68E-03	1.76E-03	4.22E+00
0.4	8.23E-06	8.08E-06	-1.86E-02	8.96E-05	1.09E+01
0.5		1.50E-07		6.35E-06	
				5.25E-07	
				2.50E-08	

L/D	0.5				
d/D					
0.05	9.95E-01	9.85E-01	-1.07E-02	9.84E-01	9.89E-01
0.1	3.44E-01	3.34E-01	-3.11E-02	3.80E-01	1.10E+00
0.15	4.17E-02	4.07E-02	-2.28E-02	6.67E-02	1.60E+00
0.2	4.76E-03	4.68E-03	-1.58E-02	1.15E-02	2.42E+00
0.3	7.89E-05	8.19E-05	3.71E-02	4.58E-04	5.81E+00
0.4	1.49E-06	1.73E-06	1.56E-01	2.78E-05	1.86E+01
				1.98E-06	
				2.25E-07	

L/D	1				
d/D	pfaal				
0.05	7.78E-01	7.27E-01	-6.55E-02	8.04E-02	1.03E-01
0.1	5.13E-02	5.48E-02	6.76E-02	7.04E-03	1.37E-01
0.15	2.99E-03	3.37E-03	1.27E-01	9.50E-04	3.18E-01
0.2	2.16E-04	2.54E-04	1.80E-01	3.07E-05	1.42E-01
0.3	1.75E-06	2.43E-06	3.90E-01	1.90E-06	1.09E+00
		2.50E-08		2.25E-07	
				2.50E-08	

L/D	2				
d/D	pfaal				
0.05	1.15E-01	1.34E-01	1.58E-01	1.54E-01	1.33E+00
0.1	8.59E-04	1.55E-03	8.08E-01	3.12E-03	3.63E+00
0.15	1.46E-05	3.04E-05	1.09E+00	1.34E-04	9.21E+00
0.2	3.00E-07	8.50E-07	1.83E+00	1.05E-05	3.49E+01
				1.25E-07	
				5.00E-08	

L/D	3				
d/D	pfaal				
0.05	1.01E-02	1.69E-02	6.70E-01	2.06E-02	2.03E+00
0.1	1.64E-05	4.98E-05	2.04E+00	1.38E-04	8.41E+00
0.15	2.50E-08	3.00E-07	1.10E+01	4.08E-06	1.63E+02
				3.25E-07	

L/D :	0.5			
d/D	pvloer	pzetting	pzetting/pvloer	
0.05	6.51E-01	7.10E-01	1.09E+00	
0.1	4.82E-03	6.41E-03	1.33E+00	
0.15	4.27E-05	6.16E-05	1.44E+00	
0.2	4.60E-07	8.13E-07	1.77E+00	

L/D :	1			
d/D				
0.05	1.55E-01	3.80E-01	2.46E+00	
0.1	2.03E-04	1.09E-03	5.37E+00	
0.15	5.45E-07	6.46E-06	1.19E+01	

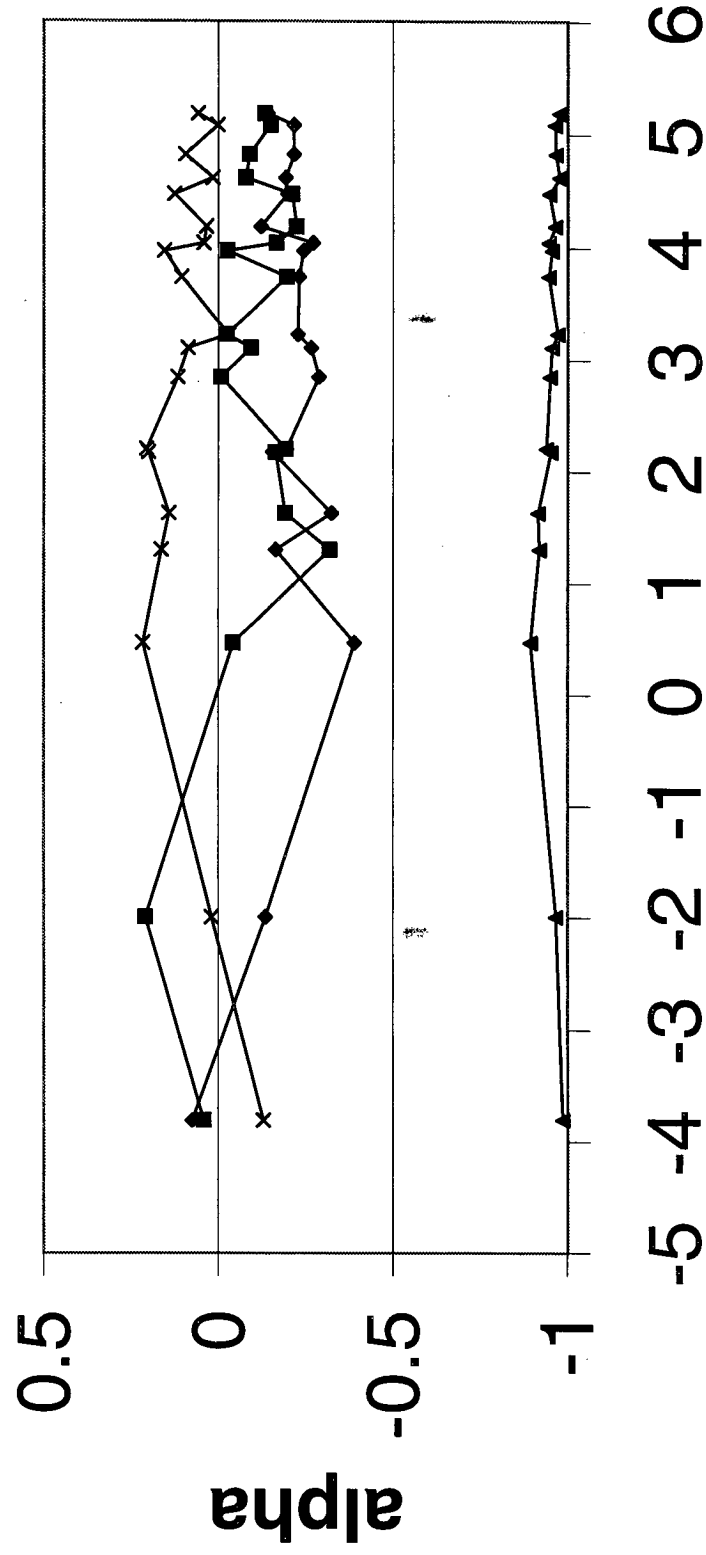
L/D :	1.5			
d/D				
0.05	2.41E-02	2.54E-01	1.05E+01	
0.1	8.82E-06	4.86E-04	5.50E+01	
		2.13E-06		

L/D :	2			
d/D				
0.05	3.66E-03	2.08E-01	5.67E+01	
0.1	3.53E-07	3.39E-04	9.62E+02	
		1.18E-06		

L/D :	3			
d/D				
0.05	8.25E-05	1.79E-01	2.17E+03	
		2.48E-04		
		7.90E-07		

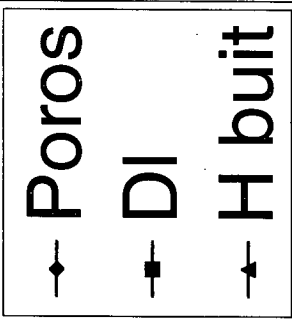
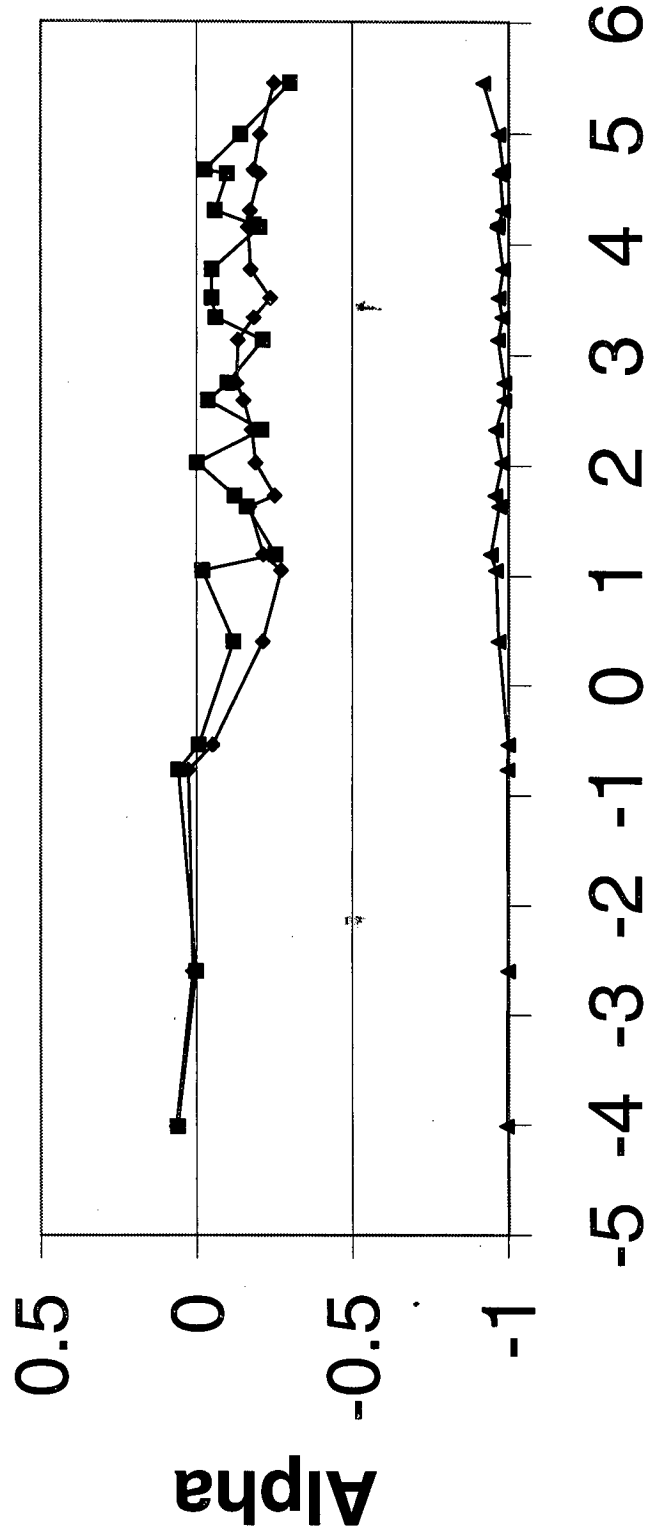
- Bijlage 15: Invloedsfactoren faalkansberekening case 4
- Bijlage 16: Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: dicht
- Bijlage 17: Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: lek
- Bijlage 18: Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: gat
- Bijlage 19: Invloedsfactoren faalkansberekening case 3: geen spleet
- Bijlage 20: Invloedsfactoren faalkansberekening case 3: spleet
- Bijlage 21: Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 22: Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: gem. gat/10
- Bijlage 23: Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 24: Invloedsfactoren faalkansberekening case 2: V porositeit *3

Buiten: alpha tegen beta

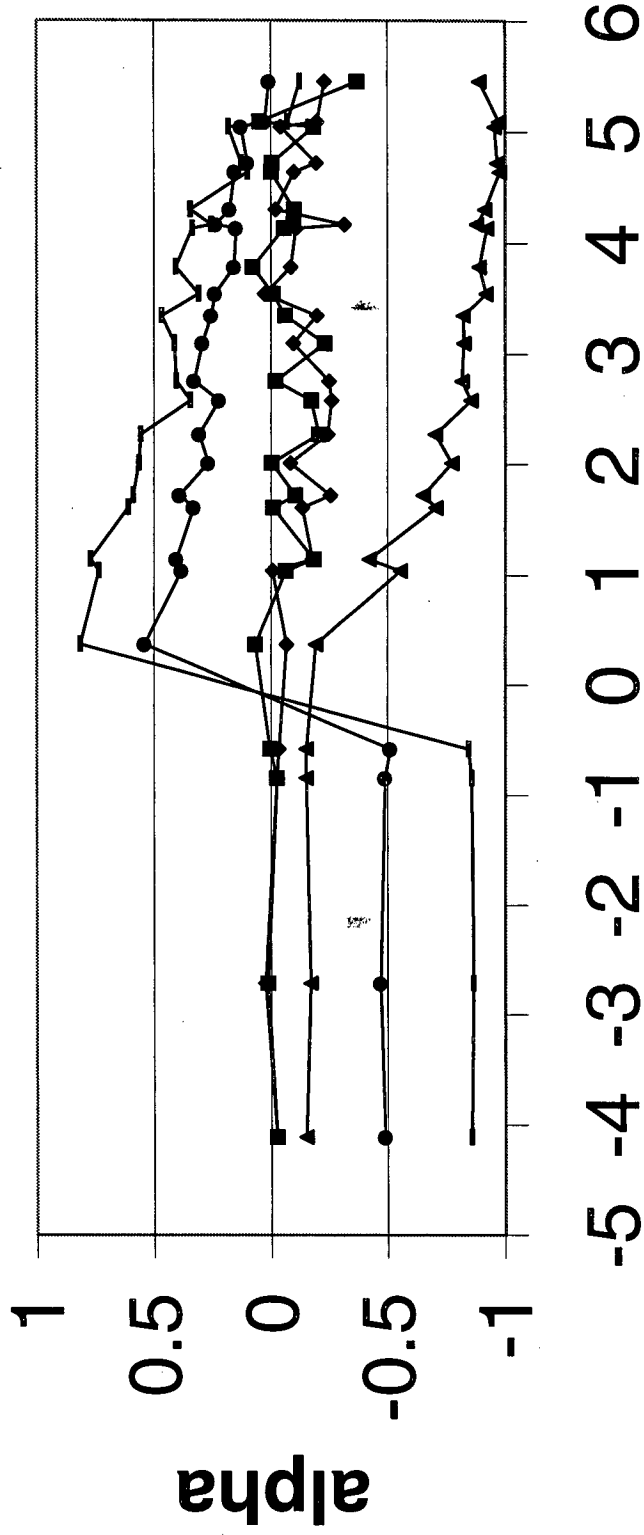


- ◆ Poros
- DI
- ▲ H buit
- × H bin

Dicht: alpha - beta

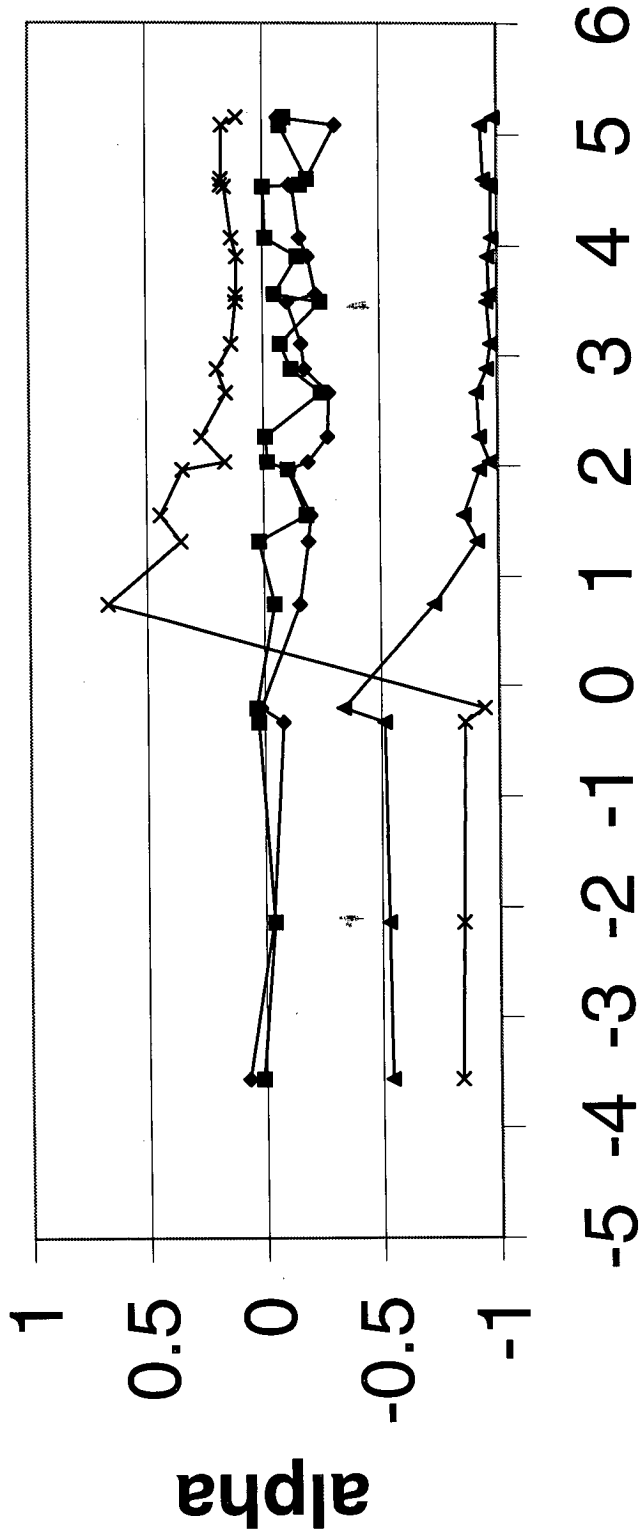


Lek: alpha - beta



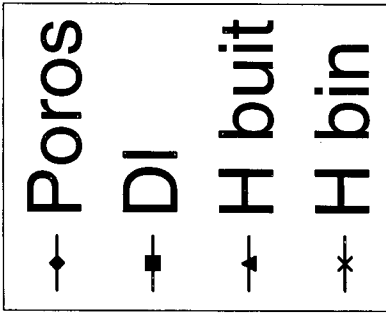
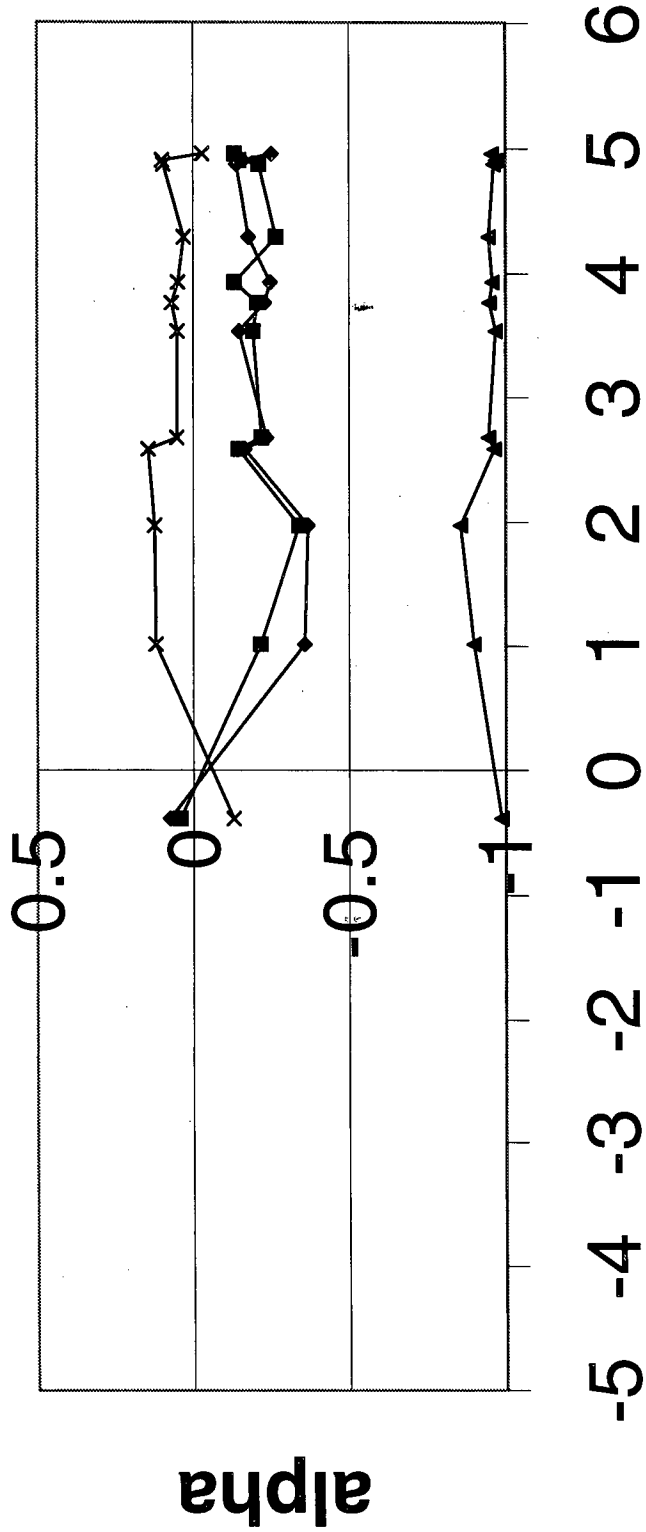
beta

Gat: alpha - beta

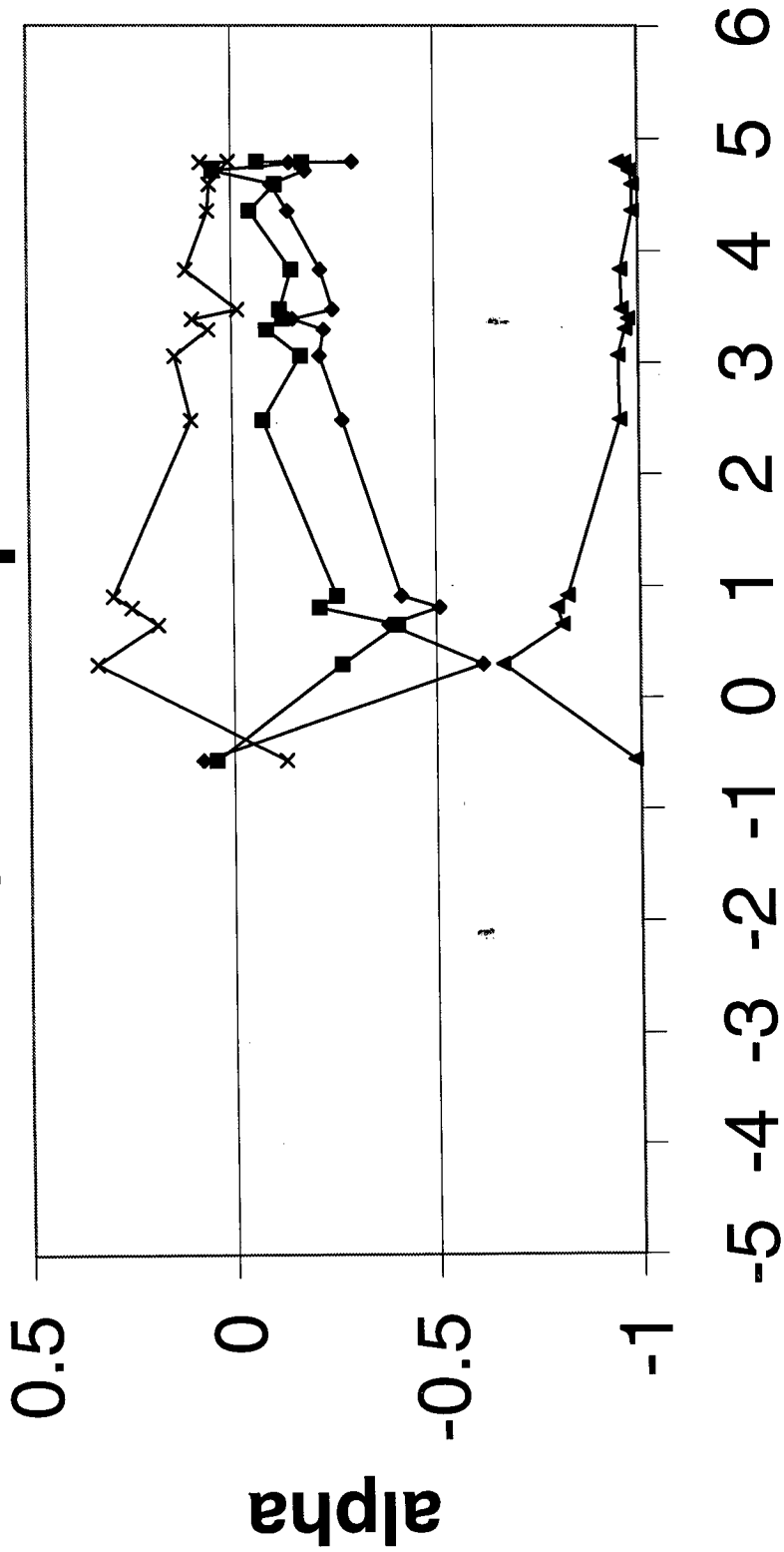


Beta

Sealed: alpha - beta

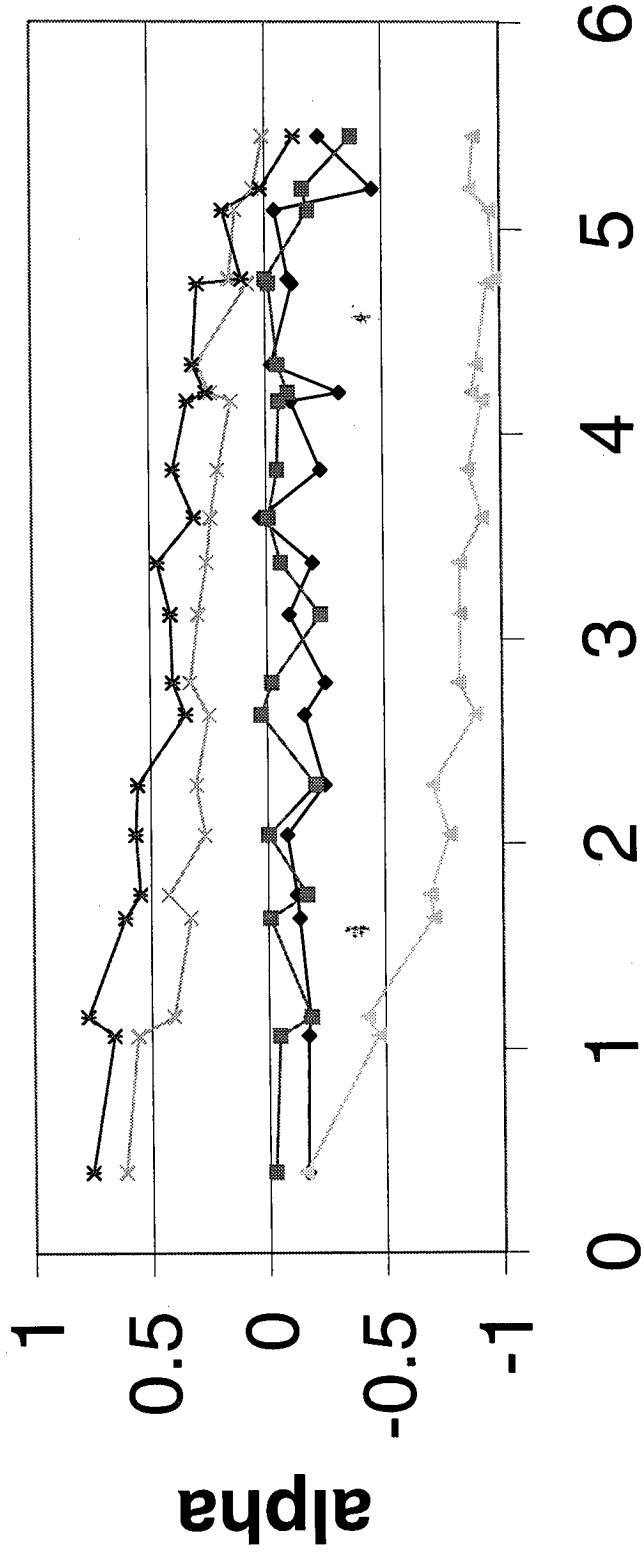


Zetting: beta - alpha

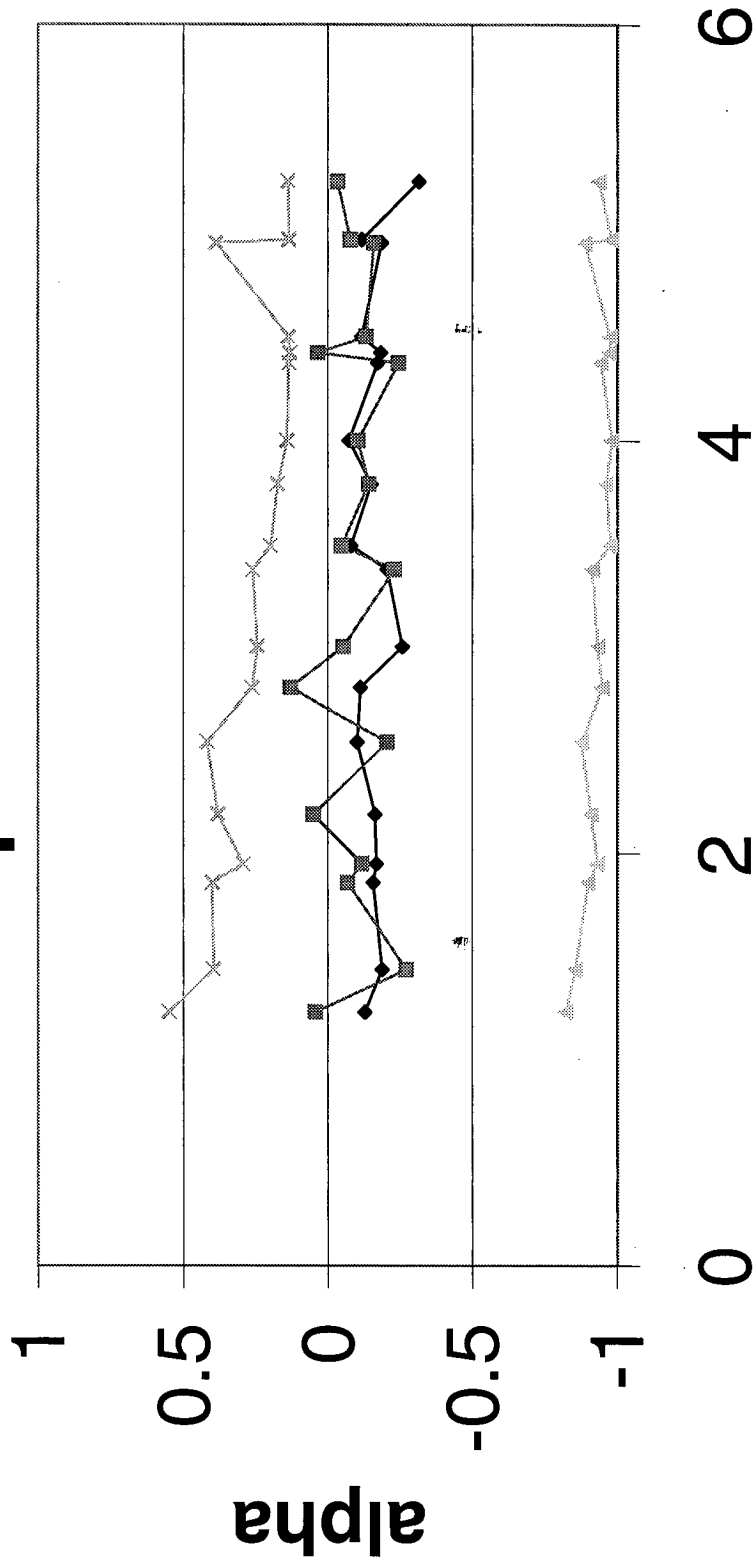


beta

Lek(*10): alpha - beta

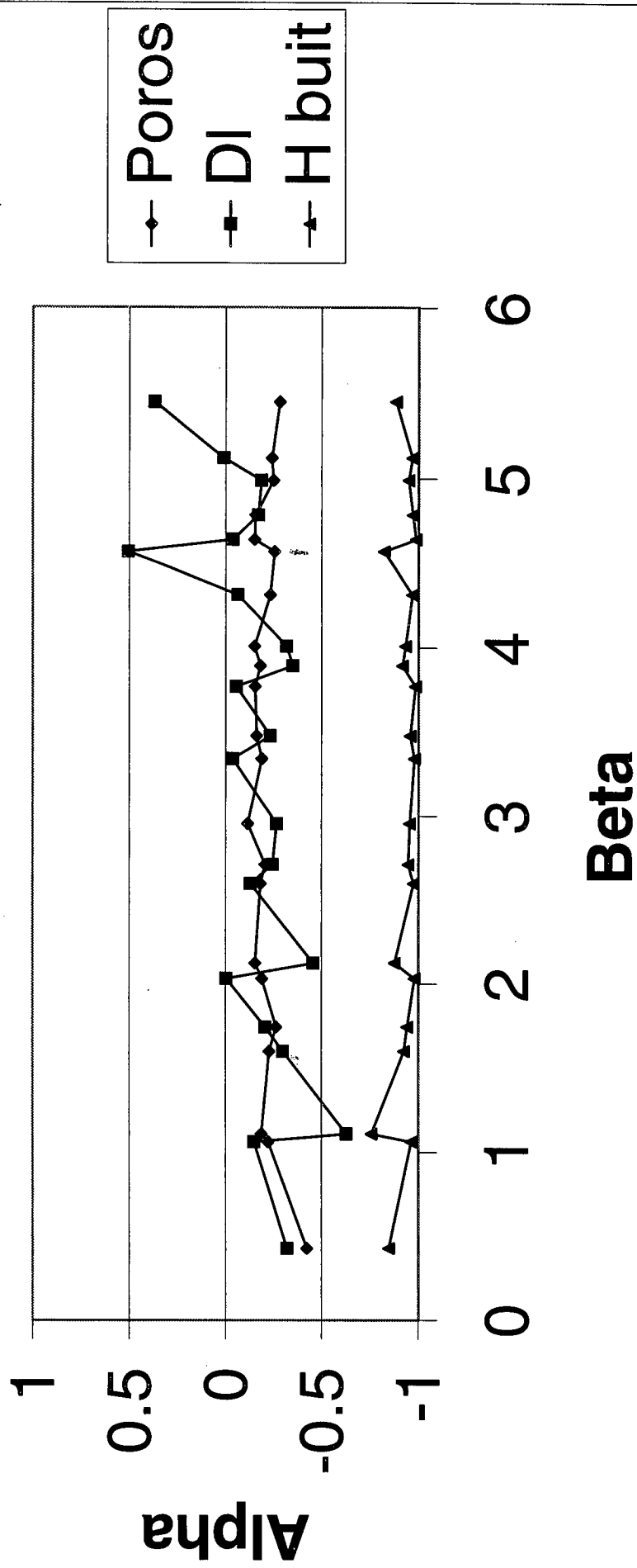


Gat (/10) alpha - beta

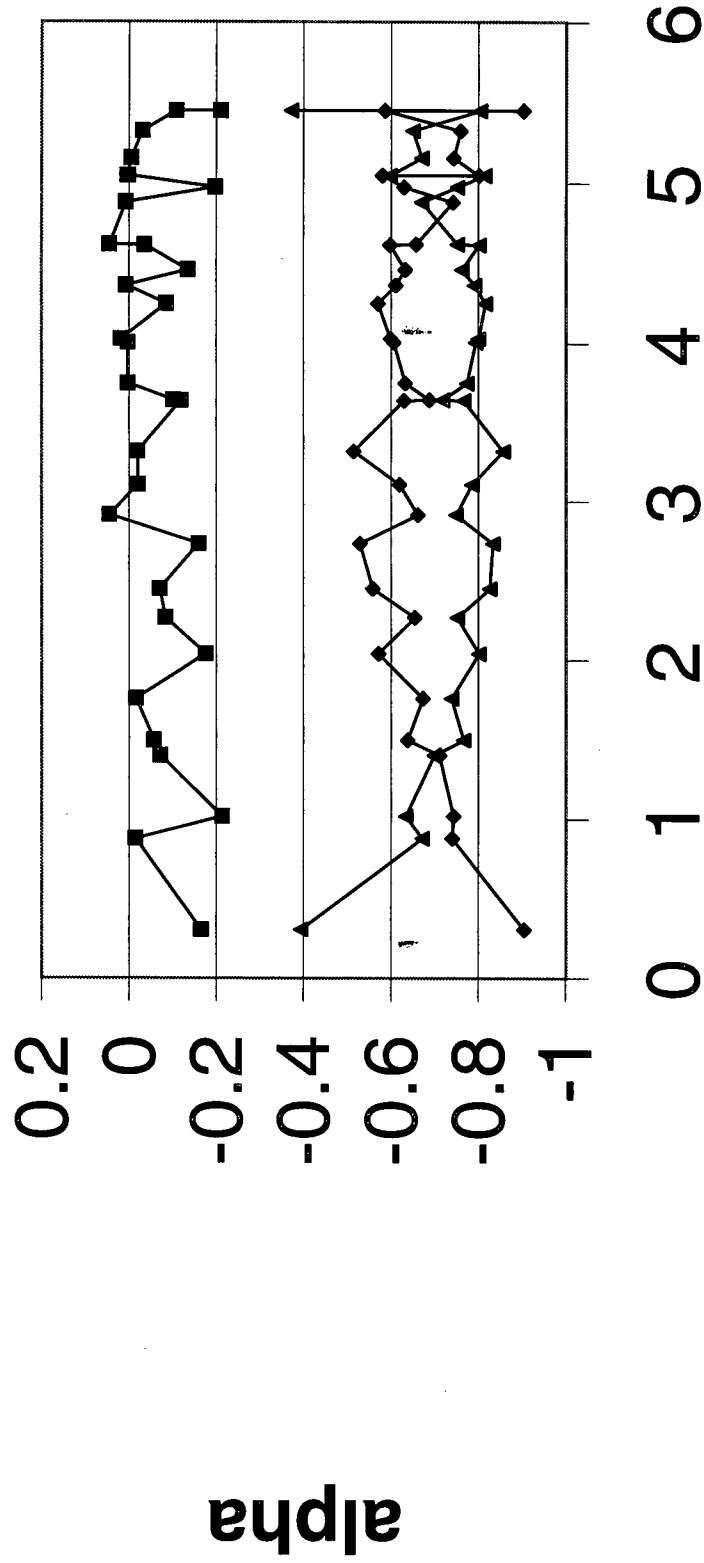


- ◆ Poros
- DI
- ▲ H buit
- × Gat

Variantie in dikte*3 alpha - beta



Variantie in poros *3 alpha - beta



Beta

- Bijlage 25:Ontwerpgrafiek case 4
- Bijlage 26:Partiële factor op de sterkte case 4
- Bijlage 27:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 4
- Bijlage 28:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 4
- Bijlage 29:Ontwerpgrafiek case 2: dicht
- Bijlage 30:Partiële factor op de sterkte case 2: dicht
- Bijlage 31:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: dicht
- Bijlage 32:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: dicht
- Bijlage 33:Ontwerpgrafiek case 2: lek
- Bijlage 34:Partiële factor op de sterkte case 2: lek
- Bijlage 35:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: lek
- Bijlage 36:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: lek
- Bijlage 37:Ontwerpgrafiek case 2: gat
- Bijlage 38:Partiële factor op de sterkte case 2: gat
- Bijlage 39:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: gat
- Bijlage 40:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: gat
- Bijlage 41:Ontwerpgrafiek case 3: geen spleet
- Bijlage 42:Partiële factor op de sterkte case 3: geen spleet
- Bijlage 43:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 3: geen spleet
- Bijlage 44:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 3: geen spleet
- Bijlage 45:Ontwerpgrafiek case 3: spleet
- Bijlage 46:Partiële factor op de sterkte case 3: spleet
- Bijlage 47:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 3: spleet
- Bijlage 48:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 3: spleet
- Bijlage 49:Partiële factor op de sterkte case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 50:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 51:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 52:Partiële factor op de sterkte case 2: gem. gat/10
- Bijlage 53:Verband ontwerpwaarden Iwand/Igloobaal en karakteristieke en gemiddelde waarden van Iwand/Igloobaal: case 2: gem. gat/10
- Bijlage 54:Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D: case 2: gem. gat/10
- Bijlage 55:Partiële factor op de sterkte case 2: V laagdikte *3

Bijlage 56: Verband ontwerpwaarden $I_{wand}/I_{globaal}$ en karakteristieke en gemiddelde waarden van $I_{wand}/I_{globaal}$: case 2: V laagdikte *3

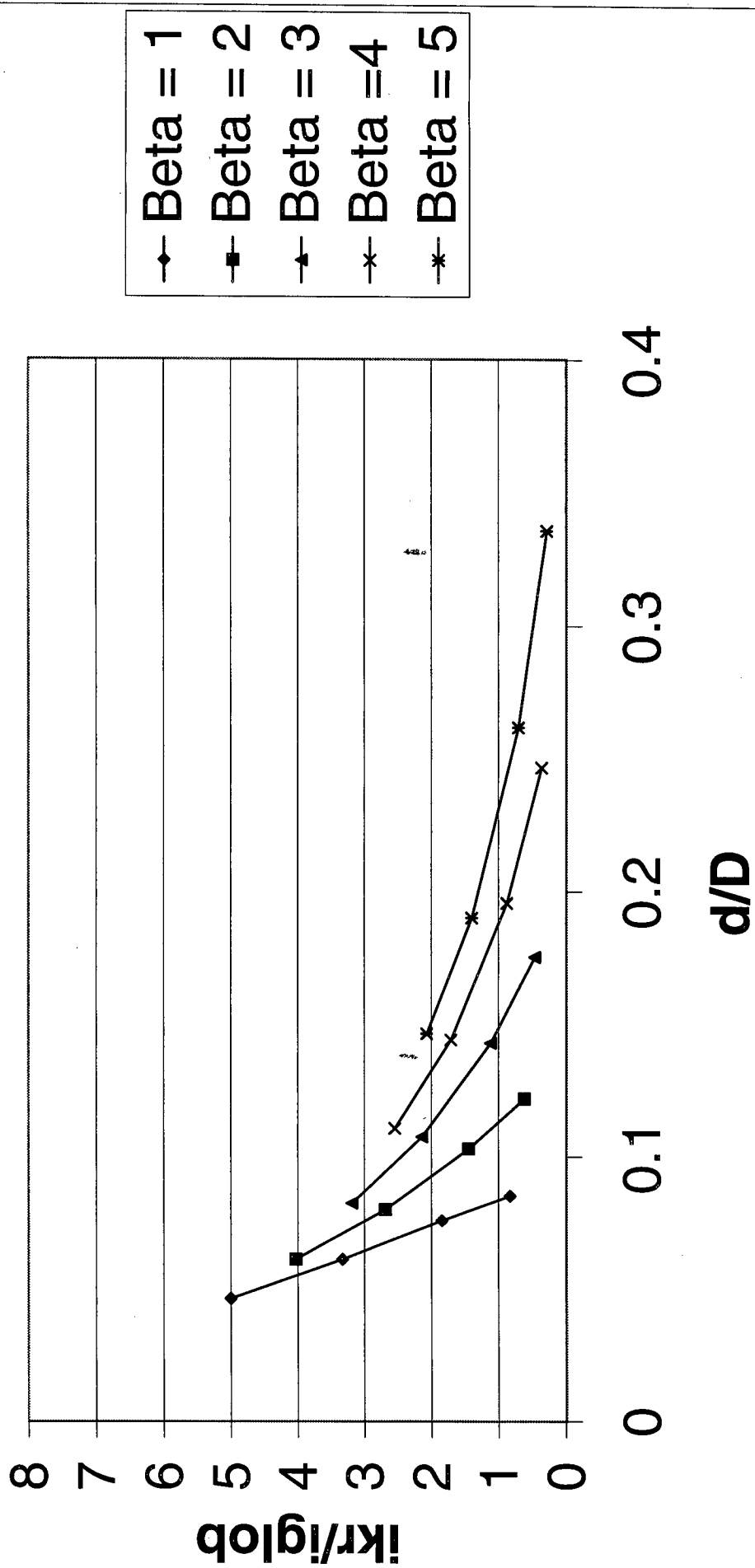
Bijlage 57: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D : case 2: V laagdikte *3

Bijlage 58: Partiële factor op de sterkte case 2: V porositeit *3

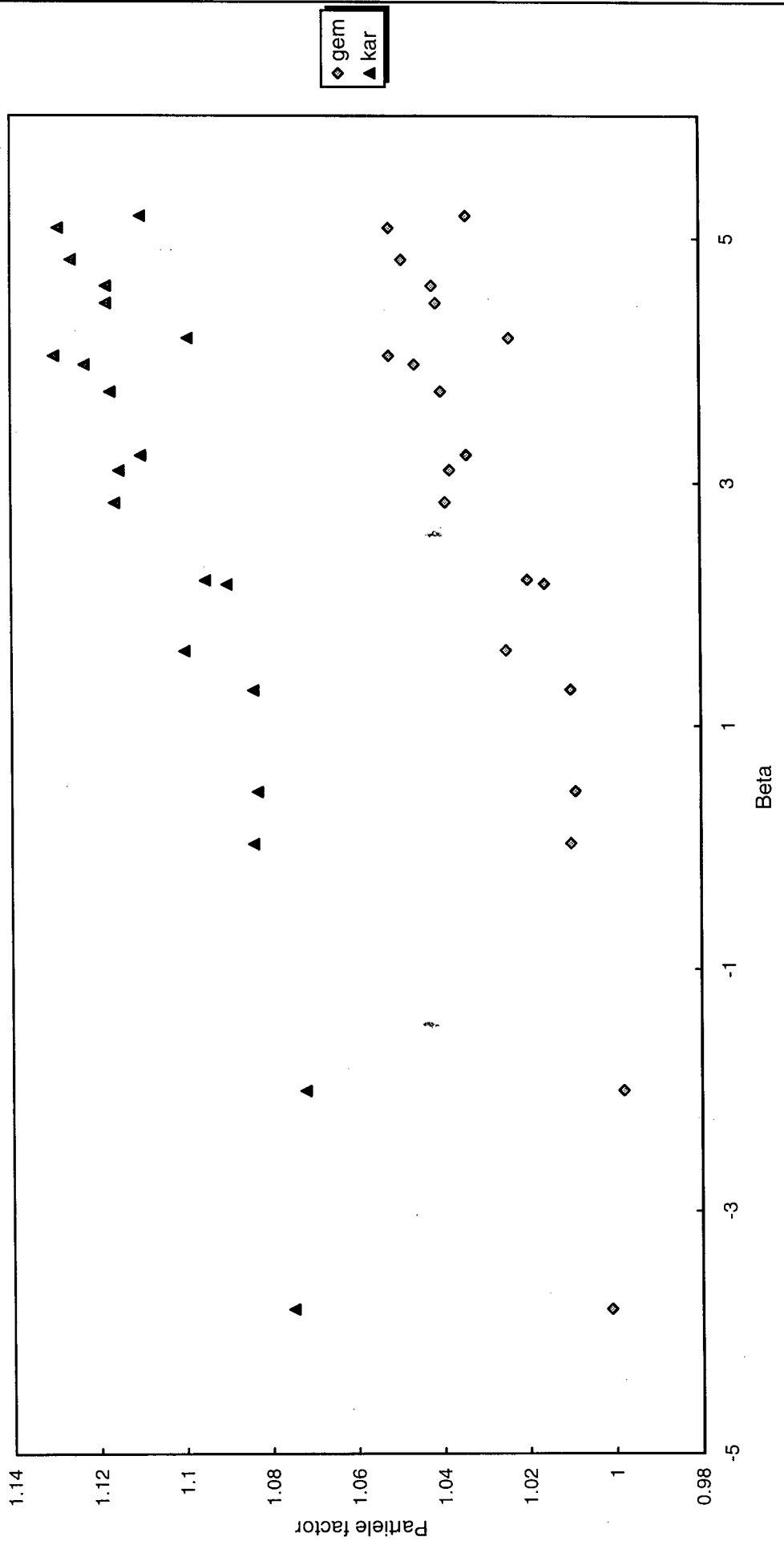
Bijlage 59: Verband ontwerpwaarden $I_{wand}/I_{globaal}$ en karakteristieke en gemiddelde waarden van $I_{wand}/I_{globaal}$: case 2: V porositeit *3

Bijlage 60: Verband ontwerpwaarden d/D en karakteristieke en gemiddelde waarden van d/D : case 2: V porositeit *3

buitenhoofd

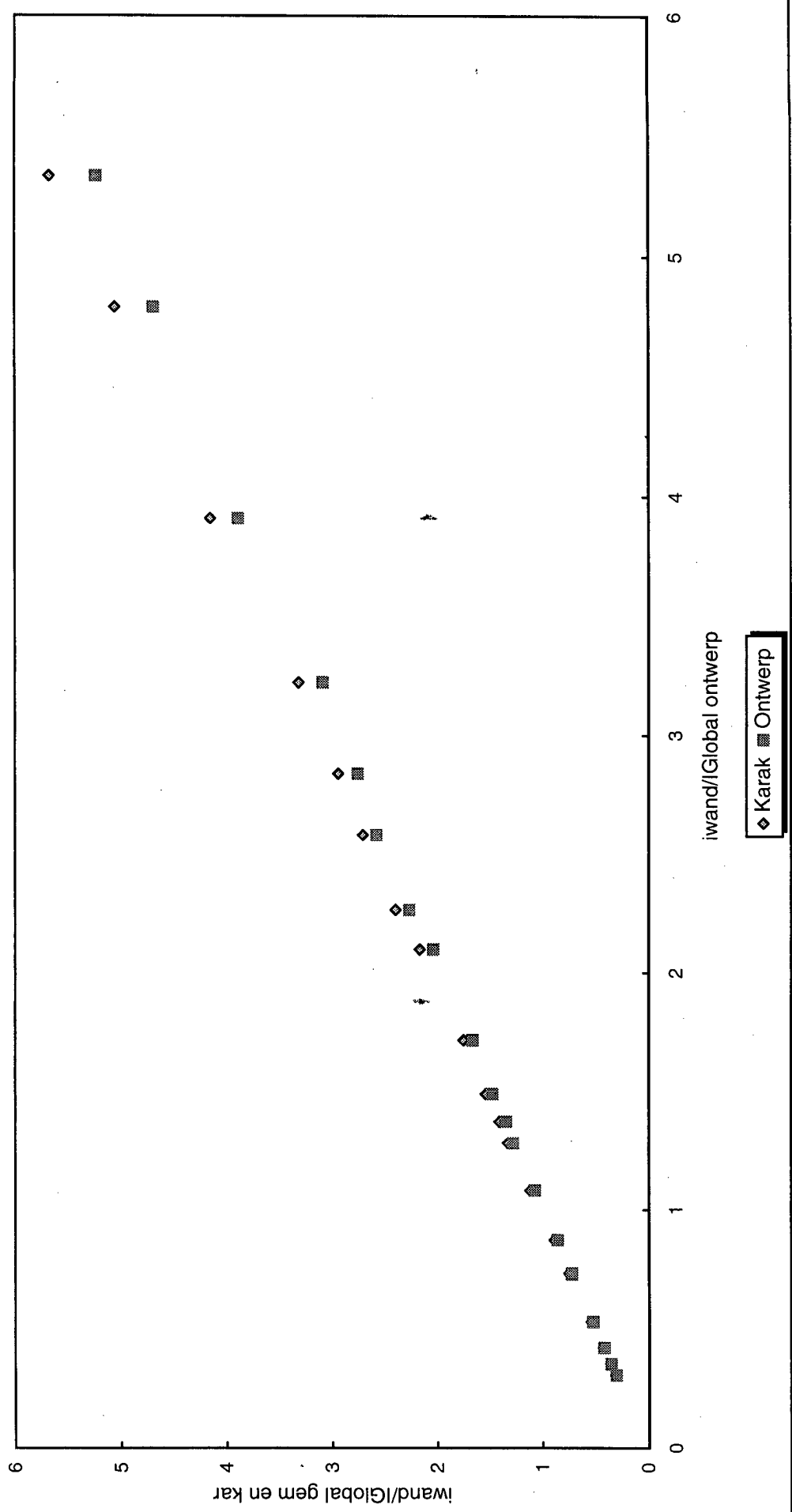


Buitenhoofd
Partiele factoren op sterkte



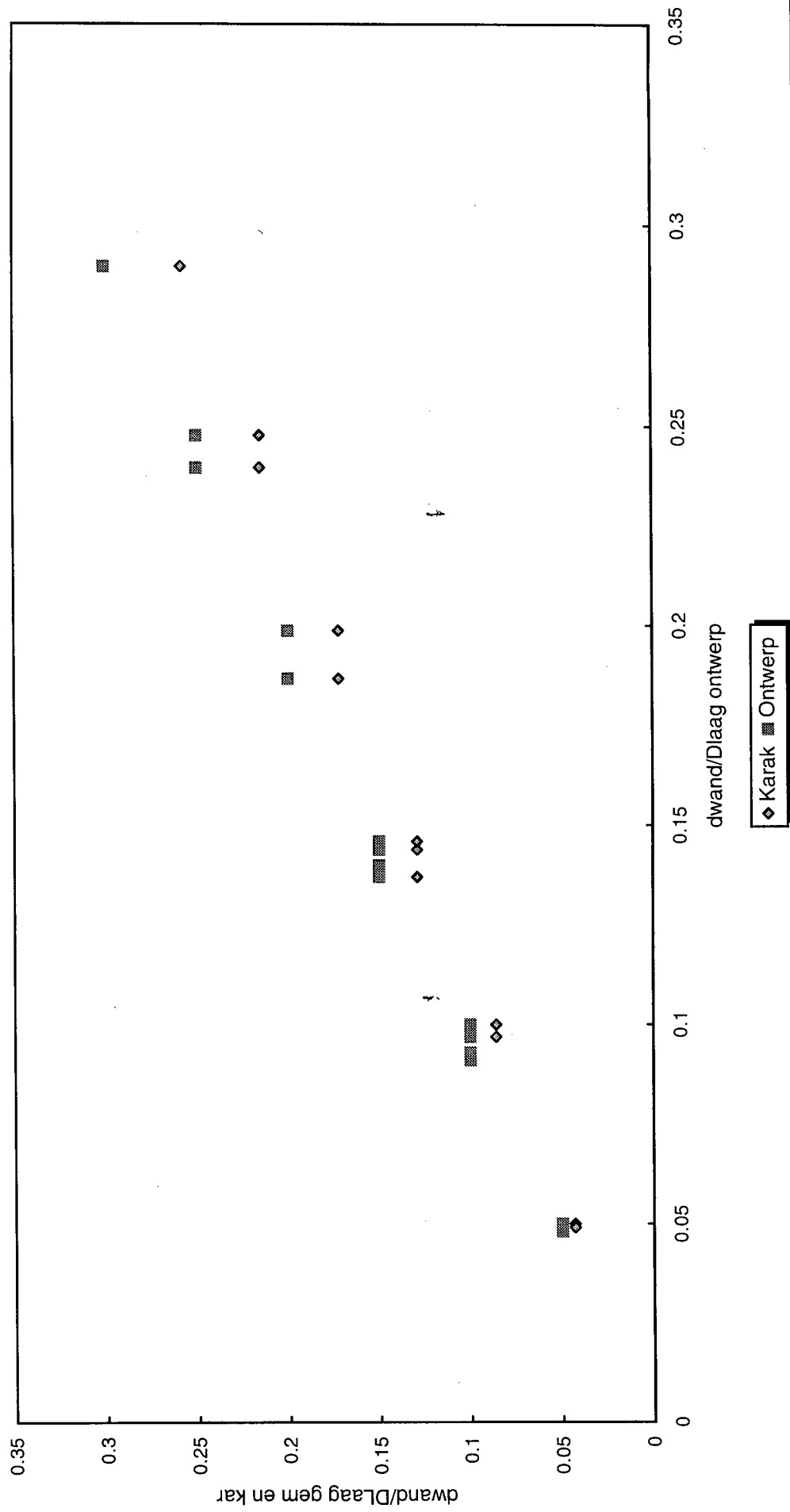
◆ gem
▲ kar

Buiten hoofd : ikr/IGlobal
ontwerp tegen gem en kar

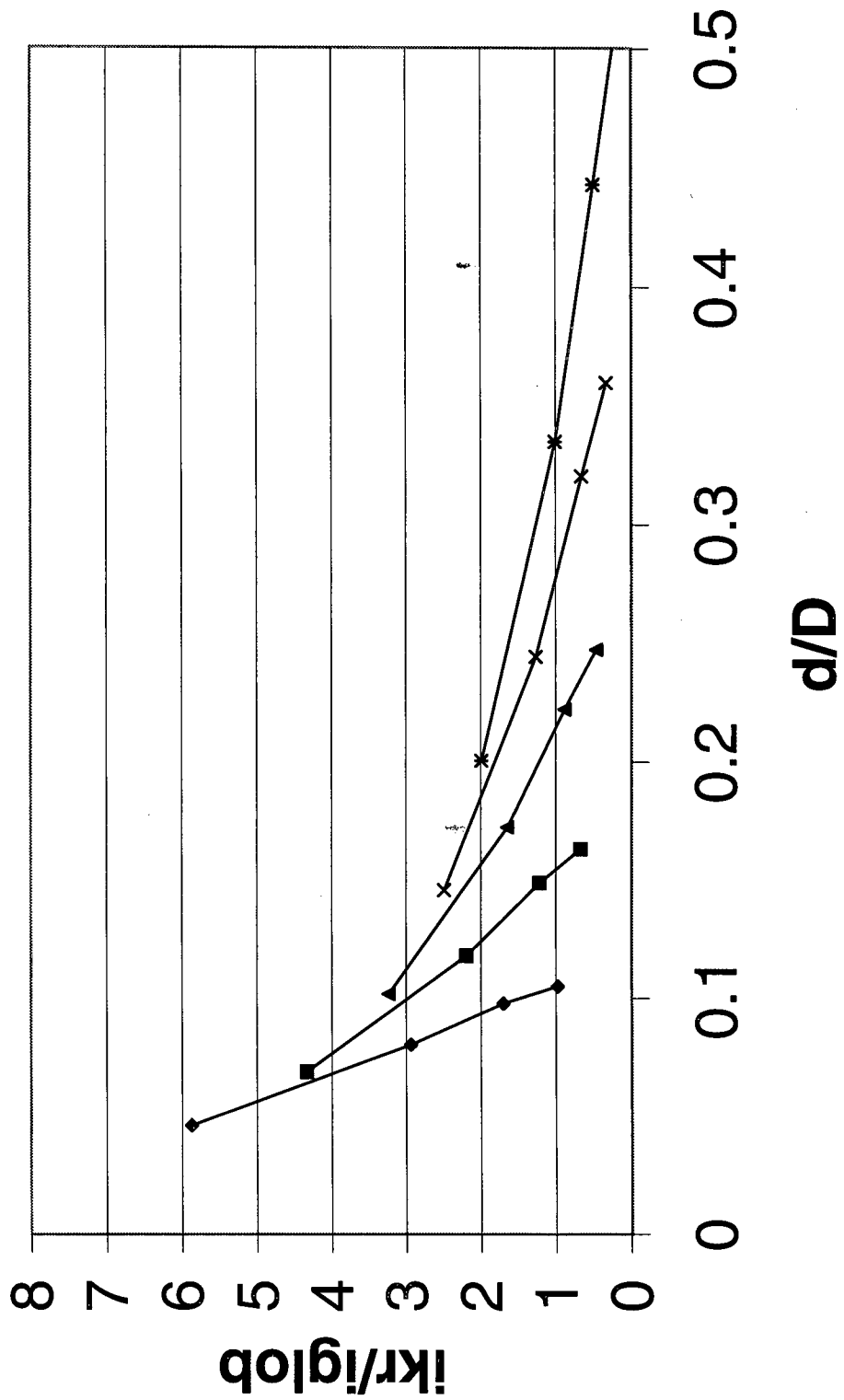


Buiten hoofd : damwand over laagdikte

ontwerp tegen gem en kar

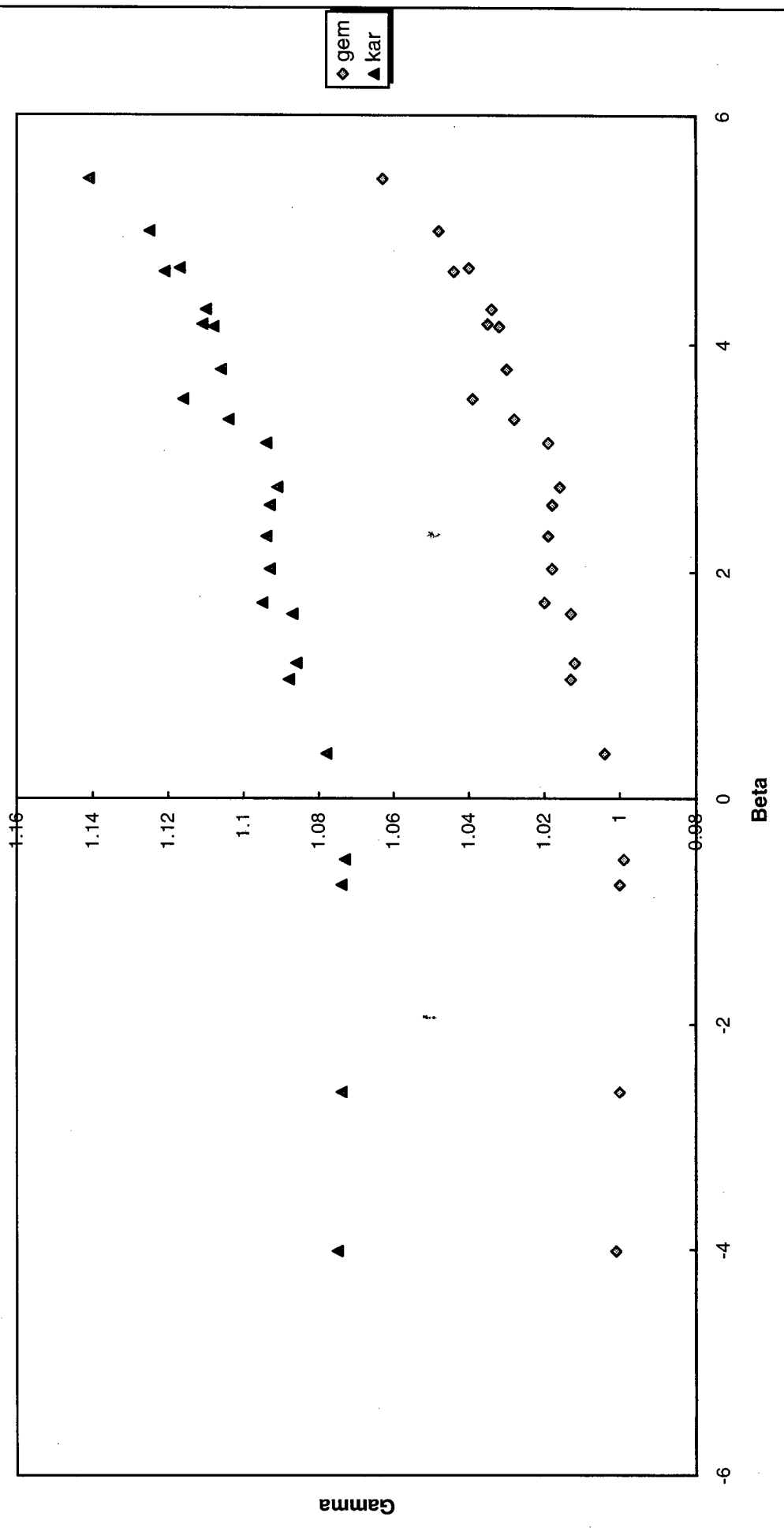


Dicht



- ◆ Beta = 1
- Beta = 2
- ▲ Beta = 3
- × Beta = 4
- * Beta = 5

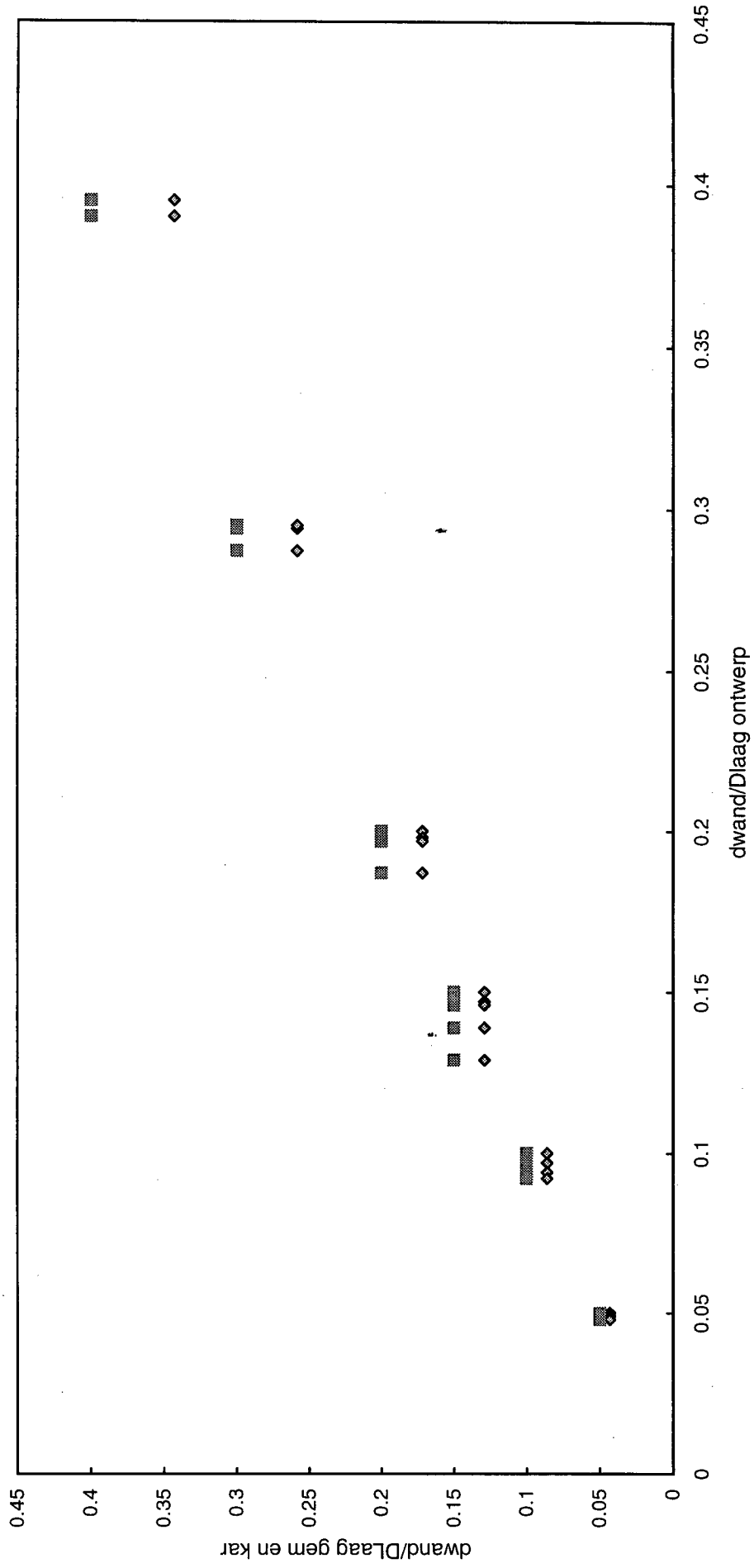
Dichte damwand
Partiele factoren op sterkte



◆ gem
▲ kar

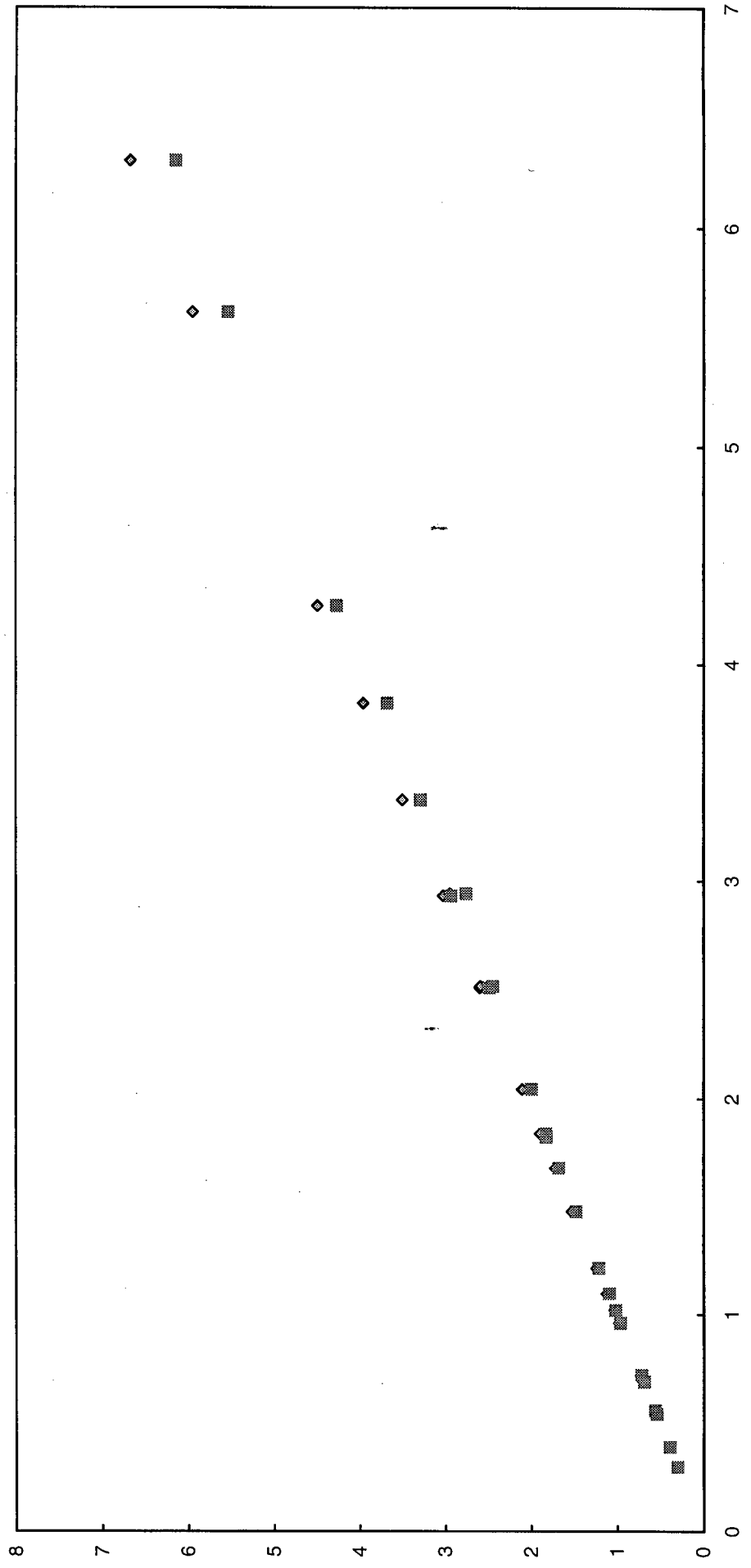
Dichte damwand : damwand over laagdikte

ontwerp tegen gem en kar



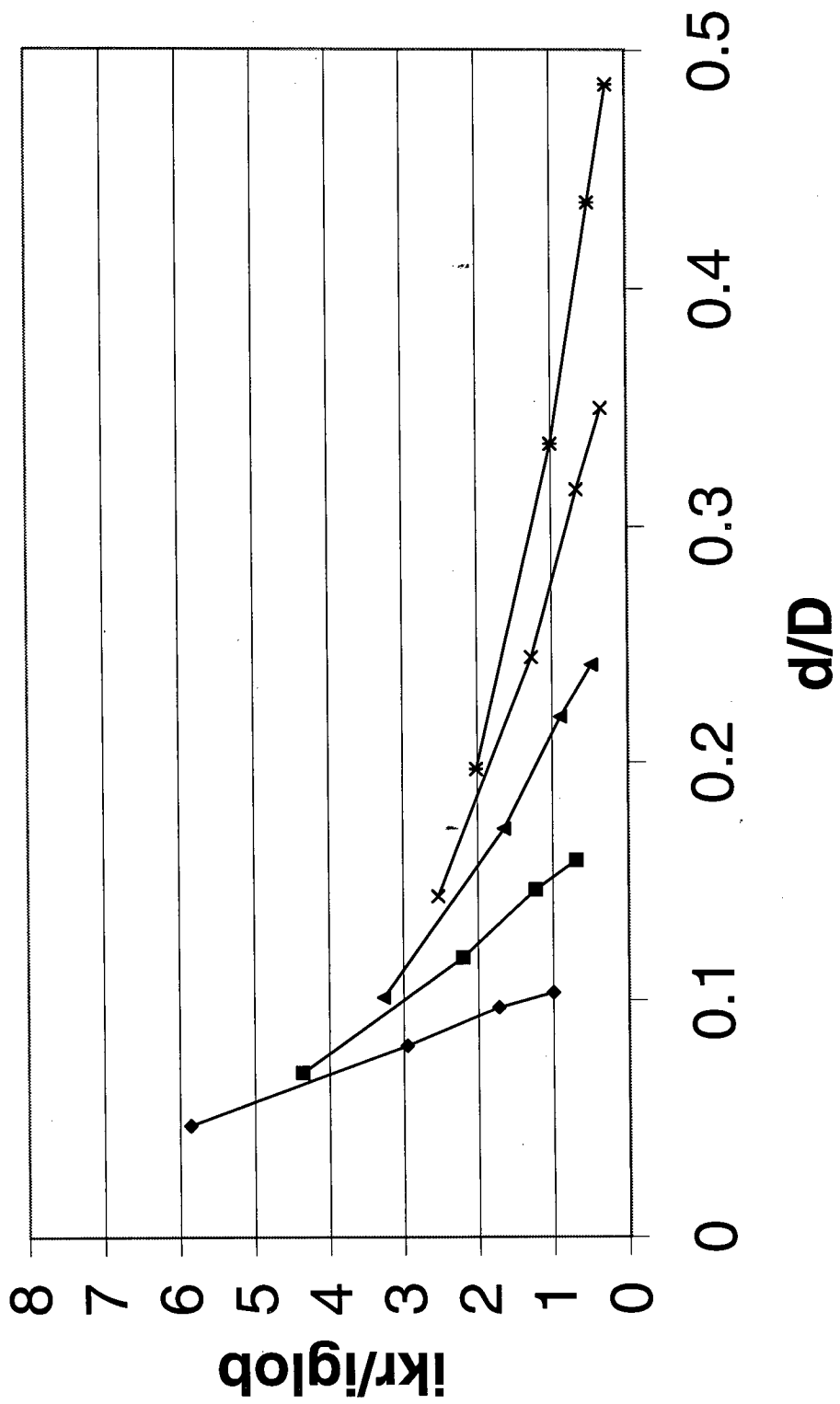
◆ Karak ■ Ontwerp

Dichte damwand : ikr/IGlobal
 ontwerp tegen gem en kar

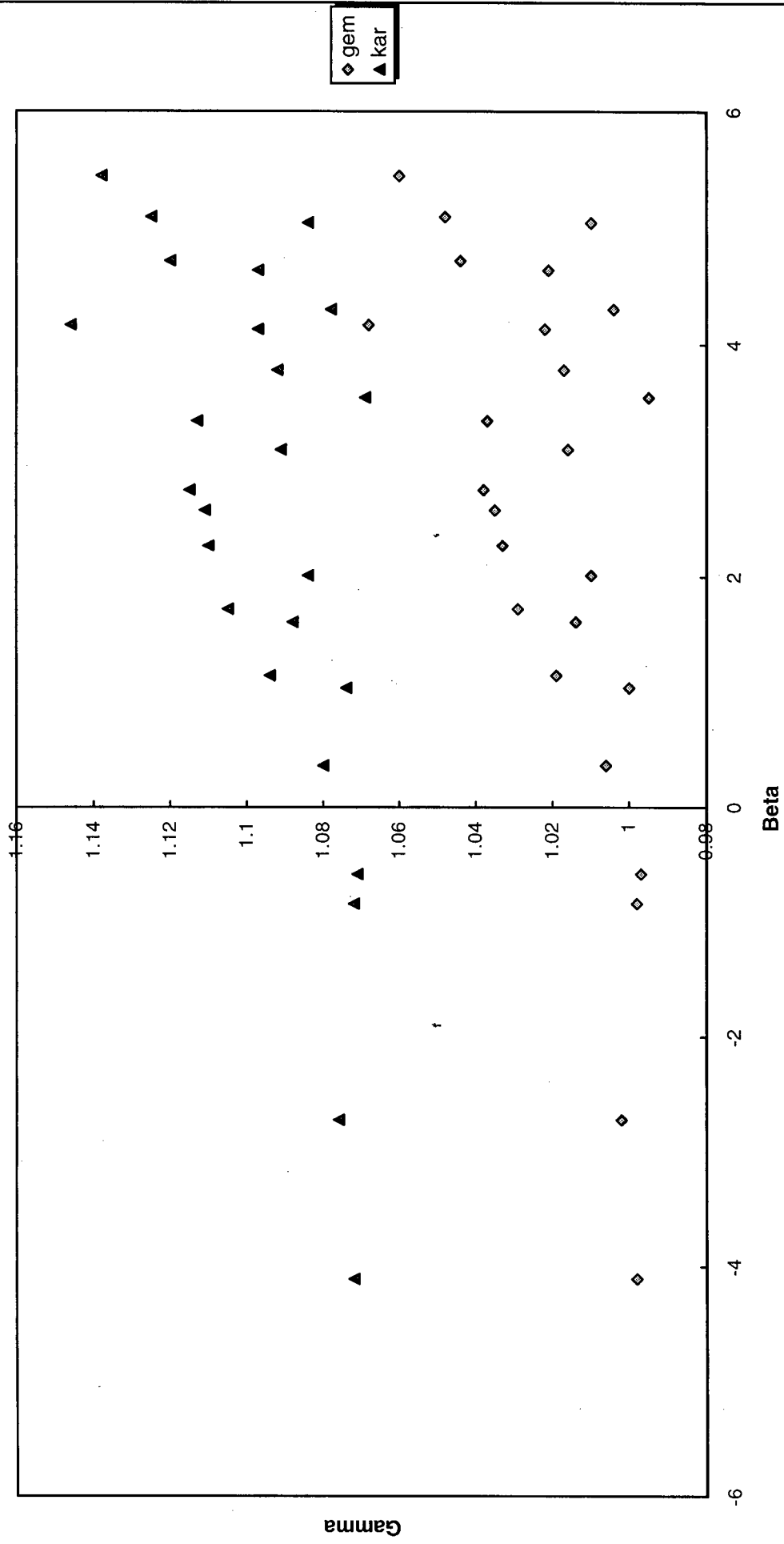


◆ Karak ■ Ontwerp

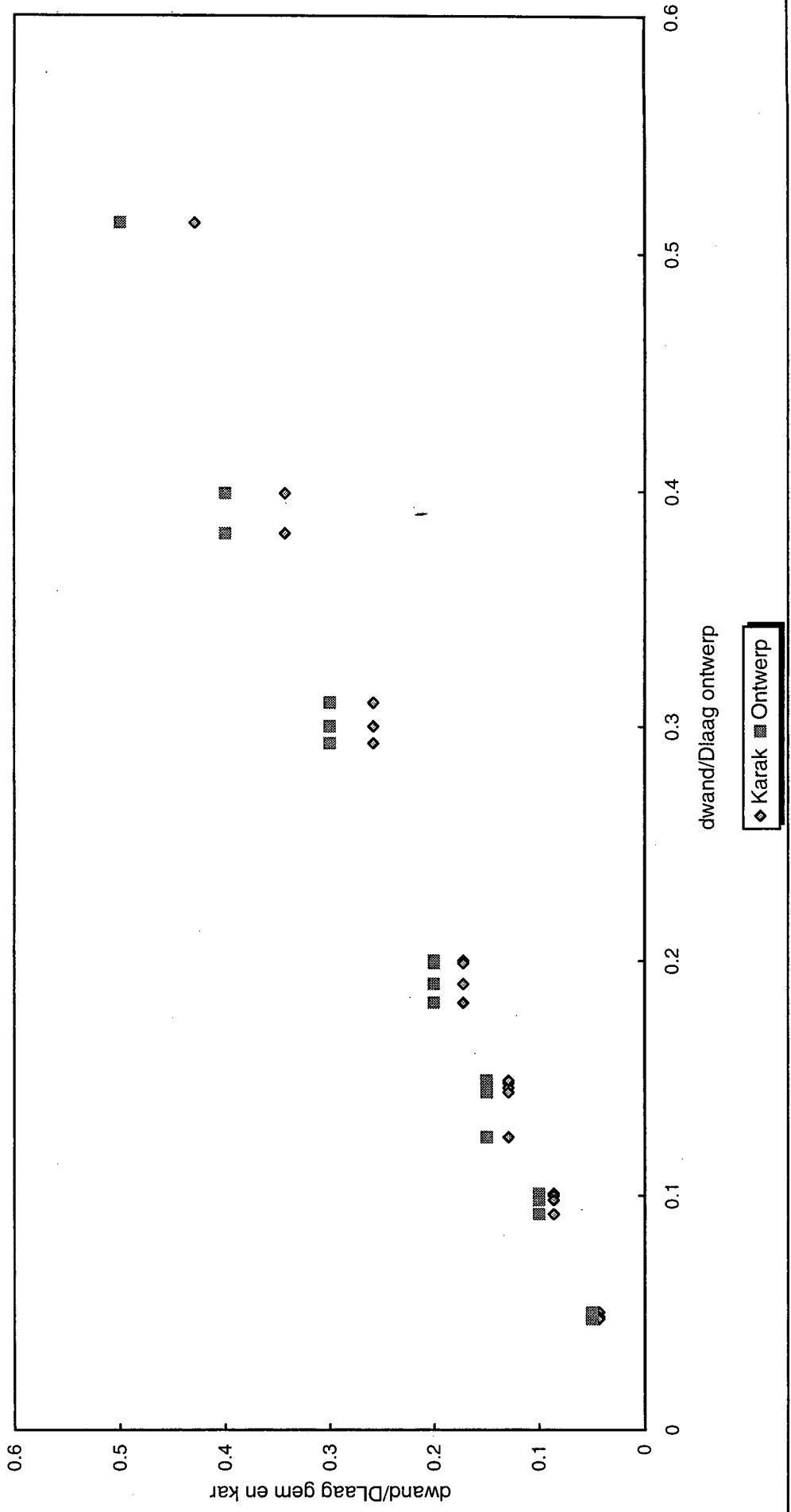
Lek



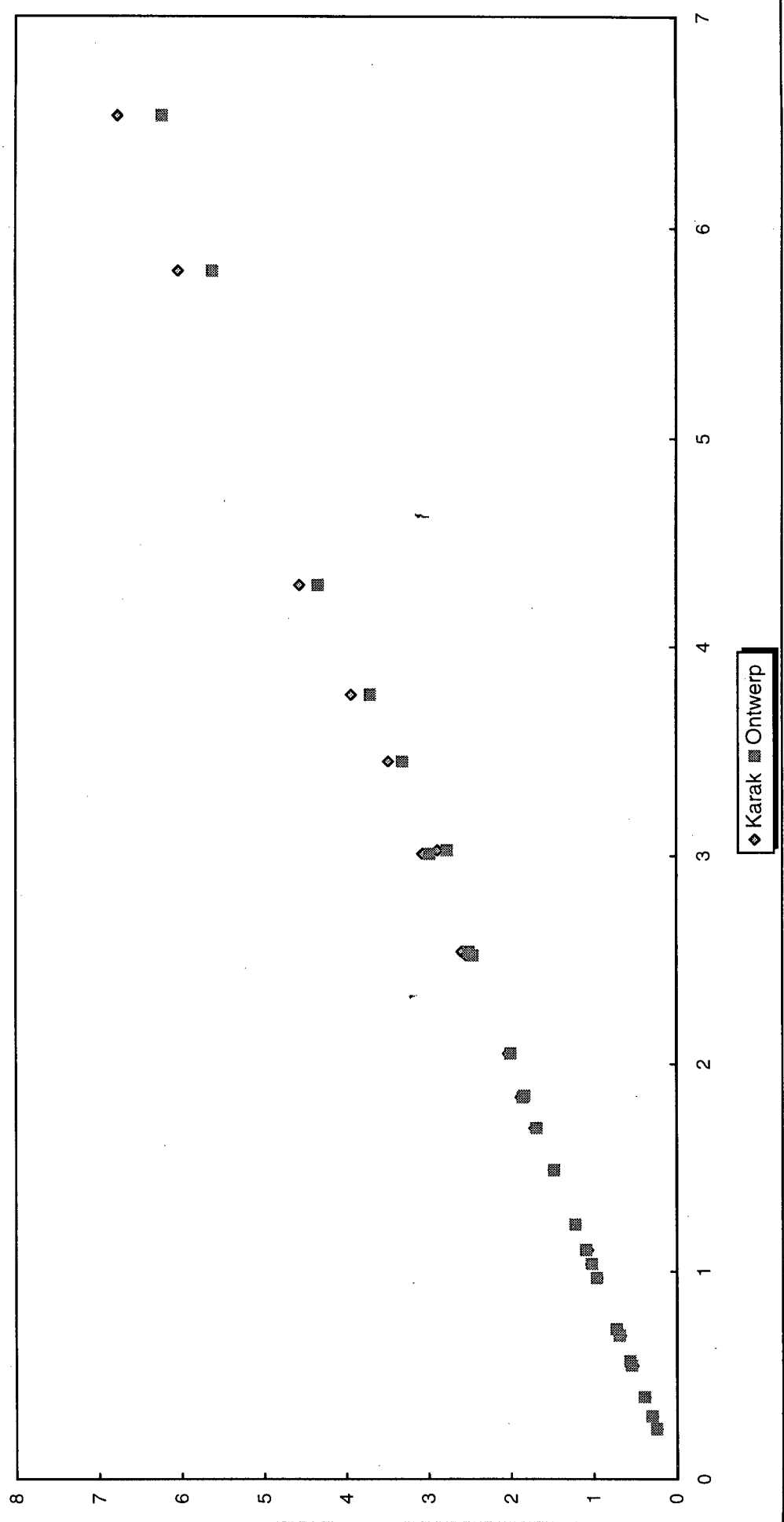
Damwand met lek
Partiele factoren op sterkte



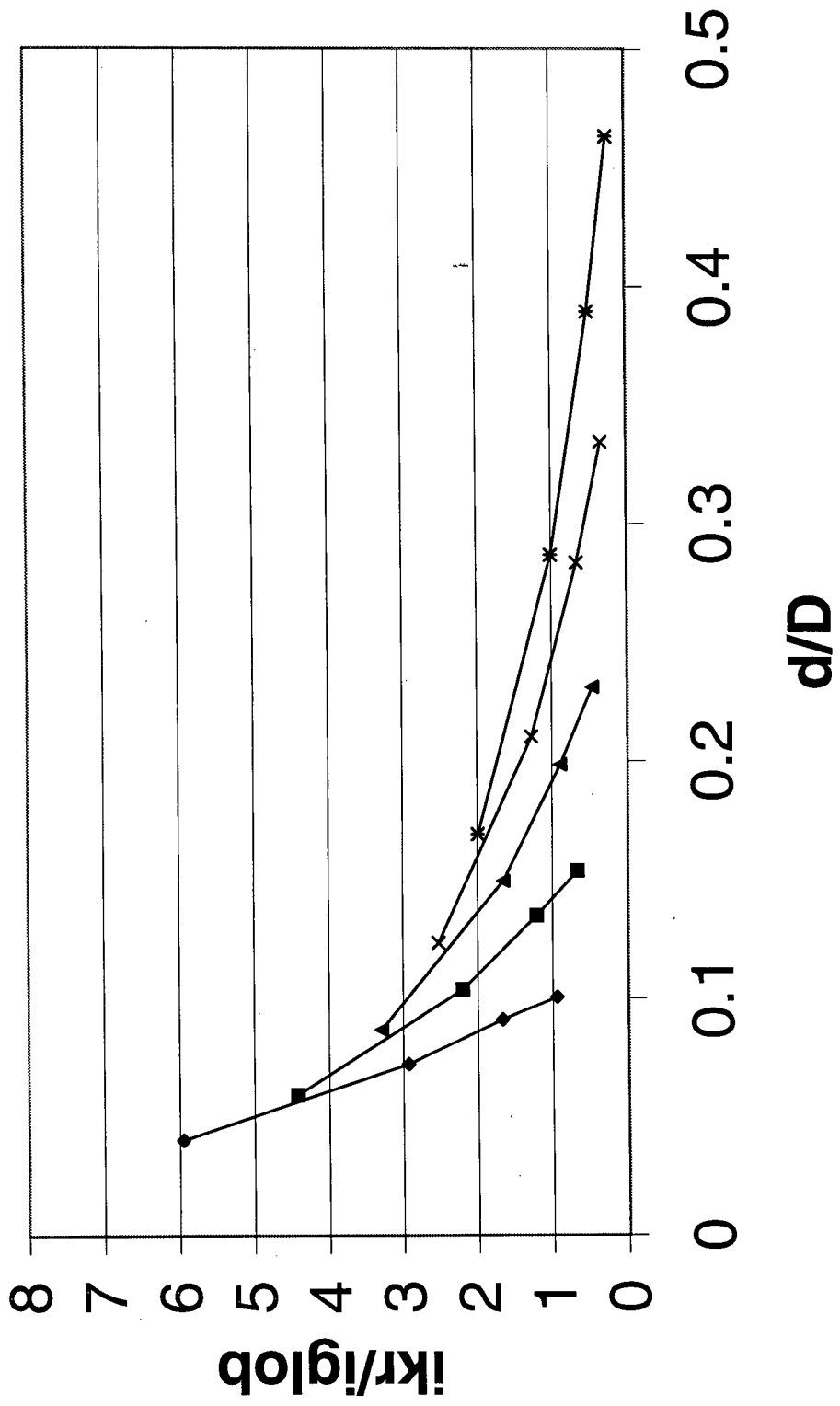
Damwand met lek : damwand over laagdikte
ontwerp tegen gem en kar



Damwand met lek : ikr/IGlobal
ontwerp tegen gem en kar

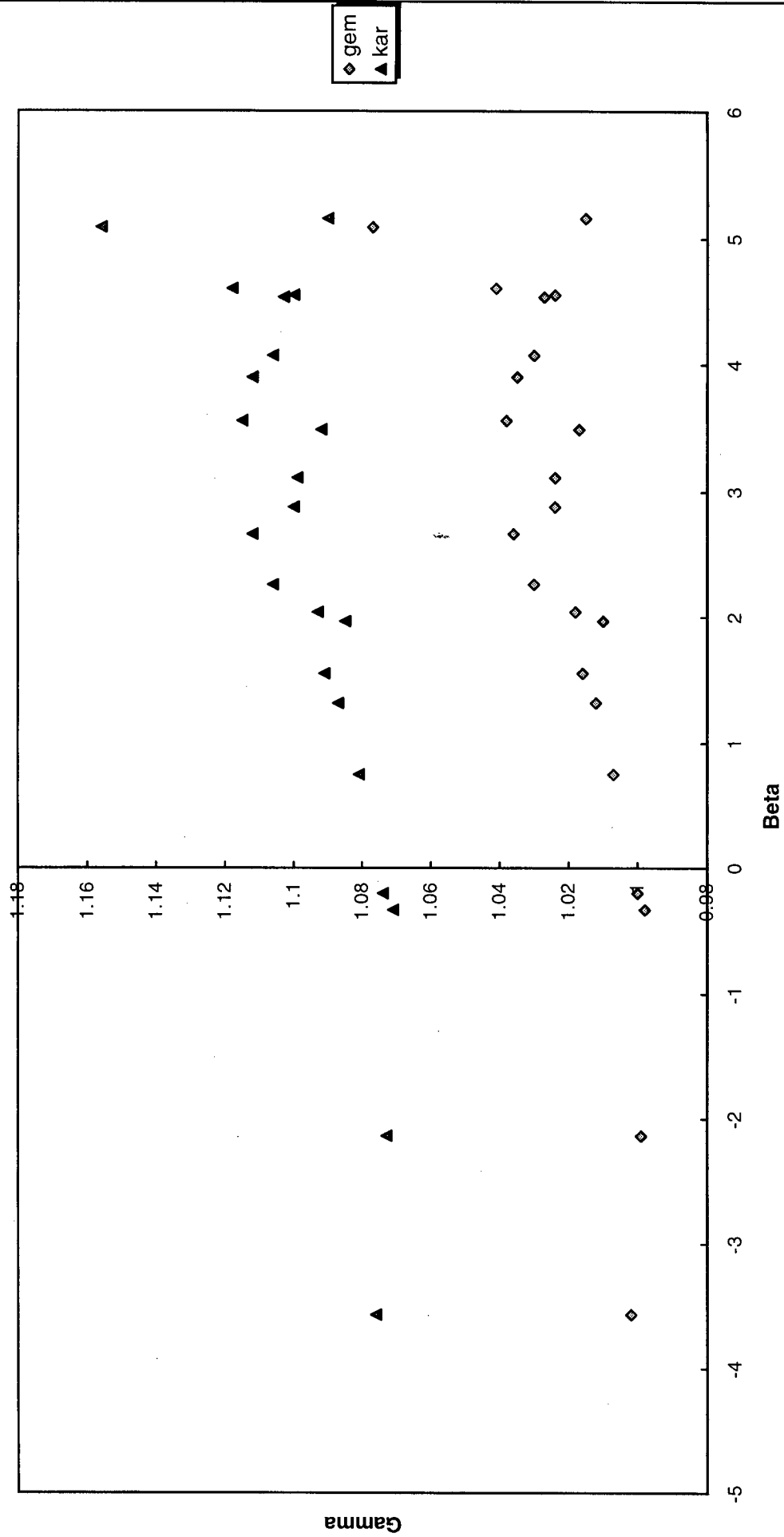


Gat

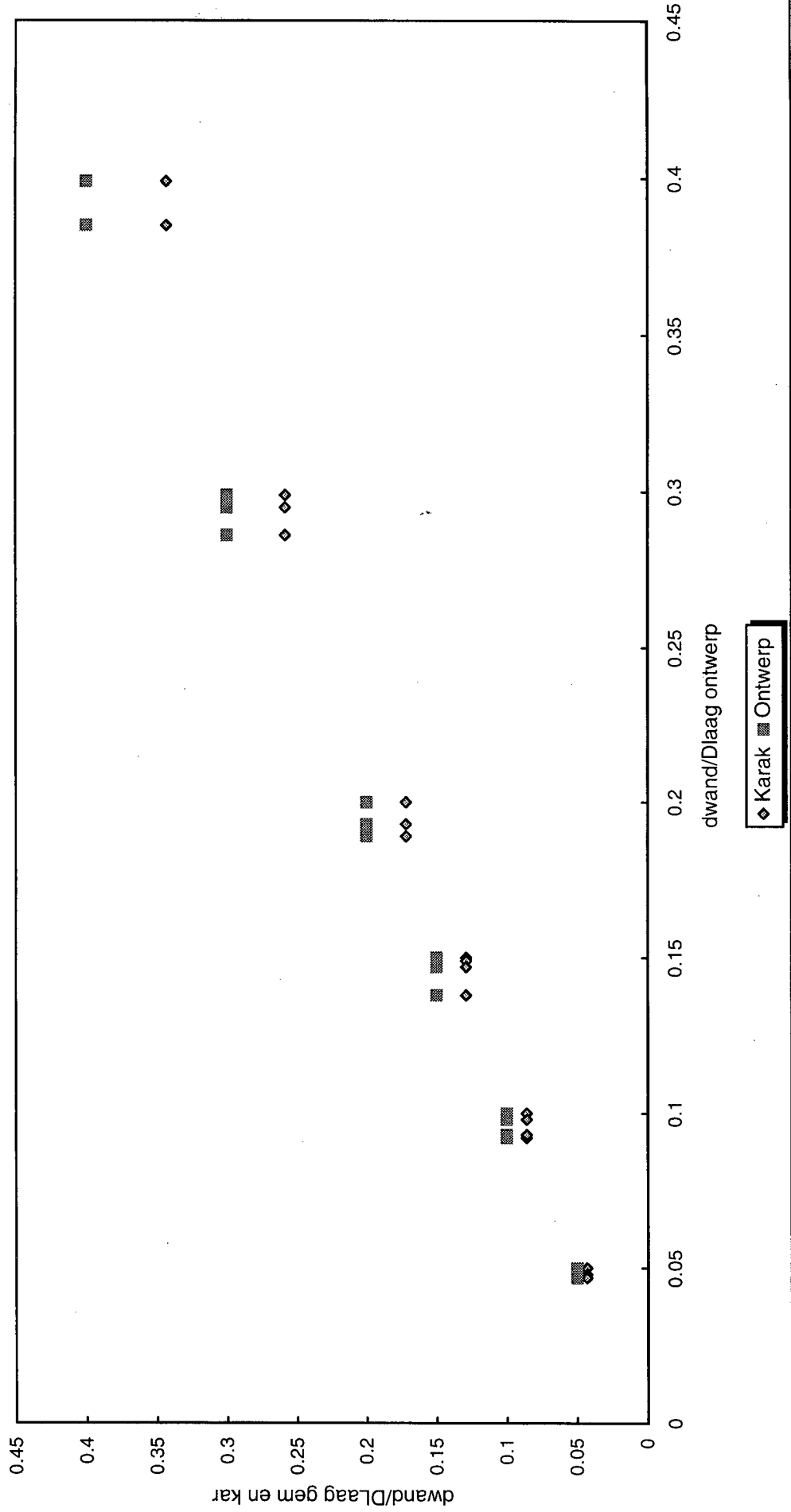


- ◆ Beta = 1
- Beta = 2
- ▲ Beta = 3
- × Beta = 4
- * Beta = 5

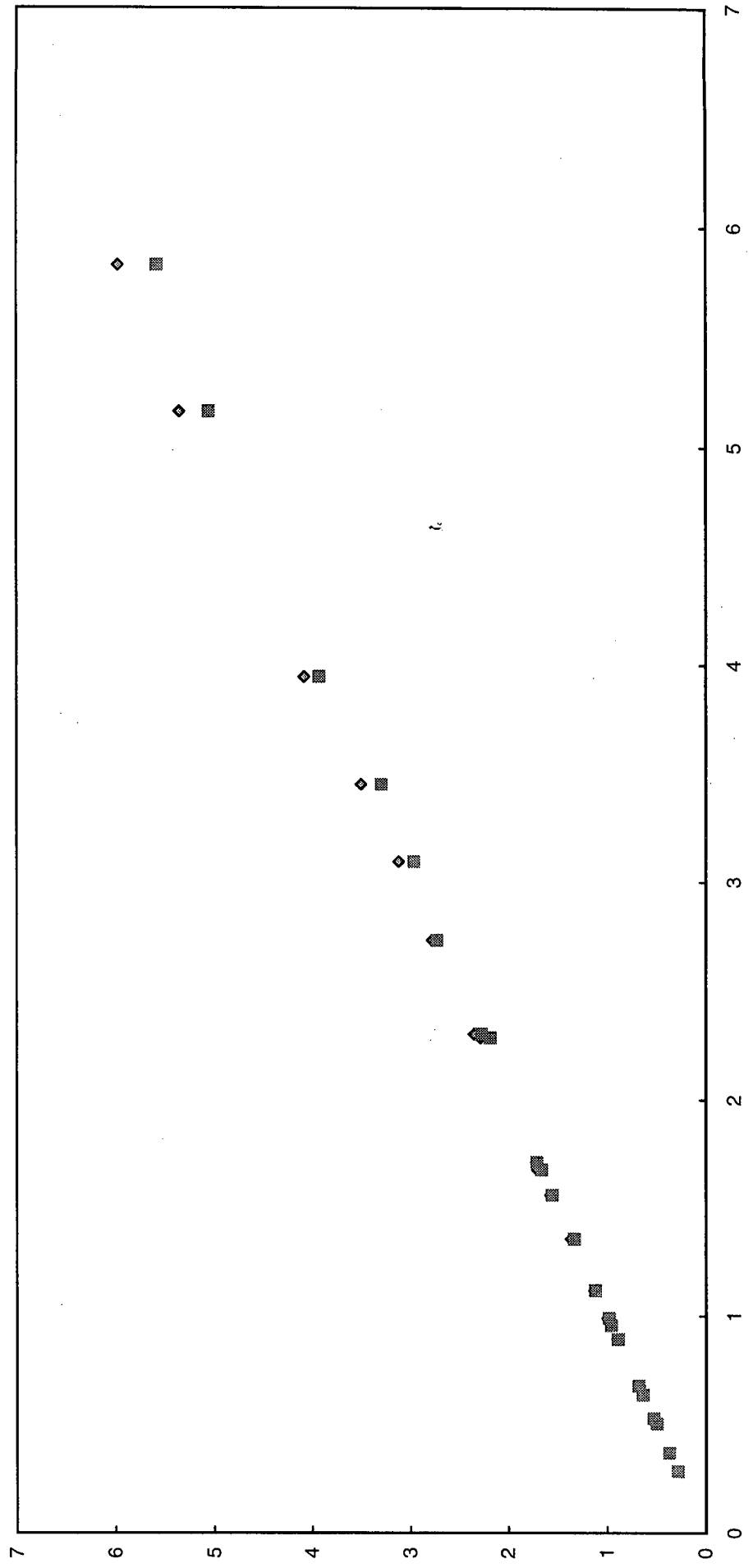
Damwand met gat
Partiele factoren op sterkte



Damwand met gat : damwand over laagdikte
ontwerp tegen gem en kar

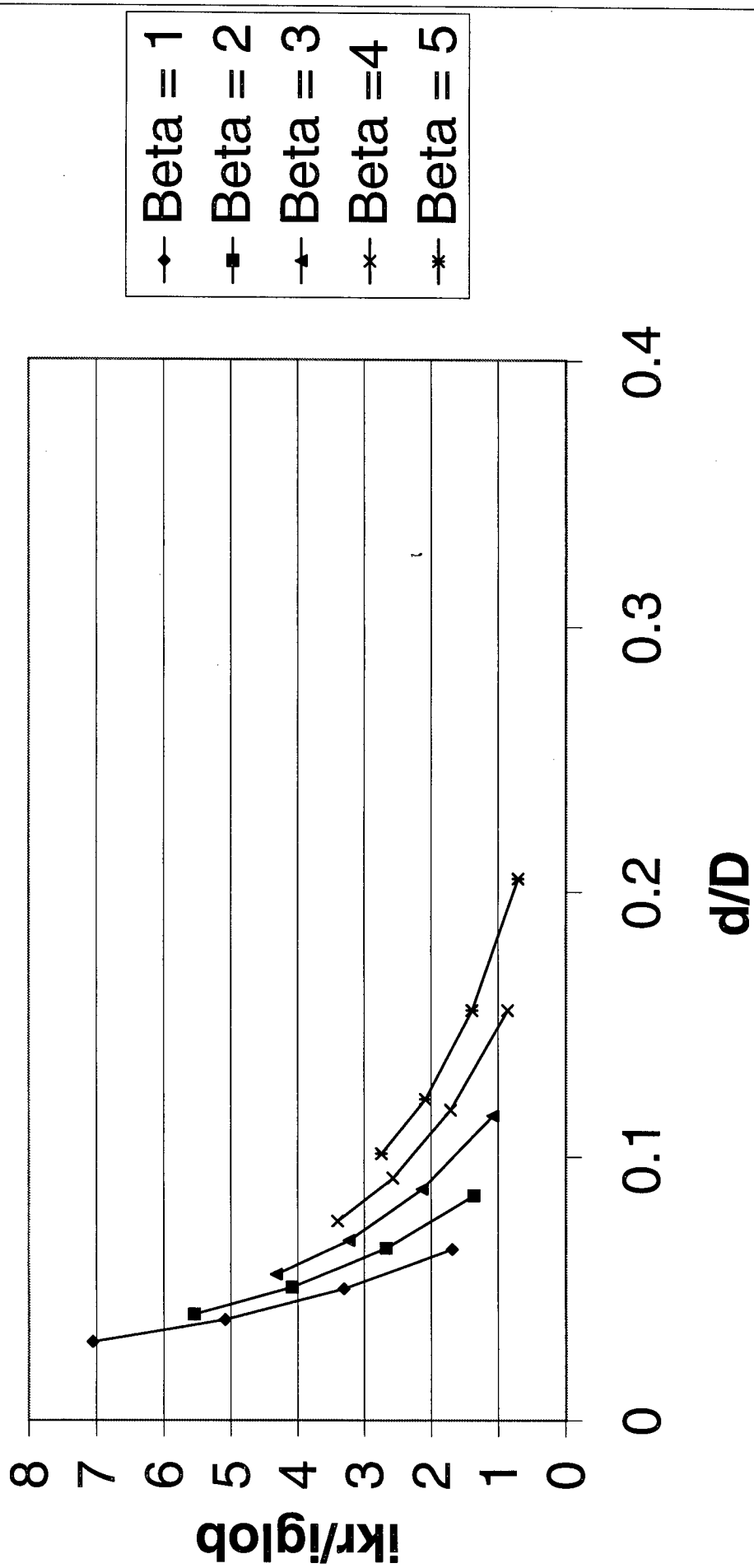


Damwand met gat : ikr/IGlobal
ontwerp tegen gem en kar

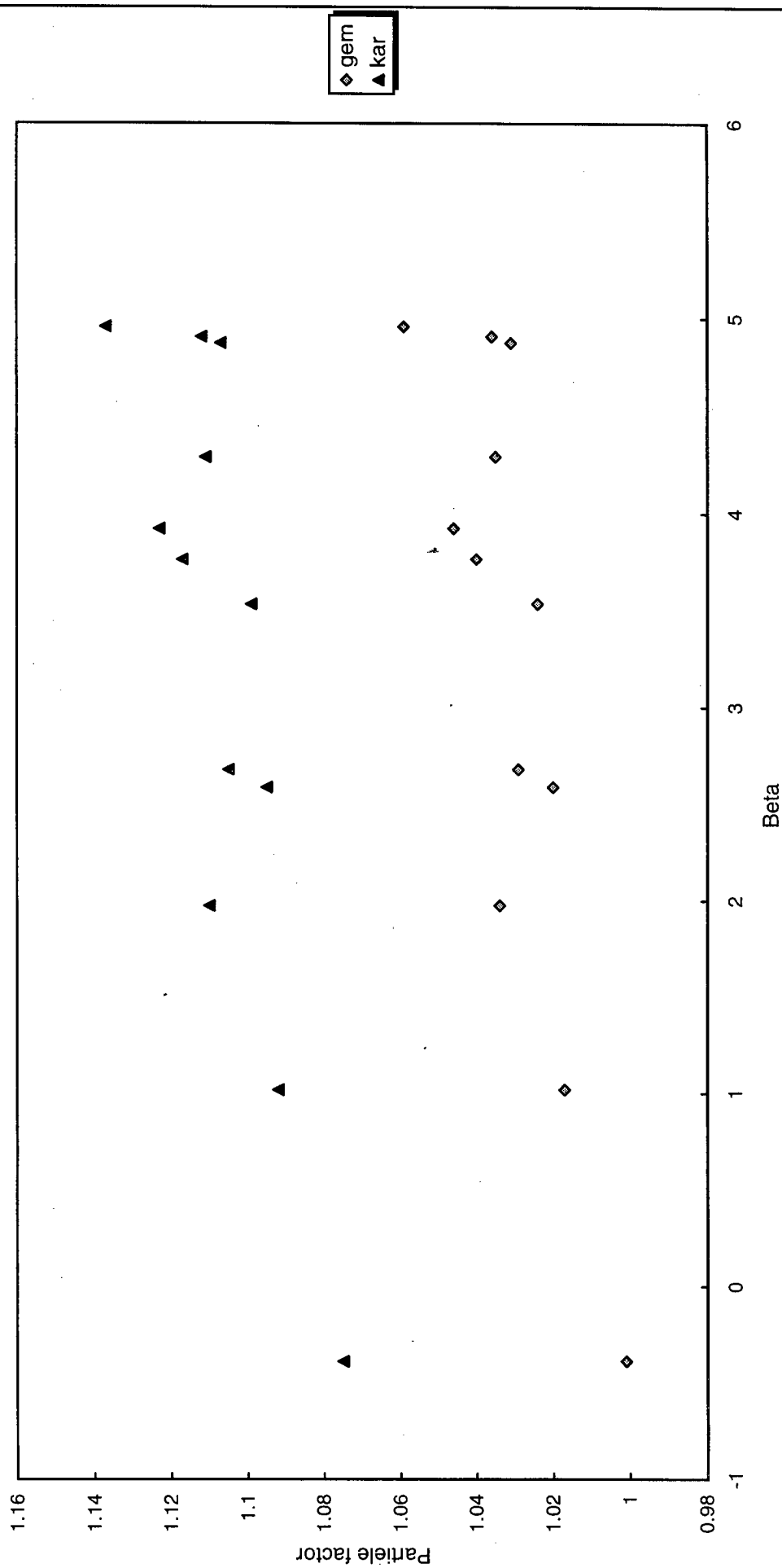


◆ Karak ■ Ontwerp

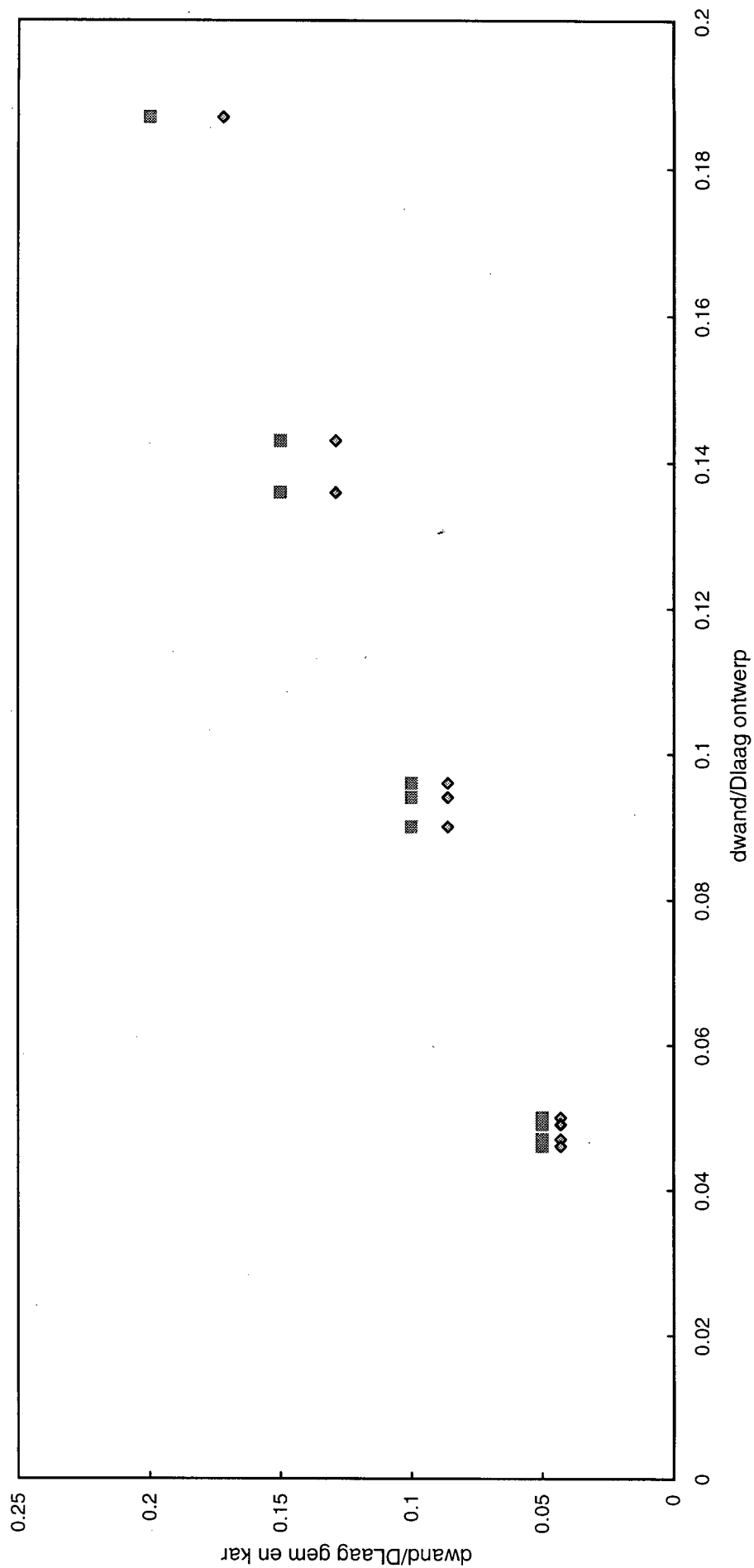
Geen zetting



Zonder zetting
Partiele factoren op sterkte

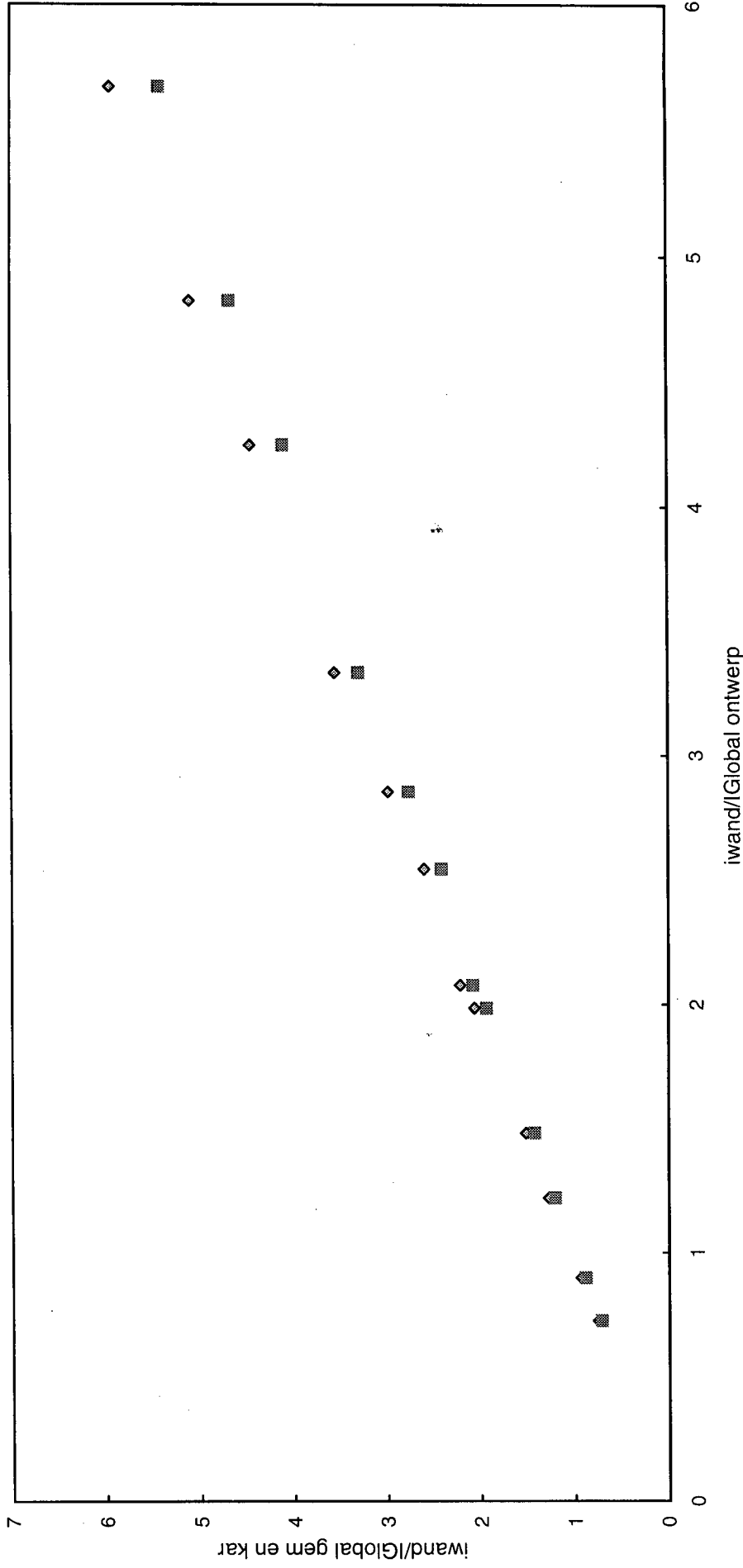


Zonder zetting : damwand over laagdikte
ontwerp tegen gem en kar



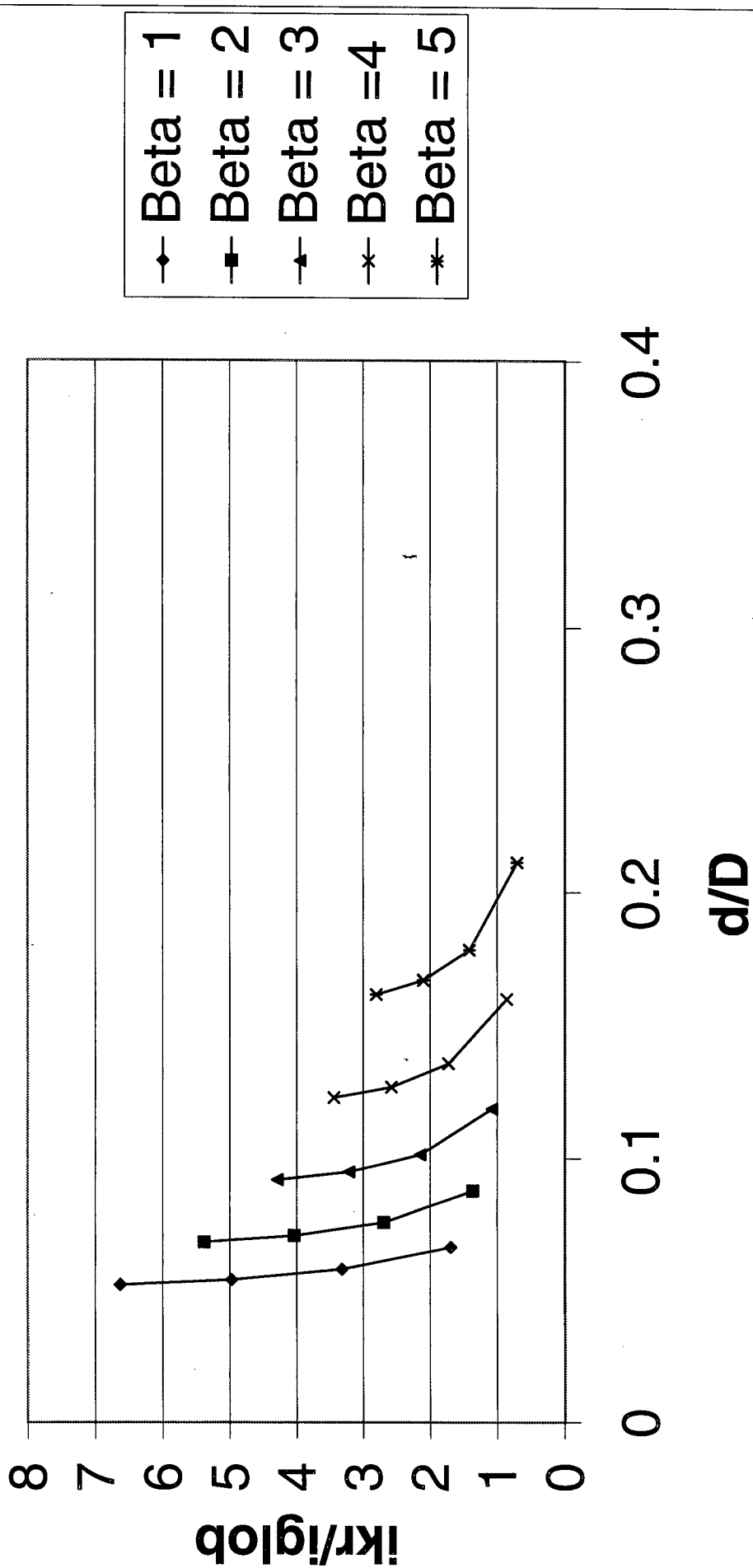
◆ Karak ■ Ontwerp

Zonder zetting : ikr/Global
ontwerp tegen gem en kar

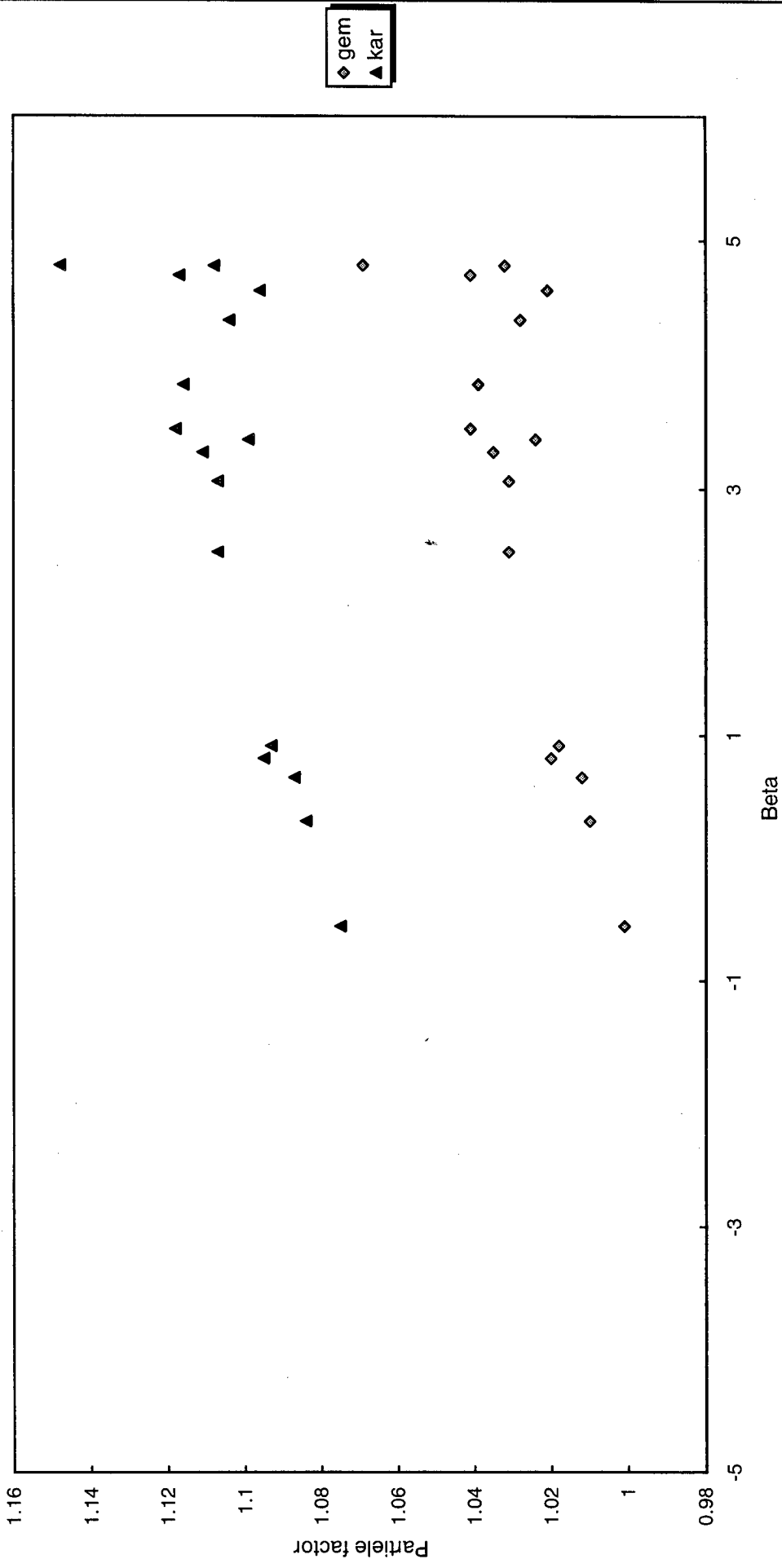


◆ Karak ■ Ontwerp

Zetting

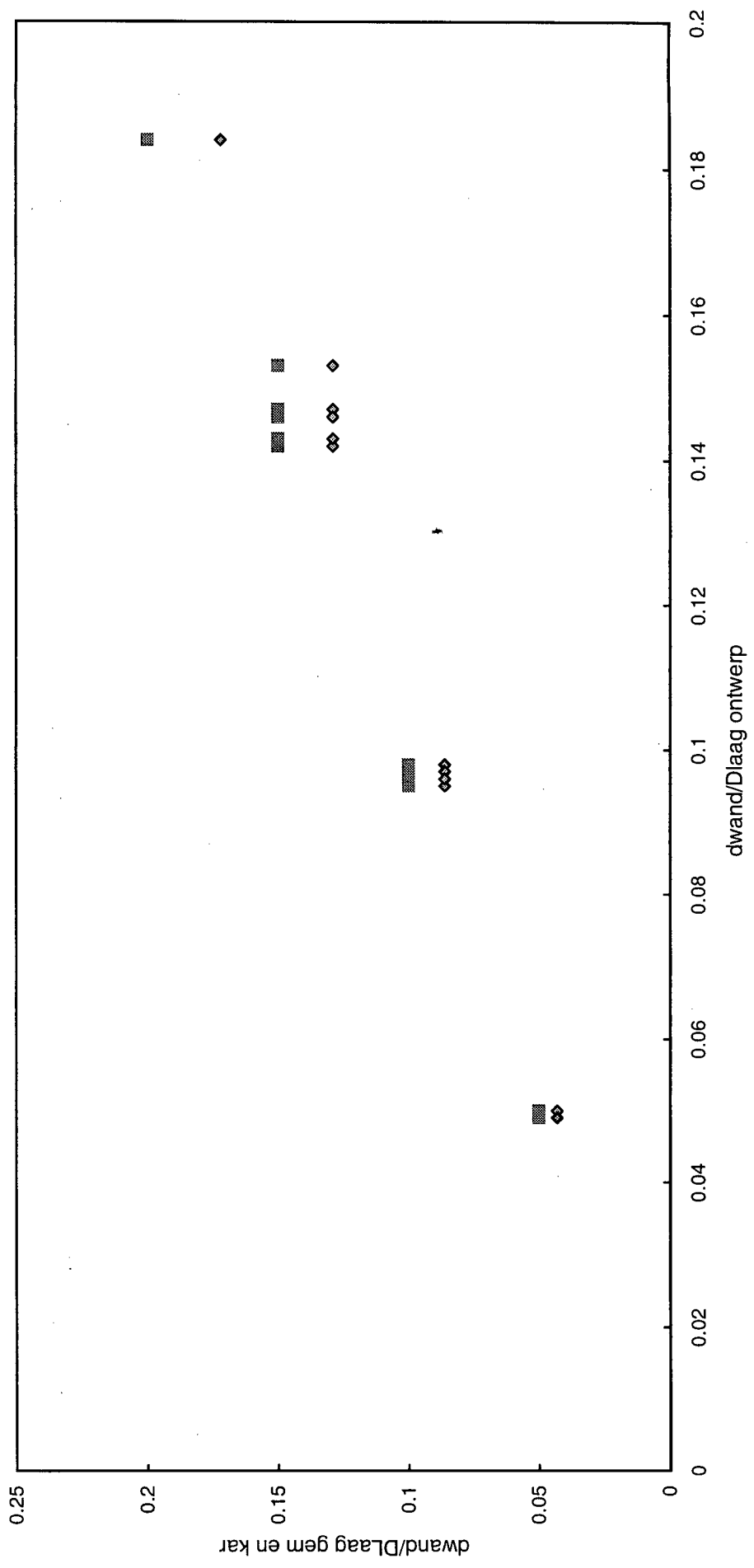


Zetting
Partiele factoren op sterkte



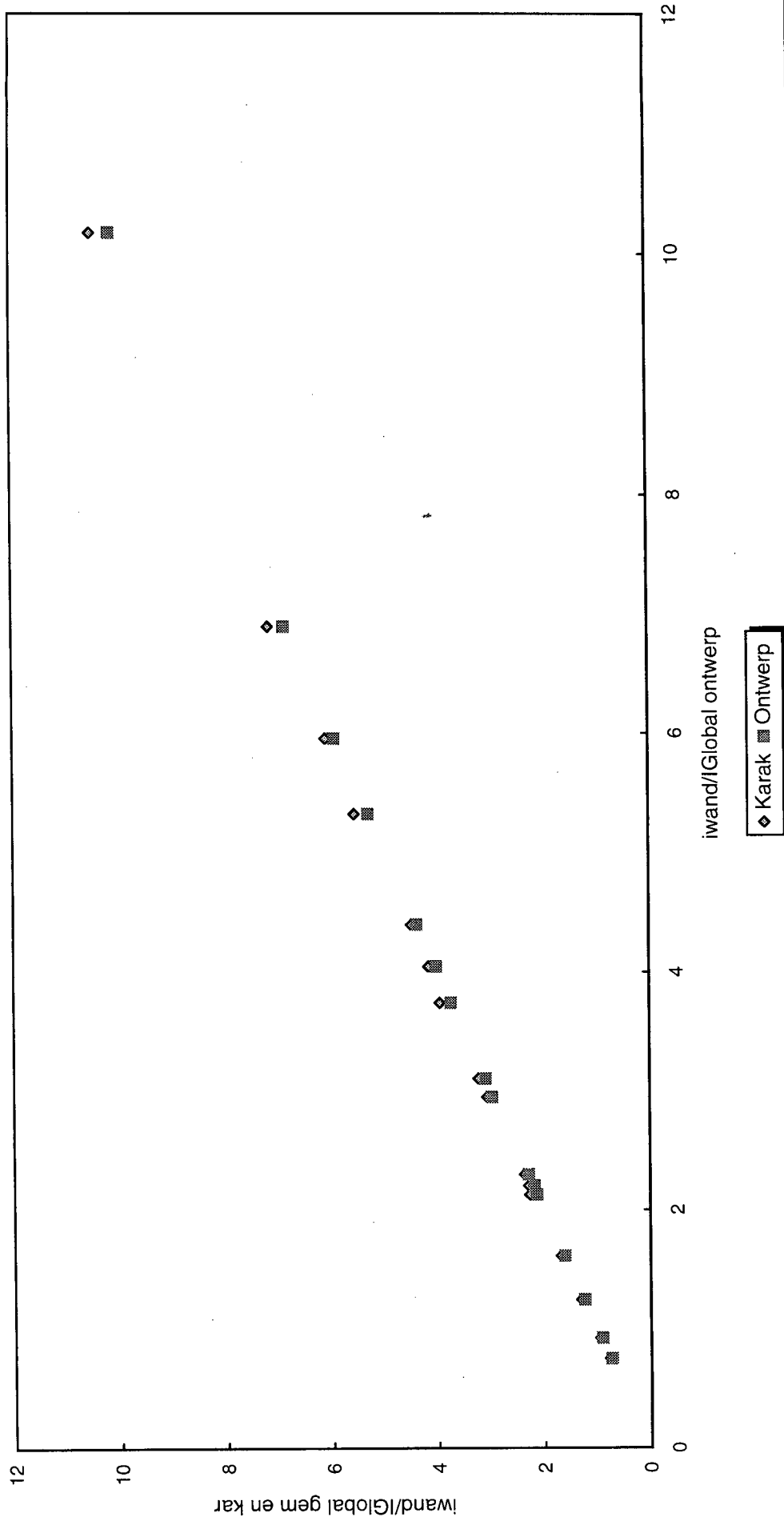
◆ gem
▲ kar

Zetting : damwand over laagdikte
ontwerp tegen gem en kar



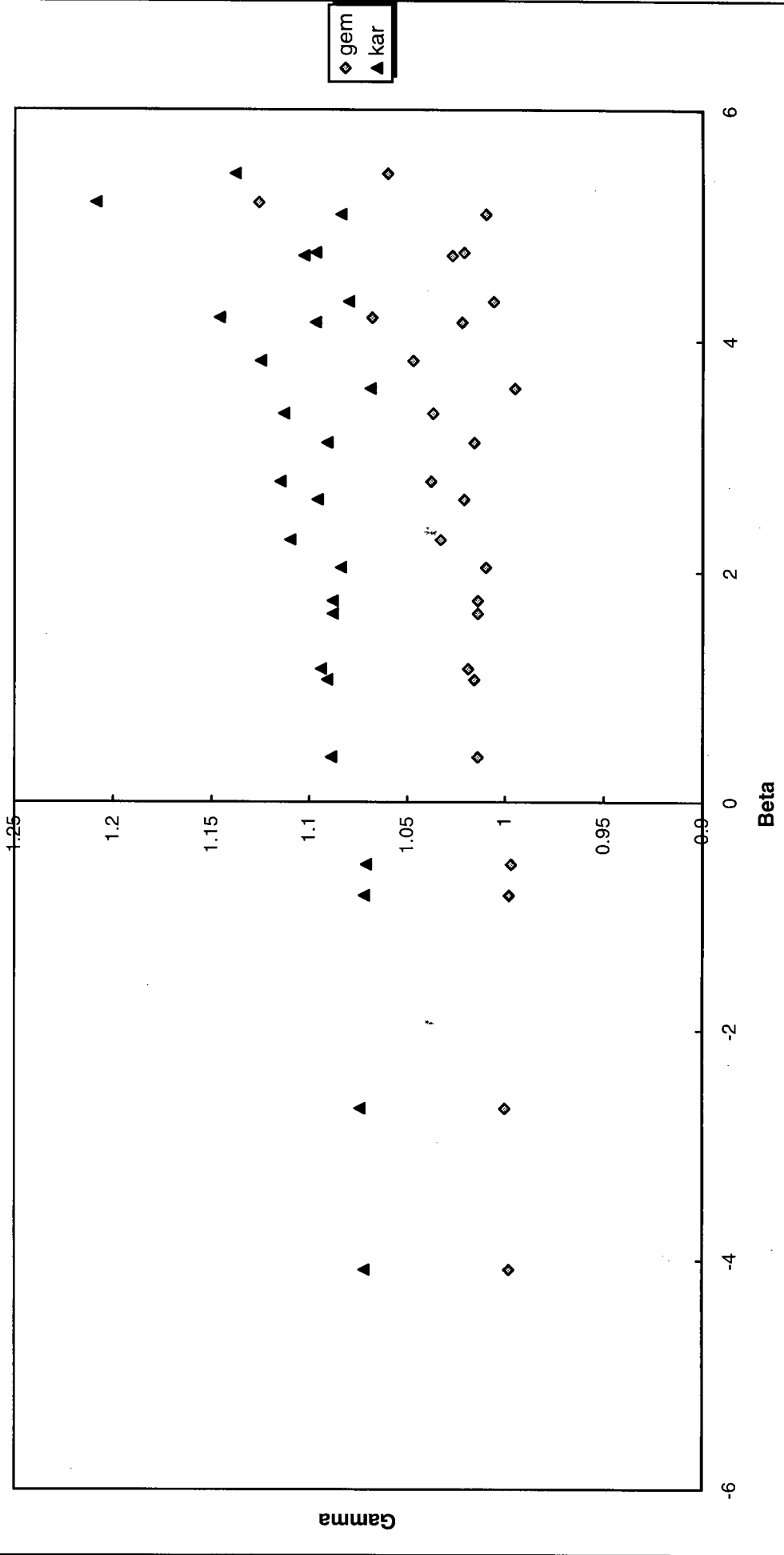
◆ Karak
■ Ontwerp

Zetting : ikr/IGlobal
ontwerp tegen gem en kar



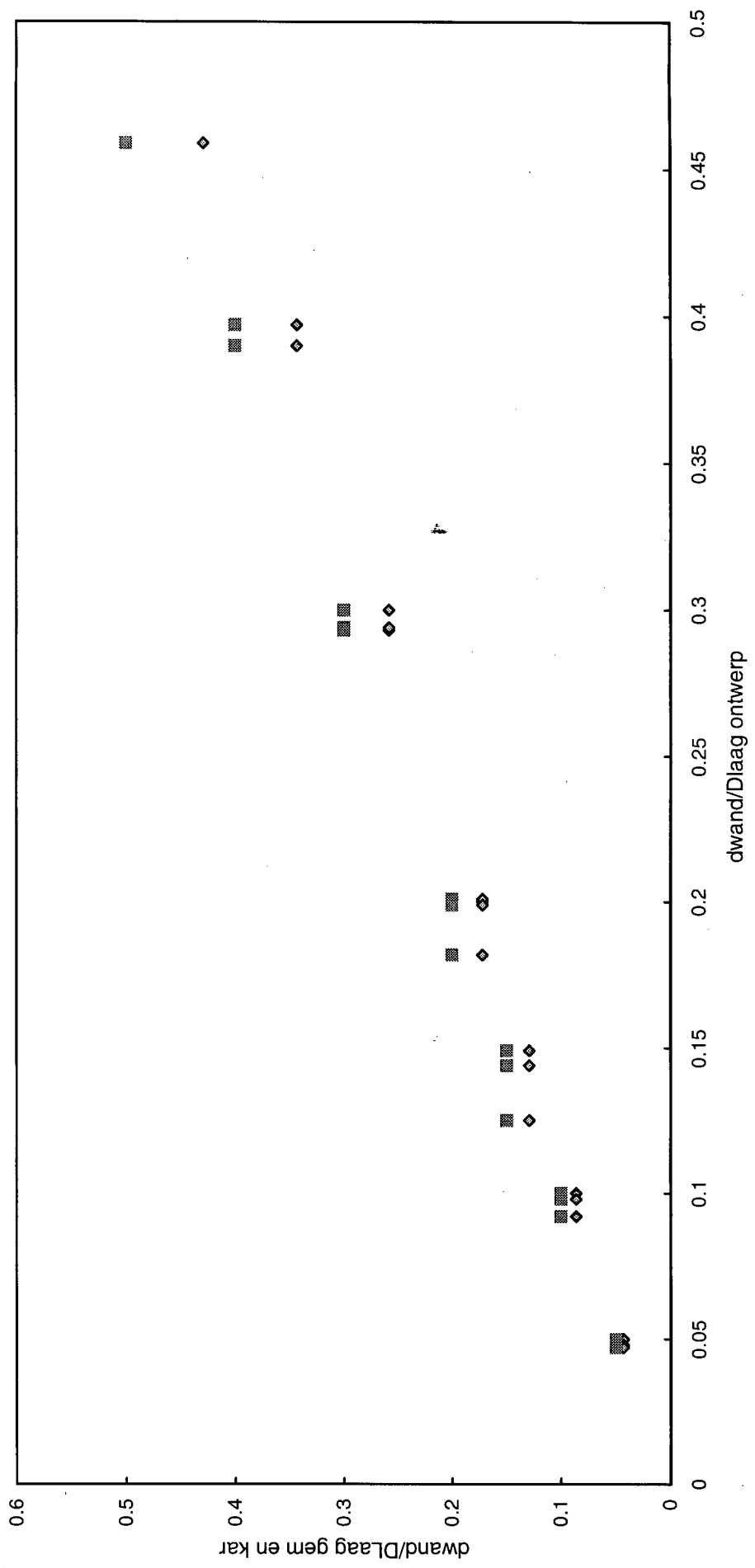
◆ Karak ■ Ontwerp

Damwand met lek(*10)
Partiele factoren op sterkte



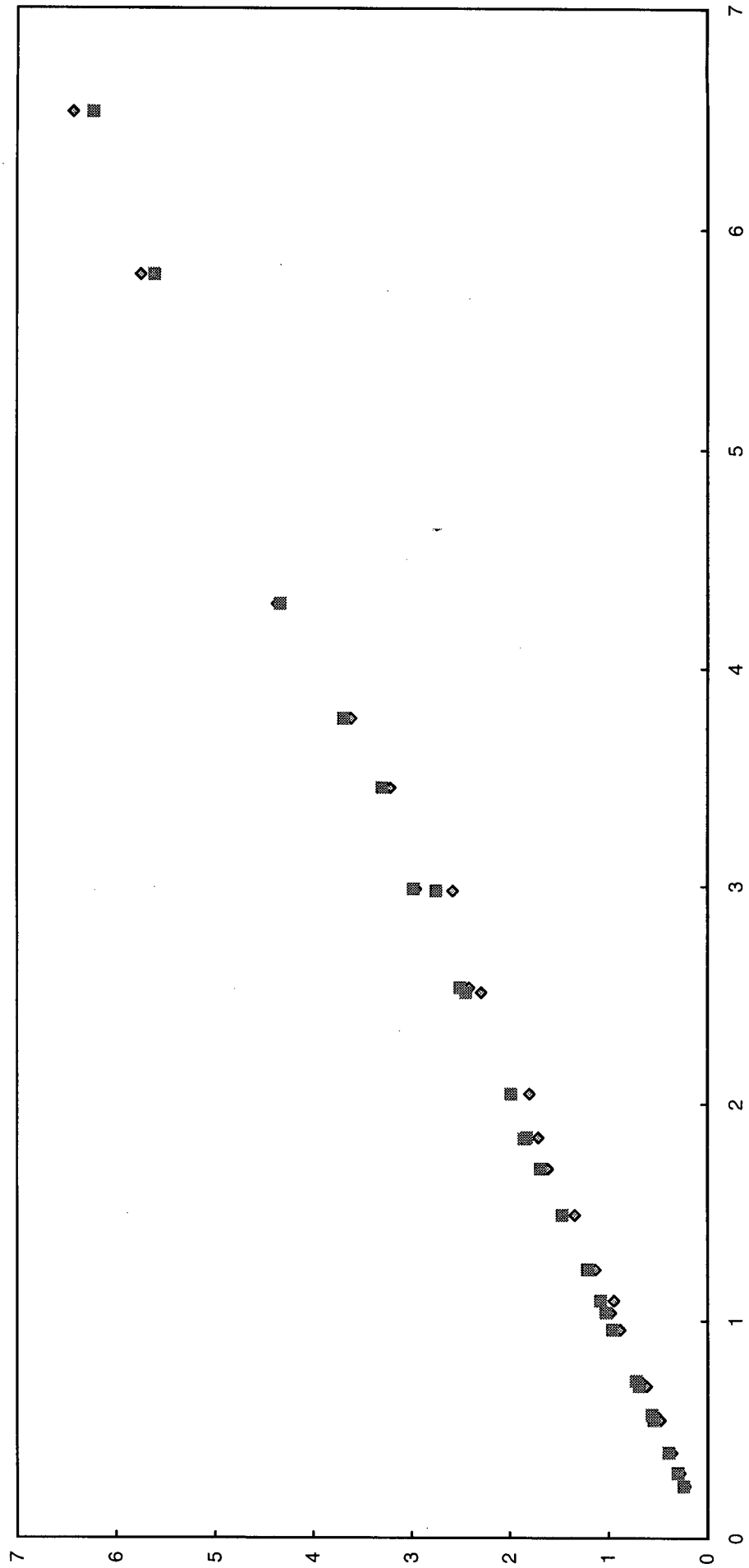
Damwand met lek(*10) : damwand over laagdikte

ontwerp tegen gem en kar



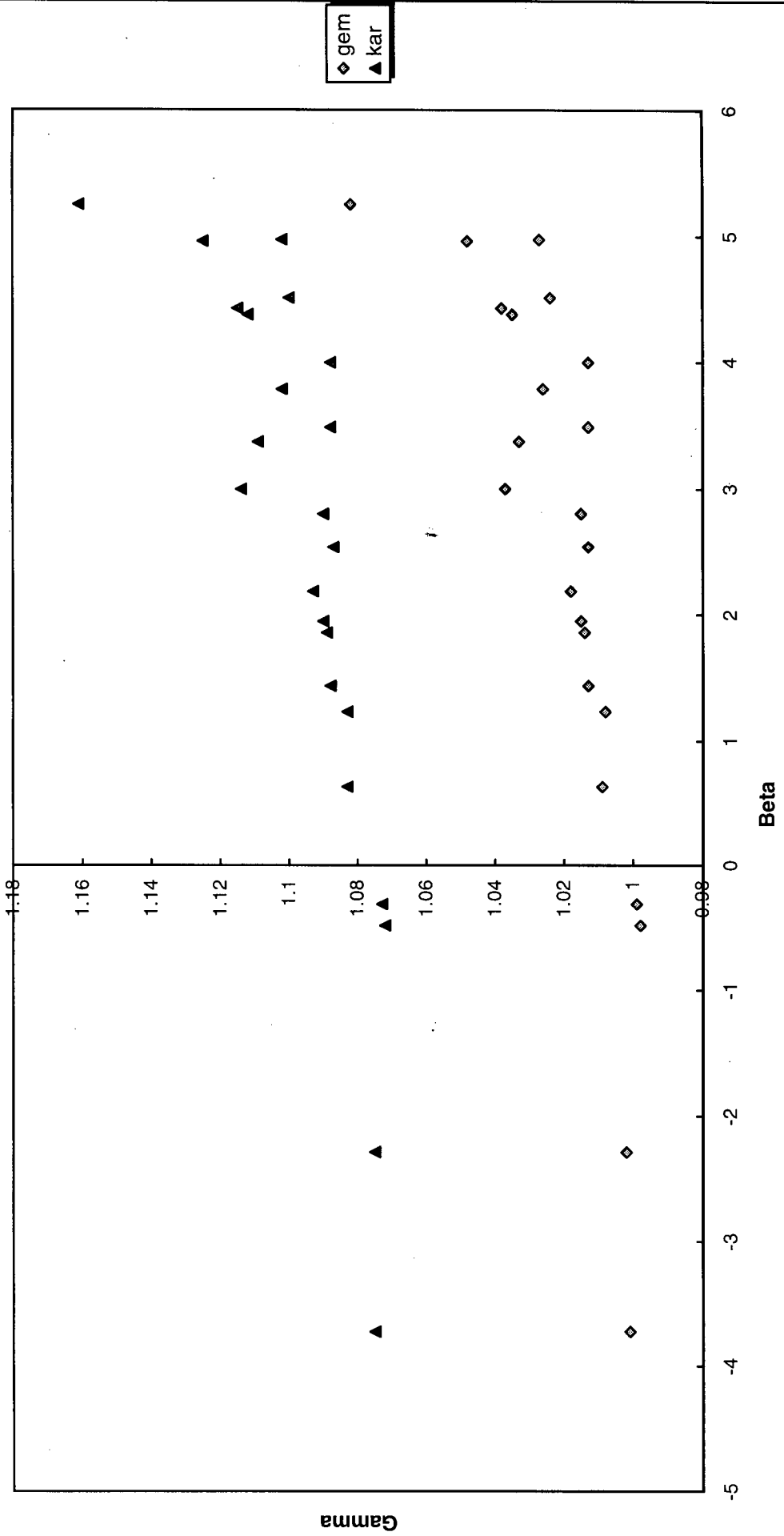
◆ Karak ■ Ontwerp

Damwand met lek(+10) : ikr/IGlobal
 ontwerp tegen gem en kar

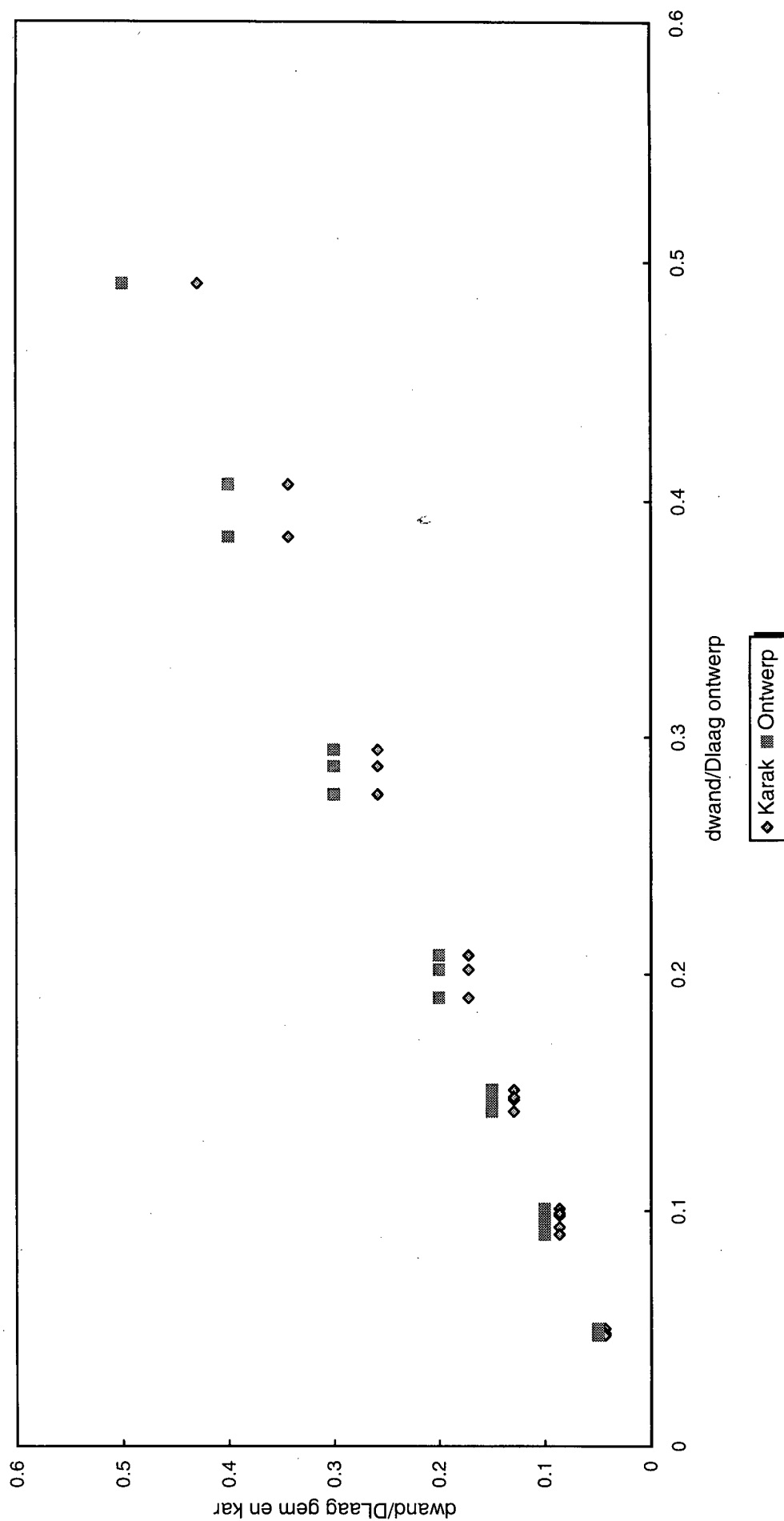


◆ Karak ■ Ontwerp

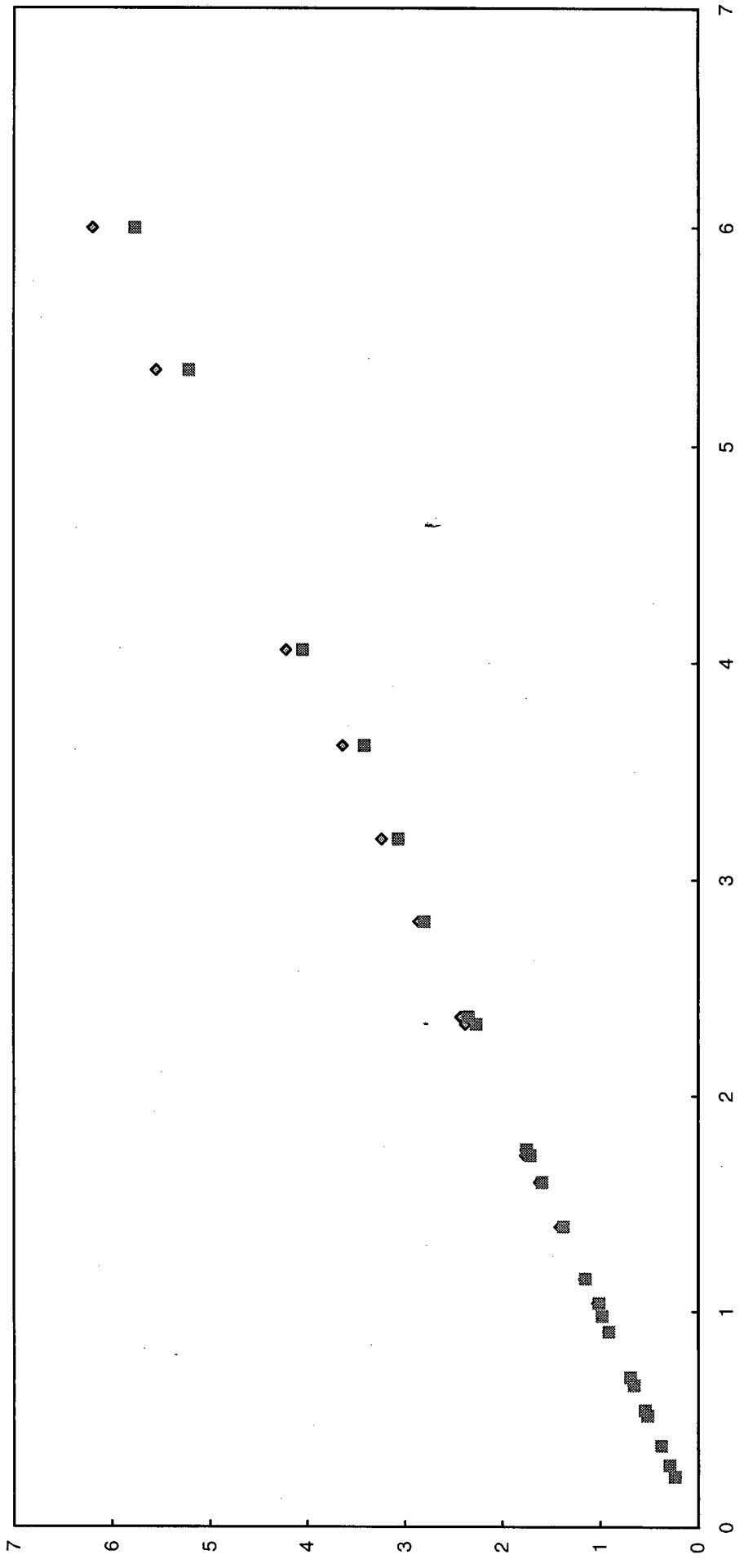
Damwand met gat(10)
Partiele factoren op sterkte



Damwand met gat(10) : damwand over laagdikte
ontwerp tegen gem en kar

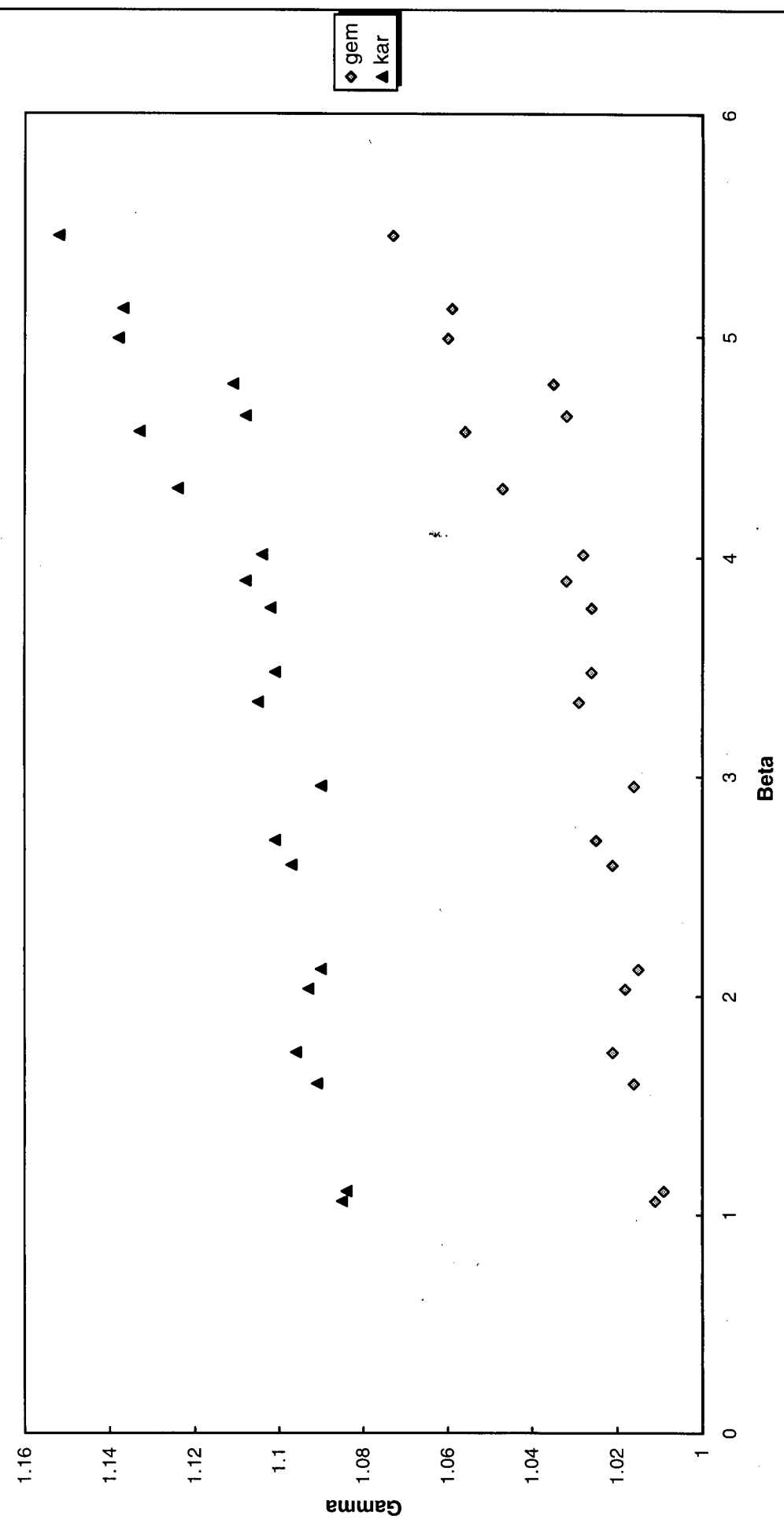


Damwand met gat(10) : ikr/IGlobal
ontwerp tegen gem en kar

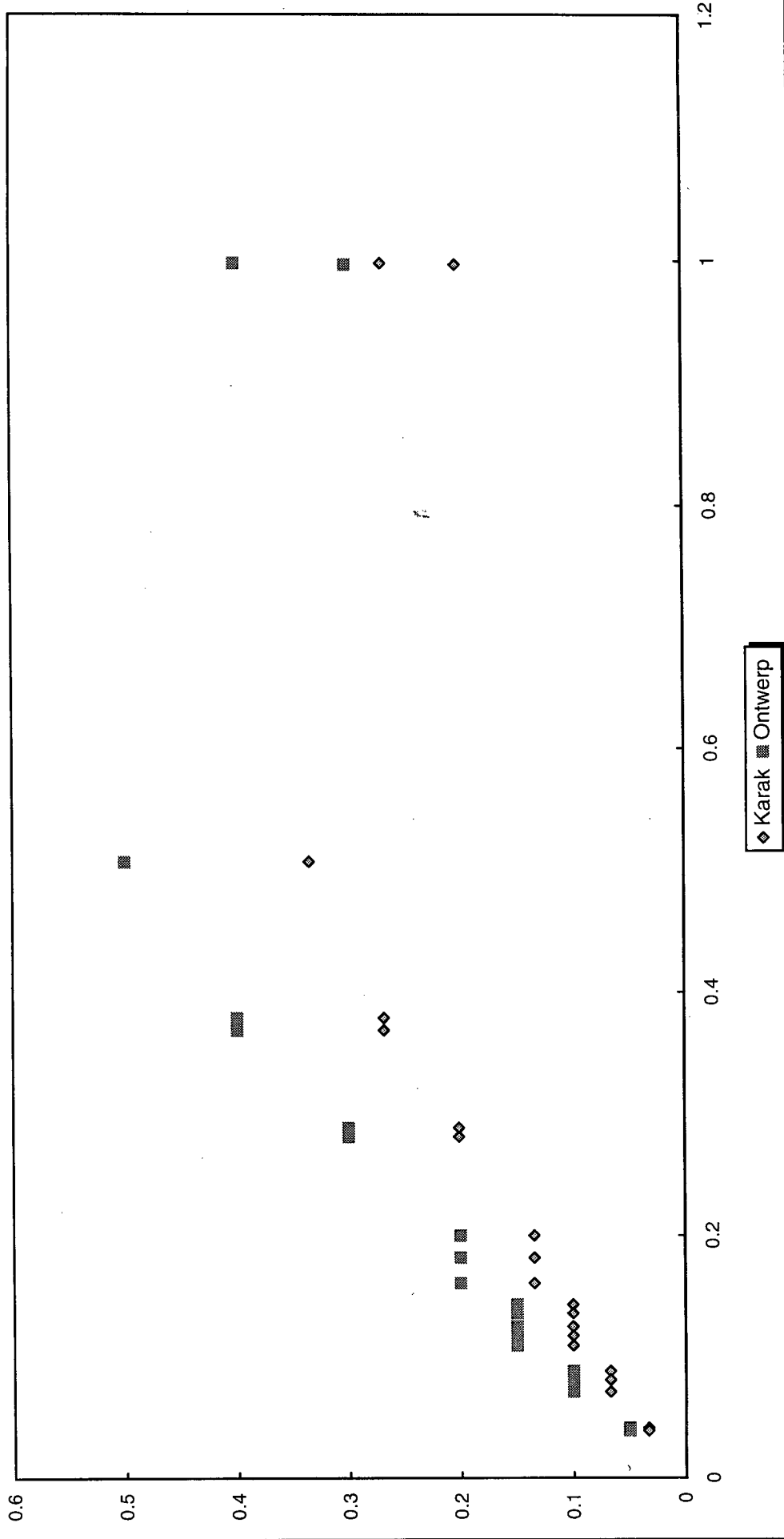


◆ Karak ■ Ontwerp

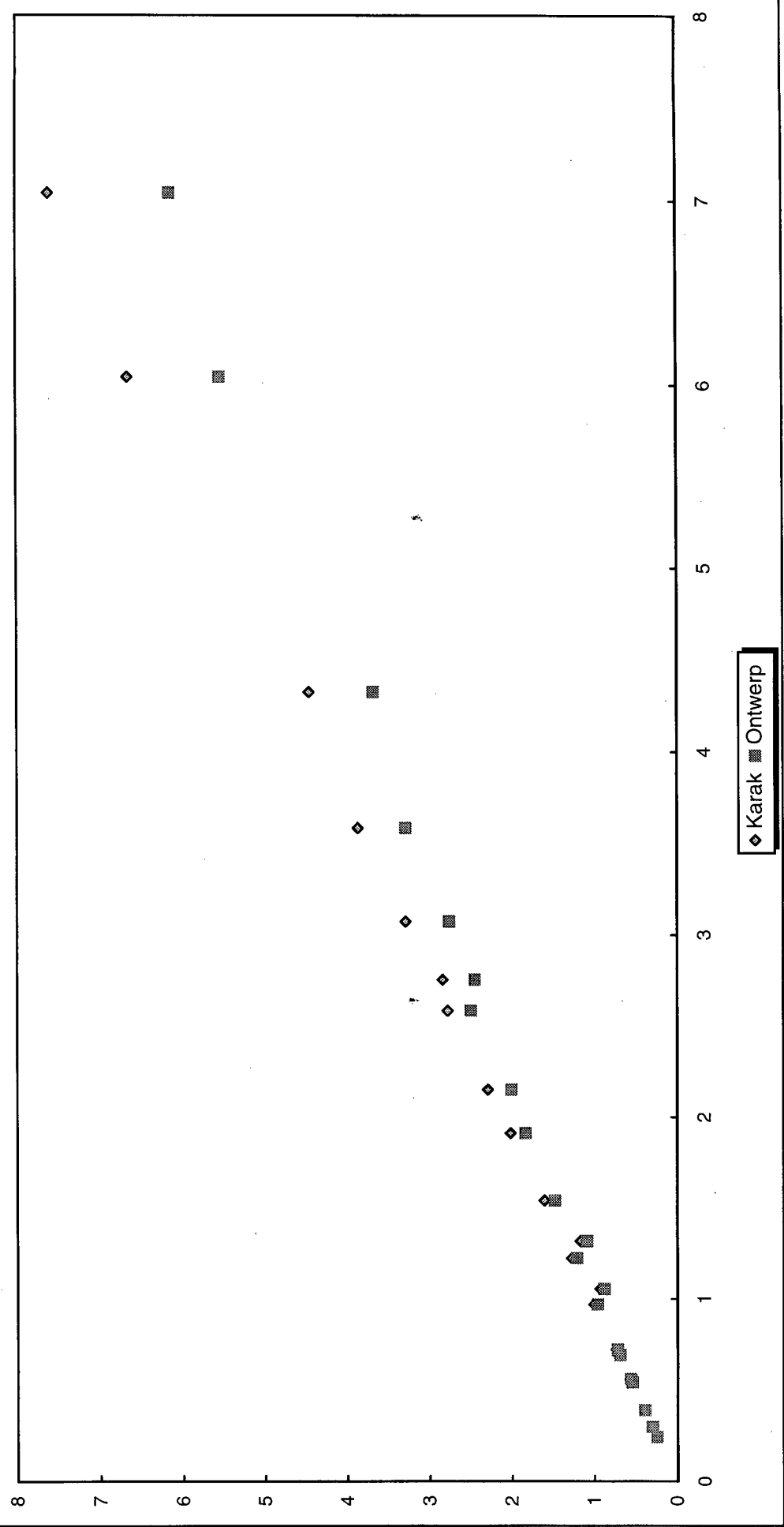
Dichte damwand (V dikte * 3)
Partiele factoren op sterkte



Dichte damwand : damwand over laagdikte
(Vdikte * 3) ontwerp tegen gem en kar

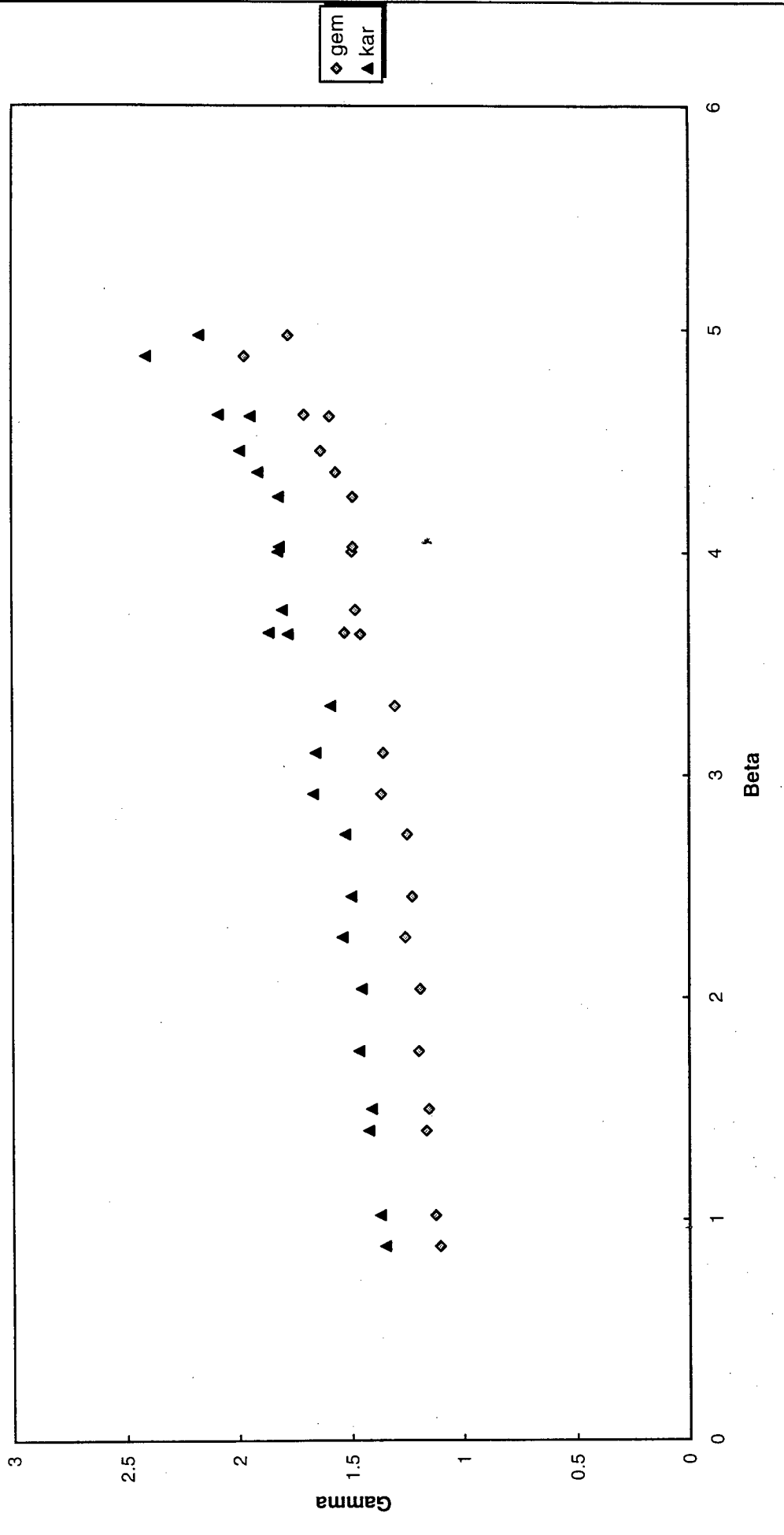


Dichte damwand : ikr/IGlobal
(V dikte * 3) ontwerp tegen gem en kar

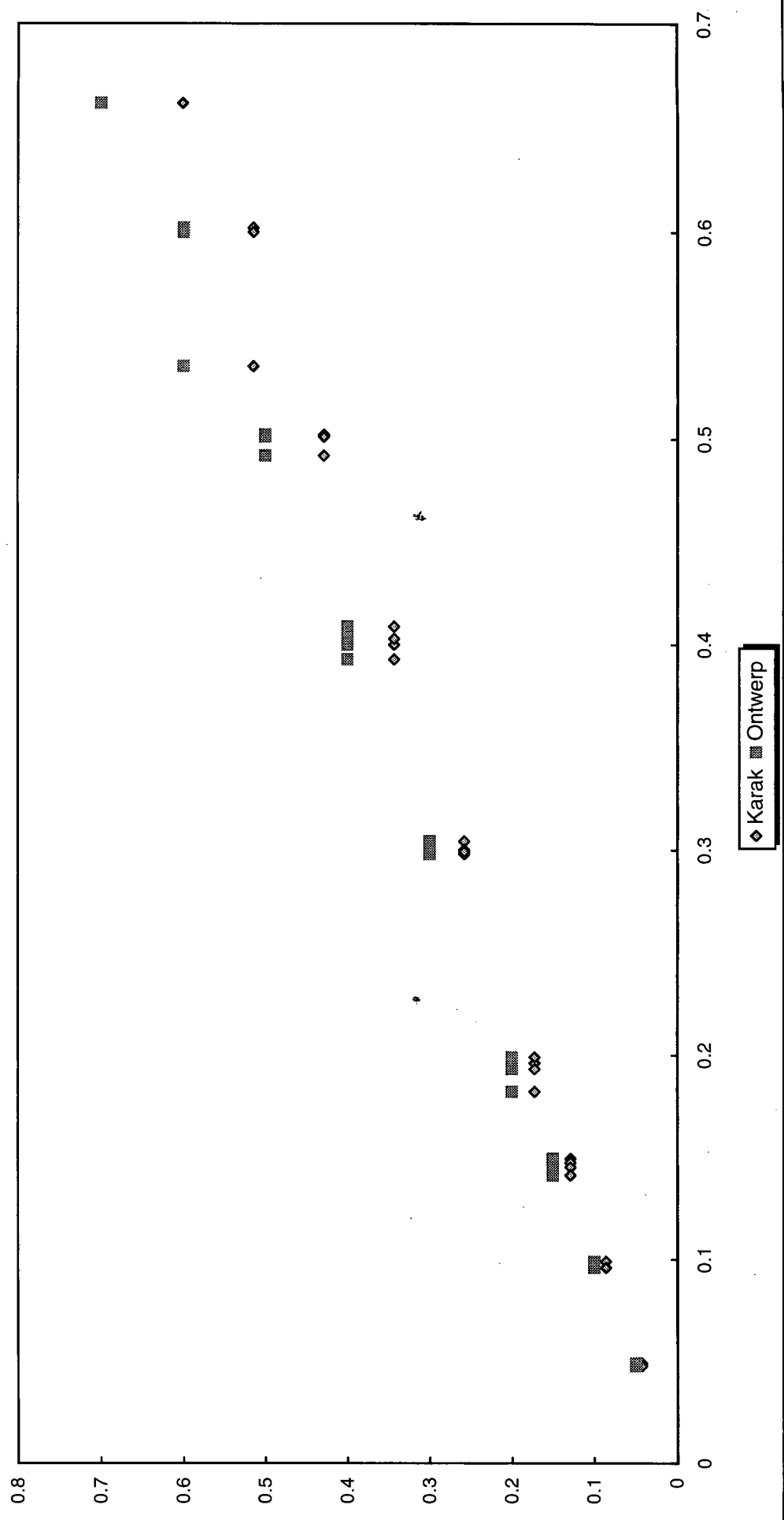


◆ Karak ■ Ontwerp

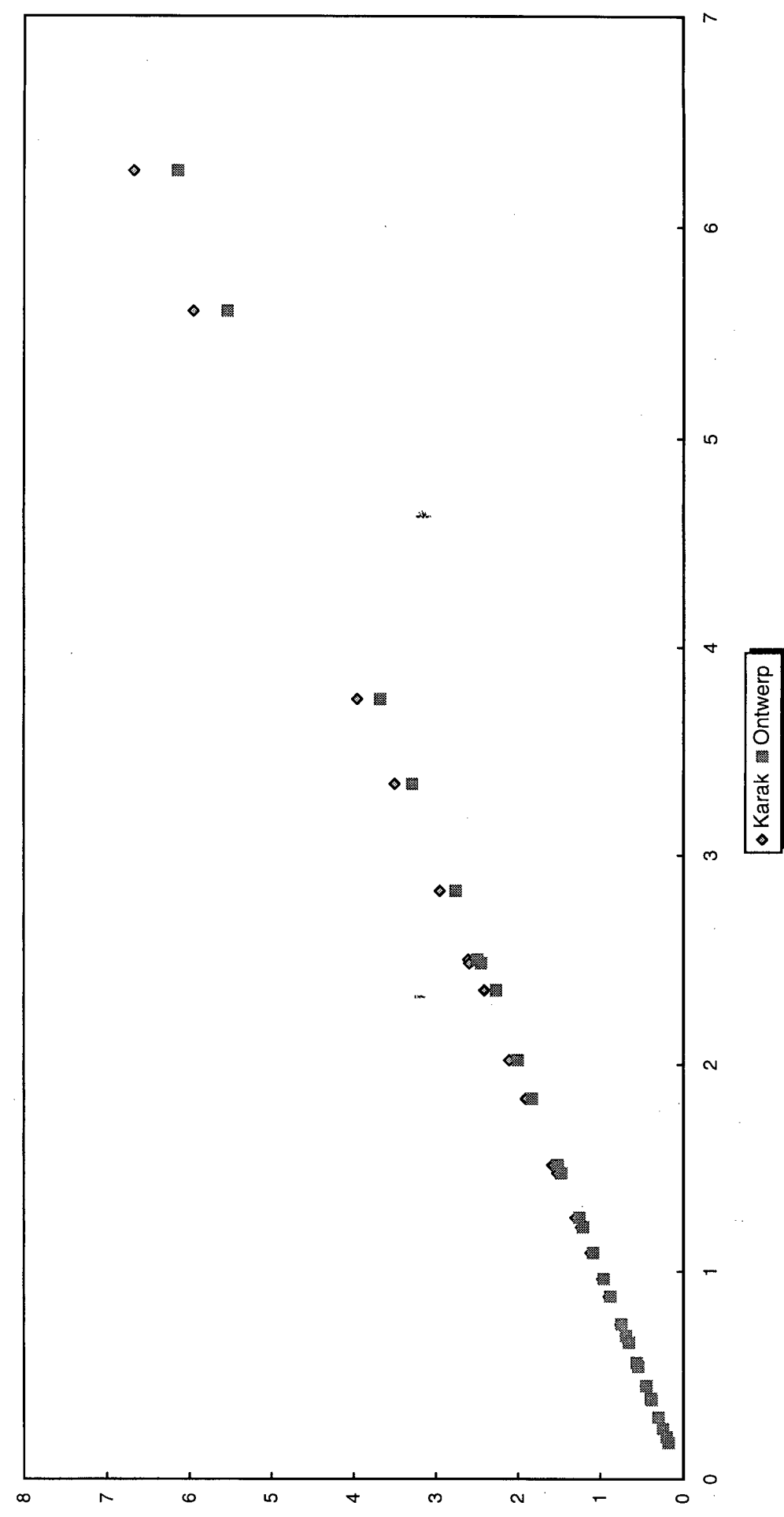
Dichte damwand (V poros * 3)
Partiele factoren op sterkte



Dichte damwand : damwand over laagdikte
(Vporos * 3) ontwerp tegen gem en kar



Dichte damwand : ikr/IGlobal
(V poros + 3) ontwerp tegen gem en kar



Bijlage 61: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 1$

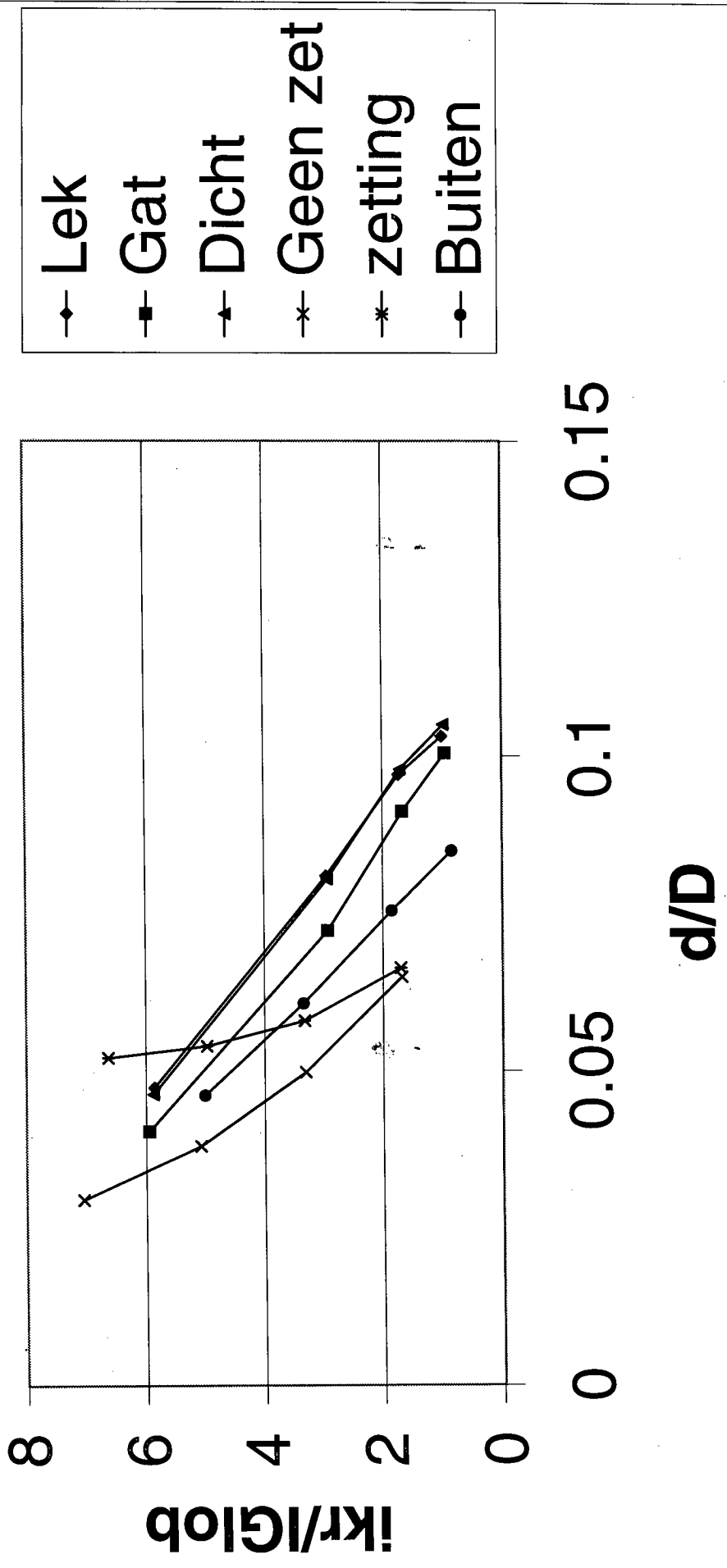
Bijlage 62: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 2$

Bijlage 63: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 3$

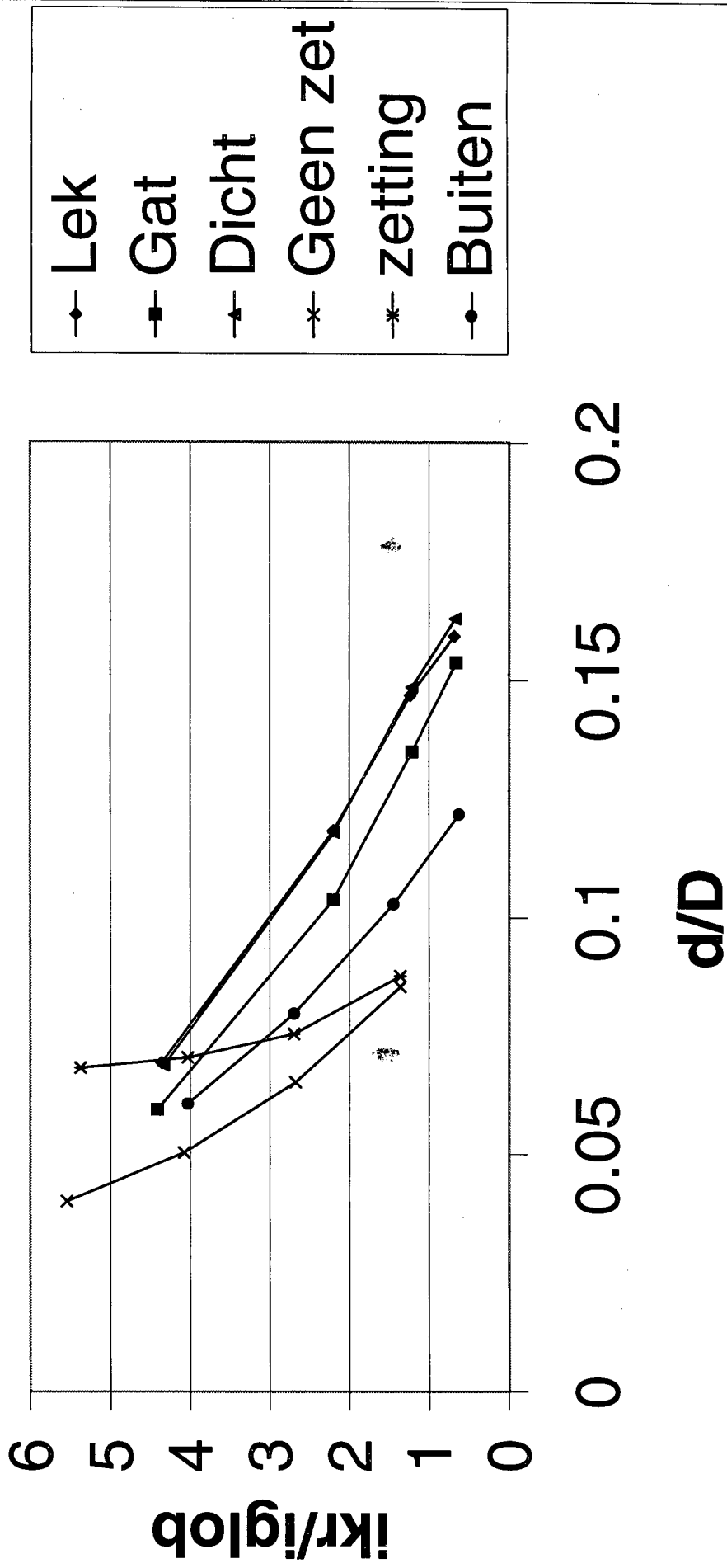
Bijlage 64: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 4$

Bijlage 65: Combinatie ontwerpgrafieken bij $\beta = 5$

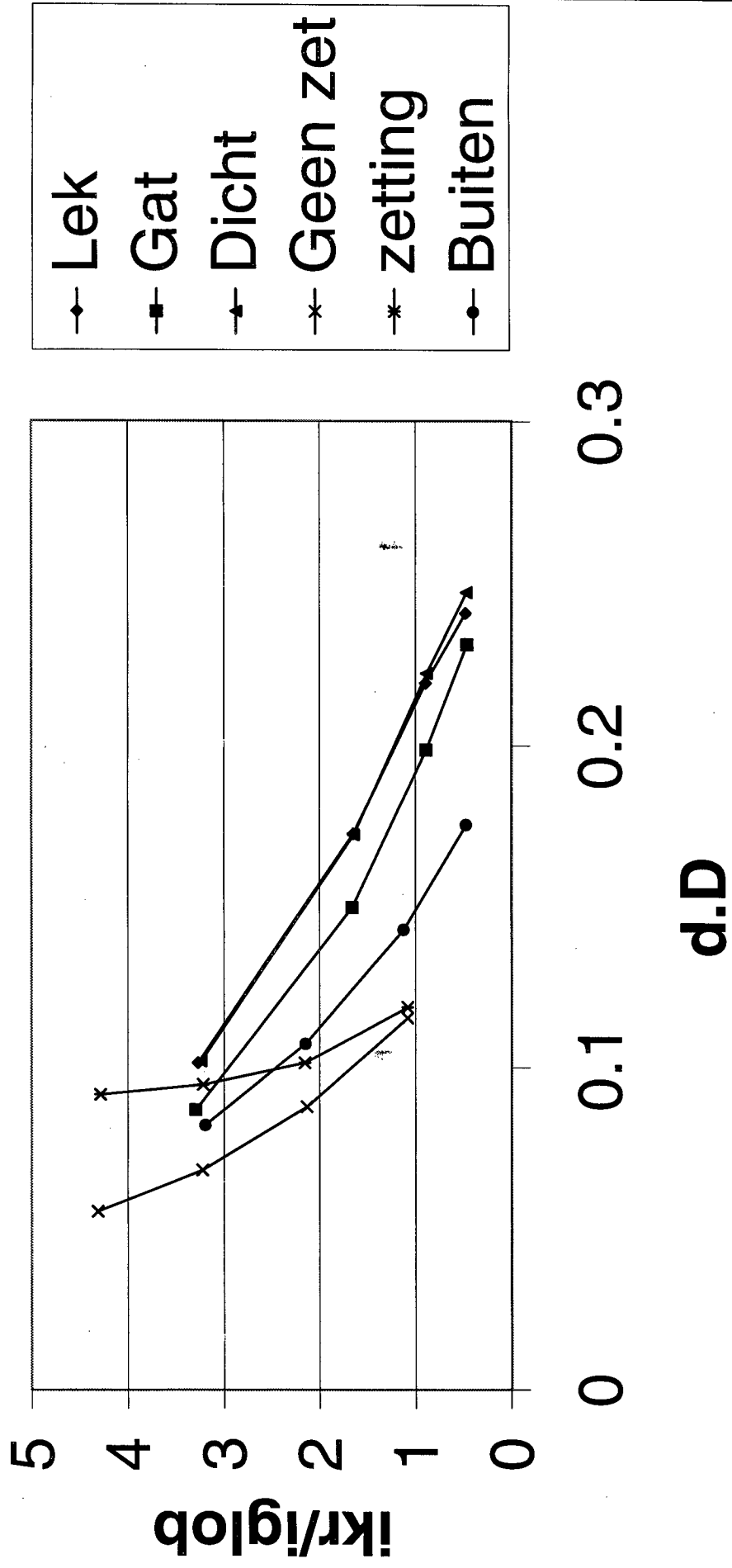
Beta = 1 voor diverse weerstanden



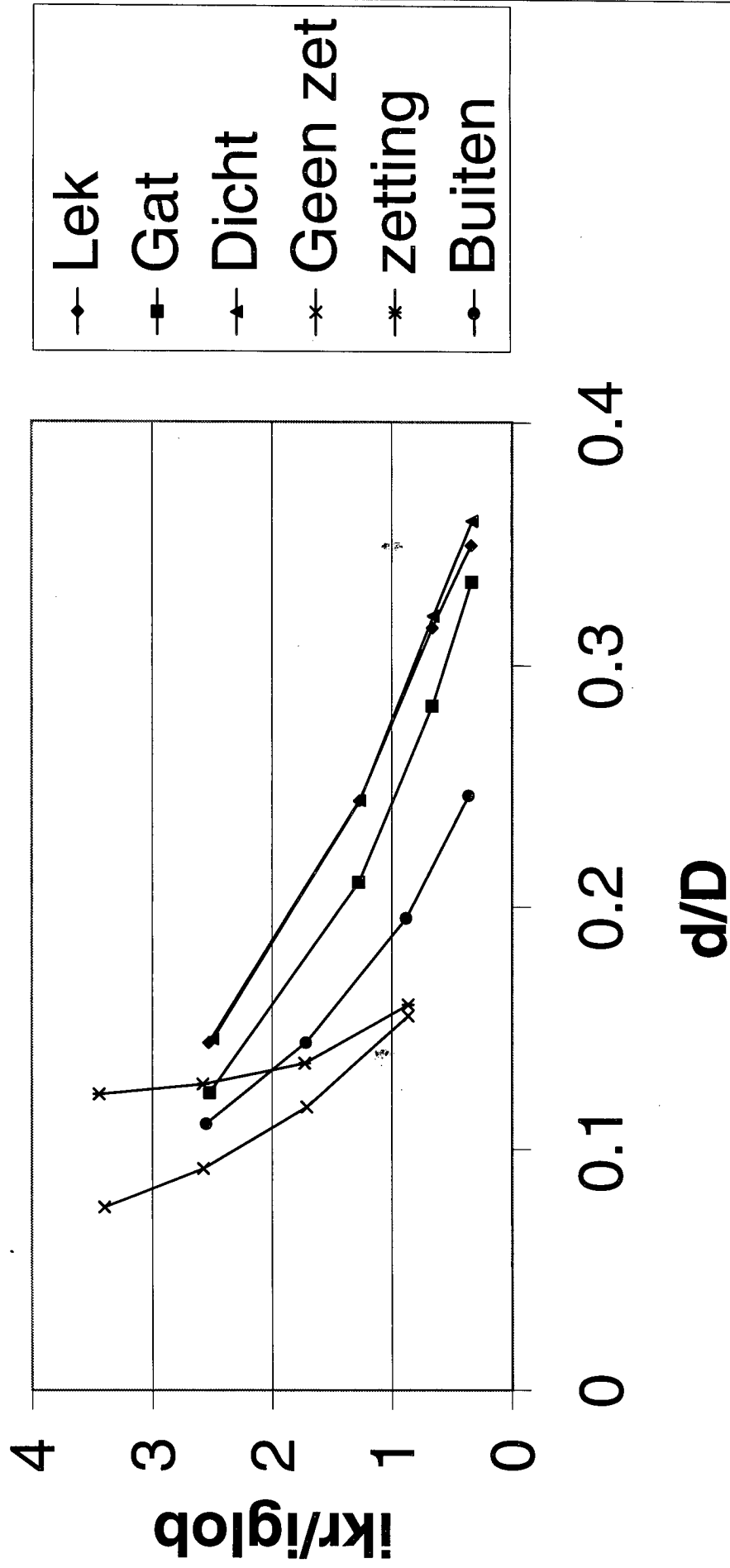
Beta = 2 voor diverse weerstanden



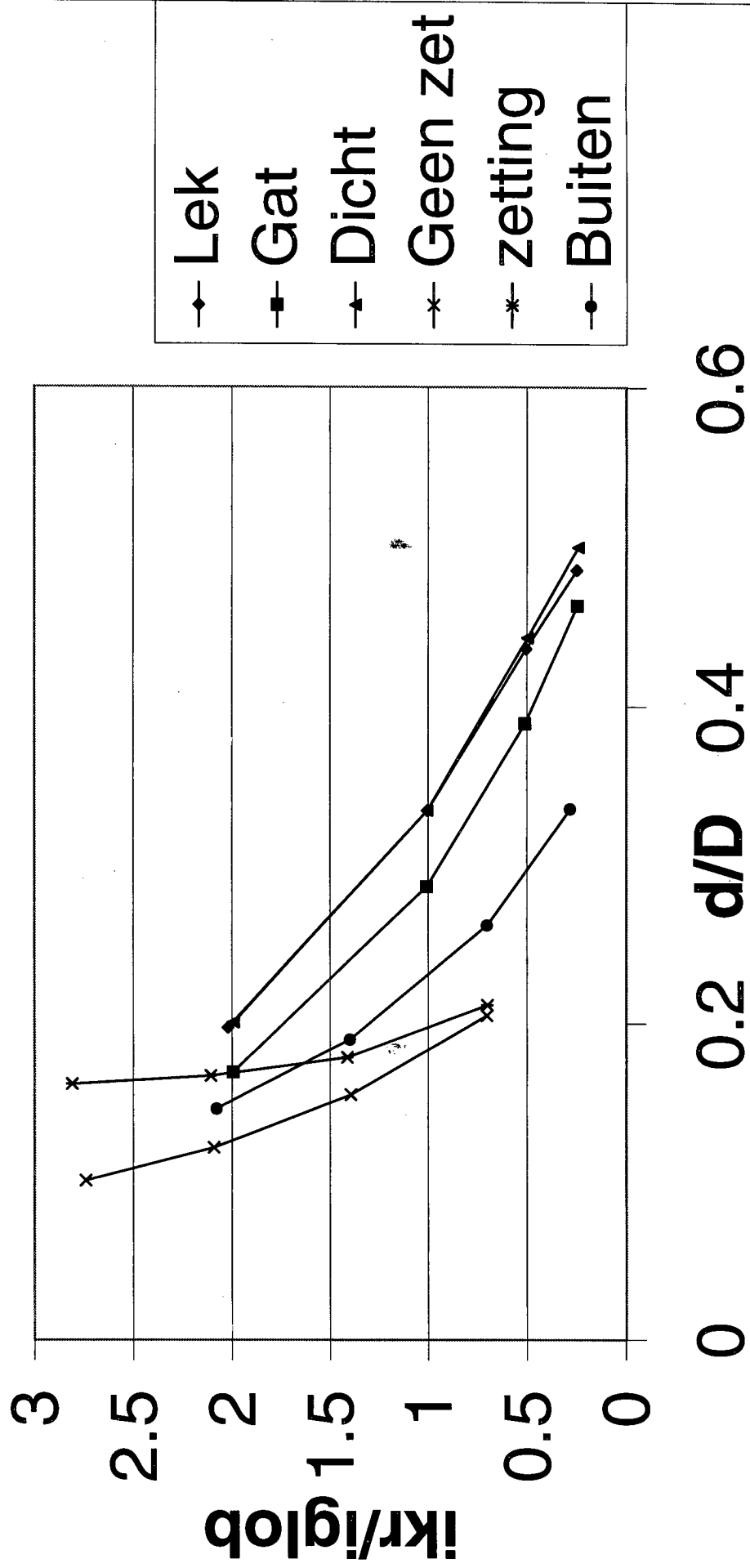
Beta = 3 voor diverse weerstanden



Beta = 4 voor diverse weerstanden

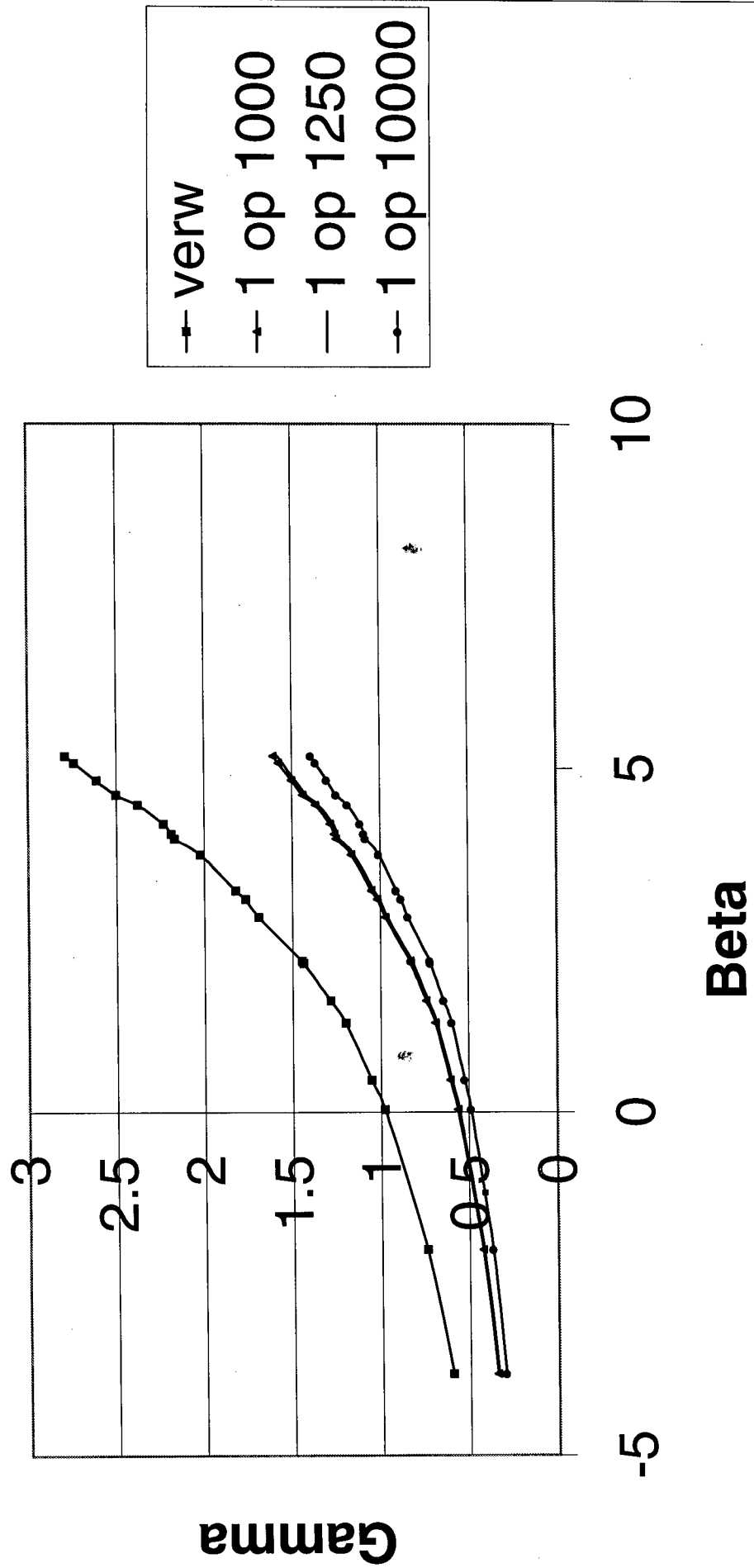


beta = 5 voor diverse weerstanden

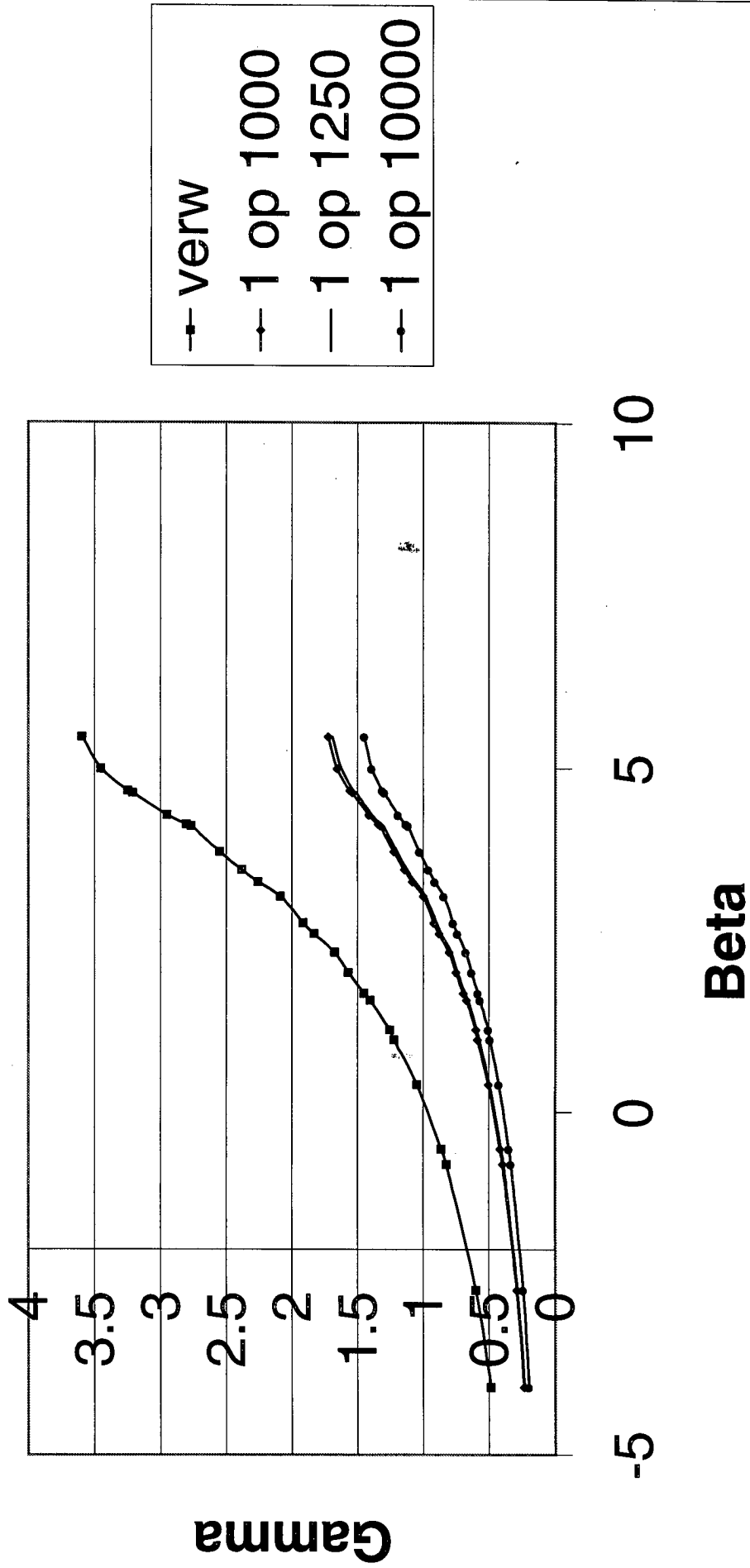


Bijlage 66:Totale veiligheidsfactor case 4
Bijlage 67:Totale veiligheidsfactor case 2: dicht
Bijlage 68:Totale veiligheidsfactor case 2: lek
Bijlage 69:Totale veiligheidsfactor case 2: gat
Bijlage 70:Totale veiligheidsfactor case 3: geen spleet
Bijlage 71:Totale veiligheidsfactor case 3: spleet
Bijlage 72:Totale veiligheidsfactor case 2: 10*gem. lek
Bijlage 73:Totale veiligheidsfactor case 2: gem. gat/10
Bijlage 74:Totale veiligheidsfactor case 2: V laagdikte *3
Bijlage 75:Totale veiligheidsfactor case 2: V porositeit *3

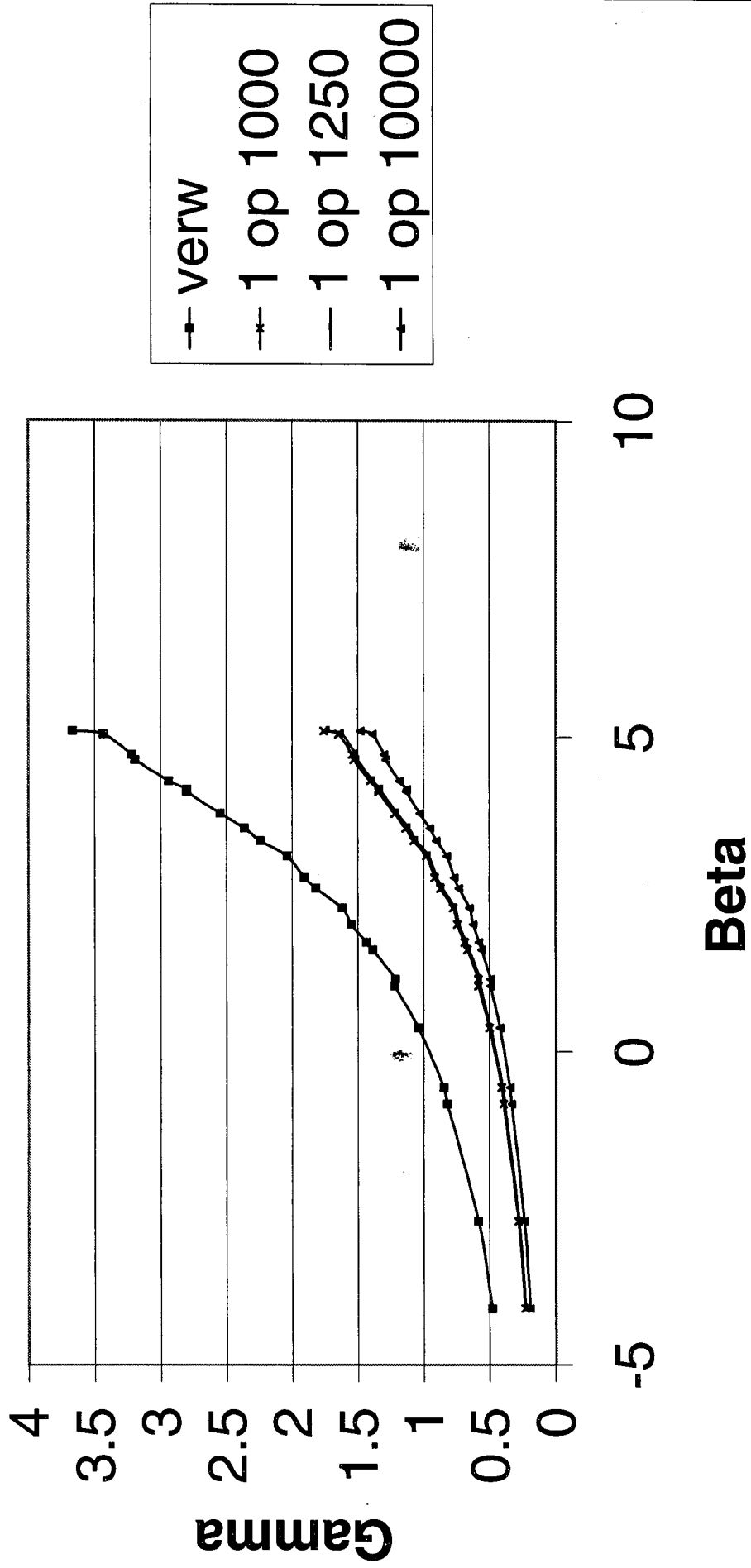
Buitenhoofd : Beta - gamma



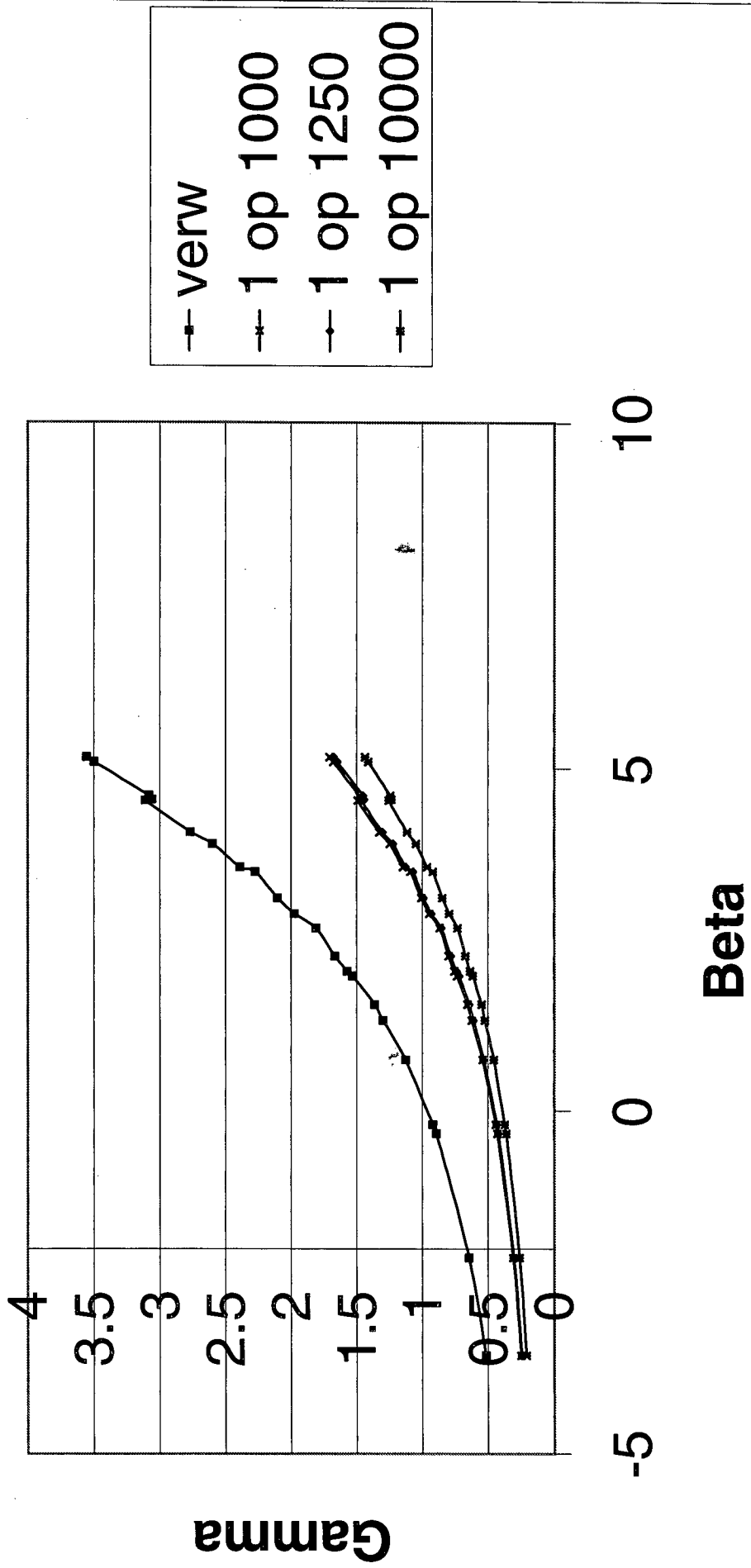
Dichte damwand : Beta - gamma



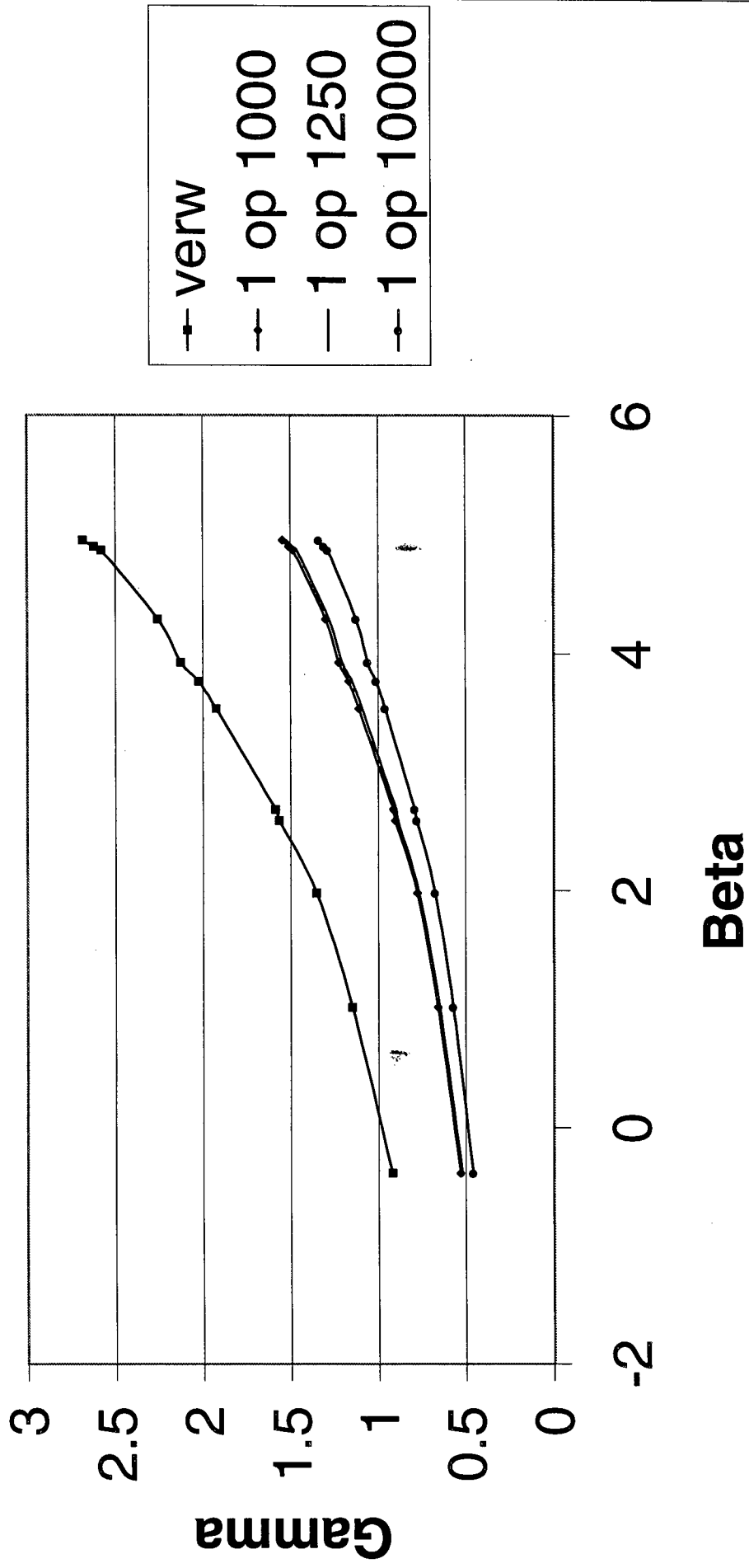
Damwand met lek : Beta - gamma



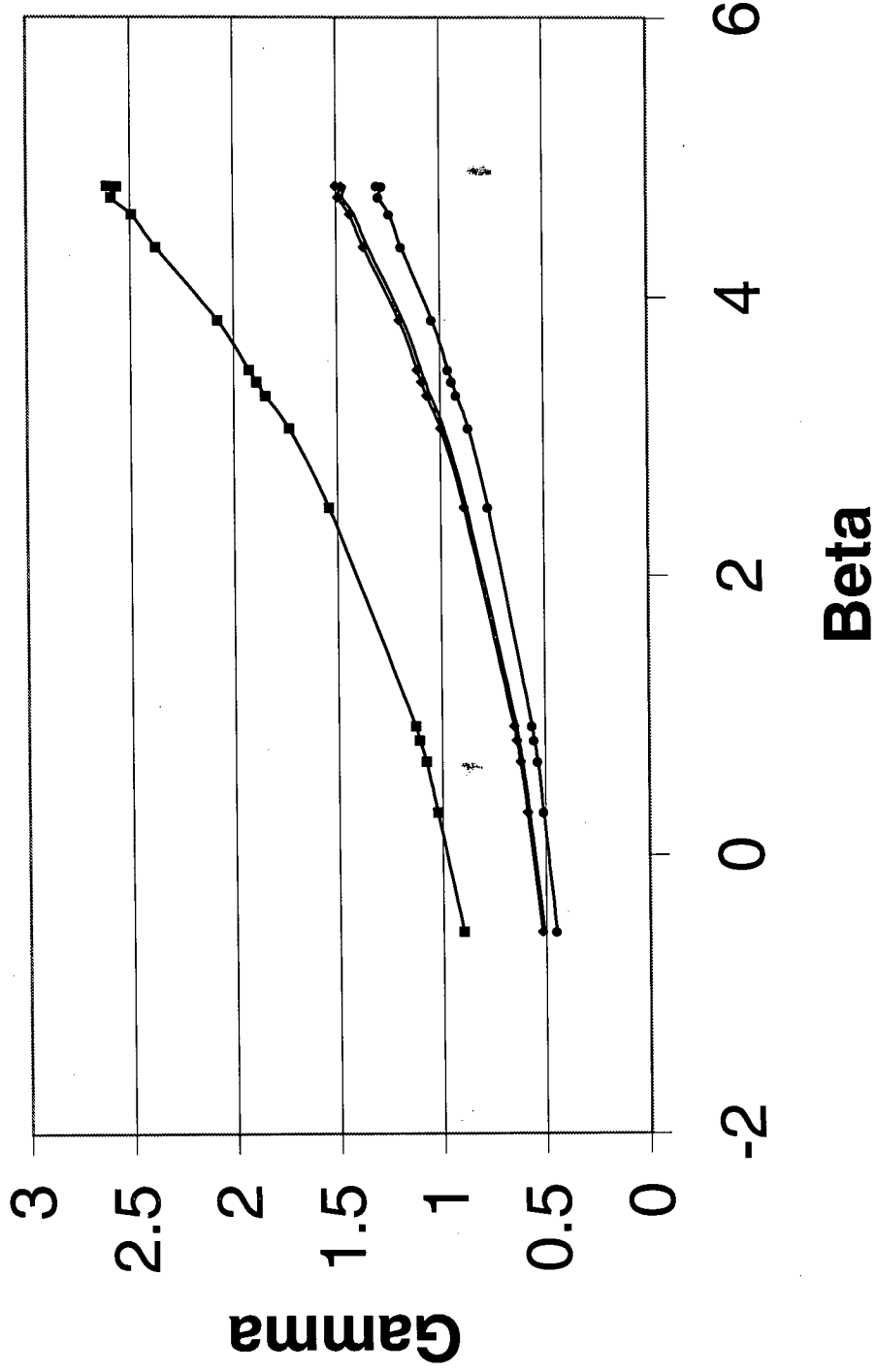
Damwand met gat : Beta - gamma



Zonder zetting : Beta - gamma

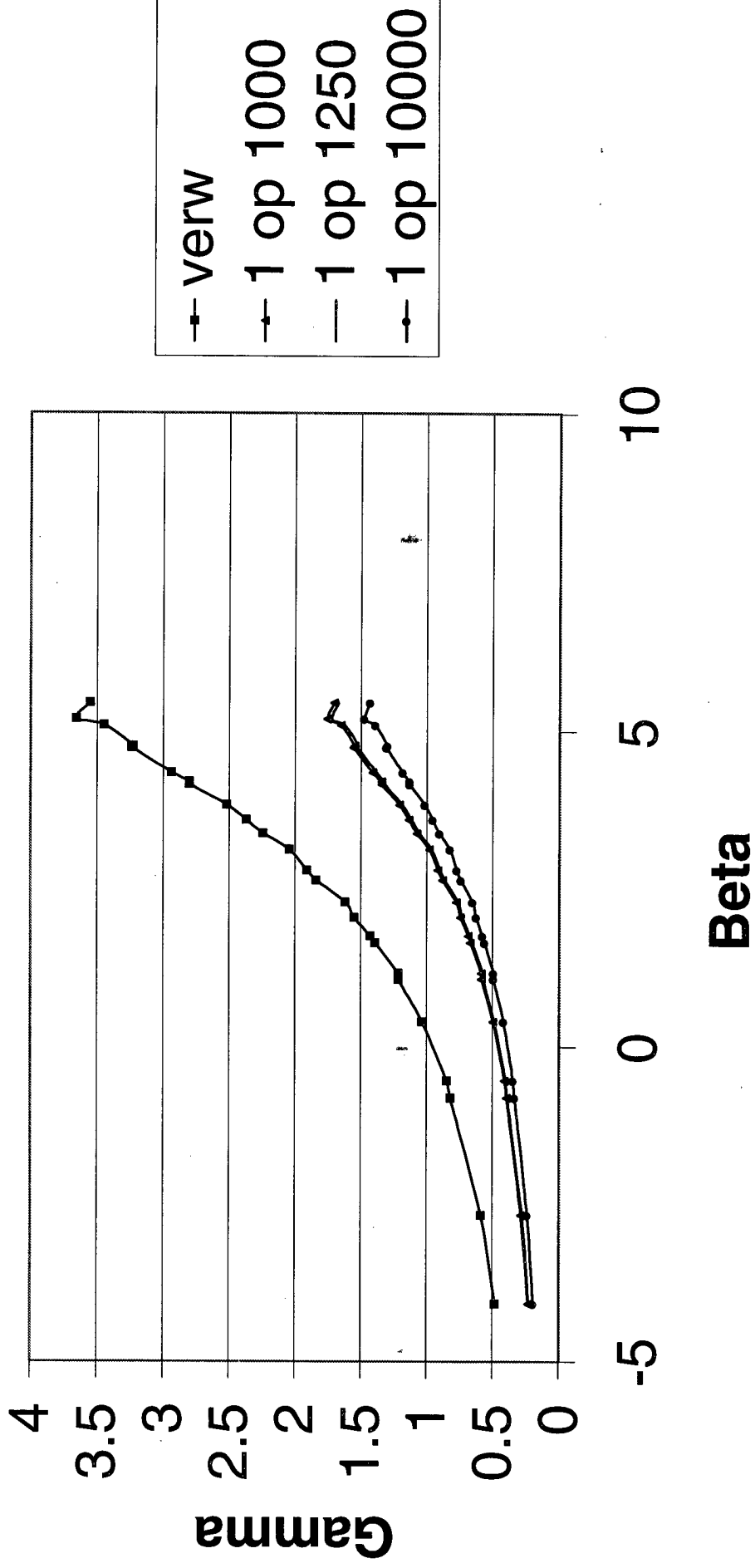


Zetting : Beta - gamma

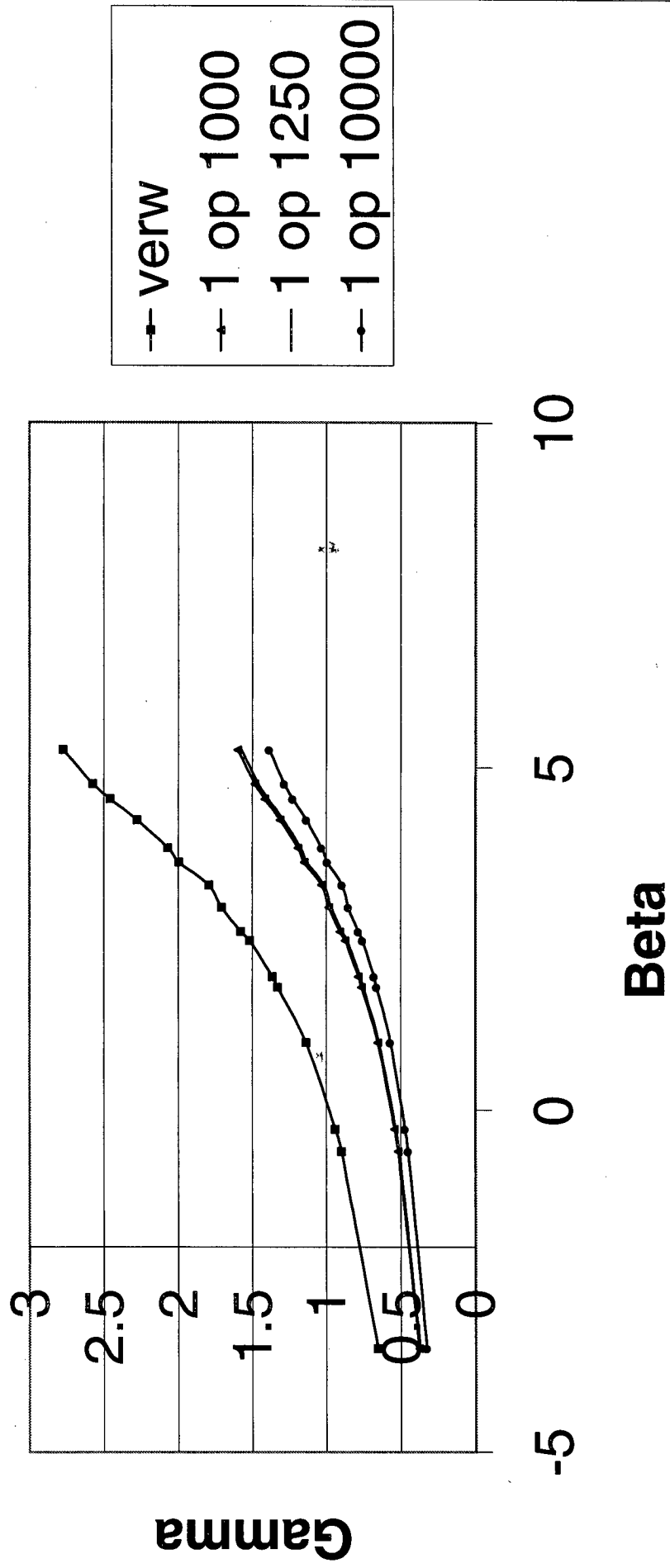


- verw
- ◆— 1 op 1000
- ▲— 1 op 1250
- 1 op 10000

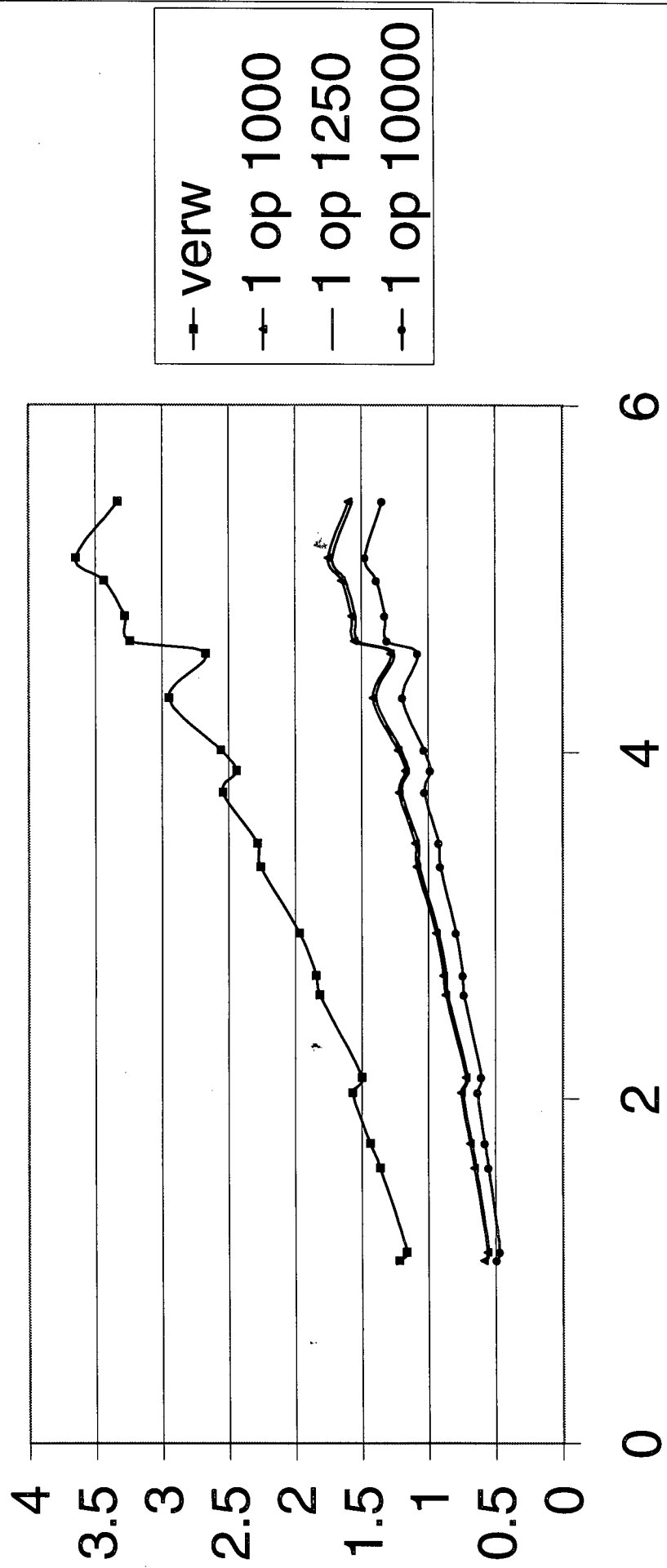
Damwand met lek (*10) : Beta - gamma



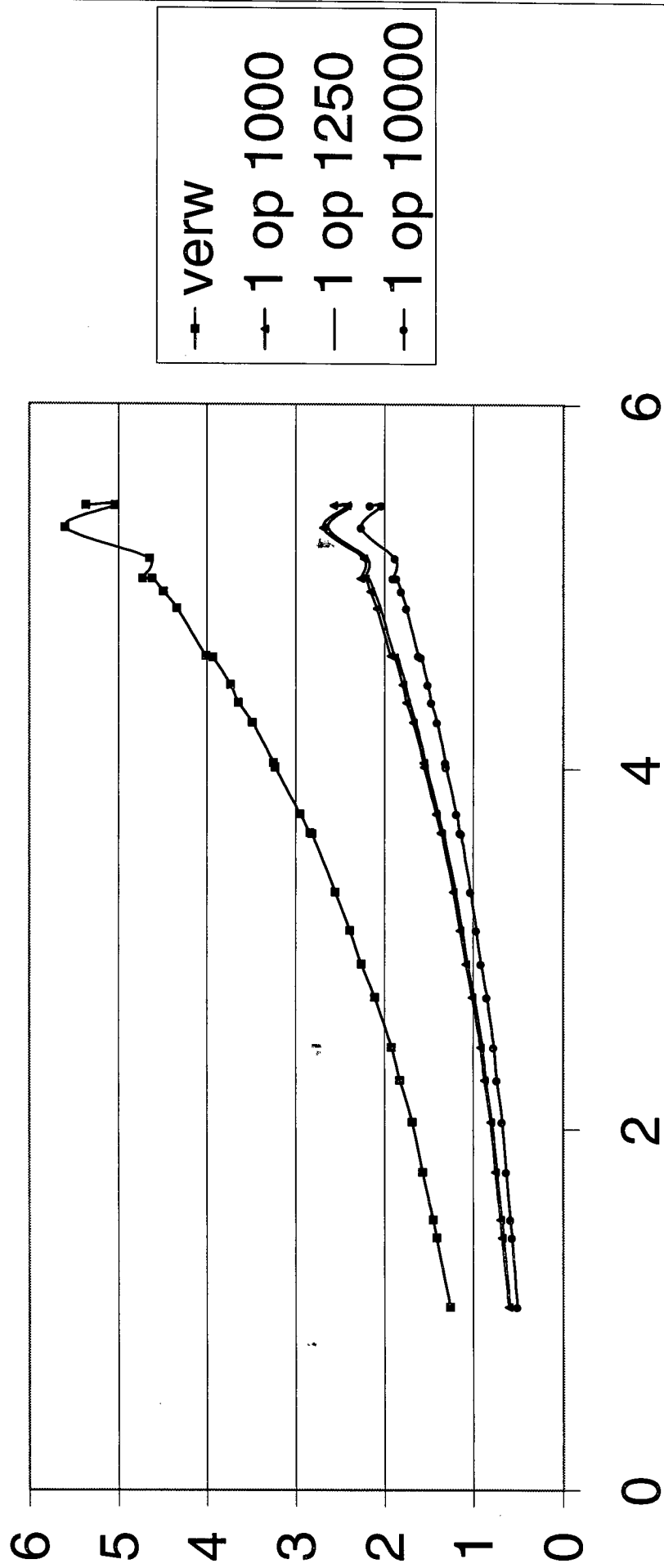
Damwand met gat(/10) : Beta - gamma



Dichte damwand : Beta - gamma (Vdikte *3)



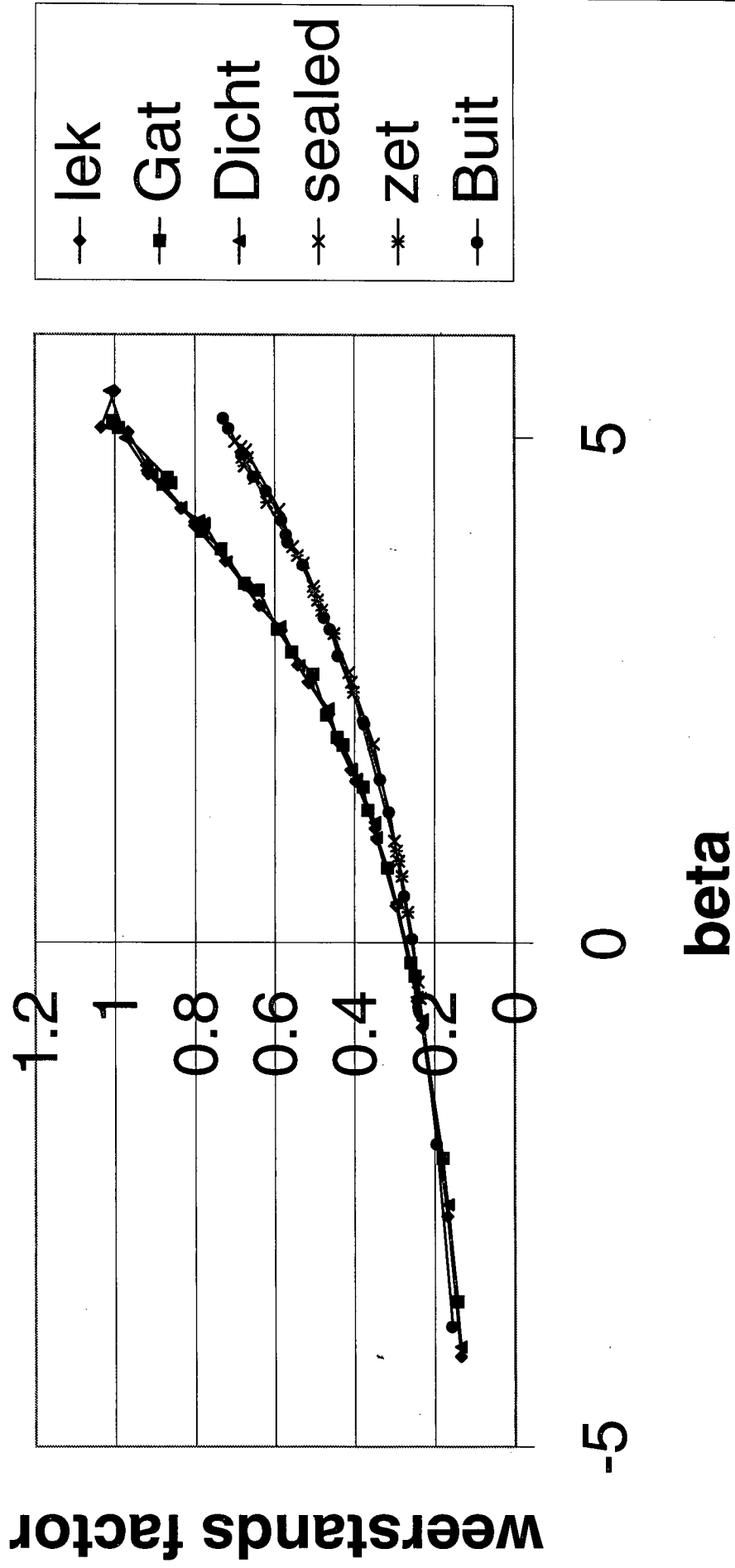
Dichte damwand : Beta - gamma (Vporos *3)

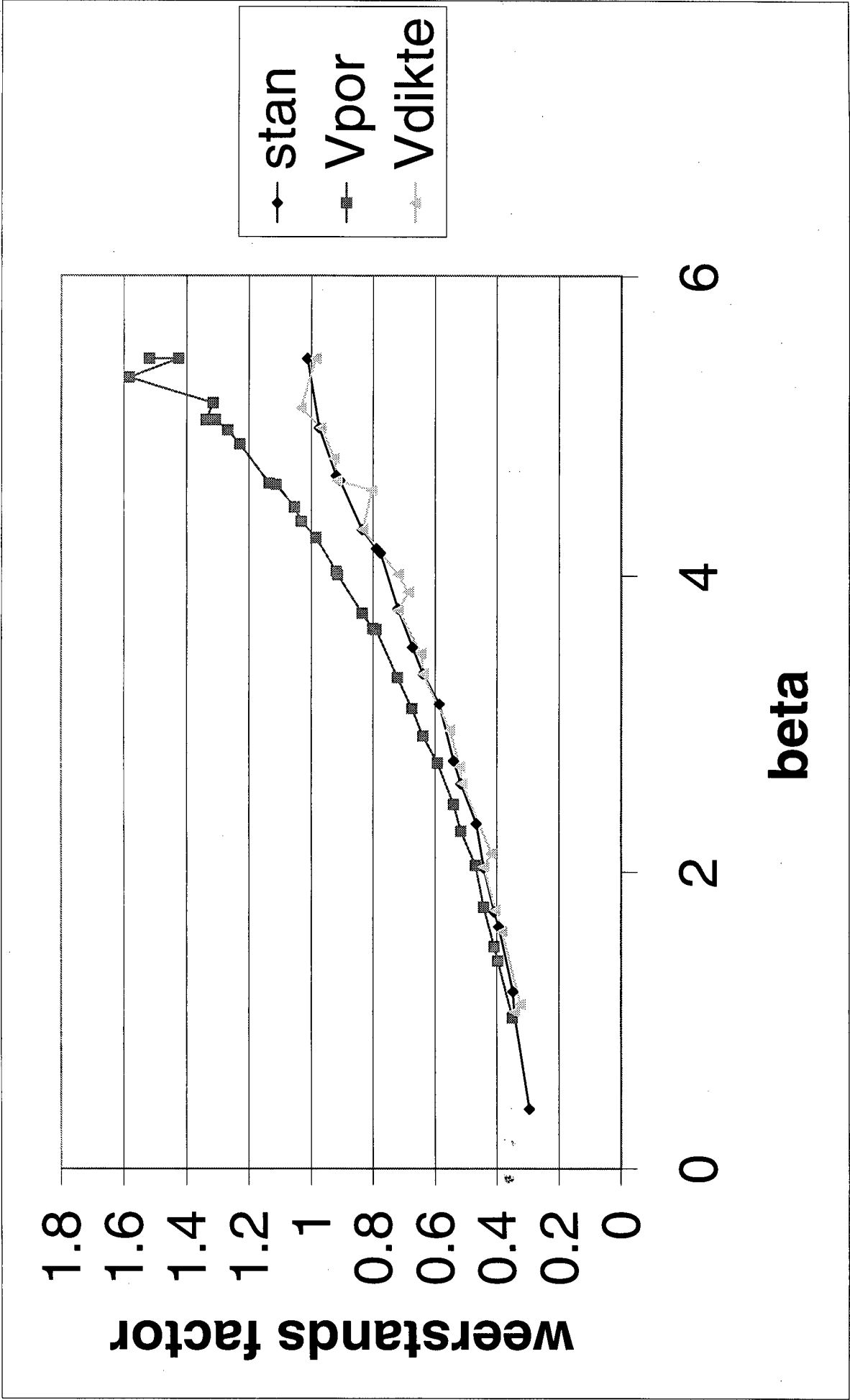


Bijlage 76: Weerstandsfactor: alle cases

Bijlage 77: Weerstandsfactor: invloed spreiding porositeit en laagdikte

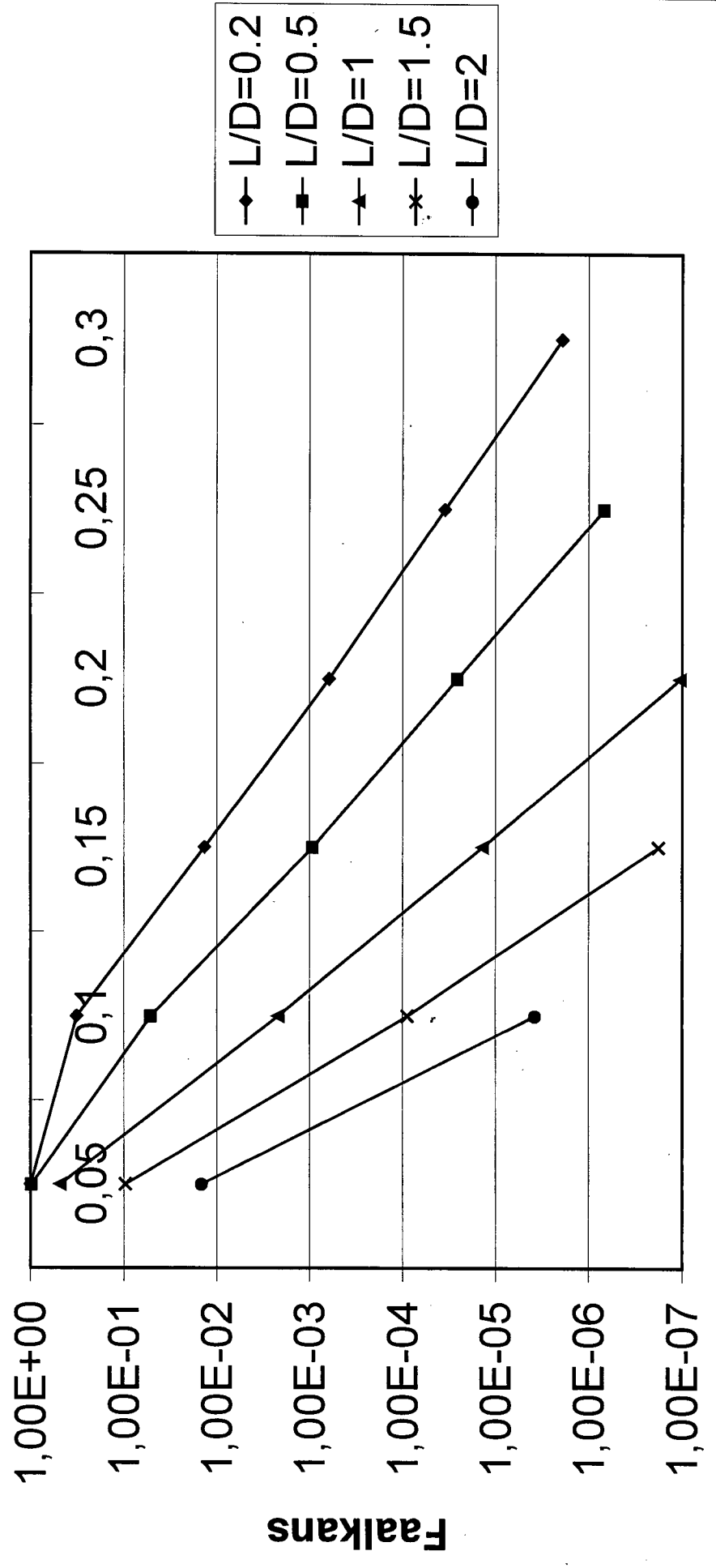
Beta tegen weerstands factor





- Bijlage 78:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 4
- Bijlage 79:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: dicht
- Bijlage 80:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: lek
- Bijlage 81:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: gat
- Bijlage 82:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 3: geen spleet
- Bijlage 83:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 3: spleet
- Bijlage 84:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: 10*gem. lek
- Bijlage 85:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: gem. gat/10
- Bijlage 86:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: V laagdikte *3
- Bijlage 87:Grafiek faalkans als functie van relatieve inbedding case 2: V porositeit *3

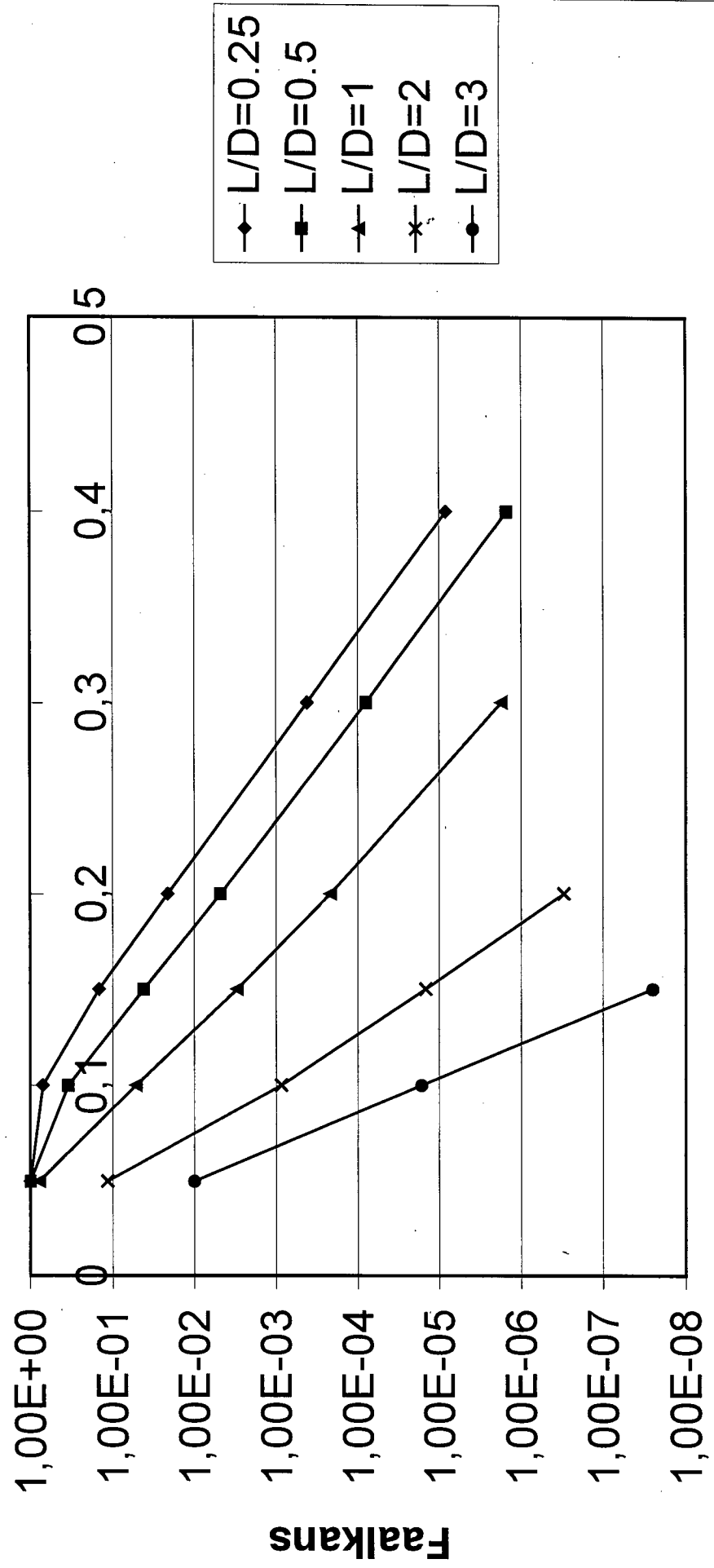
Faalkans case 4: dicht



relatieve inbedding d/D

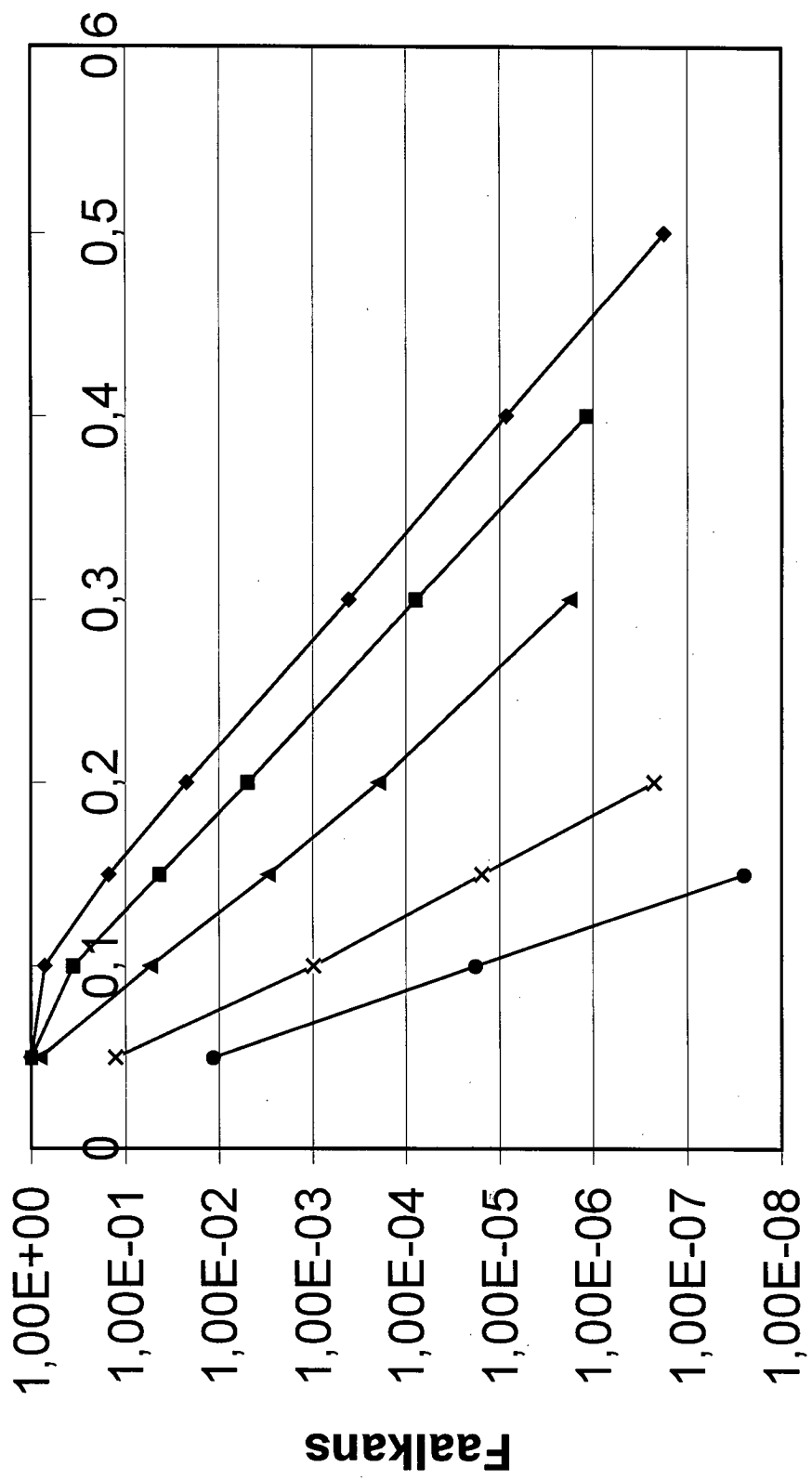
Faalkans

Faalkans case 2: dicht



relatieve inbedding d/D

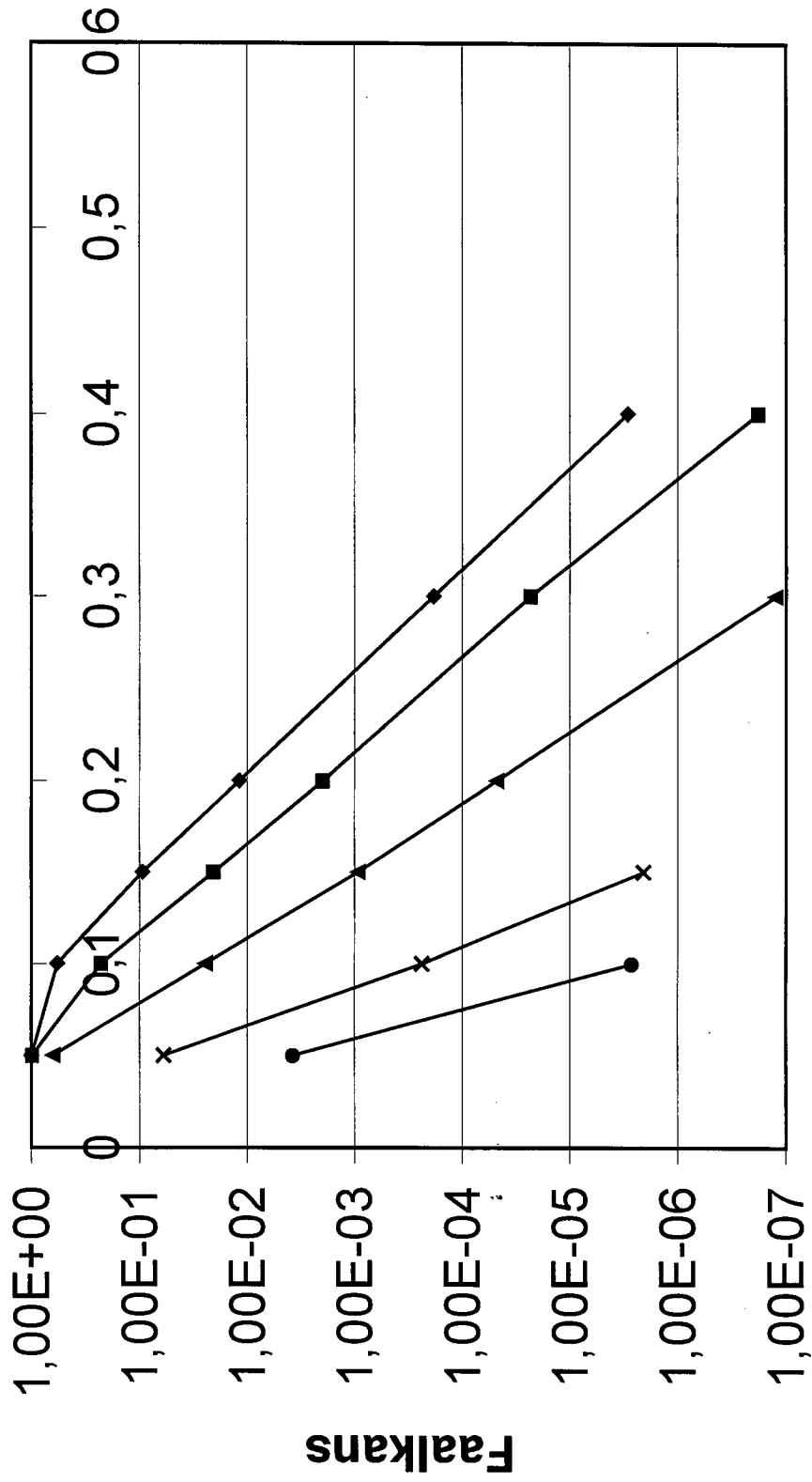
Faalkans case 2: lek



relative inbeding d/D

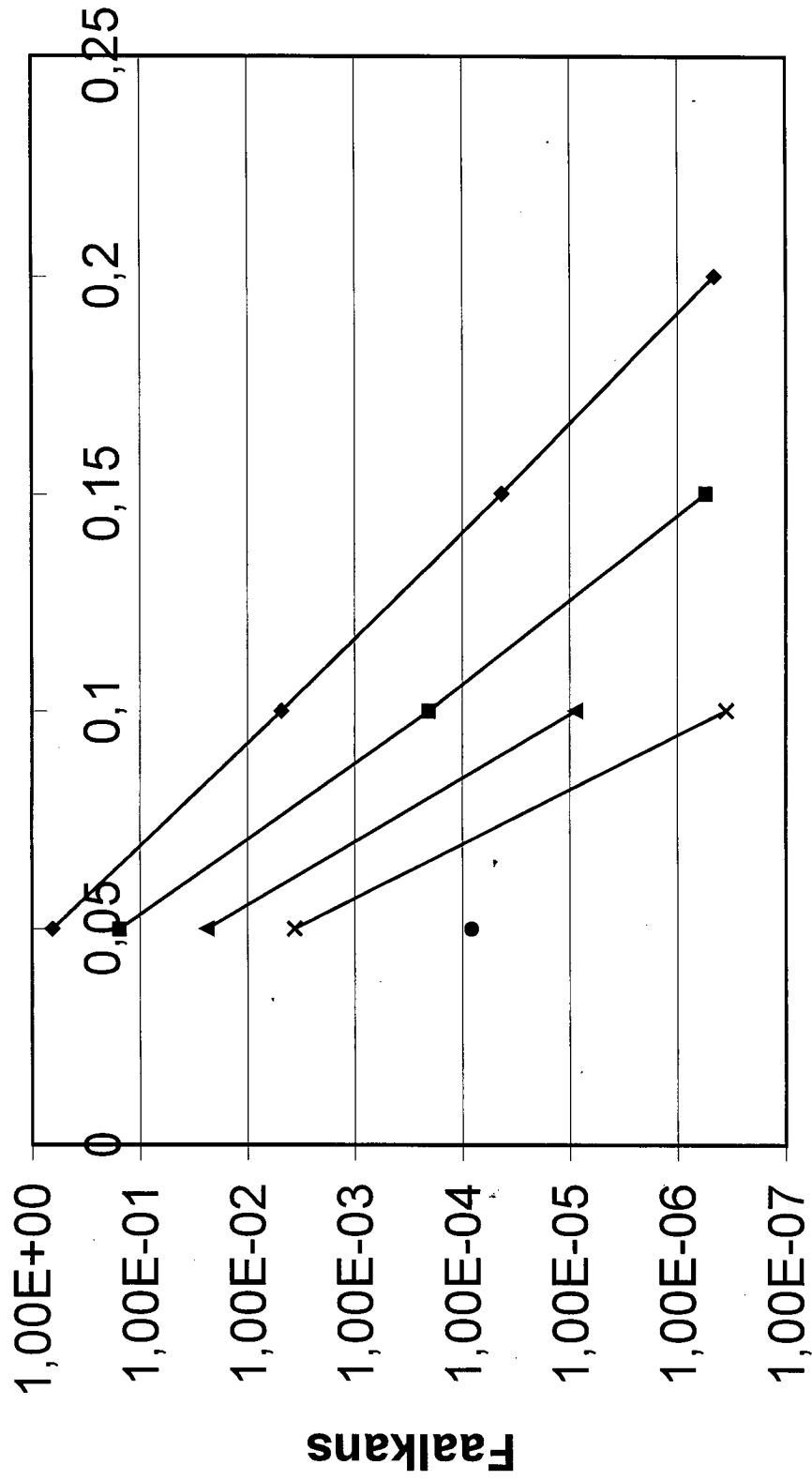
- ◆ L/D=0.25
- L/D=0.5
- ▲ L/D=1
- * L/D=2
- L/D=3

Faalkans case 2: gat



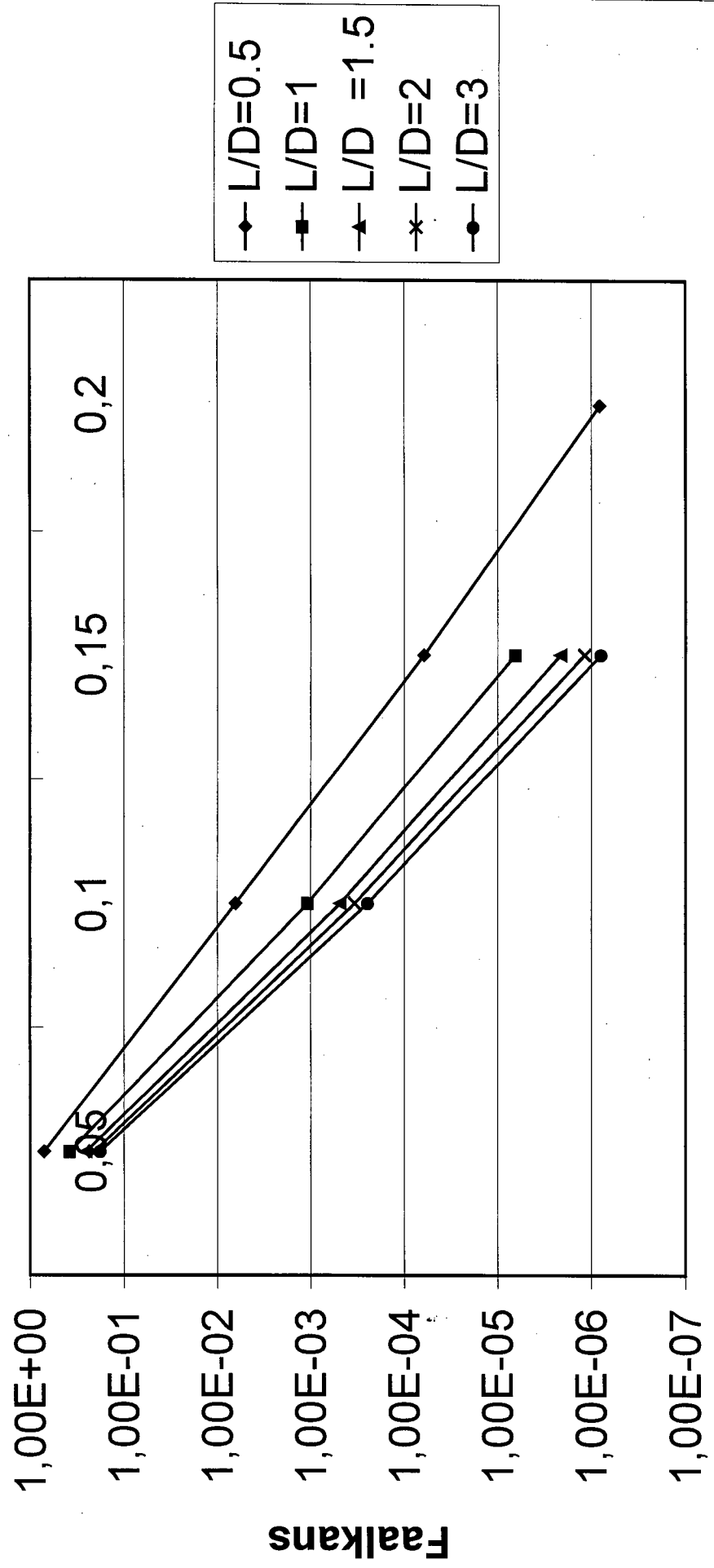
relatieve inbedding d/D

Faalkans case 3 zonder spleet



relatieve inbedding d/D

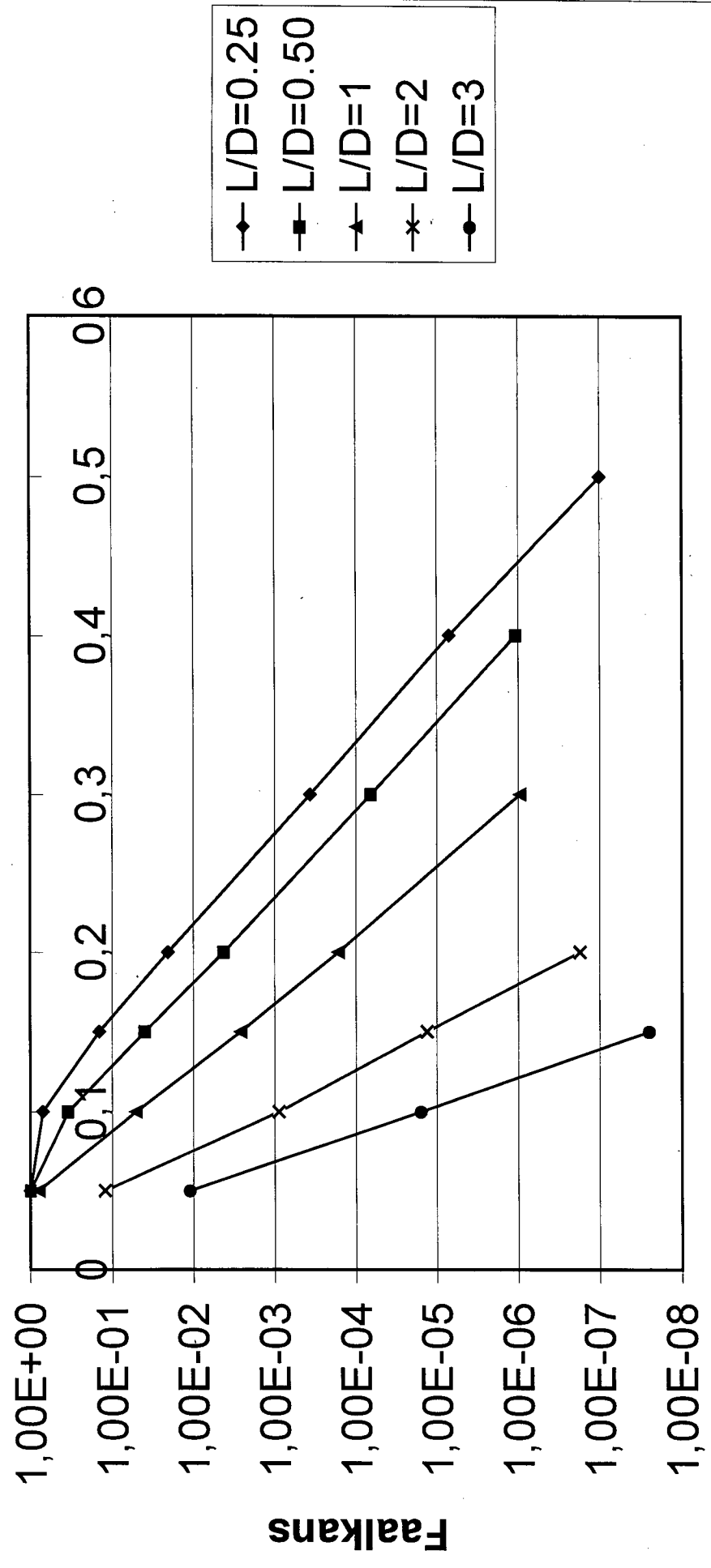
Faalkans case 3 met spleet



relatieve inbedding d/D

Faalkans

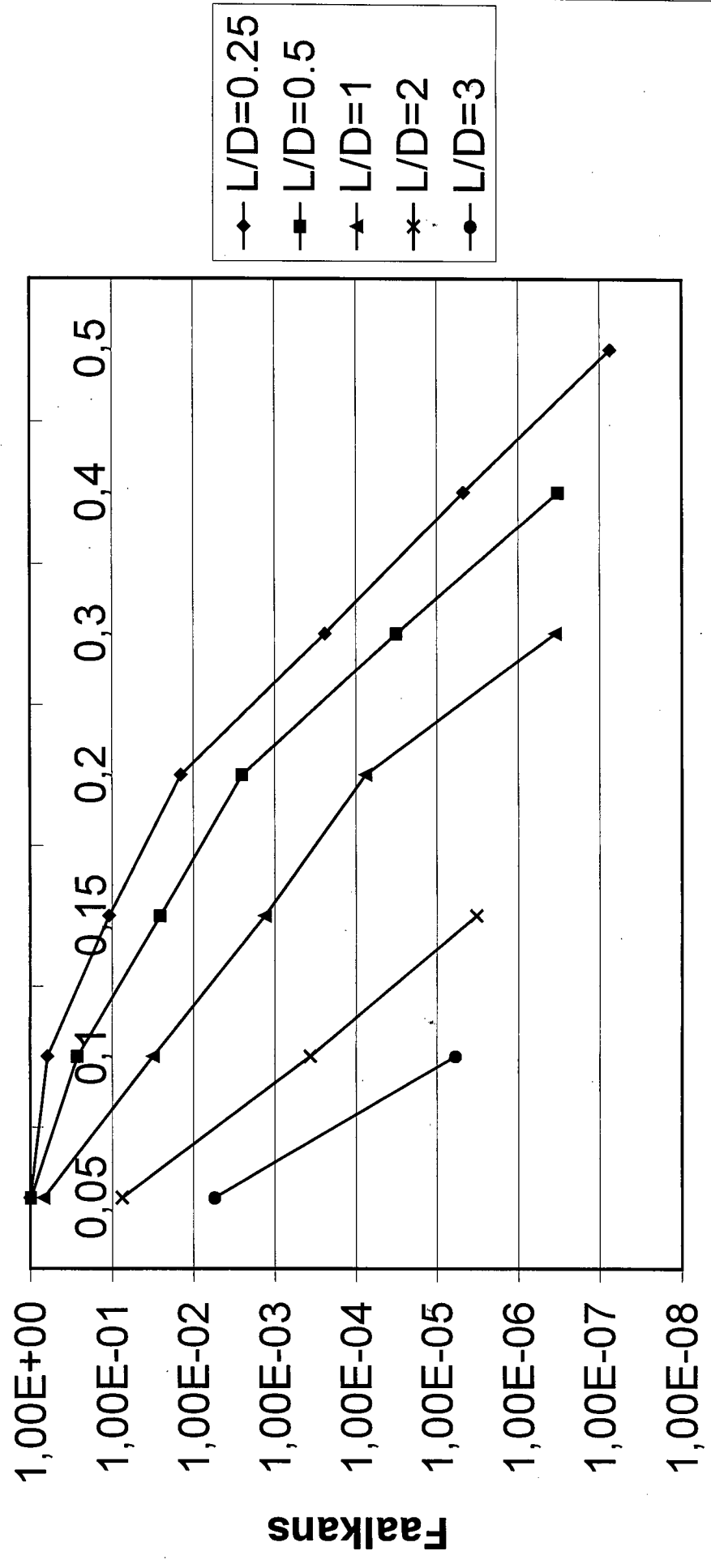
Faalkans case 2: 10*lek



relative inbedding d/D

Faalkans

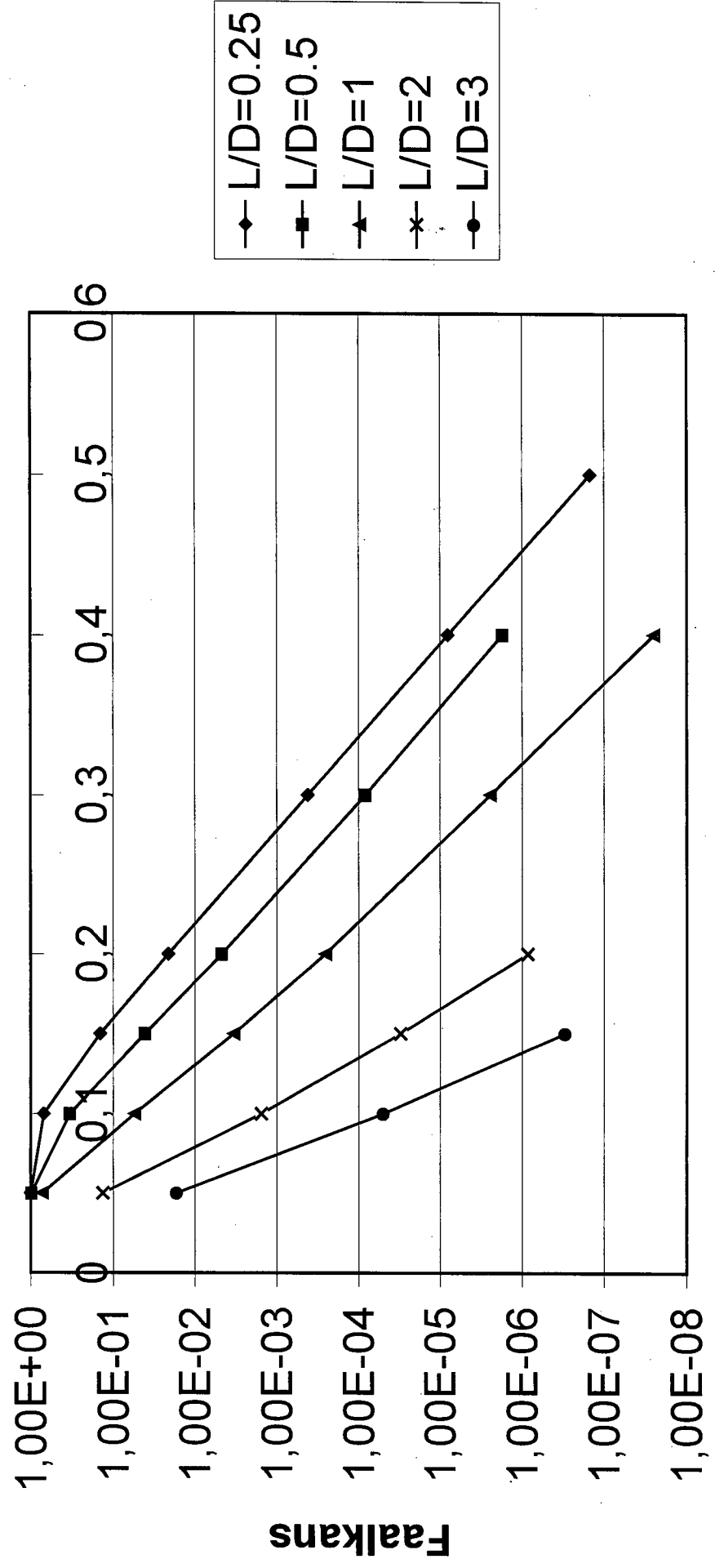
Faalkans case 2: gat/10



relatieve inbedding d/D

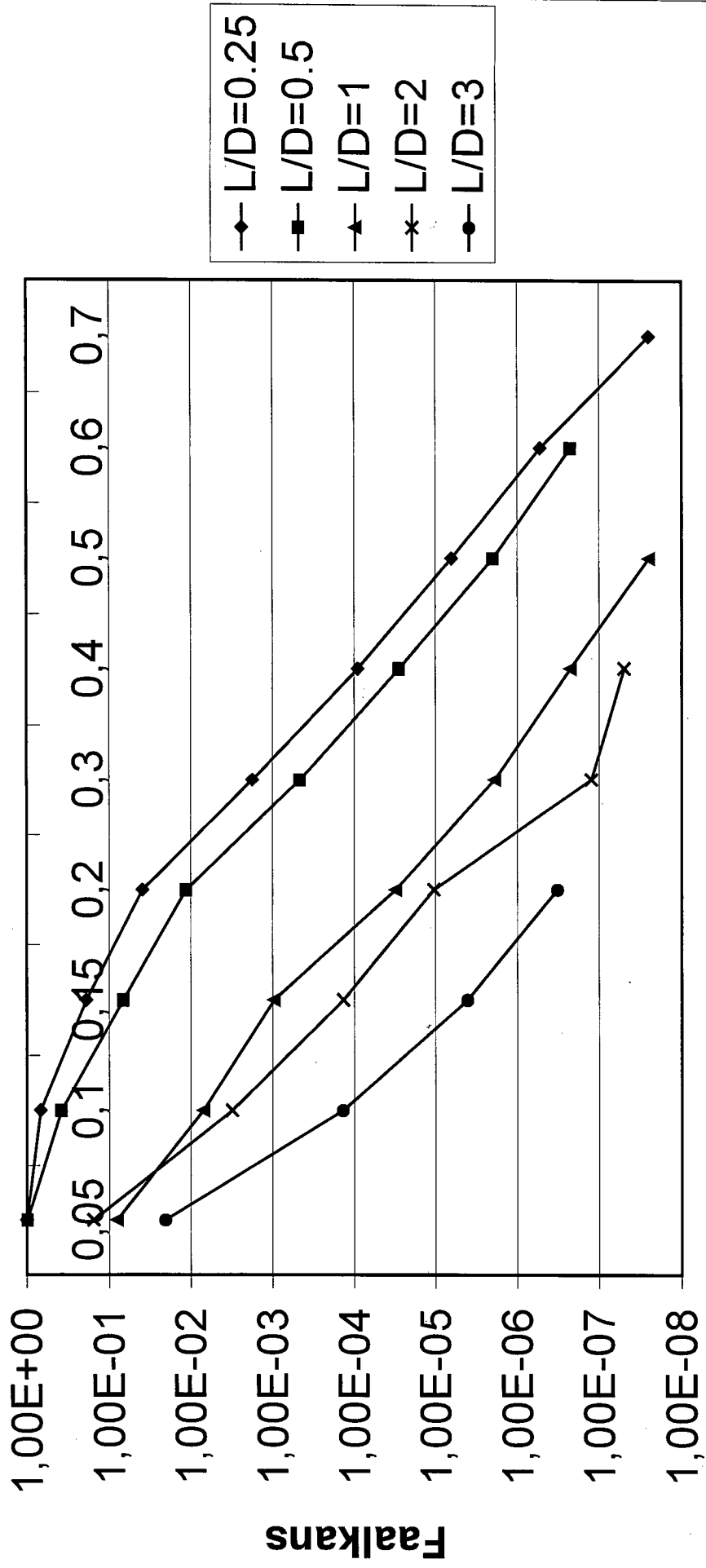
Faalkans

Faalkans case 2: V laagdikte*3



relatieve inbedding d/D

Faalkans case2: V porositeit*3



relative inbedding d/D

Bijlage 88:Foutenboomanalyse case3

Pspleet
zetting

vloer 0.5

L/D : 1 0.1 0.05 0.02 0.01 0.005 0.001

L/D : d/D	Pv	Pz	Ps*Pz	Ps*Pz	Ps*Pz	Ps*Pz	Ps*Pz	Ps*Pz	Ps*Pz	Ps*Pz	Ps*Pz
0.05	6.51E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01	7.10E-01
0.1	4.82E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03	6.41E-03
0.15	4.27E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05	6.16E-05
0.2	4.60E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07	8.13E-07

L/D : 1

d/D

0.05	1.55E-01	3.80E-01	3.80E-01	1.90E-01
0.1	2.03E-04	1.09E-03	5.46E-04	2.18E-04
0.15	5.45E-07	6.46E-06	3.23E-06	6.46E-07

L/D : 1.5

d/D

0.05	2.41E-02	2.54E-01	2.54E-01	1.27E-01	5.08E-02	2.54E-02			
0.1	8.82E-06	4.86E-04	4.86E-04	2.43E-04	9.71E-05	4.86E-05	2.43E-05	9.71E-06	4.25E-08
		2.13E-06	2.13E-06	1.06E-06	4.25E-07	2.13E-07	1.06E-07	4.25E-08	

L/D : 2

d/D

0.05	3.66E-03	2.08E-01	2.08E-01	1.04E-01	4.15E-02	2.08E-02	1.04E-02	4.15E-03	
0.1	3.53E-07	3.39E-04	3.39E-04	1.70E-04	6.78E-05	3.39E-05	1.70E-05	6.78E-06	2.36E-08
		1.18E-06	1.18E-06	5.91E-07	2.36E-07	1.18E-07	5.91E-08	2.36E-08	

L/D : 3

d/D

0.05	8.25E-05	1.79E-01	1.79E-01	8.97E-02	3.59E-02	1.79E-02	8.97E-03	3.59E-03	1.79E-04	1.79E-04
		2.48E-04	2.48E-04	1.24E-04	4.95E-05	2.48E-05	1.24E-05	4.95E-06	1.24E-06	2.48E-07
		7.90E-07	7.90E-07	3.95E-07	1.58E-07	7.90E-08	3.95E-08	1.58E-08	7.90E-09	7.90E-10

Bijlage 89:Literatuur over correlatie, kopie uit [Hogg and Craig 1971]

EXERCISES

- 2.10. Let X_1 and X_2 have the joint p.d.f. $f(x_1, x_2) = x_1 + x_2, 0 < x_1 < 1, 0 < x_2 < 1$, zero elsewhere. Find the conditional mean and variance of X_2 , given $X_1 = x_1, 0 < x_1 < 1$.
- 2.11. Let $f(x_1|x_2) = c_1 x_1/x_2^2, 0 < x_1 < x_2, 0 < x_2 < 1$, zero elsewhere, and $f_2(x_2) = c_2 x_2^4, 0 < x_2 < 1$, zero elsewhere, denote, respectively, the conditional p.d.f. of X_1 , given $X_2 = x_2$, and the marginal p.d.f. of X_2 . Determine: (a) the constants c_1 and c_2 ; (b) the joint p.d.f. of X_1 and X_2 ; (c) $\Pr(\frac{1}{4} < X_1 < \frac{1}{2} | X_2 = \frac{3}{8})$; and (d) $\Pr(\frac{1}{4} < X_1 < \frac{1}{2})$.
- 2.12. Let $f(x_1, x_2) = 21x_1^2 x_2^3, 0 < x_1 < x_2 < 1$, zero elsewhere, be the joint p.d.f. of X_1 and X_2 . Find the conditional mean and variance of X_1 , given $X_2 = x_2, 0 < x_2 < 1$.
- 2.13. If X_1 and X_2 are random variables of the discrete type having p.d.f. $f(x_1, x_2) = (x_1 + 2x_2)/18, (x_1, x_2) = (1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2)$, zero elsewhere, determine the conditional mean and variance of X_2 , given $X_1 = x_1, x_1 = 1$ or 2 .
- 2.14. Five cards are drawn at random and without replacement from a bridge deck. Let the random variables X_1, X_2 , and X_3 denote, respectively, the number of spades, the number of hearts, and the number of diamonds that appear among the five cards. (a) Determine the joint p.d.f. of X_1, X_2 , and X_3 . (b) Find the marginal probability density functions of X_1, X_2 , and X_3 . (c) What is the joint conditional p.d.f. of X_2 and X_3 , given that $X_1 = 3$?
- 2.15. Let X_1 and X_2 have the joint p.d.f. $f(x_1, x_2)$ described as follows:

$$\frac{f(x_1, x_2)}{f(x_1, x_2)} \Big| \begin{array}{c} (0, 0) \\ \frac{1}{18} \end{array} \quad \begin{array}{c} (0, 1) \\ \frac{3}{18} \end{array} \quad \begin{array}{c} (1, 0) \\ \frac{4}{18} \end{array} \quad \begin{array}{c} (1, 1) \\ \frac{3}{18} \end{array} \quad \begin{array}{c} (2, 0) \\ \frac{6}{18} \end{array} \quad \begin{array}{c} (2, 1) \\ \frac{1}{18} \end{array}$$

and $f(x_1, x_2)$ is equal to zero elsewhere. Find the two marginal probability density functions and the two conditional means.

- 2.16. Let us choose at random a point from the interval $(0, 1)$ and let the random variable X_1 be equal to the number which corresponds to that point. Then choose a point at random from the interval $(0, x_1)$, where x_1 is the experimental value of X_1 ; and let the random variable X_2 be equal to the number which corresponds to this point. (a) Make assumptions about the marginal p.d.f. $f_1(x_1)$ and the conditional p.d.f. $f(x_2|x_1)$. (b) Compute $\Pr(X_1 + X_2 \geq 1)$. (c) Find the conditional mean $E(X_1|x_2)$.
- 2.17. Let $f(x)$ and $F(x)$ denote, respectively, the p.d.f. and the distribution function of the random variable X . The conditional p.d.f. of X , given $X > x_0, x_0$ a fixed number, is defined by $f(x|X > x_0) = f(x)/[1 - F(x_0)]$, $x_0 < x$, zero elsewhere. This kind of conditional p.d.f. finds application in a

problem of time until death, given survival until time x_0 . (a) Show that $f(x|X > x_0)$ is a p.d.f. (b) Let $f(x) = e^{-x}, 0 < x < \infty$, zero elsewhere. Compute $\Pr(X > 2 | X > 1)$.

2.3 The Correlation Coefficient

Let X, Y , and Z denote random variables that have joint p.d.f. $f(x, y, z)$. If $u(x, y, z)$ is a function of x, y , and z , then $E[u(X, Y, Z)]$ was defined, subject to its existence, on p. 42. The existence of all mathematical expectations will be assumed in this discussion. The means of X, Y , and Z , say μ_1, μ_2 , and μ_3 , are obtained by taking $u(x, y, z)$ to be x, y , and z , respectively; and the variances of X, Y , and Z , say σ_1^2, σ_2^2 , and σ_3^2 , are obtained by setting the function $u(x, y, z)$ equal to $(x - \mu_1)^2, (y - \mu_2)^2$, and $(z - \mu_3)^2$, respectively. Consider the mathematical expectation

$$\begin{aligned} E[(X - \mu_1)(Y - \mu_2)] &= E(XY - \mu_2 X - \mu_1 Y + \mu_1 \mu_2) \\ &= E(XY) - \mu_2 E(X) - \mu_1 E(Y) + \mu_1 \mu_2 \\ &= E(XY) - \mu_1 \mu_2. \end{aligned}$$

This number is called the *covariance* of X and Y . The covariance of X and Z is given by $E[(X - \mu_1)(Z - \mu_3)]$, and the covariance of Y and Z is $E[(Y - \mu_2)(Z - \mu_3)]$. If each of σ_1 and σ_2 is positive, the number

$$\rho_{12} = \frac{E[(X - \mu_1)(Y - \mu_2)]}{\sigma_1 \sigma_2}$$

is called the *correlation coefficient* of X and Y . If the standard deviations are positive, the correlation coefficient of any two random variables is defined to be the covariance of the two random variables divided by the product of the standard deviations of the two random variables. It should be noted that the expected value of the product of two random variables is equal to the product of their expectations plus their covariance.

Example 1. Let the random variables X and Y have the joint p.d.f.

$$\begin{aligned} f(x, y) &= x + y, \quad 0 < x < 1, 0 < y < 1, \\ &= 0 \text{ elsewhere.} \end{aligned}$$

We shall compute the correlation coefficient of X and Y . When only two variables are under consideration, we shall denote the correlation coefficient by ρ . Now

$$\mu_1 = E(X) = \int_0^1 \int_0^1 x(x + y) dx dy = \frac{1}{3}$$

and

$$\sigma_1^2 = E(X^2) - \mu_1^2 = \int_0^1 \int_0^1 x^2(x+y) dx dy - \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{11}{144}.$$

Similarly,

$$\mu_2 = E(Y) = \frac{1}{2} \quad \text{and} \quad \sigma_2^2 = E(Y^2) - \mu_2^2 = \frac{11}{144}.$$

The covariance of X and Y is

$$E(XY) - \mu_1\mu_2 = \int_0^1 \int_0^1 xy(x+y) dx dy - \left(\frac{1}{2}\right)^2 = -\frac{1}{144}.$$

Accordingly, the correlation coefficient of X and Y is

$$\rho = \frac{-\frac{1}{144}}{\sqrt{\left(\frac{11}{144}\right)\left(\frac{11}{144}\right)}} = -\frac{1}{11}.$$

Remark. For certain kinds of distributions of two random variables, say X and Y , the correlation coefficient ρ proves to be a very useful characteristic of the distribution. Unfortunately, the formal definition of ρ does not reveal this fact. At this time we make some observations about ρ , some of which will be explored more fully at a later stage. It will soon be seen that if a joint distribution of two variables has a correlation coefficient (that is, if both of the variances are positive), then ρ satisfies $-1 \leq \rho \leq 1$. If $\rho = 1$, there is a line with equation $y = a + bx$, $b > 0$, the graph of which contains all of the probability for the distribution of X and Y . In this extreme case, we have $\Pr(Y = a + bX) = 1$. If $\rho = -1$, we have the same state of affairs except that $b < 0$. This suggests the following interesting question: When ρ does not have one of its extreme values, is there a line in the xy -plane such that the probability for X and Y tends to be concentrated in a band about this line? Under certain restrictive conditions this is in fact the case, and under those conditions we can look upon ρ as a measure of the intensity of the concentration of the probability for X and Y about that line.

Next, let $f(x, y)$ denote the joint p.d.f. of two random variables X and Y and let $f_1(x)$ denote the marginal p.d.f. of X . The conditional p.d.f. of Y , given $X = x$, is

$$f(y|x) = \frac{f(x, y)}{f_1(x)}$$

at points where $f_1(x) > 0$. Then the conditional mean of Y , given $X = x$, is given by

$$E(Y|x) = \int_{-\infty}^{\infty} yf(y|x) dy = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} yf(x, y) dy}{f_1(x)},$$

when dealing with random variables of the continuous type. This conditional mean of Y , given $X = x$, is, of course, a function of x alone, say $\varphi(x)$. In like vein, the conditional mean of X , given $Y = y$, is a function of y alone, say $\psi(y)$.

In case $\varphi(x)$ is a linear function of x , say $\varphi(x) = a + bx$, we say the conditional mean of Y is linear in x ; or that Y has a linear conditional mean. When $\varphi(x) = a + bx$, the constants a and b have simple values which will now be determined.

It will be assumed that neither σ_1^2 nor σ_2^2 , the variances of X and Y , is zero. From

$$E(Y|x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} yf(x, y) dy}{f_1(x)} = a + bx,$$

we have

$$(1) \quad \int_{-\infty}^{\infty} yf(x, y) dy = (a + bx)f_1(x).$$

If both members of Equation (1) are integrated on x , it is seen that

$$E(Y) = a + bE(X),$$

or

$$(2) \quad \mu_2 = a + b\mu_1,$$

where $\mu_1 = E(X)$ and $\mu_2 = E(Y)$. If both members of Equation (1) are first multiplied by x and then integrated on x , we have

$$E(XY) = aE(X) + bE(X^2),$$

or

$$(3) \quad \rho\sigma_1\sigma_2 + \mu_1\mu_2 = a\mu_1 + b(\sigma_1^2 + \mu_1^2),$$

where $\rho\sigma_1\sigma_2$ is the covariance of X and Y . The simultaneous solution of Equations (2) and (3) yields

$$a = \mu_2 - \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \mu_1 \quad \text{and} \quad b = \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

That is,

$$\varphi(x) = E(Y|x) = \mu_2 + \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1} (x - \mu_1)$$

is the conditional mean of Y , given $X = x$, when the conditional mean of Y is linear in x . If the conditional mean of X , given $Y = y$, is linear in y , then that conditional mean is given by

$$\psi(y) = E(X|y) = \mu_1 + \rho \frac{\sigma_1}{\sigma_2} (y - \mu_2).$$

We shall next investigate the variance of a conditional distribution under the assumption that the conditional mean is linear. The conditional variance of Y is given by

$$(4) \quad E\{[Y - E(Y|x)]^2|x\} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[y - \mu_2 - \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1}(x - \mu_1) \right]^2 f(y|x) dy \\ = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left[(y - \mu_2) - \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1}(x - \mu_1) \right]^2 f(x, y) dy}{f_1(x)}$$

when the random variables are of the continuous type. This variance is nonnegative and is at most a function of x alone. If then, it is multiplied by $f_1(x)$ and integrated on x , the result obtained will be nonnegative. This result is

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[(y - \mu_2) - \rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1}(x - \mu_1) \right]^2 f(x, y) dy dx \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[(y - \mu_2)^2 - 2\rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1}(y - \mu_2)(x - \mu_1) + \rho^2 \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}(x - \mu_1)^2 \right] \\ \times f(x, y) dy dx \\ = E[(Y - \mu_2)^2] - 2\rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1} E[(X - \mu_1)(Y - \mu_2)] + \rho^2 \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} E[(X - \mu_1)^2] \\ = \sigma_2^2 - 2\rho \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \rho \sigma_1 \sigma_2 + \rho^2 \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \sigma_1^2 \\ = \sigma_2^2(1 - \rho^2) + \rho^2 \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} \sigma_1^2 \geq 0.$$

That is, if the variance, Equation (4), is denoted by $k(x)$, then $E[k(X)] = \sigma_2^2(1 - \rho^2) \geq 0$. Accordingly, $\rho^2 \leq 1$, or $-1 \leq \rho \leq 1$. It is left as an exercise to prove that $-1 \leq \rho \leq 1$ whether the conditional mean is or is not linear.

Suppose that the variance, Equation (4), is positive but not a function of x ; that is, the variance is a constant $k > 0$. Now if k is multiplied by $f_1(x)$ and integrated on x , the result is k , so that $k = \sigma_2^2(1 - \rho^2)$. Thus, in this case, the variance of each conditional distribution of Y , given $X = x$, is $\sigma_2^2(1 - \rho^2)$. If $\rho = 0$, the variance of each conditional distribution of Y , given $X = x$, is σ_2^2 , the variance of the marginal distribution of Y . On the other hand, if ρ^2 is near one, the variance of each conditional distribution of Y , given $X = x$, is relatively small, and there is a high concentration of the probability for this conditional distribution near the mean $E(Y|x) = \mu_2 + \rho(\sigma_2/\sigma_1)(x - \mu_1)$.

It should be pointed out that if the random variables X and Y in the preceding discussion are taken to be of the discrete type, the results just obtained are valid.

Example 2. Let the random variables X and Y have the linear conditional means $E(Y|x) = 4x + 3$ and $E(X|y) = \frac{1}{4}y - 3$. In accordance with the general formulas for the linear conditional means, we see that $E(Y|x) = \mu_2$ if $x = \mu_1$ and $E(X|y) = \mu_1$ if $y = \mu_2$. Accordingly, in this special case, we have $\mu_2 = 4\mu_1 + 3$ and $\mu_1 = \frac{1}{4}\mu_2 - 3$ so that $\mu_1 = -\frac{1}{4}$ and $\mu_2 = -12$. The general formulas for the linear conditional means also show that the product of the coefficients of x and y , respectively, is equal to ρ^2 and that the quotient of these coefficients is equal to σ_2^2/σ_1^2 . Here $\rho^2 = 4(\frac{1}{4}) = 1$ with $\rho = \frac{1}{4}$ (not $-\frac{1}{4}$), and $\sigma_2^2/\sigma_1^2 = 64$. Thus, from the two linear conditional means, we are able to find the values of μ_1 , μ_2 , ρ , and σ_2/σ_1 , but not the values of σ_1 and σ_2 .

This section will conclude with a definition and an illustrative example. Let $f(x, y)$ denote the joint p.d.f. of the two random variables X and Y . If $E(e^{t_1 X + t_2 Y})$ exists for $-h_1 < t_1 < h_1$, $-h_2 < t_2 < h_2$, where h_1 and h_2 are positive, it is denoted by $M(t_1, t_2)$ and is called the *moment-generating function* of the joint distribution of X and Y . As in the case of one random variable, the moment-generating function $M(t_1, t_2)$ completely determines the joint distribution of X and Y , and hence the marginal distributions of X and Y . In fact,

$$M(t_1, 0) = E(e^{t_1 X}) = M(t_1)$$

and

$$M(0, t_2) = E(e^{t_2 Y}) = M(t_2).$$

In addition, in the case of random variables of the continuous type,

$$\frac{\partial^{k+m} M(t_1, t_2)}{\partial t_1^k \partial t_2^m} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^k y^m e^{t_1 x + t_2 y} f(x, y) dx dy,$$

so that

$$\frac{\partial^{k+m} M(t_1, t_2)}{\partial t_1^k \partial t_2^m} \Big|_{t_1=t_2=0} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^k y^m f(x, y) dx dy = E(X^k Y^m).$$

For instance, in a simplified notation which appears to be clear,

$$\mu_1 = E(X) = \frac{\partial M(0, 0)}{\partial t_1}, \quad \mu_2 = E(Y) = \frac{\partial M(0, 0)}{\partial t_2},$$

$$\sigma_1^2 = E(X^2) - \mu_1^2 = \frac{\partial^2 M(0, 0)}{\partial t_1^2} - \mu_1^2, \quad (5)$$

$$\sigma_2^2 = E(Y^2) - \mu_2^2 = \frac{\partial^2 M(0, 0)}{\partial t_2^2} - \mu_2^2,$$

$$E[(X - \mu_1)(Y - \mu_2)] = \frac{\partial^2 M(0, 0)}{\partial t_1 \partial t_2} - \mu_1 \mu_2.$$

It is fairly obvious that the results of Equations (5) hold if X and Y are random variables of the discrete type. Thus the correlation coefficients may be computed by using the moment-generating function of the joint distribution if that function is readily available. An illustrative example follows.

Example 3. Let the continuous-type random variables X and Y have the joint p.d.f.

$$f(x, y) = e^{-y}, \quad 0 < x < y < \infty, \\ = 0 \text{ elsewhere.}$$

The moment-generating function of this joint distribution is

$$M(t_1, t_2) = \int_0^\infty \int_x^\infty \exp(t_1 x + t_2 y - y) dy dx \\ = \frac{1}{(1-t_1-t_2)(1-t_2)},$$

provided $t_1 + t_2 < 1$ and $t_2 < 1$. For this distribution, Equations (5) become

$$(6) \quad \mu_1 = 1, \quad \mu_2 = 2, \\ \sigma_1^2 = 1, \quad \sigma_2^2 = 2, \\ E[(X - \mu_1)(Y - \mu_2)] = 1.$$

Verification of results of Equations (6) is left as an exercise. If, momentarily, we accept these results, the correlation coefficient of X and Y is $\rho = 1/\sqrt{2}$. Furthermore, the moment-generating functions of the marginal distributions of X and Y are, respectively,

$$M(t_1, 0) = \frac{1}{1-t_1}, \quad t_1 < 1, \\ M(0, t_2) = \frac{1}{(1-t_2)^2}, \quad t_2 < 1.$$

These moment-generating functions are, of course, respectively, those of the marginal probability density functions,

$$f_1(x) = \int_x^\infty e^{-y} dy = e^{-x}, \quad 0 < x < \infty,$$

zero elsewhere, and

$$f_2(y) = e^{-y} \int_0^y dx = ye^{-y}, \quad 0 < y < \infty,$$

zero elsewhere.

EXERCISES

2.18. Let the random variables X and Y have the joint p.d.f.

- (a) $f(x, y) = \frac{1}{3}$, $(x, y) = (0, 0), (1, 1), (2, 2)$, zero elsewhere.
 (b) $f(x, y) = \frac{1}{3}$, $(x, y) = (0, 2), (1, 1), (2, 0)$, zero elsewhere.
 (c) $f(x, y) = \frac{1}{3}$, $(x, y) = (0, 0), (1, 1), (2, 0)$, zero elsewhere.

In each case compute the correlation coefficient of X and Y .

2.19. Let X and Y have the joint p.d.f. described as follows:

$$f(x, y) \begin{cases} (1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3) \\ \frac{2}{15}, \frac{4}{15}, \frac{2}{15}, \frac{2}{15}, \frac{2}{15}, \frac{4}{15} \end{cases}$$

and $f(x, y)$ is equal to zero elsewhere. Find the correlation coefficient ρ .

2.20. Let $f(x, y) = 2$, $0 < x < y < 1$, zero elsewhere, be the joint p.d.f. of X and Y . Show that the conditional means are, respectively, $(1+x)/2$, $0 < x < 1$, and $y/2$, $0 < y < 1$. Show that the correlation coefficient of X and Y is $\rho = \frac{1}{2}$.

2.21. Show that the variance of the conditional distribution of Y , given $X = x$, in Exercise 2.20, is $(1-x)^2/12$, $0 < x < 1$, and that the variance of the conditional distribution of X , given $Y = y$, is $y^2/12$, $0 < y < 1$.

2.22. Verify the results of Equations (6) of this section.

2.23. Let X and Y have the joint p.d.f. $f(x, y) = 1$, $-x < y < x$, $0 < x < 1$, zero elsewhere. Show that, on the set of positive probability density, the graph of $E(Y|x)$ is a straight line, whereas that of $E(X|y)$ is not a straight line.

2.24. If the correlation coefficient ρ of X and Y exists, show that $-1 \leq \rho \leq 1$. Hint: Consider the discriminant of the nonnegative quadratic function $h(v) = E\{(X - \mu_1) + v(Y - \mu_2)\}^2$, where v is real and is not a function of X nor of Y .

2.25. Let $\psi(t_1, t_2) = \ln M(t_1, t_2)$, where $M(t_1, t_2)$ is the moment-generating function of X and Y . Show that

$$\frac{\partial \psi(0, 0)}{\partial t_i} = \frac{\partial^2 \psi(0, 0)}{\partial t_i^2}, \quad i = 1, 2,$$

and

$$\frac{\partial^2 \psi(0, 0)}{\partial t_1 \partial t_2}$$

yield the means, the variances, and the covariance of the two random variables.

2.26. Let X_1, X_2 , and X_3 be three random variables with means, variances, and correlation coefficients, denoted by $\mu_1, \mu_2, \mu_3; \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$; and

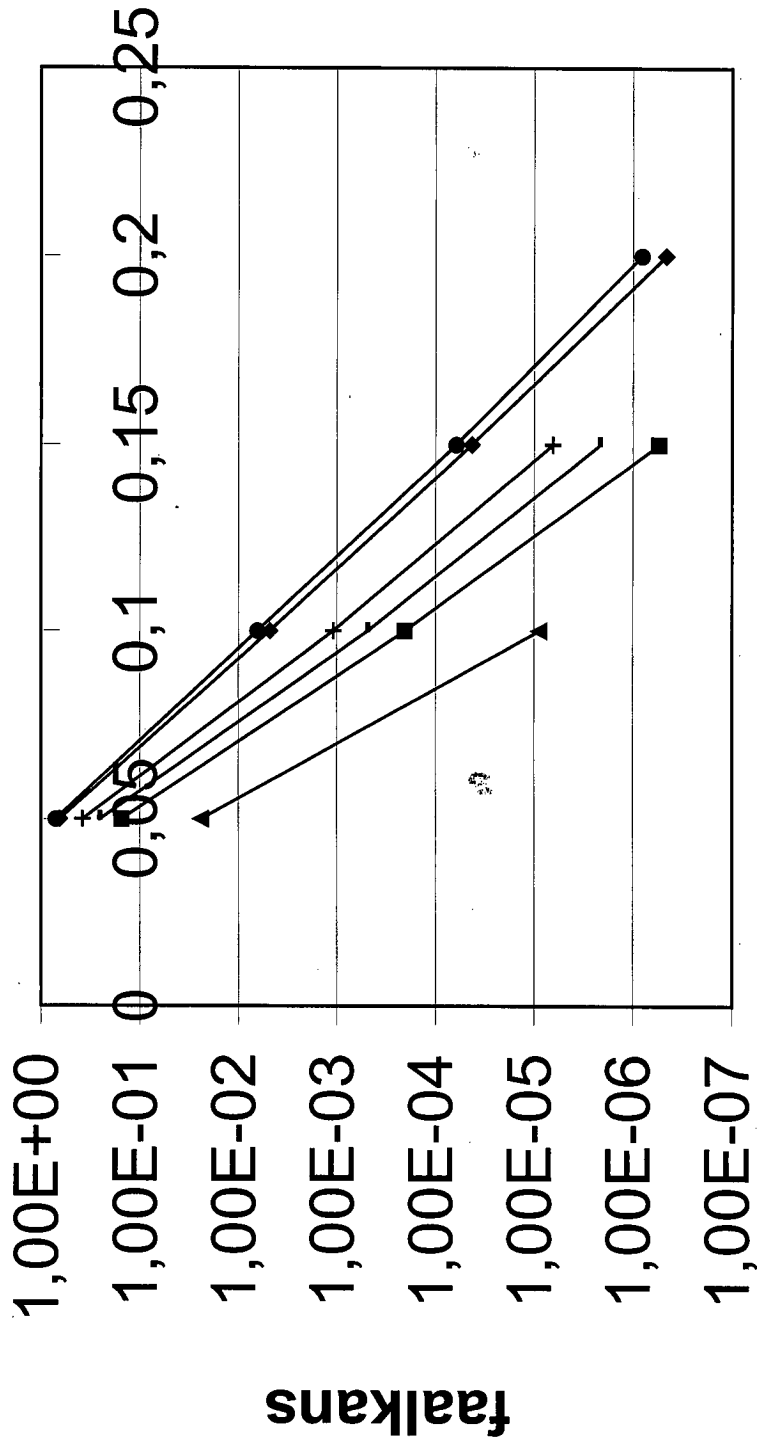
Bijlage 90: Invloed van een spleet op de faalkans bij kleine L/D

Bijlage 91: Invloed van een spleet op de faalkans bij grote L/D

Bijlage 92: Invloed van een spleet op de betrouwbaarheidsindex bij kleine L/D

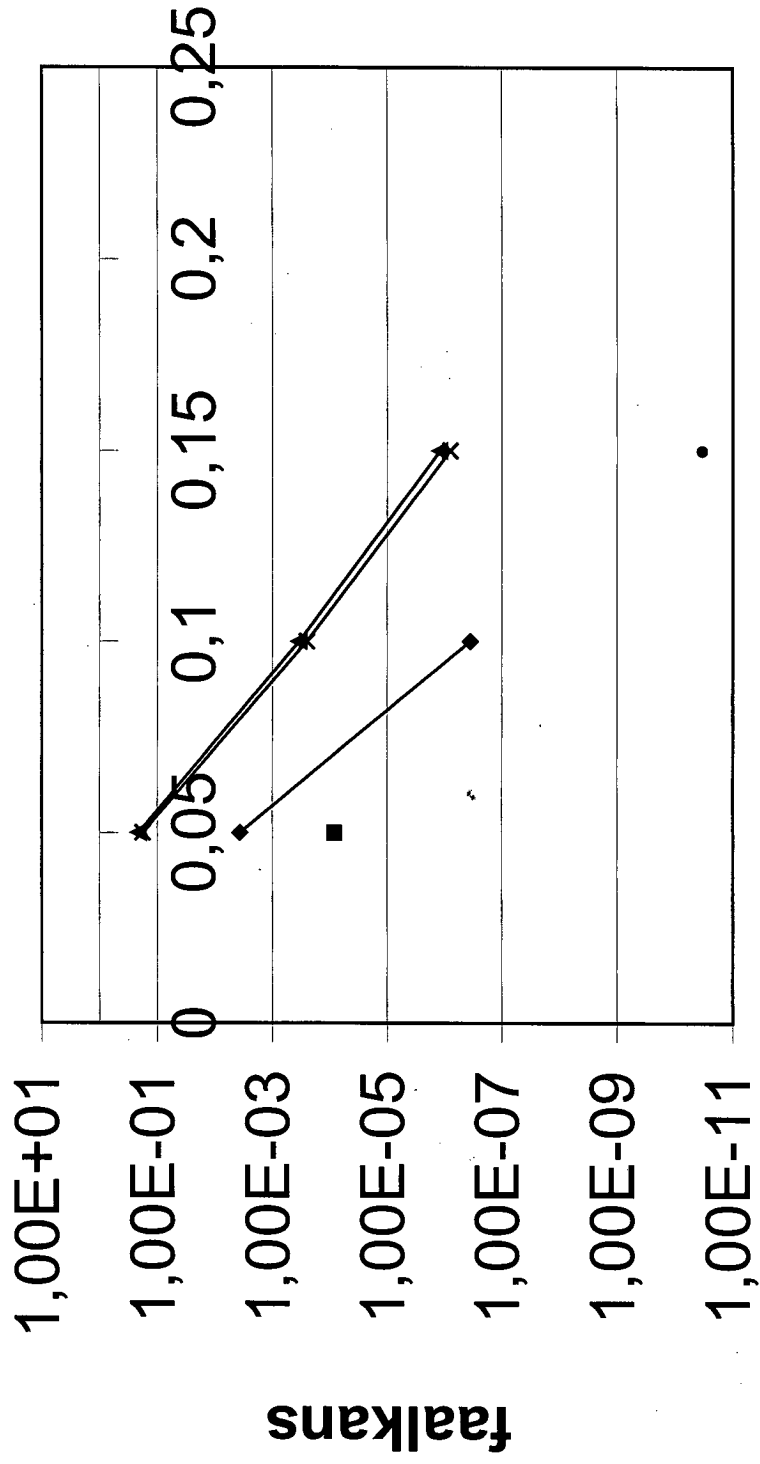
Bijlage 93: Invloed van een spleet op de betrouwbaarheidsindex bij grote L/D

Invloed spleet bij kleine L/D



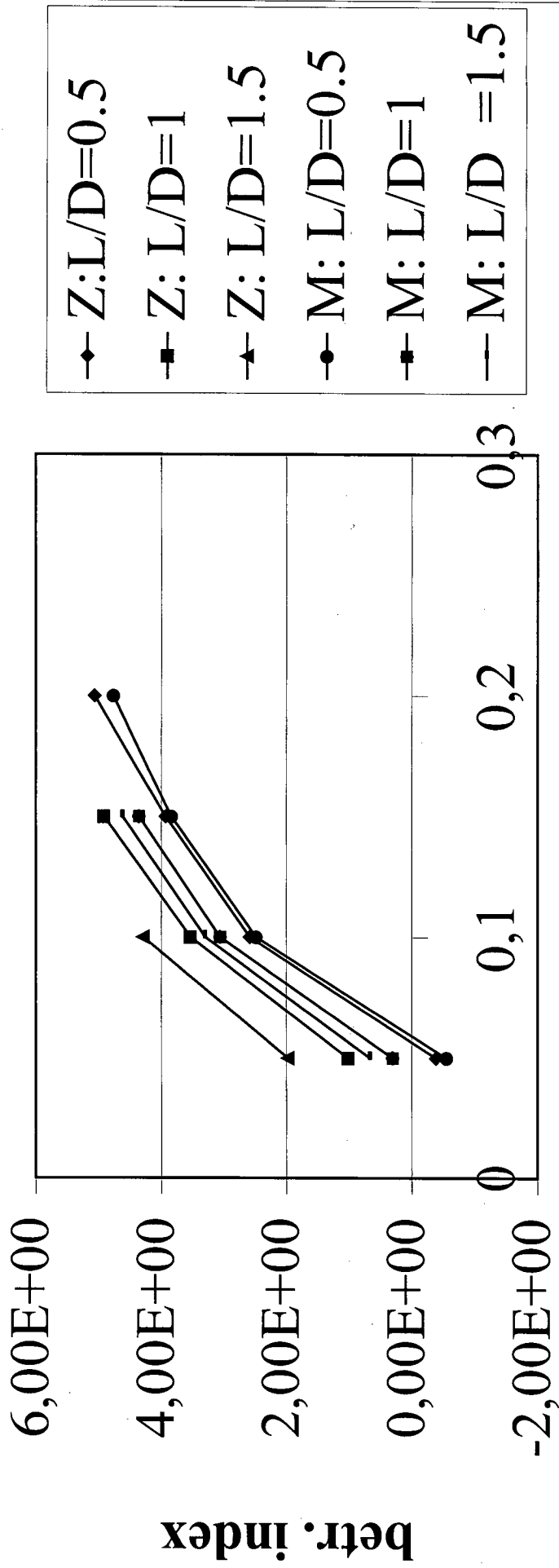
relatieve inbedding

Invloed spleet bij grote L/D



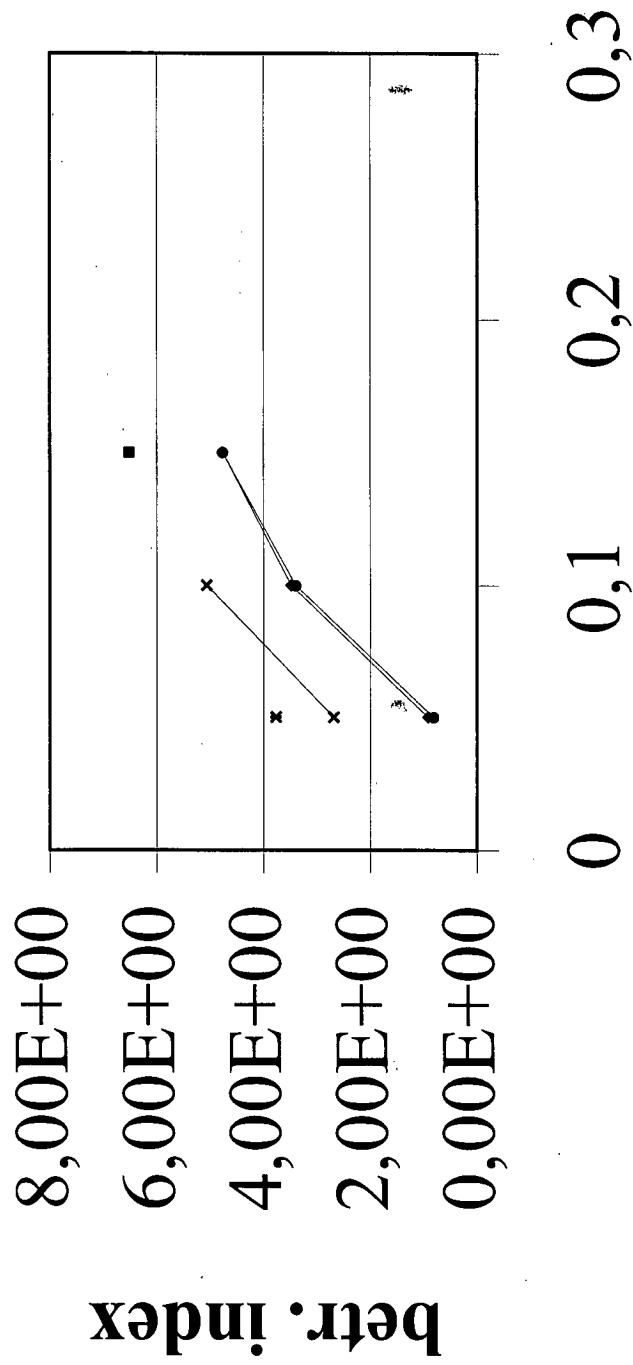
relatieve inbedding

Invloed spleet bij kleine L/D



relatieve inbedding d/D

Invloed spleet bij grote L/D



relatieve inbedding d/D