

DI: 157951

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Directie Zeeland

Nummer:

M621



Bibliotheek, Koestr. 30, tel: 0118-686362,
postbus 5014, 4330 KA Middelburg

DI: 157951



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Een technische evaluatie van de vooroeververdedigingen in het Voikerak Zoommeer



Een technische evaluatie van de vooroeververdedigingen in het Volkerak-Zoommeer



project oevers

ir. Annemarie de Visser en ir. Pieter Klok
Dienst Weg- en Waterbouwkunde, februari 1998

SAMENVATTING

In het project 'Oeverevaluatie Volkerak Zoommeer' is bekeken hoe de oevers van het Volkerak zich na de aanleg van vooroeververdedigingen hebben ontwikkeld. Dit rapport beschrijft de resultaten van de technische evaluatie van de vooroeververdedigingen. Helaas bleek dat de beschikbare meetgegevens een beperkt beeld geven van de opgetreden erosie. Daardoor is moeilijk aan te geven in welke mate diverse factoren hebben bijgedragen aan de erosie die na aanleg van de oeververdedigingen overbleef.

De golftransmissie door de dam is normaal gesproken van invloed op de mate van erosie van de oever. De kruinhoogte van de dammen is vrij hoog waardoor de invallende golven grotendeels gedempt worden. Van een golfhoogte van 0,30 m blijft achter de dammen ongeveer 0,10 m over. Dit formaat golven komt erg weinig voor, maar incidentele perioden met grote golfhoogten kunnen een grote invloed hebben op de totale erosie. Het verband is echter niet aan te tonen. Wel blijkt enigszins de invloed van de waterstand op de doorgelaten golfhoogte. Op locaties waar regelmatig een verhoogde waterstand voorkomt (hetzij door windopzet, hetzij door toevallige fluctuaties), is een grote erosie geregistreerd.

De invloed van de afstand tussen de dam en de oever, die geacht werd een grote invloed te hebben op de erosie, kon niet worden aangetoond. Bij een grote afstand is er grote kans op golfopwekking achter de dam. Uit aanvullende berekeningen blijkt, dat als de afstand tussen dam en oever verkleind wordt van 200 naar 100 m, de erosie met ongeveer 60 % vermindert. De richting waarin de oever ligt, blijkt een belangrijke factor bij de grootte van de erosie. De erosie is het grootst als de oever met de open waterkant naar het zuidwesten ligt, en het kleinst als oever met de open waterkant naar het oosten ligt. Het verschil tussen beide kan oplopen tot een factor tien.

Het lutumgehalte van de bodem speelt mogelijk een rol van betekenis. Alhoewel de lutumgehalten over het algemeen laag zijn, zijn er onderling verschillen tussen de locaties. Waar het lutumgehalte relatief hoog was, was de erosiesnelheid relatief laag.

Rekenen aan erosie kan met het erosion-rate model dat in een bijlage is gepresenteerd.

Aanbevolen wordt om het meetprogramma voort te zetten. Naast het periodiek geheel inmeten van de bodem achter de dammen, kan de achteruitgang nauwkeurig gevolgd worden door het frequent plaatsen van staken op de oeverlijn.

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding	
1.1 Project 'Oeverevaluatie Volkerak Zoommeer'	5
1.2 De technische evaluatie	5
1.3 Opbouw van dit rapport	5
2. Het verzamelen van gegevens	
2.1 Hoe een vooroeververdediging werkt	6
2.2 Erosie	6
2.3 Golfklimaat	7
2.4 Constructie	7
2.5 Bodemopbouw	8
3. Beschrijving van de locaties	
3.1 Slikken van de Heen West	9
3.2 Oude Tonge Oost	9
3.3 Krammersche Slikken Midden	10
3.4 Krammersche Slikken Oost	10
3.5 Ooltgensplaat	11
3.6 Hellegatsplaten	11
3.7 Sabina Henricapolder	11
3.8 Dintelse Gorzen Oost	12
3.9 Dintelse Gorzen West	12
3.10 Slikken van de Heen Oost	12
3.11 Overzicht	13
4. Analyse van resultaten	
4.1 Inleiding	17
4.2 Golftransmissie door de dam	17
4.3 Golfopwekking en golftransport achter de dam	18
4.4 Invloed van het bodemtype	20
4.5 Jaar van aanleg	20
4.6 Wat als	20
4.7 Verder rekenen	21
5. Conclusies en aanbevelingen	
5.1 Conclusies	22
5.2 Aanbevelingen	22
6 Literatuur	
Bijlage 1: Erosion-rate-model	
Bijlage 2: Meetgegevens	

1. Inleiding

1.1 Project 'Oeverevaluatie Volkerak Zoommeer'

Het project 'Oeverevaluatie Volkerak Zoommeer' is in 1996 opgestart door de afdeling IH van het RIZA, op verzoek van Directie Zeeland. In het Volkerak Zoommeer zijn na de afsluiting in 1987 op veel plaatsen verdedigingen aangebracht om bestaande oevers tegen doorgaande erosie te beschermen. De slikken die door de getijdenwerking zijn ontstaan, dreigden door het wegvallen van het getij weg te slaan. De drijvende kracht hiervoor zijn windgolven, die door het stagnante peil steeds op dezelfde hoogte op de oever aangrijpen. Er zijn ook eilanden aangelegd om het areaal aan oeverzones en ondiep water te vergroten.

In het project 'Oeverevaluatie Volkerak Zoommeer' is bekeken hoe de oevers zich na de werkzaamheden ontwikkeld hebben, zowel in ecologisch als in technisch opzicht. In het projectplan van augustus 1996 staan het doel, de aanpak en de tijdfasering van het project beschreven.

Dit rapport beschrijft de resultaten van één van de deelstudies van het project, namelijk de technische evaluatie van de vooroeververdedigingen. Dit deel van het project is uitgevoerd door de Dienst Wegen en Waterbouwkunde.

1.2 De technische evaluatie

De technische evaluatie richt zich specifiek op de vooroeververdedigingen. Dit zijn verdedigingen in de vorm van dammen op enige afstand van de oeverlijn.

De vraag die beantwoord moet worden door de technische evaluatie is: **Hoe heeft de bodemligging, met name de oeverlijn, zich ontwikkeld na aanleg van de vooroeververdedigingen en hoe kunnen eventuele essentiële verschillen tussen de ontwikkeling van de bodemligging achter de verschillende vooroeververdedigingen worden verklaard?**

Het gaat dus om de ontwikkelingen na aanleg van de vooroeververdedigingen.

Voor de evaluatie worden bodemmetingen gebruikt die de Meetkundige Dienst tussen 1994 en 1997 heeft uitgevoerd in raaien loodrecht op de verdedigingen. Er zijn 24 locaties geselecteerd in het Volkerak die in de evaluatie met elkaar worden vergeleken (zie figuur 1). In eerste instantie was het de bedoeling om ook vooroeververdedigingen in het Zoommeer bij de evaluatie te betrekken. De locaties bleken echter weinig interessant (beschutte ligging en weinig afslag) en de metingen beperkt. De locaties in het Volkerak zijn geselecteerd op geografische spreiding (een zo volledig mogelijk beeld van het gebied) en frequentie van de metingen (zo veel mogelijk metingen na aanleg van de vooroeververdedigingen). Voor de 24 geselecteerde locaties is door het ingenieursbureau Alkyon het golfklimaat bepaald aan de buitenkant van de vooroeververdedigingen. De erosie die na aanleg van de vooroeververdedigingen nog optreedt hangt naast het golfklimaat af van de afstand tussen oever en verdediging, de bodemsoort en de afmetingen en opbouw van de vooroeververdediging. In een analyse wordt het belang van elk van deze factoren nagegaan. Uiteindelijk wordt een poging gedaan om hiermee de optredende verschillen in de werking van de vooroeververdedigingen te verklaren.

1.3 Opbouw van dit rapport

Na deze inleiding wordt in hoofdstuk 2 aangegeven hoe een vooroeververdediging werkt en welke factoren het effect van de vooroeververdediging op de oever bepalen. Dit wetende wordt duidelijk welke gegevens allemaal nodig zijn om de werking van de verdediging te evalueren. De beschikbaarheid en de kwaliteit van deze gegevens worden ook in dit hoofdstuk beschreven.

In hoofdstuk 3 worden de locaties opgesomd die voor de evaluatie zijn geselecteerd. Per locatie wordt een omschrijving gegeven van hoe de constructie eruit ziet wat er met de bodem is gebeurd. Hierbij ligt de nadruk op wat zich heeft afgespeeld na aanleg van de vooroeververdedigingen.

In Hoofdstuk 4 wordt door middel van een beschrijvende analyse getracht na te gaan welke factoren in welke mate bijdragen aan de werking van de vooroeververdedigingen.

Hoofdstuk 5 tenslotte geeft de conclusies van de evaluatie en aanbevelingen voor het ontwerp van vooroeververdedigingen en voor vervolgonderzoek.

2. Het verzamelen van gegevens

2.1 Hoe een vooroeververdediging werkt

Een vooroeververdediging is een (dam)constructie op enige afstand van de oeverlijn, die de oever beschermt tegen doorgaande erosie door golven en/of stroming. In afgesloten zeearmen als het Volkerak-Zoommeer is de voornaamste belastingvorm de aanval door windgolven. In de dam gaat (een deel van) de golfenergie verloren. Afhankelijk van het type dam en de afmetingen wordt gaat meer of minder golfenergie verloren en ontstaat achter de dam een kleinere of grotere doorgaande golfhoogte. Over het algemeen houdt een vooroeververdediging golven dus niet in hun geheel tegen, maar reduceert de golfhoogte tot een aanvaardbaar niveau. Dit is een golfhoogte waarbij de oeverlijn niet terugschrijdt en waarbij de dynamiek in de zone achter de vooroeververdediging past bij het ecologische streefbeeld voor die zone.

Er zijn verschillende constructietypen die in aanmerking komen als vooroeververdediging. In het geval van het Volkerak-Zoommeer gaat het steeds om dammen van (verschillende graderingen) breuksteen. Invallende golven worden door de vooroeververdediging gedeeltelijk gereflecteerd en gedeeltelijk geabsorbeerd (golfenergie gaat verloren). Het overblijvende deel van de golf komt na overslag (golf gaat over de dam) of transmissie (golf gaat door de dam) terug als doorgaande golf. De doorgaande golfhoogte achter de dam bij een bepaalde invallende golfhoogte hangt als volgt af van de eigenschappen van de dam:

- de **taludhelling** van de dam aan de openwaterzijde in relatie tot de steiheid van de golven bepaalt de mate van **golffreflectie**;
- de **taludhelling, hoogte, breedte en opbouw** van de dam bepalen de mate van **golffabsorptie**;
- de **hoogte en breedte** van de dam bepalen de mate van **golffoverslag**;
- de **opbouw** van de dam bepaalt de mate van **golfftransmissie**.

In het handboek 'Natuurvriendelijke Oevers' worden formules gegeven waarmee de golfvoortplanting door een vooroeververdediging kan worden berekend.

2.2 Erosie

Door de meetdienst van de Directie Zeeland zijn in de afgelopen jaren raaien dwars op de oever regelmatig gelood. Het ging om zeer veel raaien, die veelal in meerdere jaren ingemeten waren. Er waren veel gegevens, maar de toegankelijkheid en overzichtelijkheid was slecht. Door RIZA (in gedeeltelijke uitbesteding) zijn de gegevens bewerkt tot spreadsheets met de bodemhoogte als functie van de afstand tot het nulpunt van de raai. Per raai is er een spreadsheet met een grafiek waarin het verloop van de bodemligging in de tijd te zien is.

Er zijn 24 raaien geselecteerd (zie bijlage 2) om verder uit te werken. Belangrijkste criteria bij de selectie waren spreiding over het gebied (van alles wat) en zoveel mogelijk metingen per raai. In de meest gunstige gevallen waren na aanleg van de vooroeververdediging drie meet sessies gedaan, in de regel echter twee (voor de geselecteerde raaien). Het is lastig om hier een trend uit af te leiden. Daarom zijn uit digitale terreinmetingen van 1997 bodemprofielen voor de geselecteerde raaien afgeleid. Helaas is dit niet meer gebeurd voor de noordoostelijke hoek van het Volkerak; deze terreinmetingen worden namelijk pas in 1998 gedaan.

Een derde criterium bij de selectie van de raaien was de geloofwaardigheid van het afslagproces dat de grafieken lieten zien. Bij het meten en bij het registreren van de meetwaarden kunnen nu eenmaal fouten gemaakt worden en daardoor kunnen de grafieken 'rare kronkels' laten zien. De metingen waren niet eerder gescreend op hun correctheid. Om de betrouwbaarheid te toetsen is ook gekeken naar de direct naastgelegen raaien en de raaien daarnaast. Raaien die een ongeloofwaardig verloop in de grafiek lieten zien vielen af. Door de vergelijking met de burens kon iets beter ingeschat worden of geultjes of richels nu echt aanwezig waren of dat het om meetfouten ging.

Een moeilijkheid is de ligging van het nulpunt van de raaien. De nulpunten liggen op een rechte lijn over de oever (de meetlijn). Voor de evaluatie van de vooroeververdediging is het erg handig als het nulpunt op de vooroeververdediging ligt. Zo kun je snel zien of naast elkaar gelegen raaien ongeveer dezelfde afstand tussen oever en vooroeververdediging hebben (dit zegt iets over de betrouwbaarheid). In veel raaien gingen de metingen zelfs niet tot aan de vooroeververdediging. De ligging van de verdediging stond dan dus niet in de grafiek. Daarnaast was de ligging van sommige raaien niet loodrecht op de oever en de vooroeververdediging.

Al met al zijn er veel gegevens maar het is niet eenvoudig om er een trend uit af te leiden.

2.3 Golfklimaat

Het golfklimaat bij de 24 geselecteerde uitvoerpunten is berekend door ingenieurbureau Alkyon. Windgegevens zijn ontleend aan het meetstation van de Directie Zeeland te Stavenisse.

Hoewel in het meer een constant peil wordt nagestreefd, kunnen peilverschillen ontstaan door fluctuaties in afvoer en door opwaaiing. Omdat het peil een belangrijk gegeven is bij de werking van de vooroeververdediging (de kruinhoogte boven waterpeil verandert dan immers ook) zijn de peilfluctuaties meegenomen in de golfklimaatstudie. Het peil is ook van invloed op de hoogte van de golven die opgewekt worden, alhoewel dit op het Krammer-Volkerak niet echt grote verschillen geeft. Voor de variatie in waterstand zijn tijdreeksen met peilgegevens gebruikt van een meetstation bij Dintelsas en een meetstation op open water aan de oostelijke kant van het meer. Vergelijking van de waterstandsgegevens op beide stations wees uit dat de onderlinge verschillen in waterstand erg klein waren; nooit groter dan 0,06 m. Dergelijke kleine verschillen zijn, zeker gezien de foutenmarge in de metingen) niet relevant. Daarom is besloten om uit te gaan van slechts één waterstandsstation en om voor opwaaiingsverschijnselen handmatig een formule in te bouwen in het gebruikte numerieke model. De berekeningen van de golfhoogten zijn uitgevoerd met het numerieke model SWAN. Zie voor meer informatie over de rekenwijze en voor de resultaten [1].

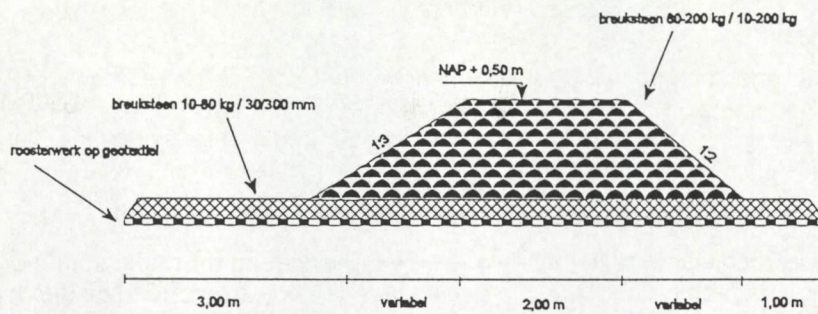
Het resultaat is per geselecteerde locatie een set tabellen met:

- de kans van voorkomen van golfhoogten in verschillende windrichtingen;
- de kans van voorkomen van waterstanden bij verschillende windrichtingen;
- de kans van gelijktijdig voorkomen van bepaalde golfhoogten en bepaalde waterstanden;
- de gemiddelde golfperiode bij verschillende windrichtingen.

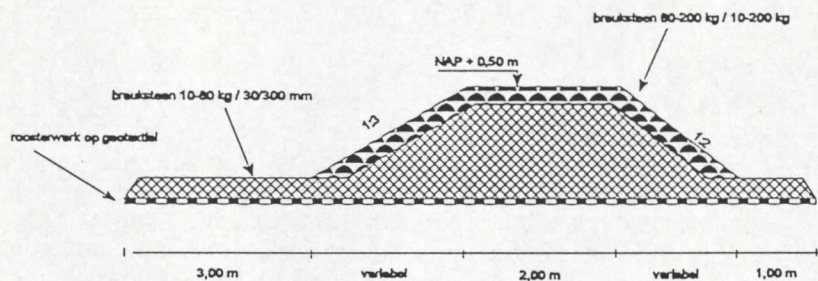
2.4 Constructie

Gegevens over de constructies zijn voor een groot deel ontleend aan bestekstekeningen e.d. Soms wijken de constructies af van de tekeningen (mond. med. Frans Schroeiers, Dienstkring Schelde-Rijnkanaal). De vooroeververdedigingen zijn onderling niet erg verschillend. Er zijn twee hoofdtypen., zie figuur 1.1 en 1.2. Type 1 bestaat uit breuksteen 80-200 kg / 10-200 kg op een vlijlaag van breuksteen 30/300 mm / 10-80 kg. Dit zijn ouderwetse steensorteringen, de steenpartijen zijn dan ook hergebruikt. Type 2 heeft een vlijlaag en een kern van breuksteen 80/200 mm en een bekleding van breuksteen 10-60 kg. Type 2 komt het meeste voor. De aanleghoogten zijn in principe overal gelijk (NAP +0,50 m), met hier en daar een (bekende) afwijking. De kruinbreedte is 2 m; de taludhelling is 1:3 aan de openwaterzijde van de dammen en 1:2 aan de binnenkant. De doorslaggevende factor voor de locatie van de vooroeververdedigingen was de diepte. Uitgangspunt was dat de dammen vanaf open water zouden worden aangelegd. De locaties moesten daarom bereikbaar zijn met een boot. Daarom zijn de dammen in de meeste gevallen aangelegd op een diepte van NAP -0,80 m à NAP -0,90 m. Ondieper kunnen de boten niet komen. Een uitzondering qua aanlegdiepte vormt vooral de vooroeververdediging bij de Hellegatsplaten, waar de aanlegdiepte NAP -1,50 m bedraagt. Omdat de waterdiepte doorslaggevend was voor de situering van de dammen kan de afstand tussen de vooroeververdediging en de (oorspronkelijke) oever tussen de vooroeververdedigingen onderling erg verschillen.

Bij de Krammersche Slikken Midden is gedeeltelijk constructietype 1 aangebracht, waarbij in plaats van de zware steensortering betonpuin is gebruikt. Na aanleg zijn er geen veranderingen opgetreden of aangebracht aan de verdedigingen, met uitzondering van de Slikken van de Heen Oost waar breuksteen is bijgestort. De aanleghoogten van het bestek zijn de werkelijke aanleghoogten en er hebben zich geen verzakkingen voorgedaan (mond. med. Frans Schroeiers). Tijdens een veldbezoek in het voorjaar van 1997 met de projectgroep was te zien dat de verdedigingen er 'keurig' en regelmatig bijlagen.



Figuur 1.1: Doorsnede constructietype 1



Figuur 1.2: Doorsnede constructietype 2

2.5 Bodemopbouw

Vóór de afsluiting van het Volkerak Zoommeer werd het sedimenttransport en daarmee de bodemsamenstelling vooral bepaald door de getijdendynamiek. De hoeveelheid sediment was heel gering. Slechts fijne slibdelen werden meegevoerd door het water en afgezet op luwe plekken op de overwegend zandige bodem. Deze luwe delen lagen met name tegen de dijk alwaar de zogenaamde schorren ontstonden; ervoor lagen de lagere zandige slikken. Waarschijnlijk zal ook in de diepe getijdegeulen sprake zijn geweest van dynamiek in de vorm van uitschuring en verplaatsing van sediment. Na het wegvallen van het tij wordt de dynamiek bepaald door windgeïnduceerde golven. De geëxponeerde gebieden zijn het meest vatbaar.

Vooral de bovenste laag is interessant voor de erosieprocessen. Langs het Volkerak komen aan de oppervlakte de volgende bodemsoorten voor [6]:

- 0c: lutumarm, middelfijn zand A
- 1c: lutumarm, middelfijn zand B
- 2c: lutumhoudend, middelfijn zand A
- 2d: lutumhoudend, zeer fijn zand A
- 3b: lichte zavel A
- 5: lichte zavel B

Op 16 van de 24 locaties komt type 1c voor. De toevoeging A en B slaan op het lutumgehalte; B bevat meer lutum dan A.

3. Beschrijving van de locaties

3.1 Slikken van de Heen West

De Slikken van de Heen West liggen aan de zuidwestelijke kant van het Volkerak, direct ten westen van het Schelde-Rijnkanaal. Van mei tot december 1992 is hier ongeveer 2,5 km vooroeververdediging volgens profiel 2 aangebracht. Ook zijn een paar kunstmatige eilandjes aangelegd. Er zijn hier drie locaties geselecteerd.

Punt 1:

X-coördinaat: 74711; Y-coördinaat:405904

Voor aanleg van de vooroeververdediging was de afslag ongeveer 10 m per jaar. De afstand tot de vooroeververdediging bedroeg oorspronkelijk 200 m. Na aanleg van de vooroeververdedigingen heeft nog enige afslag plaatsgevonden. Tussen 1994 en 1996 is de oever 2 m achteruit gegaan. De bovenste laag van de bodem is van type 2c.

Punt 2:

X-coördinaat: 73942; Y-coördinaat:406145

Ook hier was de afslag ongeveer 10 m per jaar voor aanleg van de dam. Daarna is dat zeer sterk gereduceerd. De afslag bedraagt nu minder dan 1 m per jaar. De afstand van de dam tot de oorspronkelijke oever is 185 m. Hier komt bodemtype 1c voor.

Punt 3:

X-coördinaat: 73333; Y-coördinaat:406752

De afstand tot de vooroeververdediging bedraagt hier 175 m. (De meetraai ligt hier niet loodrecht op de oever dus in de grafiek met de raaimetingen lijkt het meer). Voor aanleg van de vooroeververdediging was er ongeveer 10 m afslag per jaar (door de grote afstanden in deze raai en daardoor de grove schaal van de erosiegrafiek is dit moeilijk in te schatten). Voor en na aanleg van de dam heeft afvlakking van de bodem plaatsgevonden. Vlak voor de oever bevindt zich een geul die ondieper is geworden. Na aanleg is er geen verdere achteruitgang opgetreden. De bodem is van type 1c.

3.2 Oude Tonge Oost

Bij Oude Tonge, in de noordwesthoek van het Volkerak, zijn eilanden opgespoten en vooroeververdedigingen aangelegd. De vooroeververdedigingen liggen om de eilanden heen. Aanleg van de verdedigingen heeft plaatsgevonden tussen oktober 1989 en juli 1990. De dammen zijn van constructietype 2. Langs de gehele oever komt bodemtype 1c aan de oppervlakte voor; bij locatie 4 en 5 gedeeltelijk ook type 0c.

Punt 4:

X-coördinaat: 73542; Y-coördinaat:409507

Dit punt ligt in het uiterste westen van het gebied Oude Tonge Oost. Het ligt niet direct achter een vooroeververdediging maar ligt in een luwte van de eilandjes bij Oude Tonge West en de eilandjes en vooroeververdedigingen van Oude Tonge Oost. Bovendien ligt het punt in een 'hoek' in de oeverlijn, waardoor het niet uit een hoek van 80 maar uit een hoek van 90 graden aangevallen wordt. De eilandjes van Oude Tonge West en een extra vooroeververdediging ten westen van de eilanden van Oude Tonge Oost zijn pas in 1995 aangelegd. Toch heeft tussen 1990 en 1996 geen achteruitgang van de oever plaats gevonden. Er is alleen gemeten in 1990 en 1996 dus het is niet aan te geven of er voor aanleg van de dammen wel afslag heeft plaatsgehad. De afstand tot de meest nabij gelegen eilanden of vooroeververdedigingen bedraagt in alle richtingen ongeveer 550 m.

Punt 5:

X-coördinaat: 73477; Y-coördinaat:408607

Ook dit punt ligt in de 'hoek' die al is beschreven bij punt 4. Daardoor is er alleen golfaanval uit zuidelijke tot westelijke richting. De golven uit westelijke richting worden belemmerd door de eilanden van Oude Tonge West. Bescherming tegen golven uit zuidelijke en zuidwestelijke richting wordt geboden door de eilanden en dammen van Oude Tonge Oost. De afstand tot het dichtstbijzijnde wek (eiland of dam) bedraagt steeds ongeveer 600 m. Zowel voor als na aanleg van de dammen heeft nauwelijks afslag plaatsgevonden. Voor de aanleg is er verdieping van de bodem opgetreden, daarna niet meer.

Punt 6:

X-coördinaat: 73865; Y-coördinaat:408482

Dit punt is rondom beschermd door eilanden en vooroeververdedigingen. De afstand tot de vooroever-

verdediging is ongeveer 1000 m. Door de eilandjes varieert de afstand tot het dichtsbijzijnde werk in de verschillende richtingen van 300 tot 1000 m. Er wordt uitgegaan van een gemiddelde afstand van 600 m. Voor de aanleg van de vooroeerverdedigingen was er een afslag van ongeveer 10 m per jaar. Na aanleg is geen afslag meer opgetreden.

3.3 Krammersche Slikken Midden

De vooroeerverdedigingen van Oude Tonge Oost gaan in oostelijke richting over in de verdedigingen van de Krammersche Slikken. Daardoor is de westelijke kant van de oever van Krammersche Slikken Midden nog onder invloed van de eilandjes bij Oude Tonge. De afstand tussen de vooroeerverdediging en de oever neemt in oostelijke richting snel af van 750 m naar 200 m. De dammen zijn aangelegd tussen oktober 1989 en juli 1990. Het toegepaste type verdediging is 2 voor de punten 7, 8 en 9 en een aangepast type 1 voor punt 10 en 11. De aanpassing houdt in dat in plaats van breuksteen 80-200 kg betonpuin is toegepast. Langs de gehele oever van de Krammersche Slikken komt bodemtype 1c aan de oppervlakte voor.

Punt 7:

X-coördinaat: 74675; Y-coördinaat:408351

Golven uit zuidwestelijke richtingen worden belemmerd door de eilanden en verdediging van Oude Tonge Oost. Golven uit zuidelijke tot zuidoostelijke richting worden belemmerd door de vooroeerverdediging van de Krammersche Slikken zelf. De afstand tot de vooroeerverdediging bedraagt 500 m. Voor aanleg van de verdediging en de eilandjes van Oude Tonge Oost bedroeg was de afslag aanzienlijk. Tussen 1988 en 1990 is de oever 40 m achteruit gegaan. De afslag na aanleg is onduidelijk. Tussen 1990 en 1991 lijkt de oever 20 m achteruit te zijn gegaan. Tussen 1991 en 1996 lijkt de oeverlijn vooruit te zijn gegaan, de bodem hoger te liggen en er lijken voor de oever twee rugjes te zijn ontstaan. Met andere woorden: het erosieproces is hier niet duidelijk.

Punt 8:

X-coördinaat: 75878; Y-coördinaat:408104

De vooroeerverdediging ligt hier op 200 m uit de oever. De golfaanval wordt alleen beïnvloed door de vooroeerverdediging (niet door nabijgelegen eilanden). Tussen 1988 en 1990 is de oever 40 m achteruit gegaan (20 m per jaar). Na aanleg van de vooroeerverdediging is dit nog 4 m per jaar.

Punt 9:

X-coördinaat: 76281; Y-coördinaat:408027

De vooroeerverdediging ligt hier 250 m uit de oever. Voor aanleg bedroeg de afslag 6 m per jaar. Na aanleg lijkt de afslag te verwaarlozen. De grafieken laten twijfelachtige verlopen zien, zoals het ontstaan en weer verdwijnen van rugjes en geulen.

Punt 10:

X-coördinaat: 77063; Y-coördinaat:407820

De verdediging is aangelegd op een afstand van 225 m uit de oever. Voor aanleg bedroeg de afslag 13 m per jaar. Na aanleg is geen afslag meer opgetreden. Wel is de oeverlijn steeds flauwer geworden. Dit betekent dat onder de waterlijn aanzanding / aanslibbing heeft plaatsgevonden en boven de waterlijn erosie.

Punt 11:

X-coördinaat: 77468; Y-coördinaat:407759

Ook hier is de verdediging aangebracht op 225 m uit de oever. Voor aanleg was er 12 m afslag per jaar. Door de vooroeerverdedigingen is dit gereduceerd tot 2 m per jaar.

3.4 Krammersche Slikken Oost

De Krammersche Slikken Oost bevinden zich direct ten oosten van de Krammersche Slikken Midden. De vooroeerverdediging is aangelegd tussen december 1988 en mei 1989. Het gebruikte constructietype is type 2. Langs de oever komt bodem 1c voor. De vooroeerverdediging ligt hier iets dichter bij de oever dan bij de Krammersche Slikken Midden.

Punt 12:

X-coördinaat: 77897; Y-coördinaat:407715

De vooroeerverdediging is aangelegd op 175 m uit de oever. De mate van afslag voor aanleg is niet bekend. Na aanleg bedroeg de afslag nog 5 m per jaar.

Punt 13:

X-coördinaat: 78395; Y-coördinaat:407750

Hier lag de vooroeerverdediging oorspronkelijk 150 m uit de oever. De afslag voor aanleg is ook hier

niet bekend; na aanleg is de afslag gereduceerd tot 1 m per jaar.

3.5 Ooltgensplaat

Het Volkerak wordt naar het noordoosten toe smaller. In het smalle deel, ligt de vooroeververdediging van Ooltgensplaat. De expositierichting is oost. In dit gedeelte is het soort bodemmateriaal niet bekend. De vooroeververdediging is aangelegd tussen oktober 1993 en februari 1994.

Punt 14:

X-coördinaat: 84185; Y-coördinaat:410092

De afslag voor aanleg van de vooroeververdedigingen bedroeg hier 4 m per jaar. De verdediging is aangelegd op een afstand van 100 m uit de oever. Na aanleg van de verdediging is geen erosie meer opgetreden. Volgens de metingen is er in 1994 plotseling een rugje ontstaan op 10 m van de oever. Dit rugje is in 1996 aangegroeid in de richting van de vooroeververdediging. De oorzaak van het ontstaan hiervan is niet bekend.

Punt 15:

X-coördinaat: 84341; Y-coördinaat:410479

Voor de aanleg van de vooroeververdedigingen was er afslag. In deze raai is ook gemeten in 1984, dus voor de afsluiting van het Volkerak. Opvallend is, dat tussen 1984 en 1987 de oeverlijn 12 m achteruit is gegaan. Tussen de afsluiting van het Volkerak en de aanleg van de vooroeververdediging (zes jaar tijd) is nog eens 8 m afgeslagen. De jaarlijkse afslag was dus voor de afsluiting van het Volkerak groter dan na de afsluiting. Na de aanleg van de vooroeververdediging is geen erosie meer opgetreden. De vooroeververdediging ligt relatief dicht bij de oever: op 55 m afstand.

3.6 Hellegatsplaten

De Hellegatsplaten liggen in het uiterste noordoosten van het Volkerak. Hier is aansluitend op de oever een groot oppervlak opgespoten. Zo is een natuurgebied ontstaan met platen en geulen. Dit wordt beschermd door vooroeververdedigingen. De vooroeververdedigingen liggen vrij ver van de eigenlijke oever. De aanlegdiepte van de vooroeververdediging is hier 1,5 m. De verdediging is aangebracht tussen juni 1990 en april 1991.

Punt 16:

X-coördinaat: 85471; Y-coördinaat:412083

De afslag per jaar voor de aanleg van de vooroeververdediging is niet precies bekend, maar is fors. Tussen het moment dat de verdediging gepland was en de eigenlijke aanleg zijn nog tientallen meters afgeslagen. Daardoor was de afstand tussen de vooroeververdediging en de eigenlijke oever nog groter dan gepland. Vlak na de aanleg was de afstand ongeveer 200 m. In westelijke richting neemt de afstand toe, hetgeen invloed heeft op de erosie van dit punt. Omdat de afslag nog in rap tempo doorging, hebben Staatsbosbeheer en Rijkswaterstaat extra verdedigingen aangelegd, vlak voor de eigenlijke oever. Daarna is de erosie gestagneerd. Voor de statistische analyse wordt aangenomen dat de afslag na aanleg groter was dan 5 m per jaar. De bodem is van type 0c/2c

Punt 17:

X-coördinaat: 85648; Y-coördinaat:412089

Ook hier bleek de vooroeververdediging te weinig bescherming te bieden tegen de snelle afslag en is de oever later nog verdedigd met een extra vooroeververdediging. Deze vooroeververdediging heeft de afslag gestopt. De oever ligt hier aan het begin van een geul. De oever wordt hoofdzakelijk aangevallen door golven uit zuidwestelijke richting. De afstand tot de vooroeververdediging is in dat geval 500 m. Hier komt bodemtype 1c aan de oppervlakte voor.

3.7 Sabina Henricapolder

De Sabina Henricapolder ligt aan de oostkant van het Volkerak. De expositierichting is noordoost. Hier is de opbouw van de bodem niet bekend.

Punt 18:

X-coördinaat: 85826; Y-coördinaat:409402

De vooroeververdediging is aangelegd tussen oktober 1993 en februari 1994 op een afstand van 250 m uit de oever. Vreemd genoeg is in de grafiek van de bodemmetingen de vooroeververdedigingen in metingen van 1991 en 1992 al te vinden. Voor het vervolg wordt het aanlegjaar beschouwd als onbekend. Na aanleg is er in een jaar tijd 2 m afslag opgetreden. Helaas is er geen meting gedaan na 1992. De erosiesnelheid van 2 m per jaar is dus een zeer grove schatting.

3.8 Dintelse Gorzen Oost

De Dintelse Gorzen liggen langs de zuidrand van het Volkerak. De vooroeververdediging bij Dintelse Gorzen Oost is aangelegd tussen juni en oktober 1991. Het toegepaste constructietype is type 1.

Punt 19:

X-coördinaat: 81582; Y-coördinaat:406938

De vooroeververdediging is aangelegd op een afstand van 120 m uit de oever. De hoeveelheid afslag voor aanleg is onbekend. In de eerste 5 jaar na aanleg is nog 9 m van de oever afgeslagen. Het bodemmateriaal is van type 2d.

Punt 20:

X-coördinaat: 79865; Y-coördinaat:406810

Hier ligt de vooroeververdediging 200 m uit de oever. Er doet zich de vreemde situatie voor dat tussen 1987 en 1989 65 m oever is afgeslagen (volgens de meetgrafieken). Na 1989, maar voor de aanleg van de vooroeververdediging (1991) is nog maar 5 m afgeslagen. Een oorzaak voor de plotselinge afname van de erosiesnelheid kan zijn de overgang van grof zand naar fijn zand. Maar van 32 m per jaar naar 2,5 m per jaar is wel een erg groot verschil. Na aanleg van de vooroeververdediging is nog 1 m per jaar afgeslagen. Het bodemmateriaal is type 0c.

3.9 Dintelse Gorzen West

De Dintelse Gorzen West liggen direct ten westen van de Dintelse Gorzen Oost. De vooroeververdediging is aangebracht tussen september 1990 en februari 1991. Het toegepaste constructietype is type 1. Het bodemtype aan het oppervlak is 1c.

Punt 21:

X-coördinaat: 78710; Y-coördinaat:406490

De vooroeververdediging is aangelegd op 220 m uit de oever. Voor de aanleg was er in afnemende mate sprake van afslag. In de laatste twee jaar voor aanleg was er nog 10 m afslag. Daarvoor was er ongeveer 20 m afslag per jaar. (Iets dergelijks, maar in extremere mate, deed zich voor bij punt 20) Na aanleg van de vooroeververdediging heeft geen afslag meer plaatsgehad. Wel is de oever iets flauwer geworden. Het bodemmateriaal is grof of fijn zand.

Punt 22:

X-coördinaat: 77578; Y-coördinaat:406069

De afstand tot de vooroeververdediging is hier 100 m. Ook hier was voor de aanleg sterk afnemende afslag. In de laatste twee jaar was er 2 meter afslag per jaar. Na aanleg was er nog 1 m afslag per jaar. Het bodemmateriaal is fijn zand.

Punt 23:

X-coördinaat: 76842; Y-coördinaat:405719

Hier is de vooroeververdediging aangelegd op een afstand van 215 m uit de oever. Voor de aanleg was er nog 20 m afslag per jaar, na aanleg 1 m per jaar. Het bodemmateriaal is grof zand.

3.10 Slikken van de Heen Oost

De Slikken van de Heen Oost liggen tussen de Dintelse Gorzen West en de monding van het Schelde-Rijnkanaal. Aan de andere kant (westelijk) van het Schelde-Rijnkanaal liggen de Slikken van de Heen West. Ter plaatse van de monding van het Schelde-Rijnkanaal is er een knik in de oever. Ten oosten van de knik in de oriëntatierichting noord-noordwest en ten westen noord-noordoost. Daardoor liggen de Slikken van de Heen Oost een beetje in de luwte. Maar de oever wordt hier (als enige langs het Volkerak) belast door scheepsgolven van schepen die vanuit het Schelde-Rijnkanaal richting de Volkerak sluizen varen. Ze varen dan vlak langs de Slikken van de Heen Oost. De vooroeververdediging is aangelegd tussen mei 1992 en december 1992.

Punt 24:

X-coördinaat: 76027; Y-coördinaat:405668

De vooroeververdediging is aangelegd op 260 m uit de oever. Voor aanleg was er ongeveer 10 m afslag per jaar. Na aanleg is er nog 1 m afslag per jaar. De oever is minder steil geworden. Het bodemmateriaal is zavel (type 3b/5).

3.11 Overzicht

locatie	aanleg	bodem	% lutum	erosie voor	erosie na	c	afstand	expositie	% golf-aanval	% Hs > 0,3	w.s. Hs > 0,3	% w.s. > 0,3 en Hs > 0,2	opmerkingen
punt 1	1992	2c	2,3	10 m/jr	1 m/jr	2	200 m	320°-90° (160°)	48	3	0,01m	0,07	
punt 2	1992	1c	3,0	10 m/jr	1 m/jr	2	185 m	300°-120° (180°)	53	3	0,01m	0,02	
punt 3	1992	1c	3,0	10 m/jr	0 m/jr	2	175 m	270°-60° (150°)	53	1	0,02m	0,02	
punt 4	1990	0c/1c	?	?	0 m/jr	2	550 m	120°-300° (180°)	56	3	0,02m	0,07	
punt 5	1990	0c/1c	?	0 m/jr	0 m/jr	2	600 m	210°-300° (90°)	56	4	0,02m	0,11	
punt 6	1990	1c	10,4	10 m/jr	0 m/jr	2	600 m	150°-330° (180°)	60	1	0,04m	0,05	
punt 7	1990	1c	4,7	20 m/jr	?	2	500 m	150°-315° (165°)	59	4	0,03m	0,14	
punt 8	1990	1c	2,0	20 m/jr	4 m/jr	2	200 m	110°-280° (170°)	48	1	0,04m	0,06	
punt 9	1990	1c	4,2	6 m/jr	0 m/jr	2	250 m	110°-270° (160°)	46	1	0,05m	0,06	
punt 10	1990	1c	5,8	13 m/jr	0 m/jr	1	225 m	110°-280° (170°)	45	2	0,05m	0,11	i.p.v. breuksteen 80-200 kg betonpuin

punt 11	1990	1c	4,0		12 m/jr	2 m/jr	1	225 m	110'-280' (170')	47	0	-	0,00	i.p.v. breuksteen 80-200 kg betonpuin
punt 12	1989	1c	2,5		?	5 m/jr	2	175 m	80'-280' (200')	53	0	-	0,03	
punt 13	1989	1c	3,0		?	1 m/jr	2	150 m	80'-270' (190')	79	0	-	0,00	
punt 14	1994	?	17,0		4 m/jr	0 m/jr	2	100 m	30'-210' (180')	51	0	-	0,00	
punt 15	1994	?	18,0		1 m/jr	0 m/jr	2	55 m	20'-210' (190')	42	0	-	0,00	
punt 16	1991	0c/2c	3,0		>>	>5 m/jr	1	200 m	60'-250' (190')	65	3	0,08m	0,18	aanlegdiepte v.o.v. 1,5 m, afstand wordt groter in weste- lijke richting
punt 17	1991	1c	10,9		>>	>5 m/jr	1	500 m	210'- 240'(30')	68	3	0,08m	0,20	aanlegdiepte v.o.v. 1,5 m
punt 18	?	?	?		?	2 m/jr	2	250 m	20'-200' (180')	61	6	0,07m	0,16	
punt 19	1991	2d	3,1		?	2 m/jr	1	120 m	300'-100' (160')	78	0	-	0,00	
punt 20	1991	0c	2,8		3 m/jr?	1 m/jr	1	200 m	240'-60' (180')	76	3	0,06m	0,08	
punt 21	1991	1c	4,7		5 m/jr	0 m/jr	1	220 m	260'-60' (160')	56	4	0,04m	0,08	
punt 22	1991	1c	3,8		2 m/jr	1 m/jr	1	100 m	240'-60' (180')	73	3	0,05m	0,09	

punt 23	1991	1c	4,6	20 m/jr	1 m/jr	1	215 m	210°-60° (210°)	80	1	0,04m	0,07	
punt 24	1992	3b/5	5,8	10 m/jr	1 m/jr	2	260 m	270°-90° (180°)	44	3	0,01m	0,08	

verklaring

aanleg:	jaar van afronding aanleg vooroeververdediging
bodem:	bodemmateriaal tussen 0 m en 0,25 m beneden bodemniveau, zie p. 2.5
% lutum:	lutumgehalte van de bovenste 0,20 m van de bodem
erosie voor:	erosiesnelheid voor aanleg van de vooroeververdediging
erosie na:	erosiesnelheid na aanleg van de vooroeververdediging
c.:	constructietype (1 of 2)
afstand:	afstand tussen oever en vooroeververdediging in het jaar van aanleg
expositie:	richtingen van waaruit golfaanval op de oever zelf kan voorkomen; dit stemt niet per se overeen met de xpositie van de ervoor gelegen vooroeververdediging. Als bij voorbeeld een eiland achter de vooroeververdediging ligt, is de oever meer beschermt gelegen dan de vooroeververdediging.

De volgende vier kolommen geven een samenvatting van het golfklimaat. Zie voor een verklaring van de keuze van de parameters p.4.2

% golfaanval:	percentage van de tijd dat golven invallen loodrecht op de vooroeververdediging (langs de normaal) en tot 75° links en rechts van de normaal
% golven > 0,3 m:	percentage van de tijd dat golven hoger dan 0,30 m invallen loodrecht op de vooroeververdediging (langs de normaal) en tot 75° links en rechts van de normaal
w.s. $H_s > 0,3$:	(gewogen) gemiddelde waterstand bij golven hoger dan 0,30 m, invallend loodrecht op de vooroeververdediging (langs de normaal) en tot 75° links en rechts van de normaal
%w.s.>0,3 en $H_s > 0,2$:	percentage van de tijd dat golven, hoger dan 0,20 m en invallend loodrecht op de vooroeververdediging (langs de normaal) en tot 75° links en rechts van de normaal, samen gaan met lokale waterstanden hoger dan 0,30 m + NAP

4. Analyse van resultaten

4.1 Inleiding

De erosiesnelheid van de oever wordt bepaald door de golfhoogte van de op de oever invallende golven en de cohesie van de oever. In het Volkerak-Zoommeer worden golven voornamelijk opgewekt door de wind. Windgolven die op de vooroeverdedigingen invallen gaan deels door en eventueel over de dam heen. De hoogte van de golven die (direct achter de dam) resulteert hangt af van de hoogte en breedte van de vooroeverdediging en de porositeit ervan. Bij hele hoge en brede vooroeverdedigingen is de transmissie klein.

Als er geen golven door of over de dam heengaan, dan wordt de aanval op de oever alleen veroorzaakt door de golven die achter de dam worden opgewekt. Als de vooroeverdediging verder uit de oever ligt, dan is de golf die achter de dam wordt opgewekt hoger. De afstand uit de oever kan dus een belangrijke invloed hebben op de grootte van de erosie. De richting waarin de oever ligt is echter ook van belang omdat de wind niet uit elke richting even sterk waait.

De tabel in paragraaf 3.11 is opgesteld om te dienen als basis voor een statistische analyse. Een statistische analyse wijst uit in hoeverre afzonderlijke parameters bijdragen aan een bepaald verschijnsel, in dit geval de erosiesnelheid aan de oever.

Een eerste blik op de tabel leert dat er weinig systeem te vinden is in de veroorzakende factoren en de daaruit voorkomende erosie. Daarom is gekozen, in plaats van een wiskundige, statistische analyse, voor een beschrijvende analyse.

4.2 Golftransmissie door de dam

Windgolven kunnen over en door de dam heengaan. Naast de afmetingen en opbouw van de dam zijn vooral de golfhoogte en de waterstand bepalend voor de mate van transmissie. Bij een grotere invallende golfhoogte gaat ook een grotere golfhoogte door achter de dam. Als de waterstand hoger is, is er meer overslag en is de weg door de dam korter. Voor een deel gaat een grote golfhoogte samen met een grote waterstand. Bij harde wind ontstaan immers hoge golven en aan lijzijde van het meer een grote windopzet. Maar door toevallige fluctuaties in het meer kan een hoge waterstand ook voorkomen zonder hoge windgolven. Daarom worden de invloed van golfhoogte en van de waterstand ook apart geanalyseerd.

In de tabel in p. 3.11 staat een kolom met het percentage van de tijd dat de vooroeverdediging wordt aangevallen uit een relevante richting. Als relevant wordt gezien golven loodrecht op de vooroeverdediging en tot 75° links en rechts van de normaal. Golven parallel aan de dam en op de achterkant van de dam hebben geen invloed op de erosie van de oever.

In de kolom daarnaast staat het percentage van de tijd aangegeven dat golven voorkomen uit een relevante richting en met een hoogte van minimaal 0,30 m. Daar weer naast staat de gemiddeld voorkomende waterstand bij golfhoogten vanaf 0,30 m. Dat wil zeggen, de waterstand bij de golfcondities van de vorige kolom.

Tenslotte is er een kolom die aangeeft gedurende welk percentage van de tijd hoge waterstanden (> 0,2m NAP) voorkomen samen met golfhoogten vanaf 0,30 m.

Bij alle locaties varieert de golflengte bij golven van 0,30 m tot 0,40 m tussen 1,4 s en 1,7 s.

Een onderlinge vergelijking van de golfklimaten ter plaatse van de 24 locaties geeft het volgende beeld.

Het percentage van de tijd dat de vooroeverdedigingen worden aangevallen door golven uit een relevante richting (ongeacht de golfhoogte) varieert tussen grofweg 40% en 80%. Dit heeft te maken met overheersende windrichtingen en meer of minder beschutte ligging van de locaties. Locaties met een hoog percentage hebben een groot deel van de tijd te maken met golfaanval tegen de dam. En ook met golfopwekking achter de dam in de richting van de oevers. Een hoog percentage kan daarom aanleiding geven tot relatief grote erosie. Dit zowel voor als na de aanleg van de dammen. De locaties 10, 15 en 24 worden relatief weinig belast met golven uit een relevante richting. De locaties 13, 19, 20 en 23 relatief veel. Dit is samengevat in de volgende tabel:

weinig belaste locaties	veel belaste locaties
-------------------------	-----------------------

locatie	% golfaanval	erosie voor/na aanleg	locatie	% golfaanval	erosie voor/na aanleg
10	45	13 / 0 m per jaar	13	79	? / 1 m per jaar
15	42	1 / 0 m per jaar	19	78	? / 2 m per jaar
24	44	10 / 1 m per jaar	20	76	3? / 1 m per jaar
			23	80	20 / 1 m per jaar

Verwacht zou worden dat links in de tabel relatief lage erosiesnelheden zouden voorkomen en rechts relatief hoge. Dit blijkt niet zo te zijn. Het percentage relevante golfaanval lijkt daarmee van weinig invloed op de erosie.

Erosie kan worden veroorzaakt door langdurig voorkomende kleine golfjes of door kortdurende periodes van grotere golfaanval. De golfhoogten in het Volkerak zijn onder dagelijks omstandigheden zo klein, dat er geen transmissie is door de dammen. Wat betreft de dagelijks voorkomende golven op de oever is daarom alleen de golfopwekking achter de dammen van belang. Langs het Volkerak bestaan de oevers uit cohesief materiaal. Erosie treedt bij cohesieve oevers pas op als de stroomsnelheden langs de oever (veroorzaakt door stroming of golven) een bepaalde waarde overschrijden. Daarom is bij cohesieve oevers vooral het vóórkomen van grotere golven van belang. Hier is sprake van een combinatie van door de dam getransmitteerde golven en achter de dam opgewekte golven.

Voor een onderlinge vergelijking van de locaties is het percentage van de tijd aangegeven dat golven > 0,30 m uit een relevante richting voorkomen. Dit percentage is maximaal 6 %. In de kolom ernaast is de gemiddelde waterstand aangegeven die bij golfhoogten vanaf 0,30 m per locatie voorkomt. Uit die gegevens blijkt, dat de waterstandsverhoging maximaal 0,08 m is.

Met deze gegevens kunnen transmissie sommen gemaakt worden met behulp van formules van van der Meer [2]. De gebruikte formules zijn formules voor doorlatende dammen. Uitgaande van een golperiode van 1,7 s en een golfhoogte van 0,30 m is de doorgaande golfhoogte:

- bij een waterstand van NAP+ 0,00 m: 0,10 m
- bij een waterstand van NAP + 0,05 m: 0,11m
- bij een waterstand van NAP + 0,08 m: 0,12 m

Hieruit blijkt dat de genoemde peilvariaties nauwelijks van invloed zijn op de doorgelaten golfhoogte. Alleen het percentage van de tijd dat grote golfhoogten optreden is van belang. Bij een hoog percentage zou een hogere erosie van de oever kunnen optreden. Locaties met een laag percentage (zelfs 0%) zijn 11 t/m 15 en 19. Locaties met een relatief hoog percentage (4%-6%) zijn 5, 7, 18 en 21. Ook hier blijkt echter geen verband met de erosiesnelheid.

Tenslotte kan een (al dan niet toevallige) waterstandsverhoging aanleiding zijn tot grotere doorgelaten golfhoogtes. Bij een waterstand van NAP +0,20 m, een golfhoogte van 0,30 m en een golperiode van 1,7 s is de doorgelaten golfhoogte 0,14 m. Waar deze situatie zich vaker voordoet is de erosie mogelijk groter dan op plaatsen waar de situatie minder vaak voorkomt. De locaties 11, 13 t/ 15, en 19 scoren wat dit betreft laag (0,00%) en de locaties 7 (0,14%), 16 (0,18%), 17 (0,20%) en 18 (0,16%) relatief hoog. Dit kan een mogelijke verklaring zijn voor de grote erosie bij de locaties 16 en 17.

De gekozen golfparameters geven een beeld waarmee een onderlinge vergelijking van de locaties mogelijk is. Als voorbeeld is een golfhoogte van 0,30 m gekozen. Er komen echter incidenteel nog grotere golfhoogten voor. In een heel enkel geval zelfs van 0,50 m. Dergelijke kortdurende situaties met grote golfhoogten kunnen ineens veel erosie veroorzaken. Ze zijn dus relevant voor het erosieverloop. De mate van voorkomen van deze situaties vertoont grote overeenkomst met de mate van voorkomen van de voorbeeldsituaties. Alhoewel de tabel dus beperkte informatie geeft, is hij representatief voor het hele golfklimaat en de onderlinge verschillen daartussen. Met andere woorden: locaties met een relatief hoog percentage tijd met golven groter dan 0,30 m, hebben ook een relatief hoog percentage golven > 0,40 m.

De opbouw van de constructies heeft invloed op de mate van transmissie van golven. Constructietype 1 zou dus structureel een ander effect op de erosie kunnen hebben dan type 2. Uit de tabel blijkt dat dit niet het geval is.

4.3 Golfopwekking en golftransport achter de dam

Verwacht werd, dat de afstand tussen oever en verdediging een groot effect zou hebben op de optre-

dende erosie. Het feit dat op sommige plaatsen nog steeds erosie optreedt, werd vooral toegeschreven aan de hier en daar zeer forse afstanden. Dit verband is echter uit de tabel in p. 3.11 niet aan te tonen. In een snelle analyse zijn de locaties gegroepeerd op basis van de afstand. Zowel de erosiesnelheid na aanleg van de verdediging als de afname van de erosiesnelheid door aanleg van de verdediging zijn vergeleken. Wanneer alleen nog maar de gemiddelden worden bekeken ontstaat het volgende beeld.

afstand	gemiddelde afname erosiesnelheid	gemiddelde erosiesnelheid na aanleg
< 150 m	2 m/jaar	0,75 m/jaar
150-200 m	9,5 m/jaar	1,75 m/jaar
200-250 m	10,5 m/jaar	1,3 m/jaar
250-350 m	7,5 m/jaar	1,0 m/jaar
> 350 m	? m/jaar	? m/jaar

Voor de vijf locaties waar de afstand groter was dan 350 m, is geen gemiddelde aan te geven, omdat er te veel onbekende en tegenstrijdige gegevens tussen zitten. Overigens wordt in een evaluatiestudie naar vooroeerverdedigingen in het Veerse Meer en het Grevelingenmeer [5] aanbevolen om de afstand niet groter te maken dan 80 m.

Te verwachten was dat met de toename van de afstand de erosie zou toenemen (laatste kolom) en dat het verschil in erosiesnelheid (middelste kolom) zou afnemen. In beide kolommen is deze trend niet te ontdekken. In dit stadium is het niet mogelijk om een kwantitief verband aan te geven tussen de afstand en de erosiesnelheid.

Op ondiep water breken golven. Daarom is ook de diepte achter de dammen belangrijk. Als de zone achter de dam ondiep is, worden de golven gedempt. Hierdoor is de erosie kleiner. Door erosie wordt zand van de oever naar de ondiepe zone getransporteerd. De zone wordt nog ondieper, de golven worden meer gedempt en de erosie is kleiner. Hierdoor dempt de erosie als het ware uit en de oever bereikt op een gegeven moment een evenwicht.

In de meeste gevallen zijn de dammen aangelegd op een diepte van 0,80 m tot 0,90 m en heeft geen verhoging of verlaging van de bodem plaatsgevonden. Er is een geleidelijk verloop naar de oever. In sommige gevallen is bij de oever een abrupte sprong zichtbaar (een steile oever). Een steile oever is vatbaarder voor erosie dan een flauwe oever, omdat op een flauw talud de golfenergie sterk afneemt. Voor sommige locaties laten de bodemprofielen zien dat de oever in de loop der tijd flauwer wordt en dus minder vatbaar voor erosie. Hier is te verwachten dat de erosiesnelheid (verder) afneemt.

Bij de Hellegatsplaten is de vooroeerverdediging dieper aangelegd, namelijk op 1,5 m. Hier is na aanleg nog flinke erosie opgetreden. De oevers hebben van alle oevers langs het Volkerak het meest te lijden onder erosie. De diepte kan hier zeker een rol spelen.

Ook de expositierichting is van belang voor de mate van golfopwekking achter de dam. Dit heeft te maken met de overheersende windrichting en met beschutting van de oever. De expositie van de oever zelf kan overigens afwijken van die van de vooroeerverdediging. Wanneer achter de vooroeerverdediging bij voorbeeld een eiland ligt, is de oever meer beschermd dan de vooroeerverdediging. In de tabel van paragraaf 3.11 is een kolom met de expositierichting opgenomen. De aangegeven richtingen gelden voor de oever zelf. Tussen haakjes staat de totale hoek vanwaaruit golfaanval plaatsvindt, ofwel de expositiehoek. Voor een gestrekte oever (zonder hoeken en bochten) zonder beschutting van eilanden is deze hoek 180°. De overheersende windrichting is zuidwest (ongeveer 240°). Oevers die uit deze richting worden aangevallen eroderen naar verwachting sterker dan andere oevers, met name de oevers op het noordoosten. En hoe groter de expositiehoek, hoe groter de verwachte erosie. Uit de tabel blijkt dit verband niet. In bijlage 2 wordt verder op de expositierichting en de afstand tussen dam en oever ingegaan. Uit de analyse met behulp van het erosion rate model in deze bijlage blijkt dat als de afstand tussen dam en oever verkleind wordt van 200 naar 100 m, de erosie in dit geval met

ongeveer 60 % vermindert. De richting waarin de oever ligt, blijkt een belangrijke factor bij de grootte van de erosie. De erosie is het grootst als de oever met de open waterkant naar het Zuid-Westen ligt, en het kleinst als oever met de open waterkant naar het oosten ligt. Het verschil tussen beide kan oplopen tot een factor tien. Dit betekent dat bij het bepalen van de gewenste afstand tussen dam en oever, nadrukkelijk rekening gehouden moet worden met de richting waarin de oever ligt. Als de oever met de open waterkant naar het Zuid-Westen ligt dan kan de afstand beter klein zijn (50 m). Als de oever met de open water kant naar het oosten ligt dan kan de dam op 200 m of meer worden gelegd, zonder dat de erosie heel groot wordt. De norm van 80 m voor alle vooroeververdedigingen zoals die gesteld is voor het Veerse meer [5] is niet logisch.

4.4 Invloed van het bodemtype

Het type bodemmateriaal kan van invloed zijn op de mate van erosie. Voor de meeste locaties is het bodemmateriaal lutumarm, middelfijn zand. Het lutumgehalte staat in een aparte kolom in de tabel in p. 3.11 vermeld. Een zandige bodem is op zich niet cohesief. Met andere woorden er is geen onderlinge verbinding tussen de korrels. Of erosie optreedt hangt bij een niet-cohesieve bodem alleen af van de stroomsnelheden in relatie tot de grootte van de korrels. Kleine korrels zijn lichter en worden dus gemakkelijker getransporteerd dan grote korrels. Een bodem van middelfijn zand (b.v. 1c) is daarom minder gevoelig dan een bodem van zeer fijn zand (b.v. 2d). Door de aanwezigheid van lutum kan een niet-cohesieve bodem toch cohesieve eigenschappen krijgen. De lutumdeeltjes binden de afzonderlijke korrels waardoor de bodem minder vatbaar wordt voor erosie. Zavel (zand met klei) is van zichzelf een cohesieve bodemsoort. De kleideeltjes binden de zand korrels.

Samenvattend is de verwachting dat de erosie minder is naarmate het zand grover is en het lutumgehalte groter. Ook is het logisch dat een zavelbodem minder erodeert dan een zandbodem.

Wat betreft de bodemtypen in de derde kolom van de tabel in p. 3.11 is niet precies aan te geven welke het meest vatbaar is voor erosie. Dit komt omdat lutumgehalte en zandgrofheid niet afzonderlijk herkenbaar zijn. Wel kunnen in afnemende mate van erosiegevoeligheid geordend worden:

1c

2c

3b

5

De typen 2c, 3b en 5 komen eigenlijk te weinig voor om een uitspraak te kunnen doen over de invloed van het bodemtype. Op het eerste gezicht is er weinig verband te ontdekken.

In de vierde kolom van de tabel in p. 3.11 valt op dat op enkele locaties het lutumgehalte beduidend hoger is dan bij de andere. (Overigens zijn de gehalten in het algemeen laag). Dit zijn de locaties 6, 14, 15 en 17. Hier zou de erosie dus relatief laag moeten zijn. Voor de locaties 6, 14 en 15 klopt dit ook wel, maar voor 17 helemaal niet (dit kan komen door de grotere hydraulische dynamiek in de noordoosthoek van het Volkerak). Bovendien zijn er locaties met weinig erosie en lage lutumgehalten (b.v. locatie 20). De invloed van het lutumgehalte kan dus niet goed afgeleid worden uit de tabel, maar het speelt mogelijk een rol.

De erosie van een cohesieve oever heeft een enigszins 'toevallig' karakter. Als er een steilwand is, kan gedurende lange tijd niets gebeuren, waarna ineens een groot stuk afbrokkelt. Of dit gebeurt, hangt ook weer af van de aanwezigheid van plantenwortels of andere 'onregelmatigheden' in de bodem. Dit varieert natuurlijk van plaats tot plaats. Hier en daar komen nog 'schelpenbankjes' voor die een natuurlijke verdediging vormen tegen erosie.

4.5 Jaar van aanleg

Doordat de constructies in verschillende jaren zijn aangelegd, zijn niet alle oevers blootgesteld aan dezelfde windcondities. Hierdoor is het niet goed mogelijk om de erosie na aanleg van de verschillende oevers met elkaar te vergelijken. Door over een langere periode metingen te verrichten kunnen verschillen langzaam verwaarloosbaar worden.

4.6 Wat als...

Uit de tabel in p. 3.11 en de grafieken in bijlage 2 blijkt dat de erosiesnelheid na aanleg van de dammen erg is afgenomen. De aanleg van de dammen is dus zeker zinnig geweest. Hoe het erosieproces was verlopen als er geen verdedigingen waren geweest, is moeilijk te zeggen. Er zijn te weinig metingen van voor de aanleg van de dammen om een trend te ontdekken. Wel is het duidelijk

dat er nog steeds geen evenwicht was (en is). Waarschijnlijk zou de erosie nog lange tijd zijn doorgegaan. Van de onbeschermden platen zou dan weinig of niets zijn overgebleven. Dit proces had afgeremd kunnen worden door de aanwezigheid van moerasplanten.

4.7 Verder rekenen

Als uit een statistische analyse blijkt welke factoren bepalend zijn voor de erosie, kunnen berekeningen verder inzicht geven. Er wordt dan een model gekozen, waarin die factoren een overwegende rol spelen. Er zijn geen kant-en-klare modellen voor het berekenen van de erosie van een cohesieve oever achter een vooroeververdediging. Er zijn wel modellen voor het berekenen van golfopwekking op een groot meer, voor het berekenen van golftransmissie door een dam, voor het berekenen van golfopwekking achter de dam en voor het berekenen van erosie bij een op stroming belaste oever. Door modellen voor de verschillende verschijnselen te combineren, ontstaat een model die het gehele proces beschrijft.

Bij het verder rekenen is het belangrijk om onderscheid te maken in dagelijkse omstandigheden en 'extreme' omstandigheden. Voor het Volkerak is al gebleken dat onder dagelijkse omstandigheden geen golven over of door de dam heen komen. Golfopwekking achter de dammen bepaalt dan de golfhoogte bij de oever. Onder extreme omstandigheden komen wel golven door en over de dam, in de orde van 0,10-0,15 m, of bij erg zware stormen nog hoger. In dat geval bepalen transmissie en de achter de dam opgewekte golven samen de golfhoogte bij de oever.

Of erosie optreedt bij een bepaalde golfhoogte, hangt af van de weerstand van de oever tegen erosie. De weerstand van een grondsoort wordt uitgedrukt in een kritieke stroomsnelheid. Dit is de snelheid waarbij erosie begint. Bij lagere stroomsnelheden is er geen erosie; bij hogere snelheden is er wel erosie die afhankelijk is van de grootte van de stroomsnelheid. Bij golfaanval zijn de stroomsnelheden door golfloop bepalend; hier zijn formules voor. Het bepalen van de kritieke stroomsnelheid is erg belangrijk maar ook erg moeilijk. Voor verschillende bodemsoorten zijn hier richtgetallen voor, maar het is niet goed mogelijk om afhankelijk van eigenschappen van de bodem (lutumgehalte, korrelgrootteverdeling, etc.) een kritieke stroomsnelheid te bepalen. De mate van erosie die optreedt is erg gevoelig voor de waarde van de kritieke stroomsnelheid, blijkt uit bijlage 1. Hier is dus sprake van een leemte in kennis die vrij essentieel is bij het voorspellen van erosie.

Uit de inventariserende berekening in bijlage 1 ontstaat het vermoeden dat golfhoogten bij de oever onder dagelijkse omstandigheden niet bijdragen aan de erosie. De stroomsnelheden zijn dan waarschijnlijk lager dan de kritieke stroomsnelheid. Erosie wordt veroorzaakt door 'extreme' omstandigheden. Als de kritieke stroomsnelheid van de oever bekend is, kan met de rekenmodellen een voorspelling gedaan worden van de grootte van de erosie, of in ieder geval van de onderlinge verschillen in gevoeligheid voor erosie van verschillende locaties. Uit het golfklimaat ter plekke moet dan met behulp van transmissieformules en golfopwekkingsformules de golfhoogte aan de oever berekend worden. Hierbij moet rekening gehouden worden met de hoek van inval van de golven. Het resultaat is een kansverdeling van golfhoogten aan de oever. De golfhoogten moeten vervolgens worden omgerekend naar stroomsnelheden. De situaties waarin de stroomsnelheid hoger is dan de kritieke stroomsnelheid, dragen bij aan erosie. De erosiesnelheid wordt per situatie uitgerekend. De uiteindelijke erosiesnelheid is de som van de afzonderlijke bijdragen, vermenigvuldigd met de kans van voorkomen.

Verdere berekeningen zijn voor het Volkerak niet gemaakt. Uit de beschrijvende analyse bleek namelijk al dat de metingen van de erosie weinig systeem vertonen. Met berekeningen valt dan weinig te verklaren. Bovendien zijn er geen kritieke stroomsnelheden van de bodem bekend of te berekenen, terwijl de berekeningen erg gevoelig zijn voor de kritieke stroomsnelheid. In bijlage 1 wordt het erosion-rate-model beschreven, waarmee erosie van een cohesieve bodem kan worden benaderd als functie van de stroomsnelheid.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Een heel belangrijke conclusie is dat de meetgegevens geen goed beeld geven van de opgetreden erosie. Daardoor is heel moeilijk aan te geven in welke mate diverse factoren hebben bijgedragen aan de erosie die na aanleg van de oeververdedigingen overbleef.

De golftransmissie door de dam is normaal gesproken van invloed op de mate van erosie van de oever. De kruinhoogte van de dammen is vrij hoog waardoor de invallende golven grotendeels gedempt worden. Van een golfhoogte van 0,30 m blijft achter de dammen ongeveer 0,10 m over. Dit formaat golven komt erg weinig voor, maar incidentele perioden met grote golfhoogten kunnen een grote invloed hebben op de totale erosie. Het verband is echter niet aan te tonen. Wel blijkt enigszins de invloed van de waterstand op de doorgelaten golfhoogte. Op locaties waar regelmatig een verhoogde waterstand voorkomt (hetzij door windopzet, hetzij door toevallige fluctuaties), is een grote erosie geregistreerd. Dit geldt met name voor de locaties 16 en 17.

De invloed van de afstand tussen de dam en de oever, die geacht werd een grote invloed te hebben op de erosie, kon niet worden aangetoond. Bij een grote afstand is er grote kans op golfopwekking achter de dam. Uit berekeningen blijkt, dat als de afstand tussen dam en oever verkleind wordt van 200 naar 100 m, de erosie met ongeveer 60 % vermindert. De richting waarin de oever ligt, blijkt een belangrijke factor bij de grootte van de erosie. De erosie is het grootst als de oever met de open waterkant naar het Zuid-Westen ligt, en het kleinst als oever met de open waterkant naar het oosten ligt. Het verschil tussen beide kan oplopen tot een factor tien. Het golftransport achter de dam hangt ook af van de diepte. Hoe ondieper het water, hoe groter de kans dat golven breken en de golfhoogte dus kleiner wordt. Op de locaties 16 en 17 is de diepte achter de dammen groter dan op de andere locaties. Ook dit kan bijdragen aan de grote erosie op beide locaties.

Het lutumgehalte van de bodem speelt mogelijk een rol van betekenis. Alhoewel de lutumgehalten over het algemeen laag zijn, zijn er onderling verschillen tussen de locaties. Waar het lutumgehalte relatief hoog was, was de erosiesnelheid relatief laag. Dit klopte alleen niet voor locatie 17, maar dit komt waarschijnlijk door de grote hydraulische dynamiek op die plaats.

Zonder aanleg van de vooroeververdedigingen was de erosie waarschijnlijk nog lange tijd doorgedaan. Doordat er weinig meetgegevens zijn van voor de aanleg van de dammen, kan geen trend worden afgeleid.

5.2 Aanbevelingen

Voortzetting van het monitoringsprogramma is wenselijk, zeker in verband met de mogelijke gevolgen van het veranderde peilbeheer. Hierbij is het van belang dat de meetgegevens in het jaar van meting worden gecontroleerd en verwerkt, om fouten zo spoedig mogelijk op te sporen en te corrigeren. Het verdient aanbeveling om, in aanvulling op het eenmaal per vier à vijf jaar volledig inmeten van de hoogteligging, in een reeks geselecteerde locaties jaarlijks de teruggang van de oeverlijn met behulp van staken te meten. Met een beperkte inspanning kunnen hiermee snel gegevens worden verkregen. Tot slot verdient het aanbeveling om met het onderzoek naar erosie aan te sluiten bij het onderzoek dat op dit moment plaatsvindt naar de golfvoortplanting op ondiepe voorlanden. Met dit onderzoek wordt de reducerende werking van een ondiep voorland bepaald. Door de uitkomsten van dit onderzoek te gebruiken, kan meer inzicht worden verkregen in de invloed van de diepte van de vooroever op de grootte van de erosie. Dit levert informatie op over het uitdempen van erosie, wat veroorzaakt wordt doordat de vooroever achter de dam steeds ondieper wordt. De erosiereductie kan dan bijvoorbeeld worden verdisconteerd door een reductiefactor te introduceren die na verloop van tijd steeds groter wordt.

6 Literatuur

1. Golfbrandvoorwaarden Volkerak-Zoommeer, modelberekeningen en statistiek, Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, 1998
2. Natuurvriendelijke oevers, CUR, 1994.
3. Collegedictaat b78 Windgolven, J.A. Battjes, 1984
4. Windklimaat van Nederland, P.J. Rijkaart en J. Wieringa
5. Evaluatie oevers, Technische Universiteit Delft, W. Leeuwestein en P. Schoot, 1988
6. De oevergebieden van het Volkerak-Zoommeer, Directie IJsselmeergebied, 1996

Bijlage 1: Erosion-rate-model

In deze bijlage wordt een model beschreven waarmee de erosiesnelheid kan worden benaderd als functie van de stroomsnelheid langs de oever.

Voor zandige oevers wordt in Nederland het duinafslagmodel DUROSTA gebruikt. Hierbij volgt de erosie uit het transport van sediment op een bepaald punt. Erosie is een continu proces. De erosie van cohesieve oevers werkt anders. Door de aanval van golven ontstaan steilranden. Tegen deze steilranden weerkaatsen de golven, waardoor de randen nog steiler worden. Op een gegeven moment zal de grond afschuiven. Erosie is dus een sprongsgewijs proces. De oevers van het Vokerak zijn veelal steilranden. Dit duidt erop dat de erosie niet continu, maar sprongsgewijs verloopt. Er moet van een ander model gebruik worden gemaakt. Om de erosie bij cohesieve oevers te berekenen wordt gebruik gemaakt van het erosion-rate model. Het erosion-rate model is oorspronkelijk afgeleid voor de erosie door stroming van cohesieve oevers. De grootte van de erosie volgt uit de verhouding tussen de optredende stroomsnelheid en de stroomsnelheid, waarbij deeltjes gaan bewegen, de zogenaamde kritieke stroomsnelheid. Door Van der Knaap (1996) is dit model vertaald naar erosie door golven. De stroomsnelheid is nu gelijk aan de oploopsnelheid van de golf. De stroomsnelheid waarbij deeltjes gaan bewegen, hangt sterk af van de deeltjesgrootte en de cohesie van het materiaal. De kritieke stroomsnelheid is in het algemeen moeilijk te bepalen. Omdat het model wel erg gevoelig is voor kleine variaties in de kritieke stroomsnelheid, is het niet mogelijk om met het model nauwkeurige voorspellingen te doen. Wel kan het model worden gebruikt om verschillen in erosie op verschillende punten te verklaren en het belang van bepaalde factoren te analyseren.

$$\frac{db}{dt} = \frac{R}{\rho g} \left[\frac{u_b^2}{u_c^2} - 1 \right]$$

De erosiesnelheid (db/dt) volgt uit:

$$R = 0,364 \tau_c \exp(-1,3 \tau_c)$$

met:

waarin:

τ is de schuifspanning

τ_c is de kritieke schuifspanning

ρ is de volumieke massa van water

g is de zwaartekrachtsversnelling

u_b is de stroomsnelheid langs de oever

u_c is de kritieke stroomsnelheid

$$b = \frac{R T_w}{\rho g} \frac{1}{2} \left(\frac{(v_0 / \sqrt{2})^2}{u_c^2} - 2 \right)$$

De erosie door een enkele golf volgt uit:

waarin:

N = aantal golven

t = tijd in seconde

T_w = golfperiode

$$v_0 = 1,25 (2g H_w \cos \beta)^{0,5}$$

v_0 = golfploopsnelheid. Hiervoor geldt:

met:

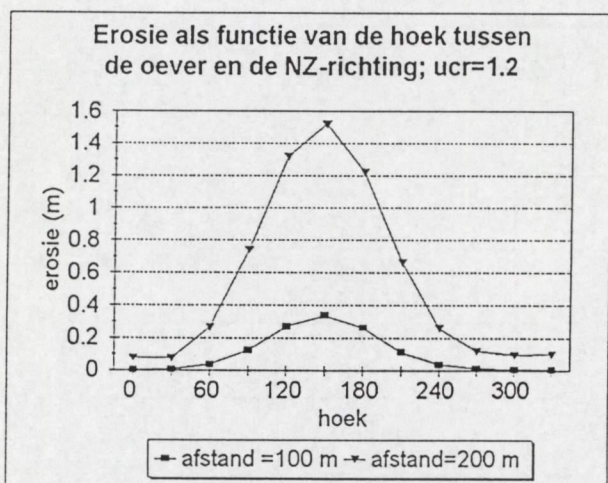
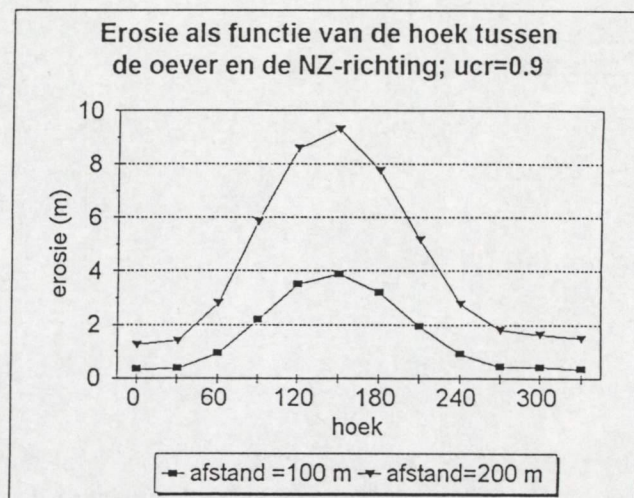
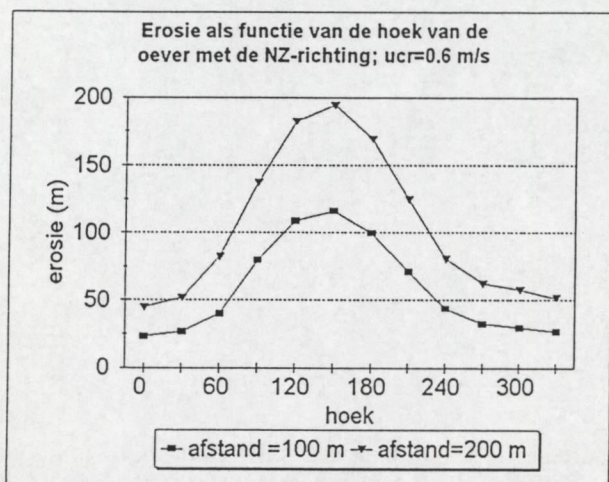
H_w = golfhoogte

β = hoek van golfinval

De kritieke stroomsnelheid is moeilijk te bepalen. Bij cohesieve grond (klei, evt. gewapend met wortels) zal zij groot zijn. Bij zandige oevers is zij relatief klein. In onderstaande tabel zijn als voorbeeld enige waarden weergegeven (Pilarczyk, 1987).

poriëngetal(-)		Kritieke stroomsnelheid (m/s)		
		vette klei	klei	schrale klei
2,0-1,2	los	0,45	0,35	0,30
1,2-0,6	matig compact	0,90	0,90	0,70
0,6-0,3	compact	1,25	1,20	1,05
0,3-0,2	zeer compact	1,70	1,65	1,35

Als de golfhoogte bekend is kan de erosie berekend worden als functie van de kritieke stroomsnelheid. De golfhoogte wordt eerst vertaald naar een golfploopsnelheid. Als deze groter is dan de kritieke stroomsnelheid van de bodem, treedt erosie op. In eerste instantie is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De berekeningen zijn uitgevoerd voor drie kritieke stroomsnelheden: 0,6, 0,9 en 1,2 m/s. Voor de afstand van de vooroeververdediging tot de oever is 100 en 200 m genomen en de hoek die de oever met de NZ-richting maakt is gevarieerd. Een hoek van 0° betekent dat de oever in NZ-richting ligt, waarbij het water aan de oostkant ligt. Een hoek van 90° betekent dat de oever in OW-richting ligt, waarbij het water aan de zuidkant ligt, enz. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 3.1 t/m 3.3.



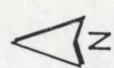
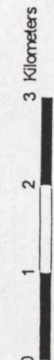
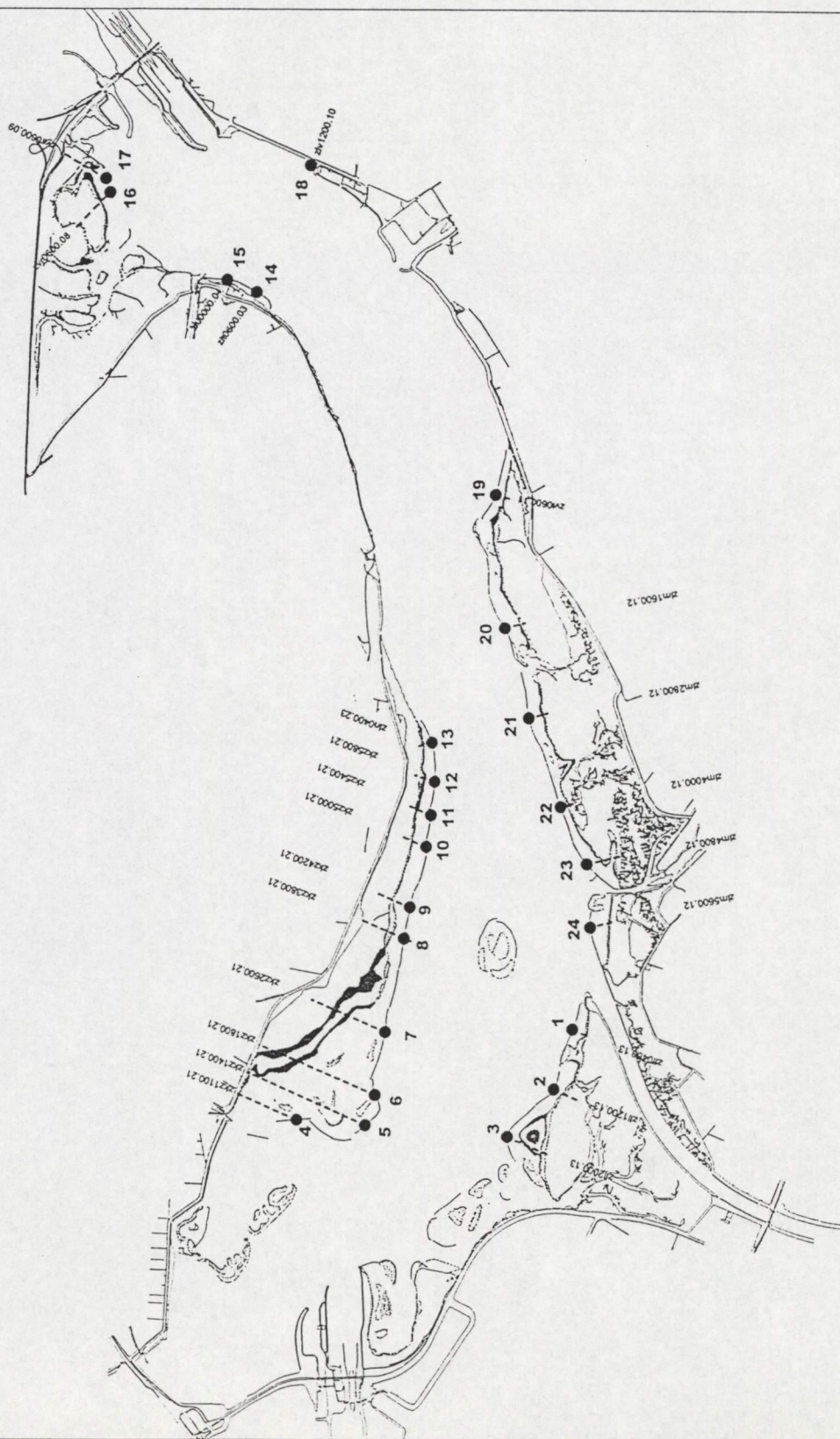
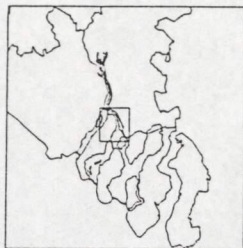
Uit de figuren volgt duidelijk dat de grootte van de erosie erg gevoelig reageert op kleine veranderingen in de kritieke stroomsnelheid. Een verdubbeling van de kritieke stroomsnelheid (van 0,6 naar 1,2 m/s) leidt ertoe dat de erosie meer dan honderd keer zo klein wordt.

De erosie is in alle gevallen het grootst als de oever een hoek maakt van 150° met de NZ-richting. Dit is het geval als de oever naar het Zuid-Westen is gericht. De wind komt in Nederland overwegend uit die richting, dus het is logisch dat de erosie daar het grootst is. De erosie is het kleinst als de oever in NZ-richting ligt, dat wil zeggen naar het Oosten is gericht. Beide kunnen een factor tien verschillen. Als de afstand tussen dam en oever gelijk is aan twee honderd meter en de oever ligt naar het oosten gericht dan is de erosie nog kleiner dan bij een oever waarbij de dam op honderd meter ligt en die naar het Zuidwesten is gericht. Door de afstand tussen dam en oever van 200 naar 100 meter te verkleinen kan de erosie met 60% worden gereduceerd.

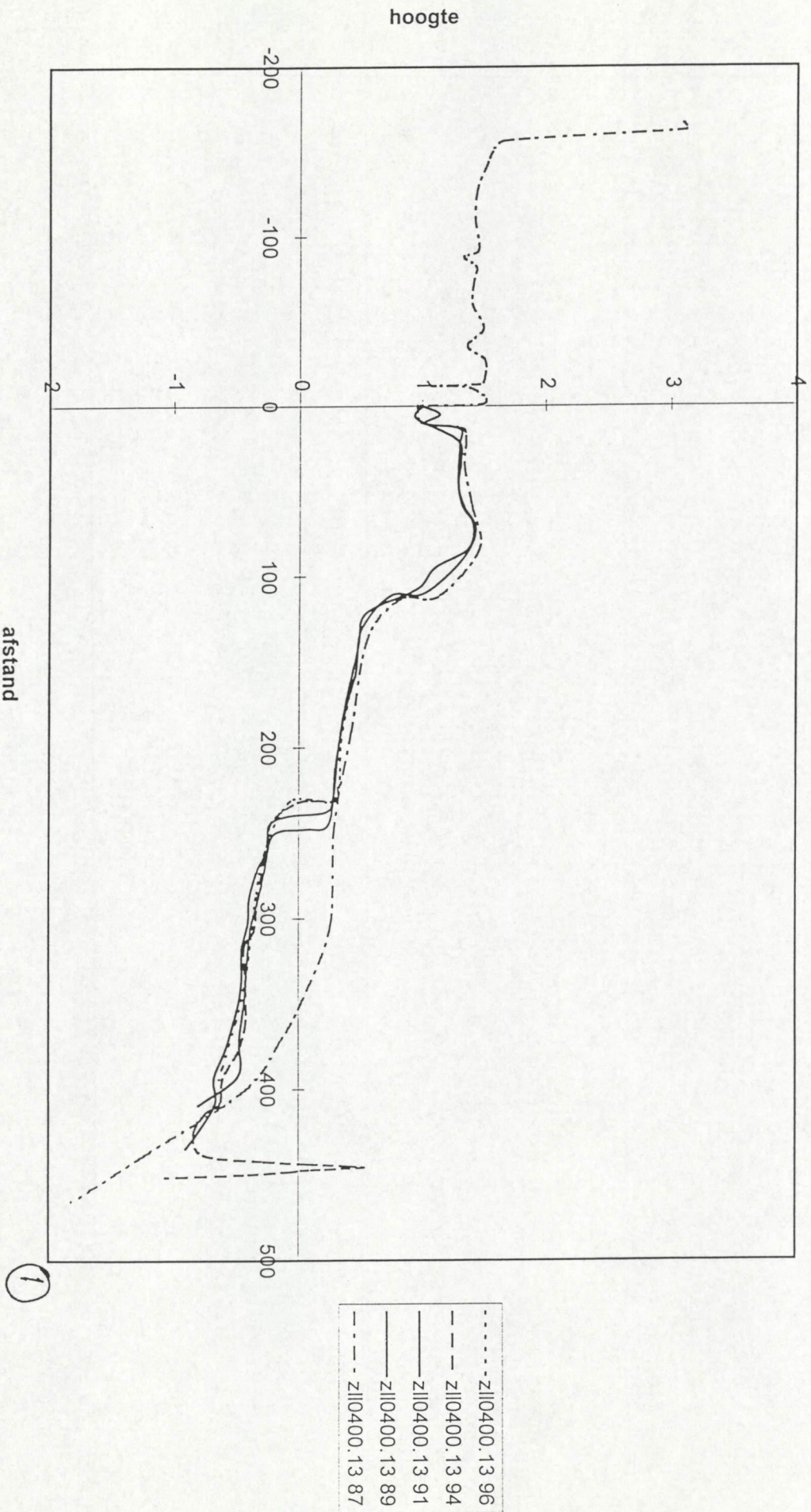
Bijlage 2: Meetgegevens

Overzicht locaties golfberekening

- locatie golfberekening



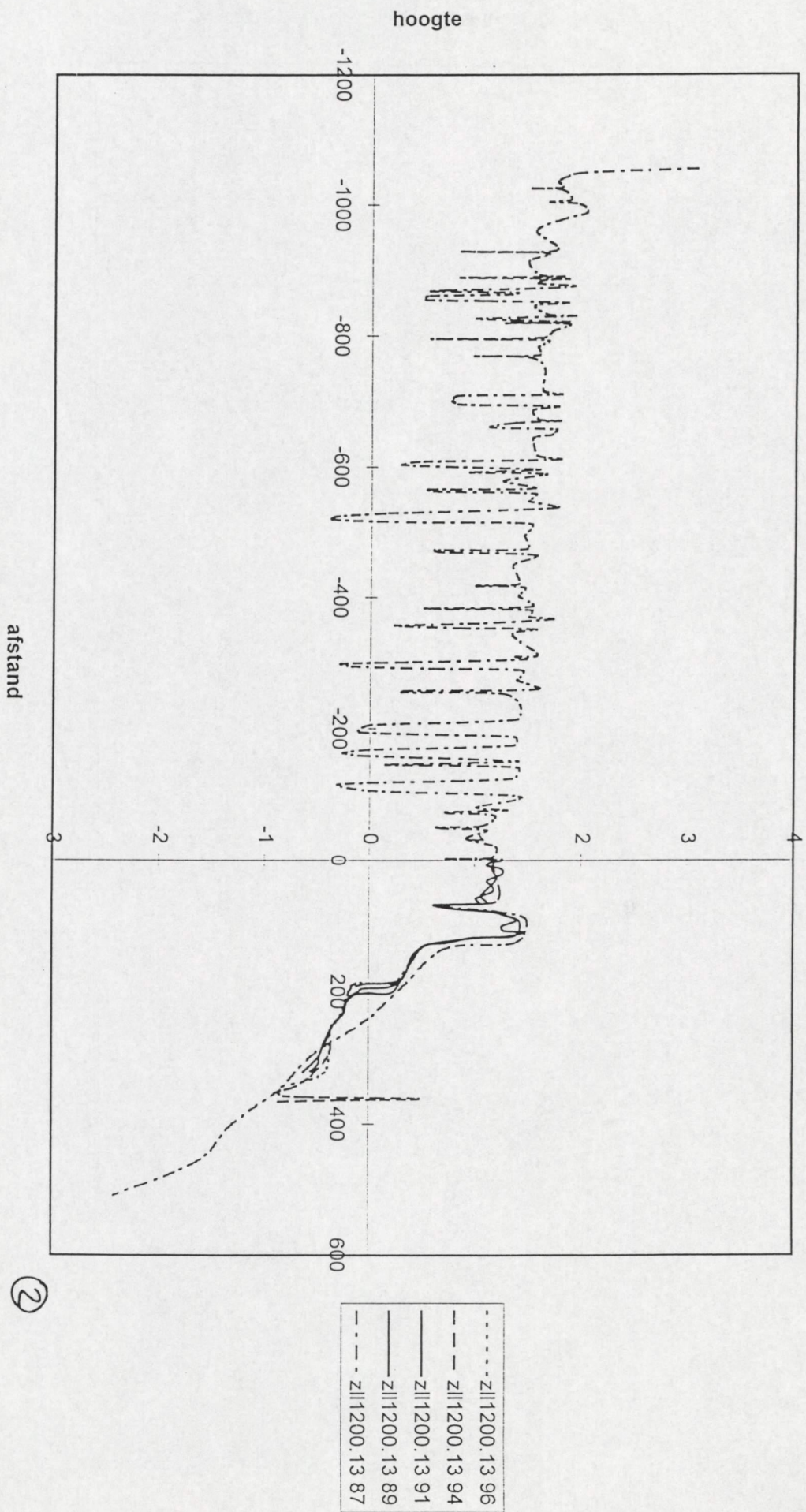
Z110400



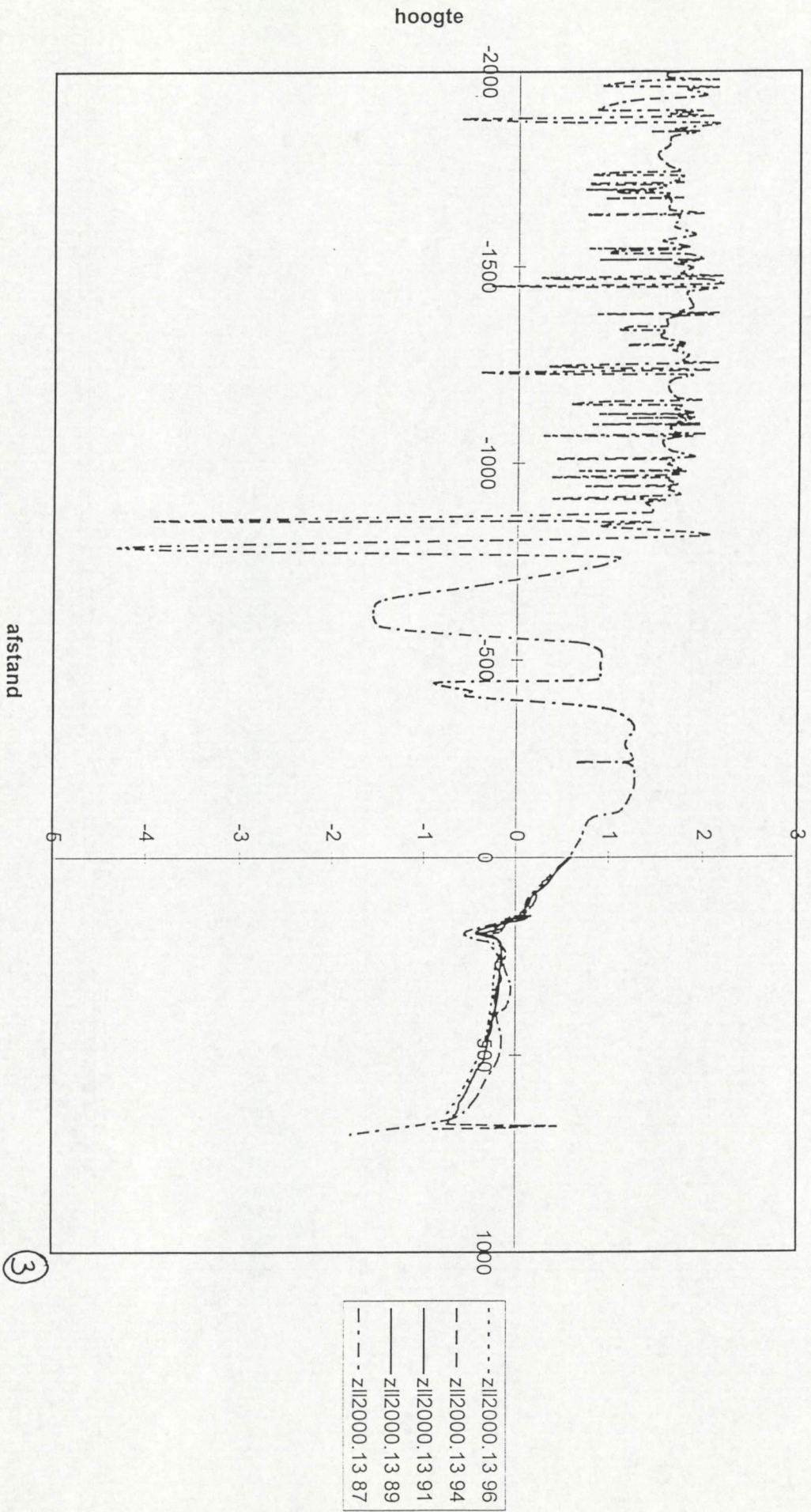
afstand

hoogte

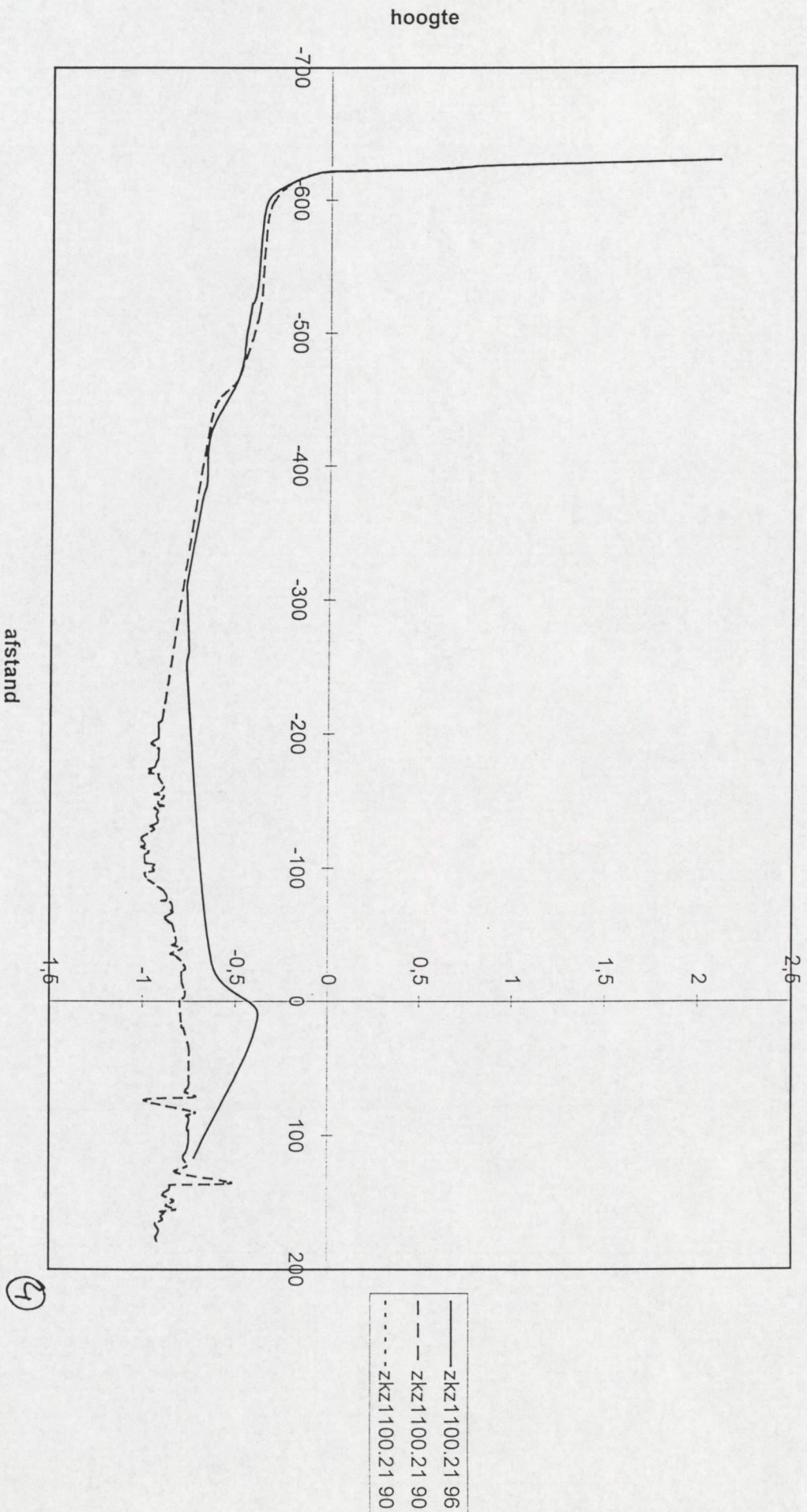
ZII1200



Z112000

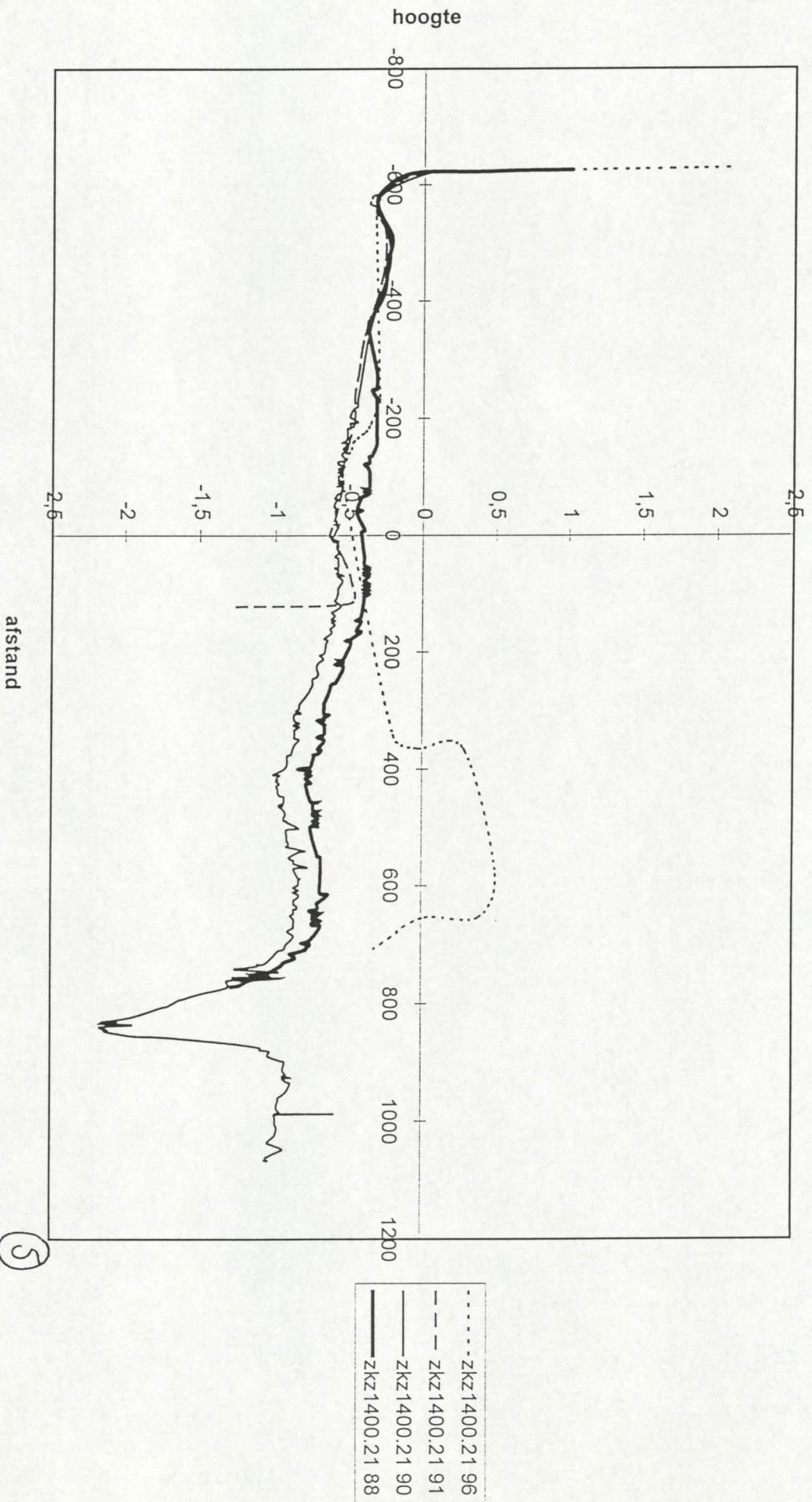


ZKz1100

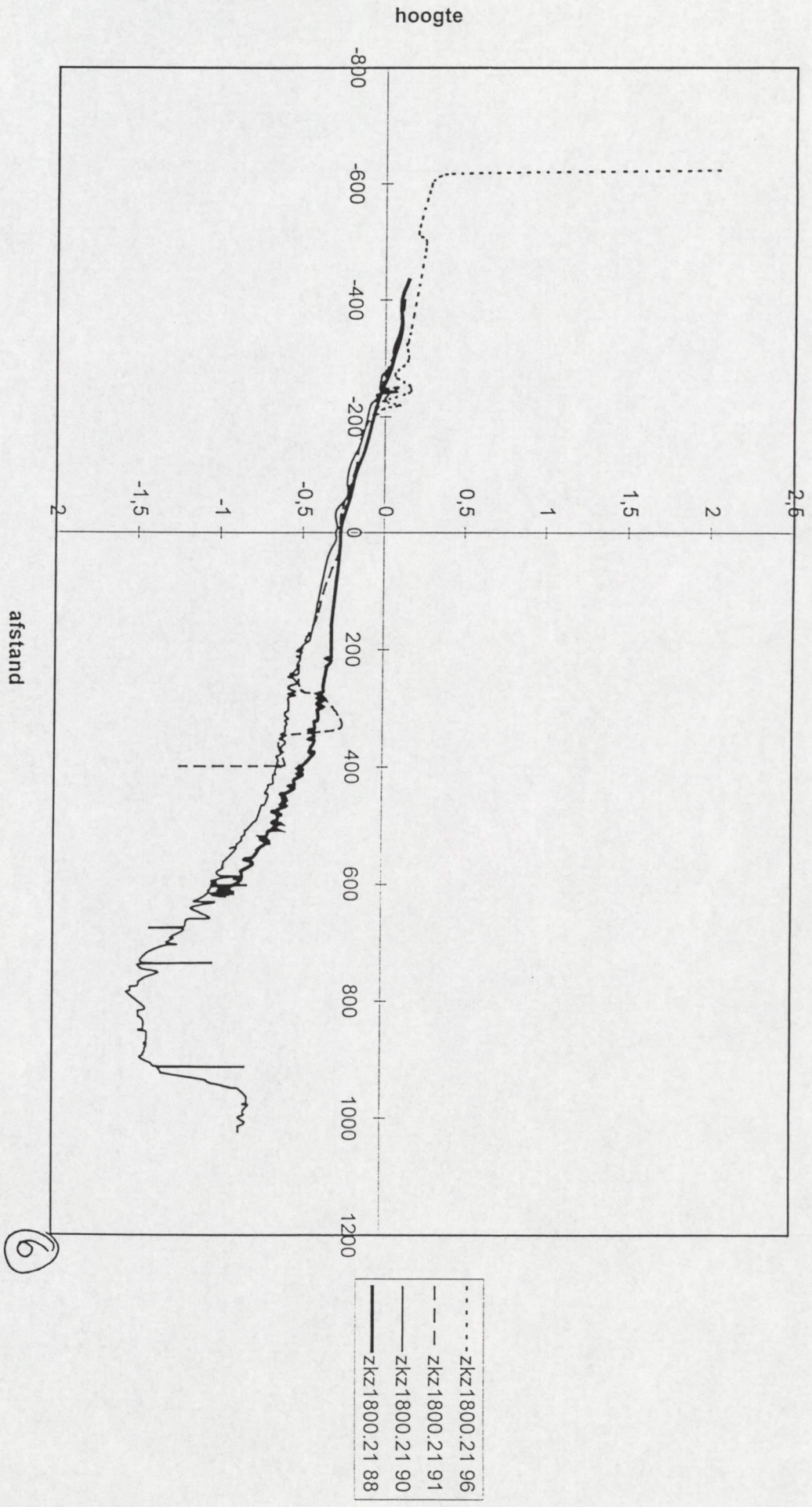


4

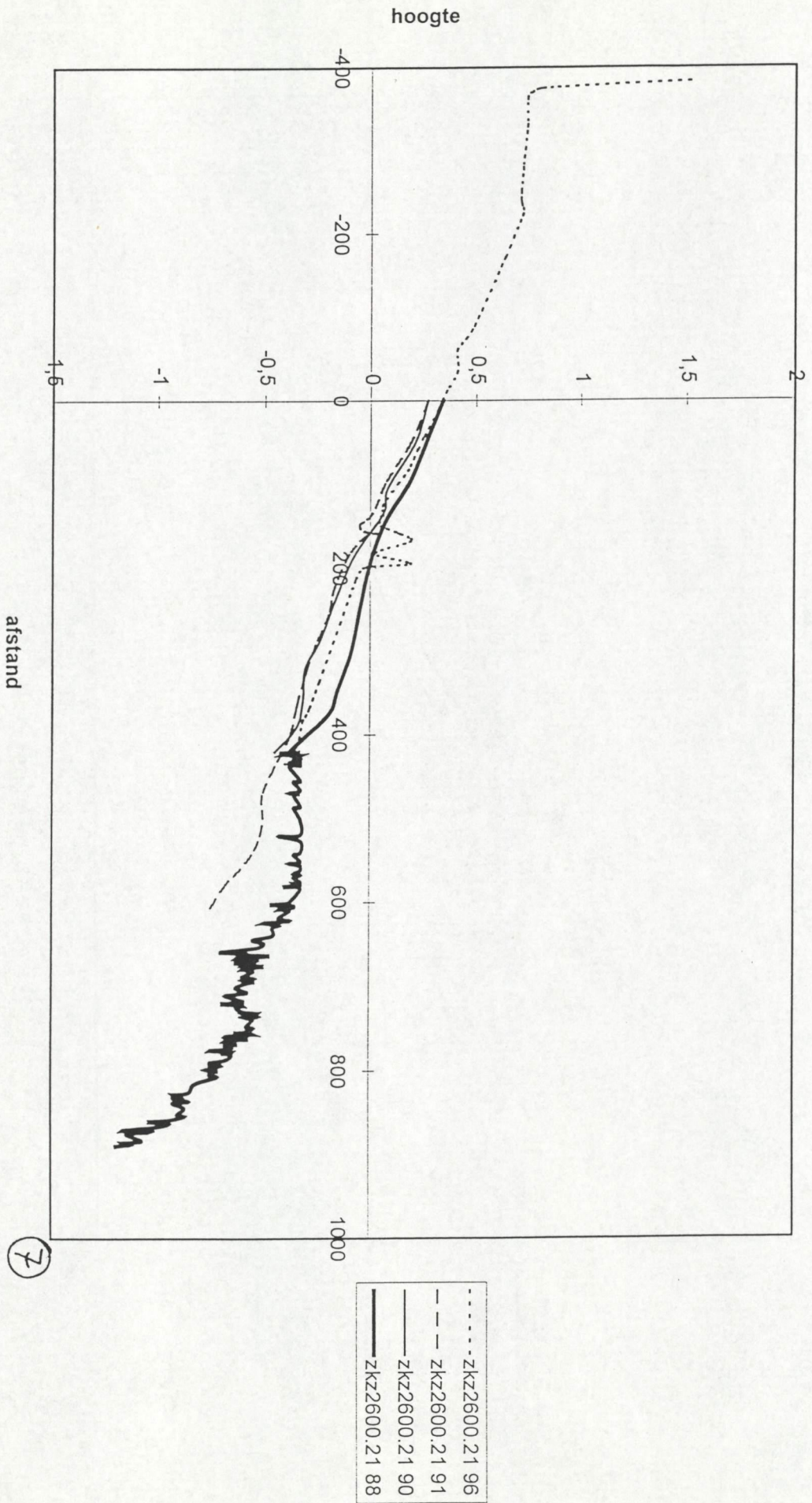
ZKz1400



ZKZ1800



ZKZ2600

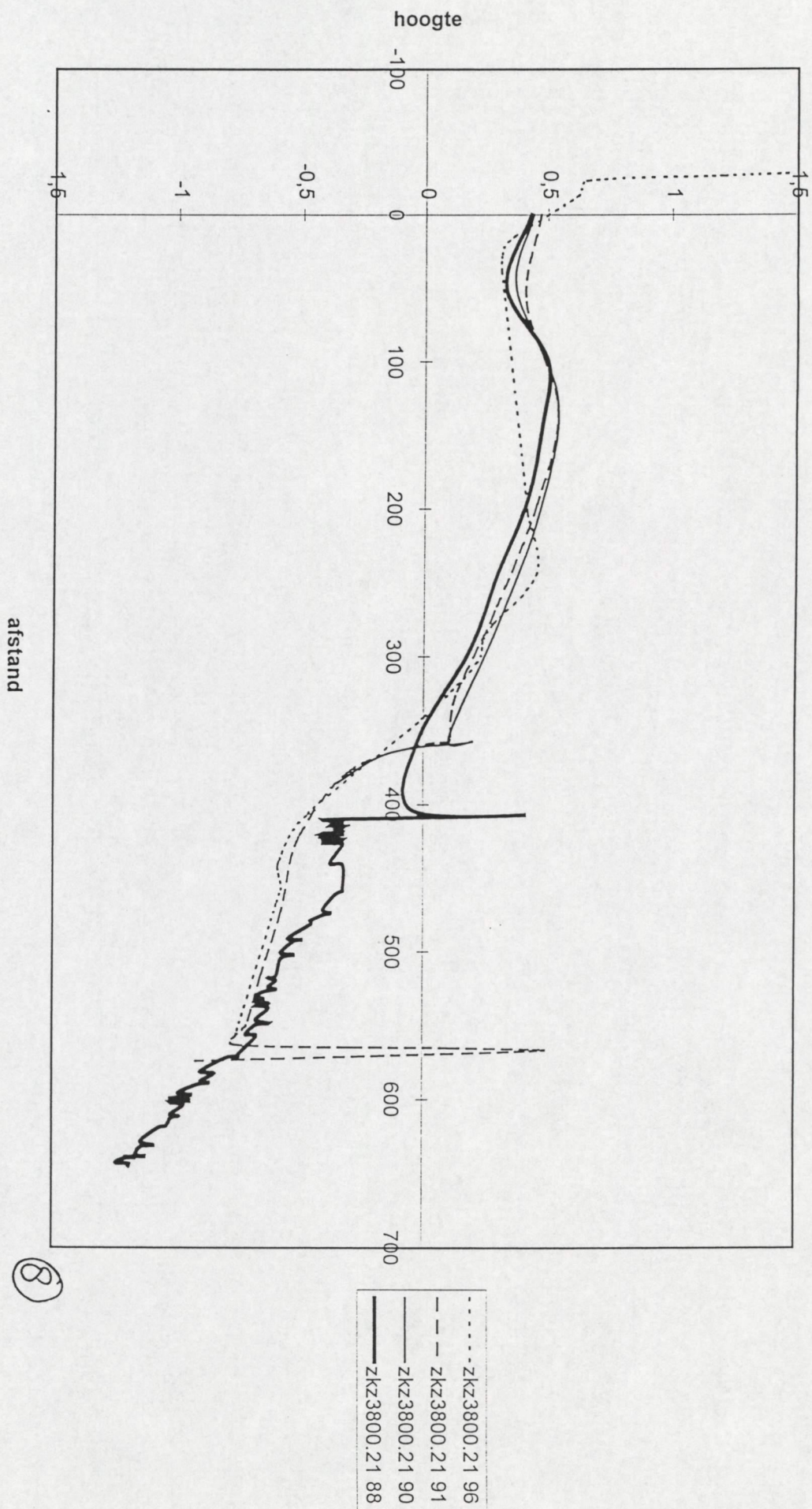


(7)

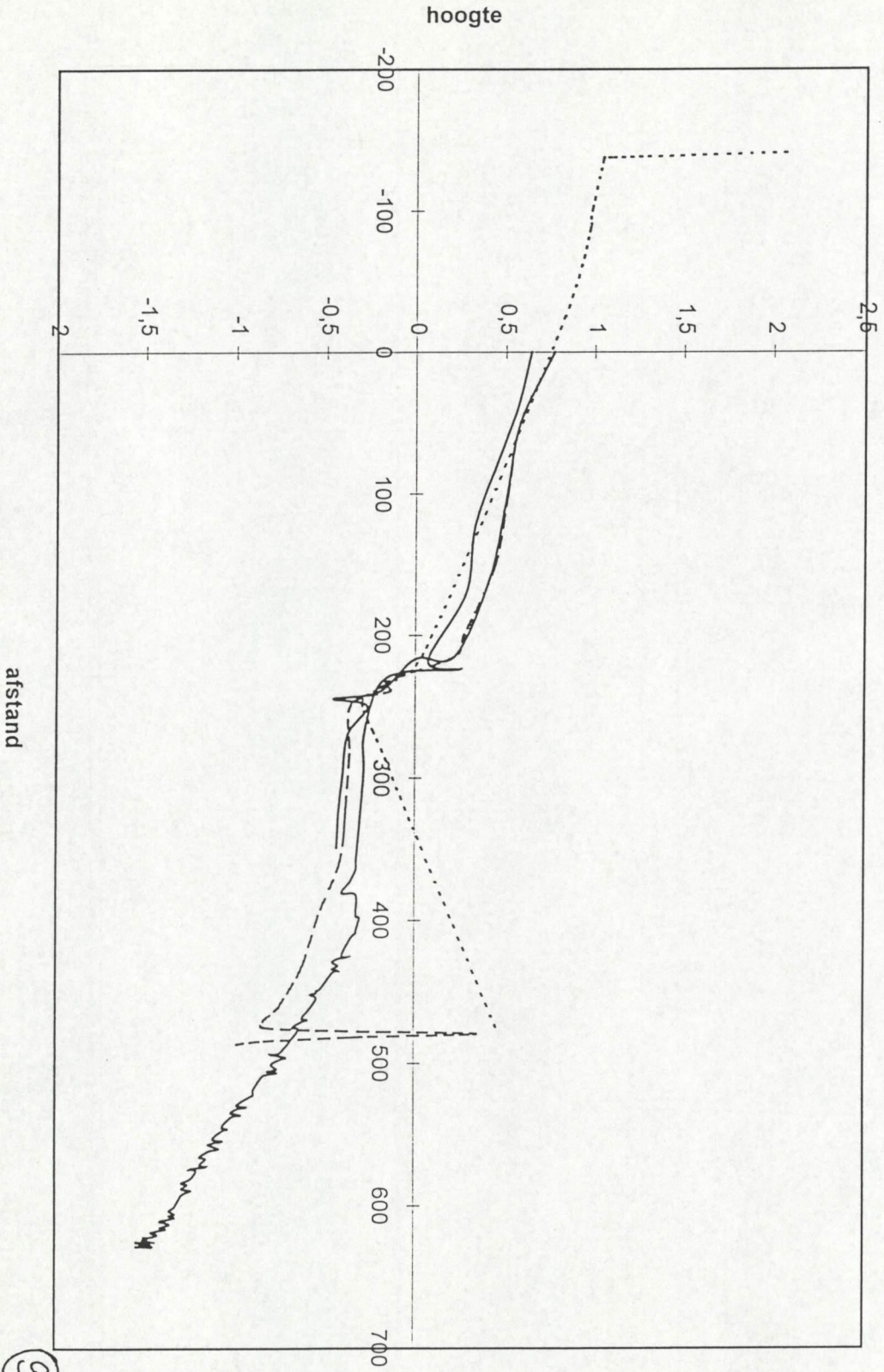
afstand

hoogte

ZKZ3800



ZKZ4200



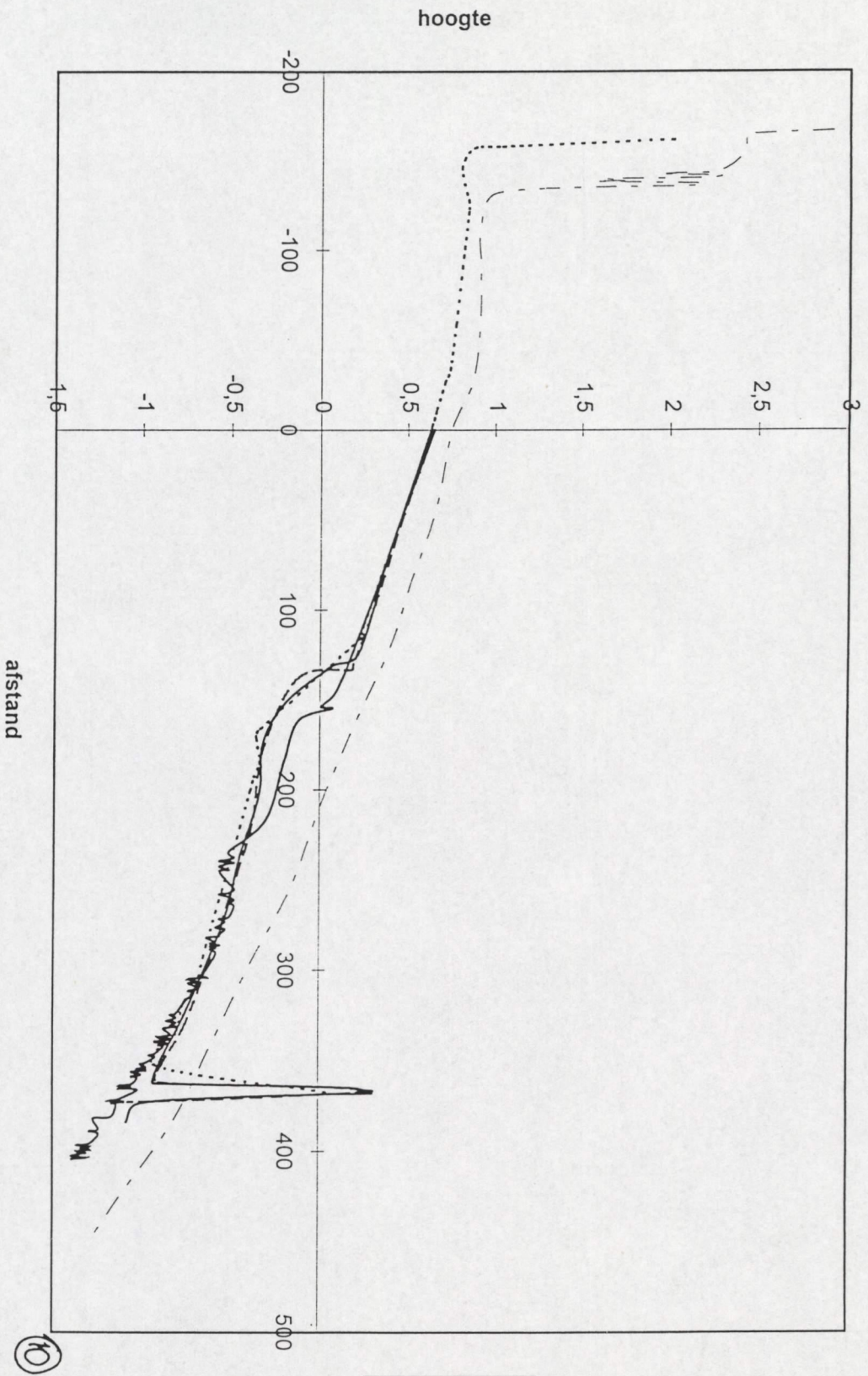
9

- ZKZ4200.21 96
- ZKZ4200.21 91
- ZKZ4200.21 90
- ZKZ4200.21 88

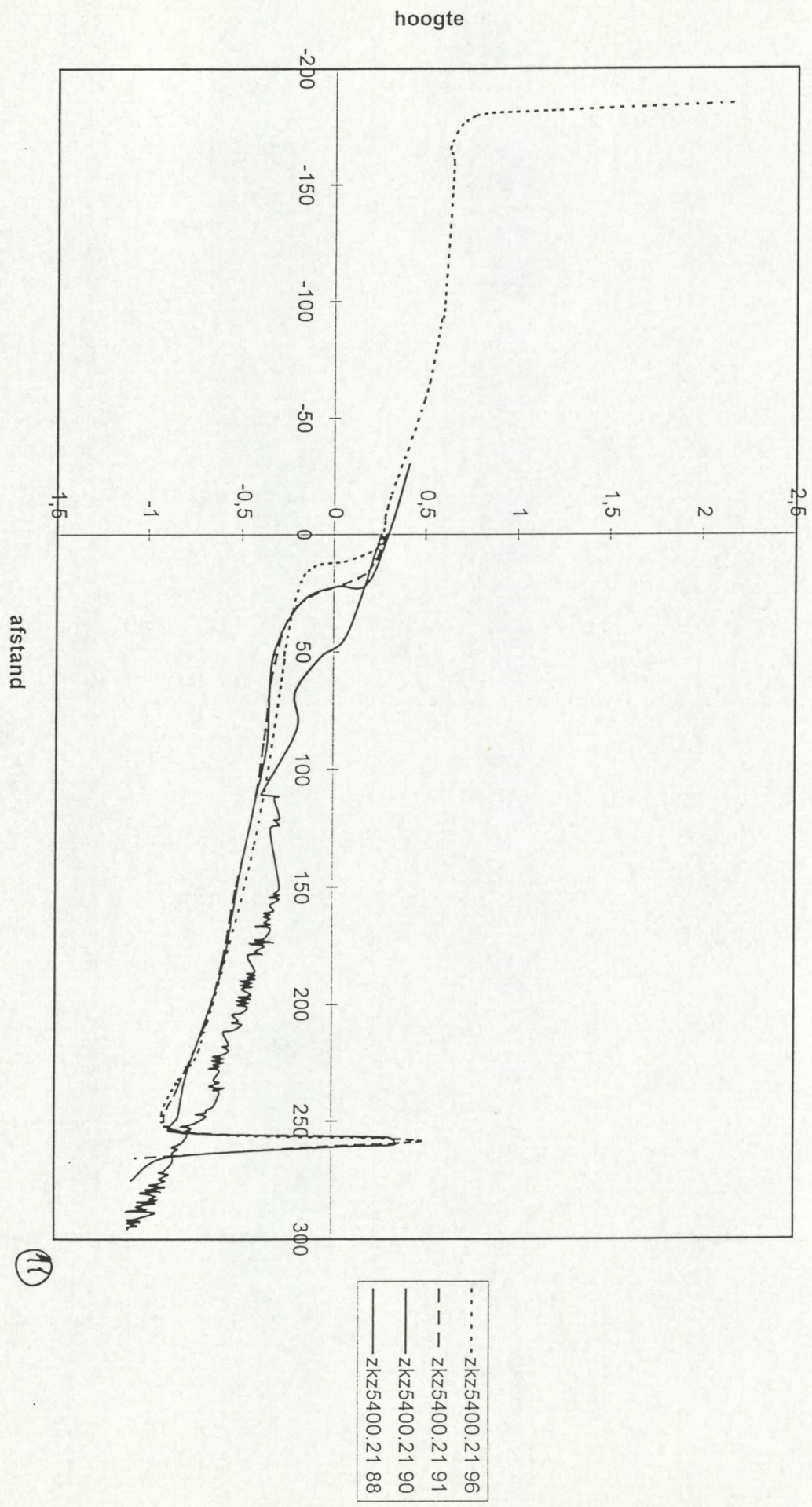
afstand

hoogte

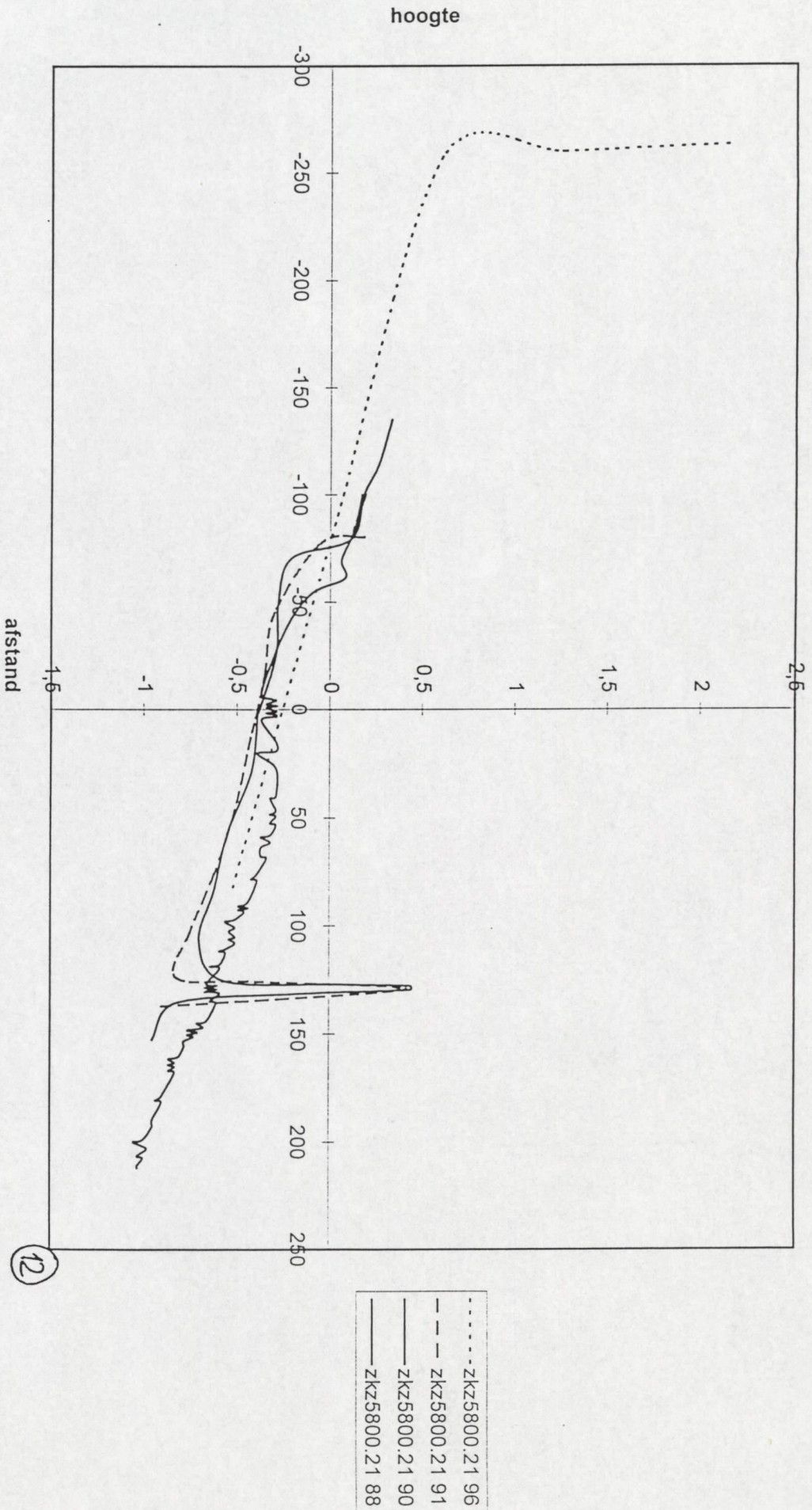
ZKZ5000



ZKZ5400

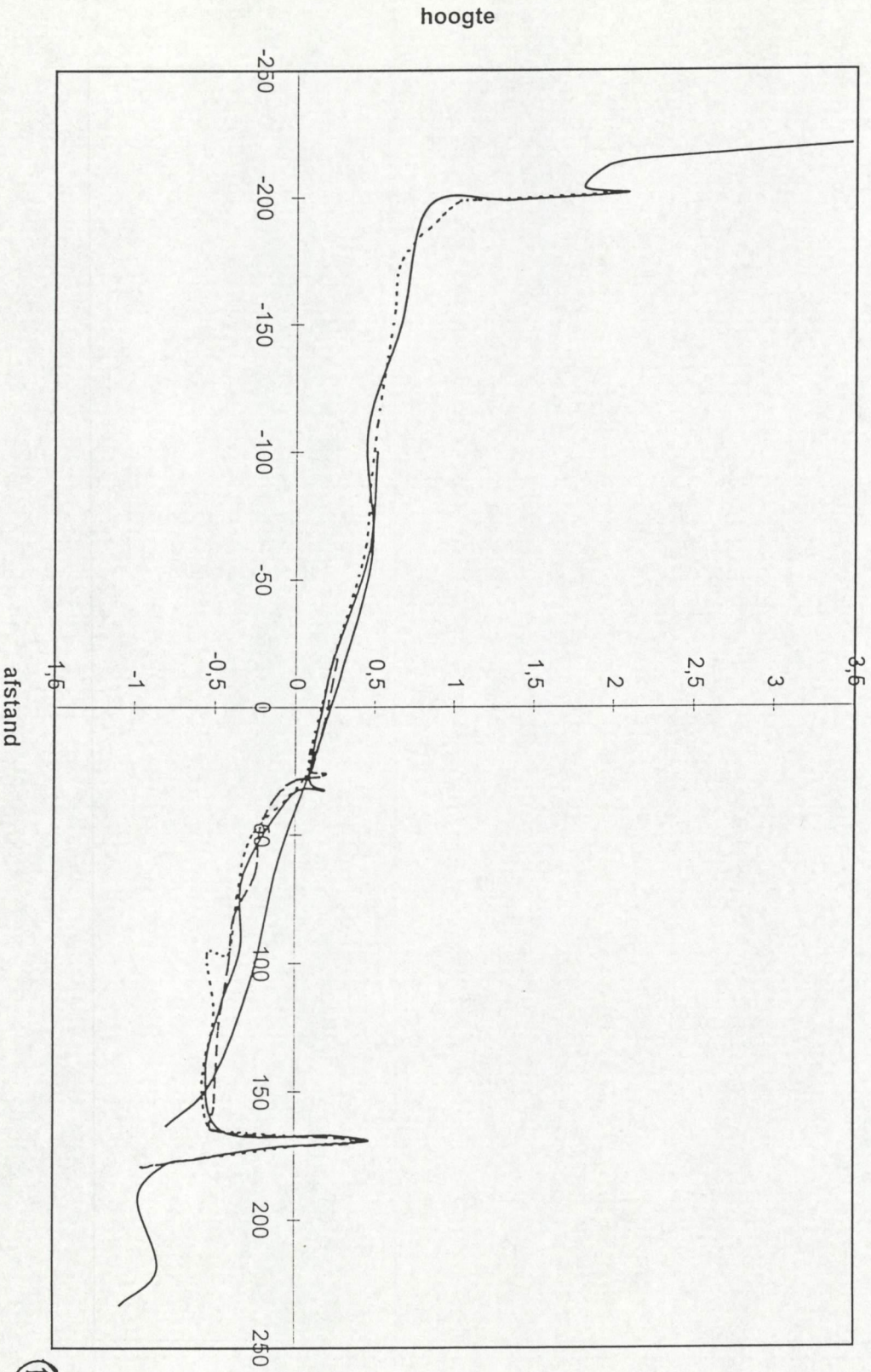


ZKZ5800



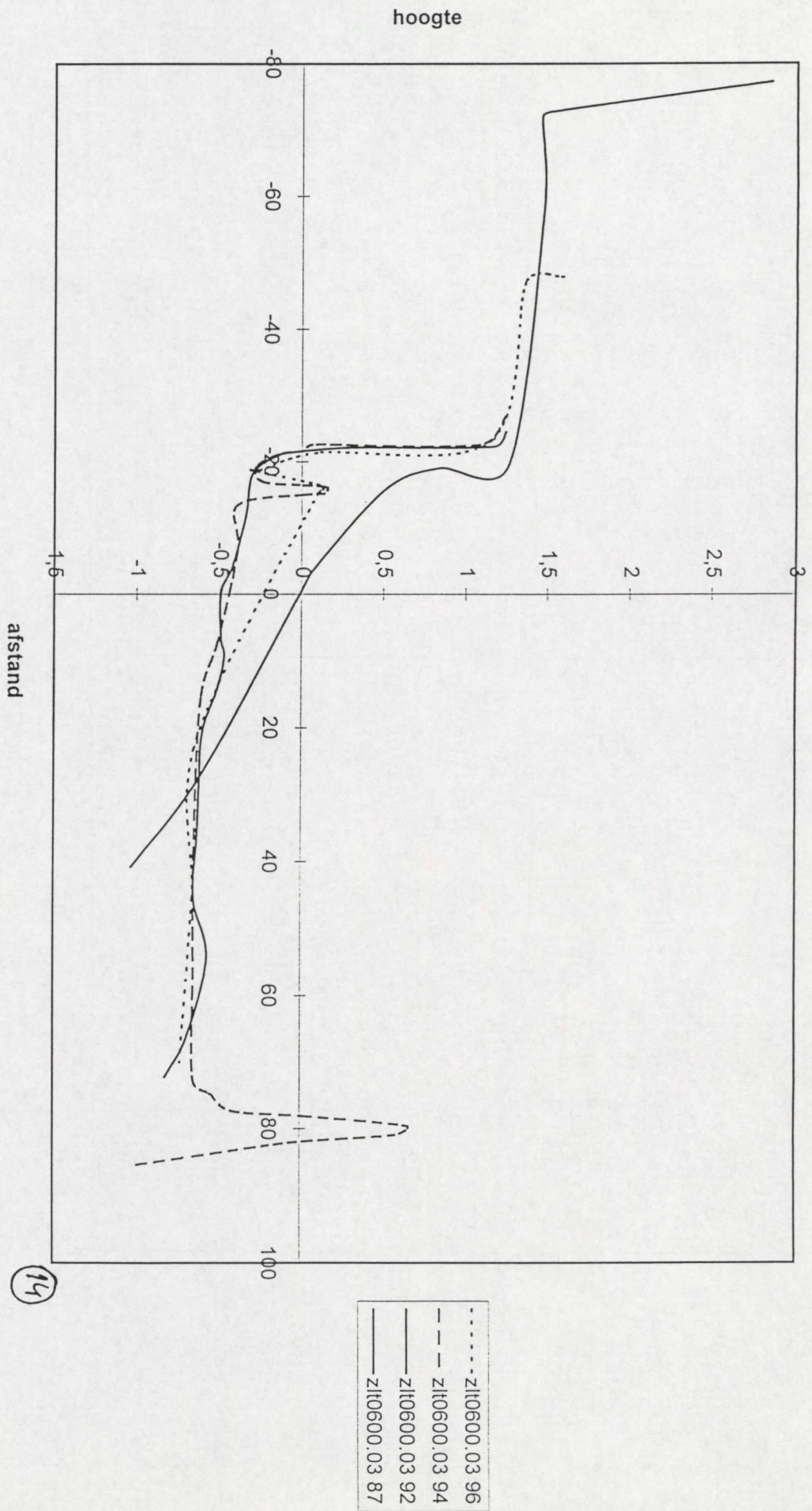
12

Zln0400



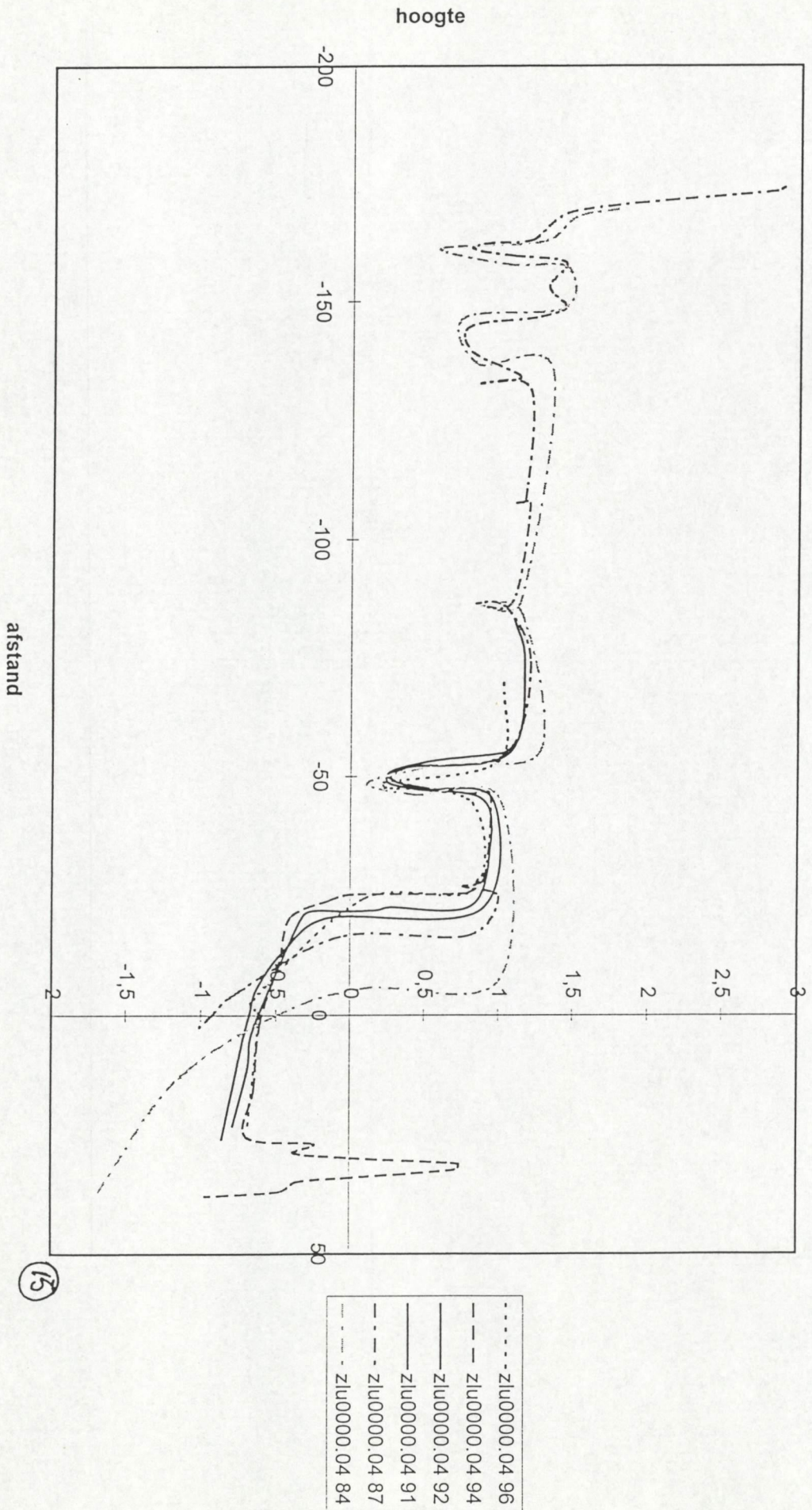
.....Zln0400.23 96
- - - -Zln0400.23 95
————Zln0400.23 90
————Zln0400.23 87

ZI10600



14

Zlu00000

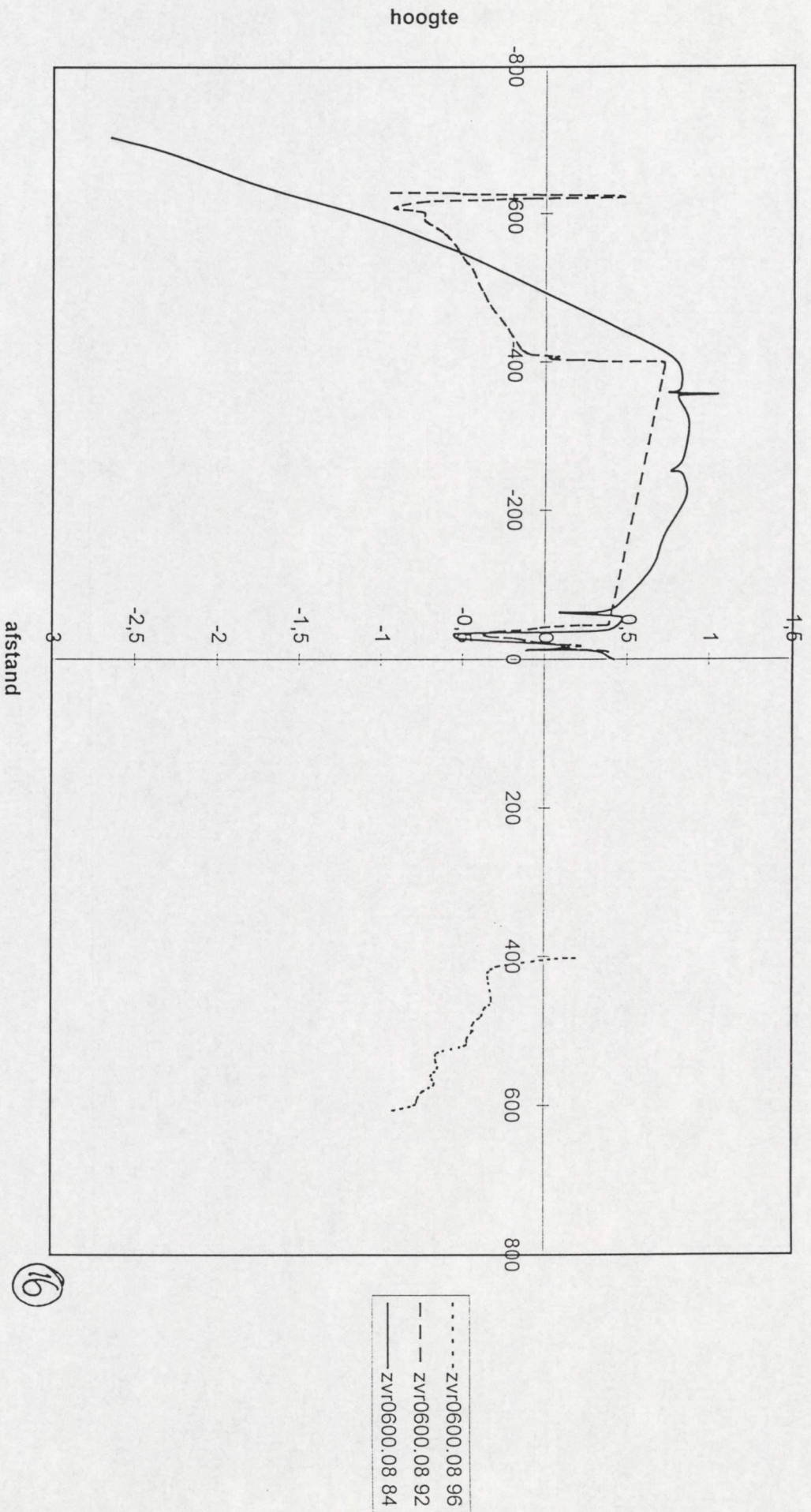


15

afstand

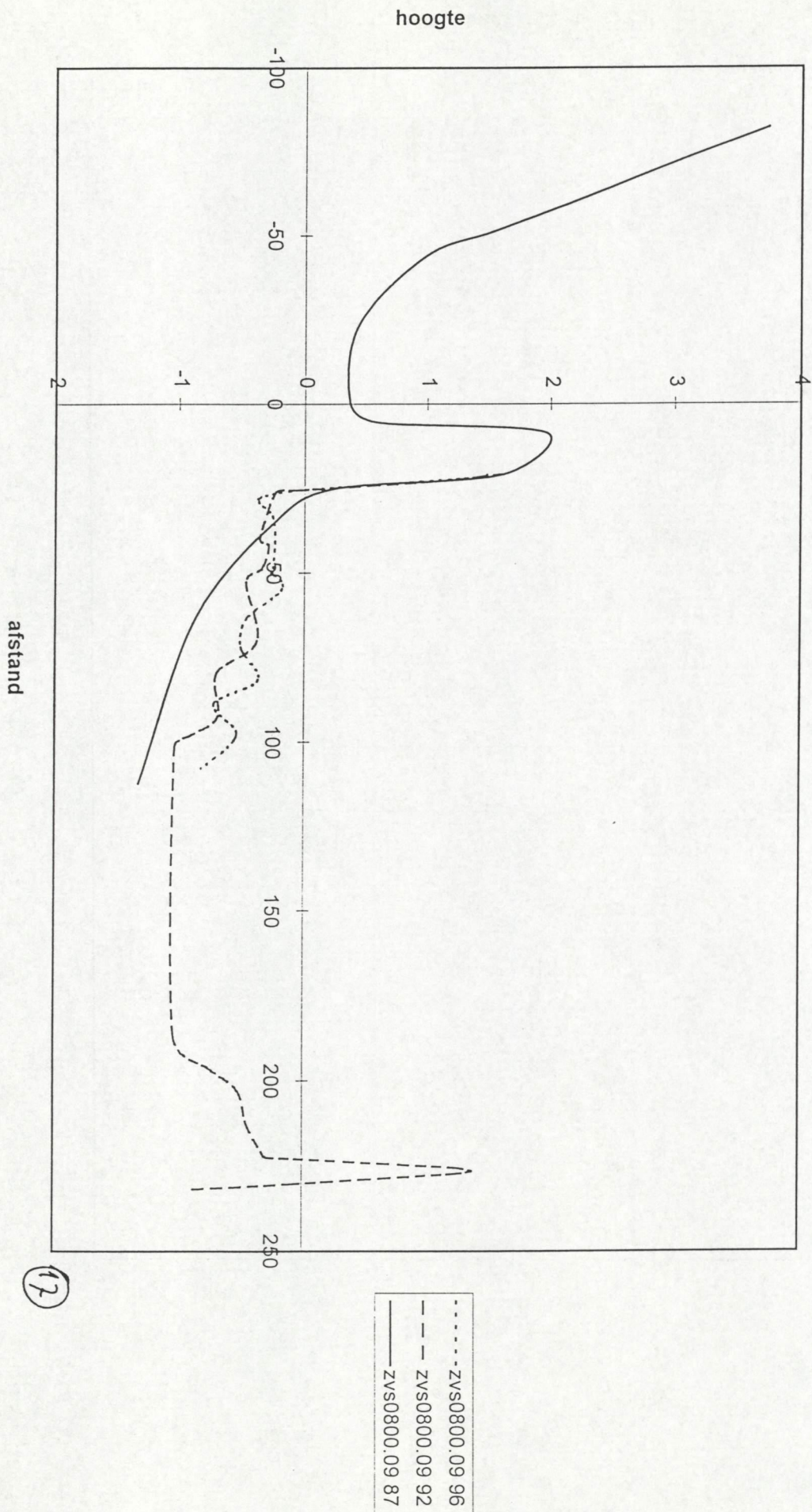
hoogte

ZVR0600

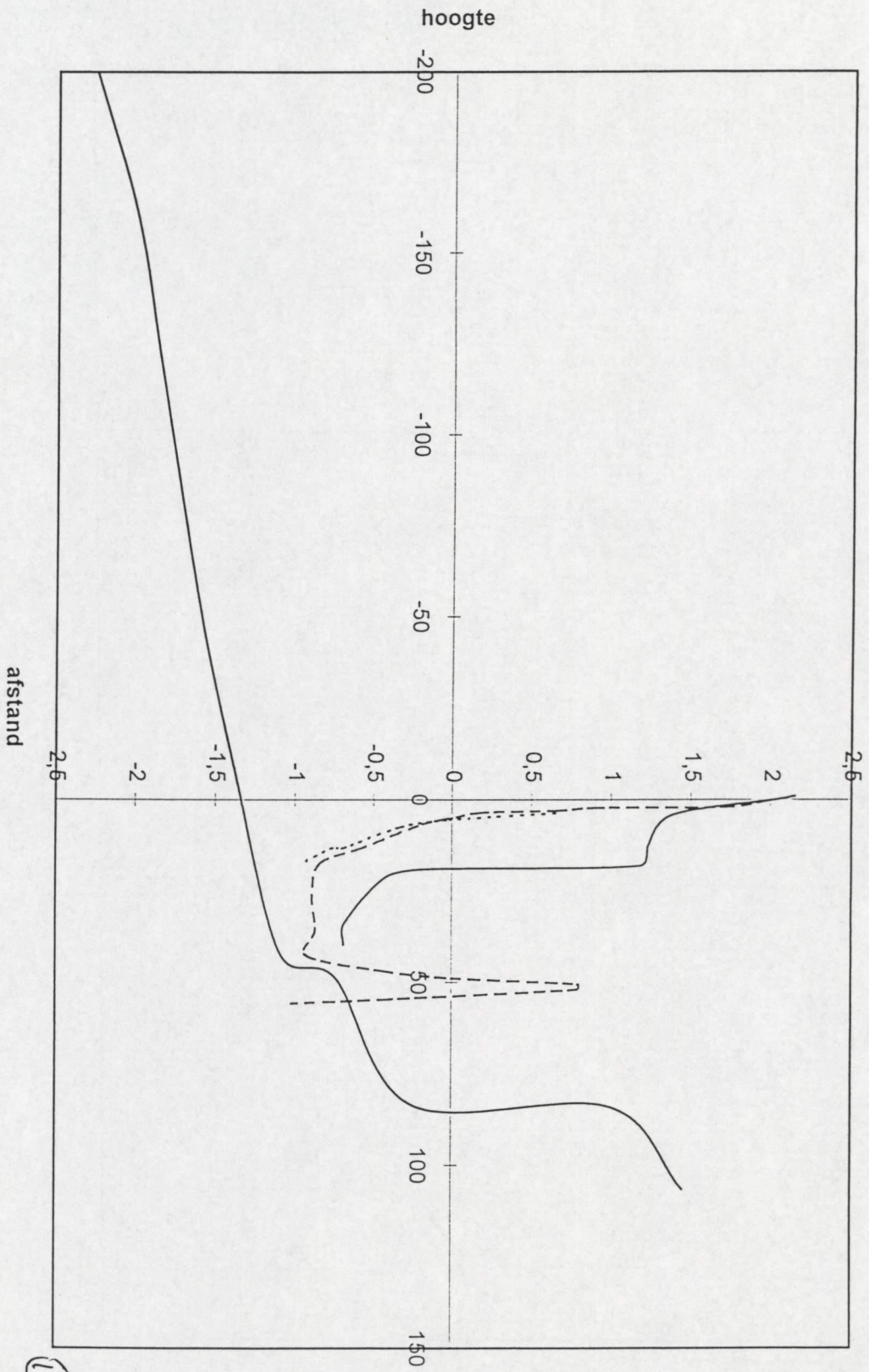


16

ZVS0800

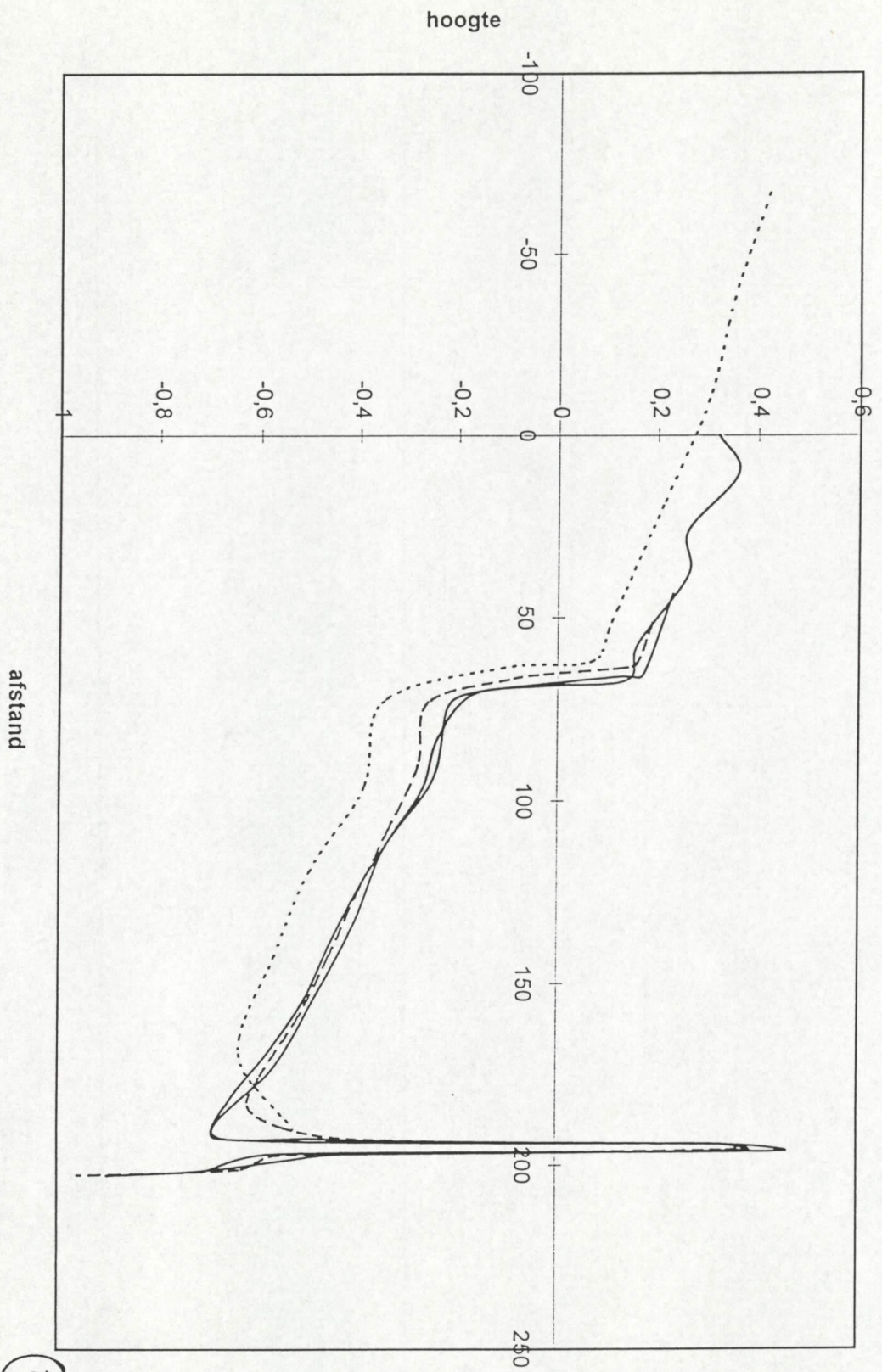


ZIV1200



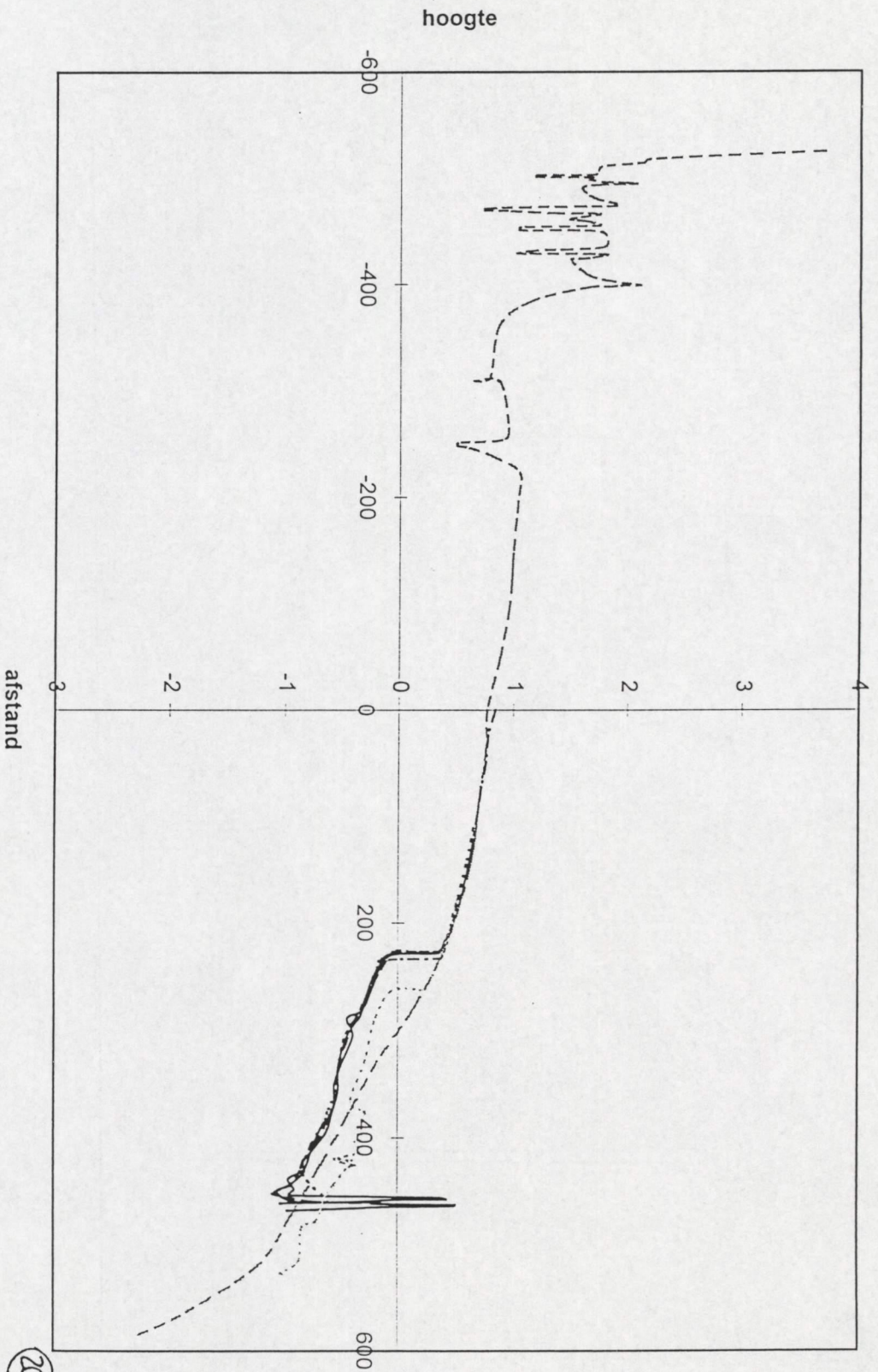
.....	ZIV1200.10 96
-----	ZIV1200.10 94
—————	ZIV1200.10 87
—————	ZIV1200.10 84

18



.....	ZV/10600.11 96
-----	ZV/10600.11 94
—————	ZV/10600.11 92
—————	ZV/10600.11 91

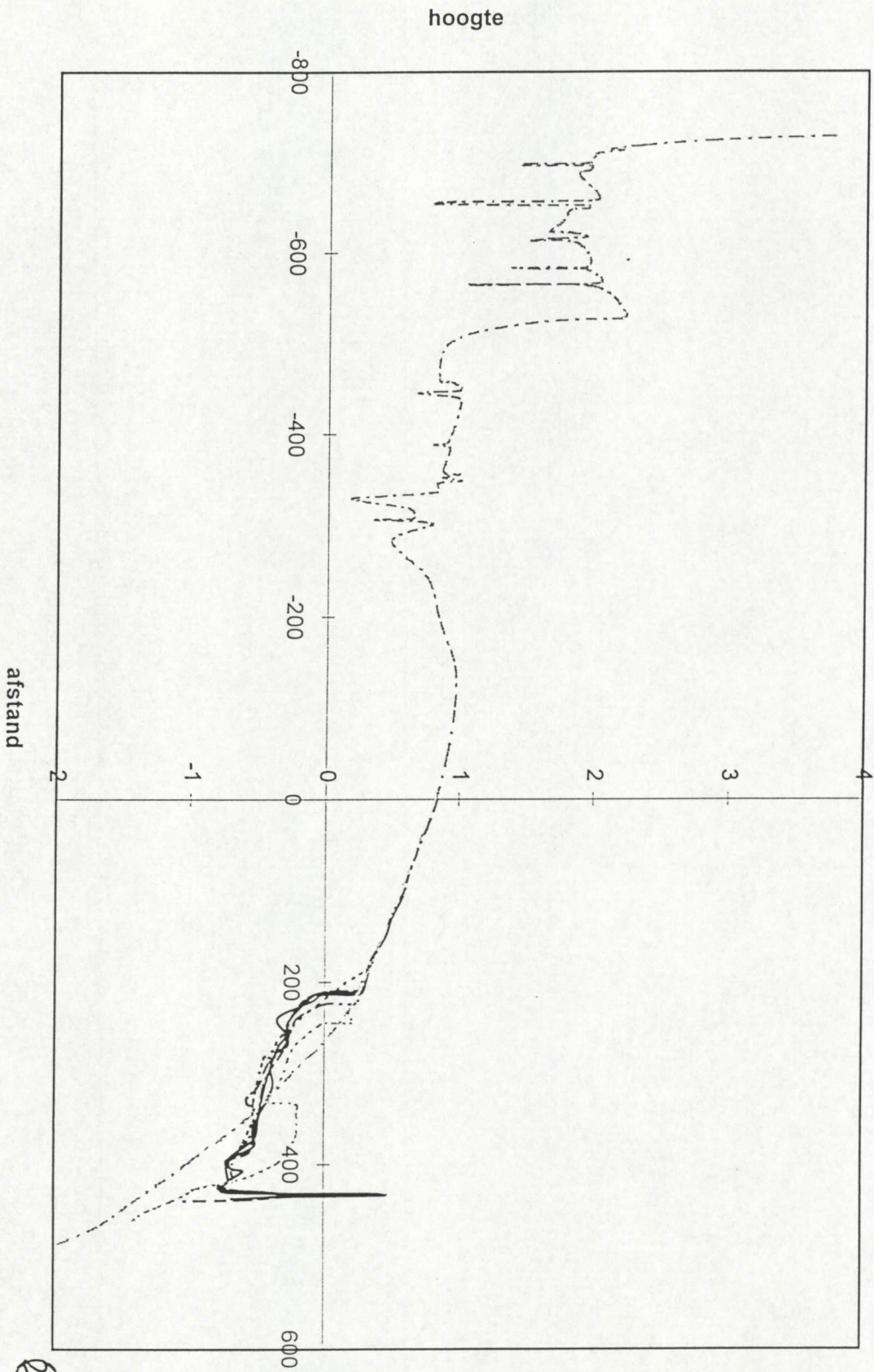
zlm1600



-zlm1600.12 96
- zlm1600.12 94
- zlm1600.12 92
- zlm1600.12 91
- zlm1600.12 89
-zlm1600.12 88
- 79979,75 87

20

zlm2800



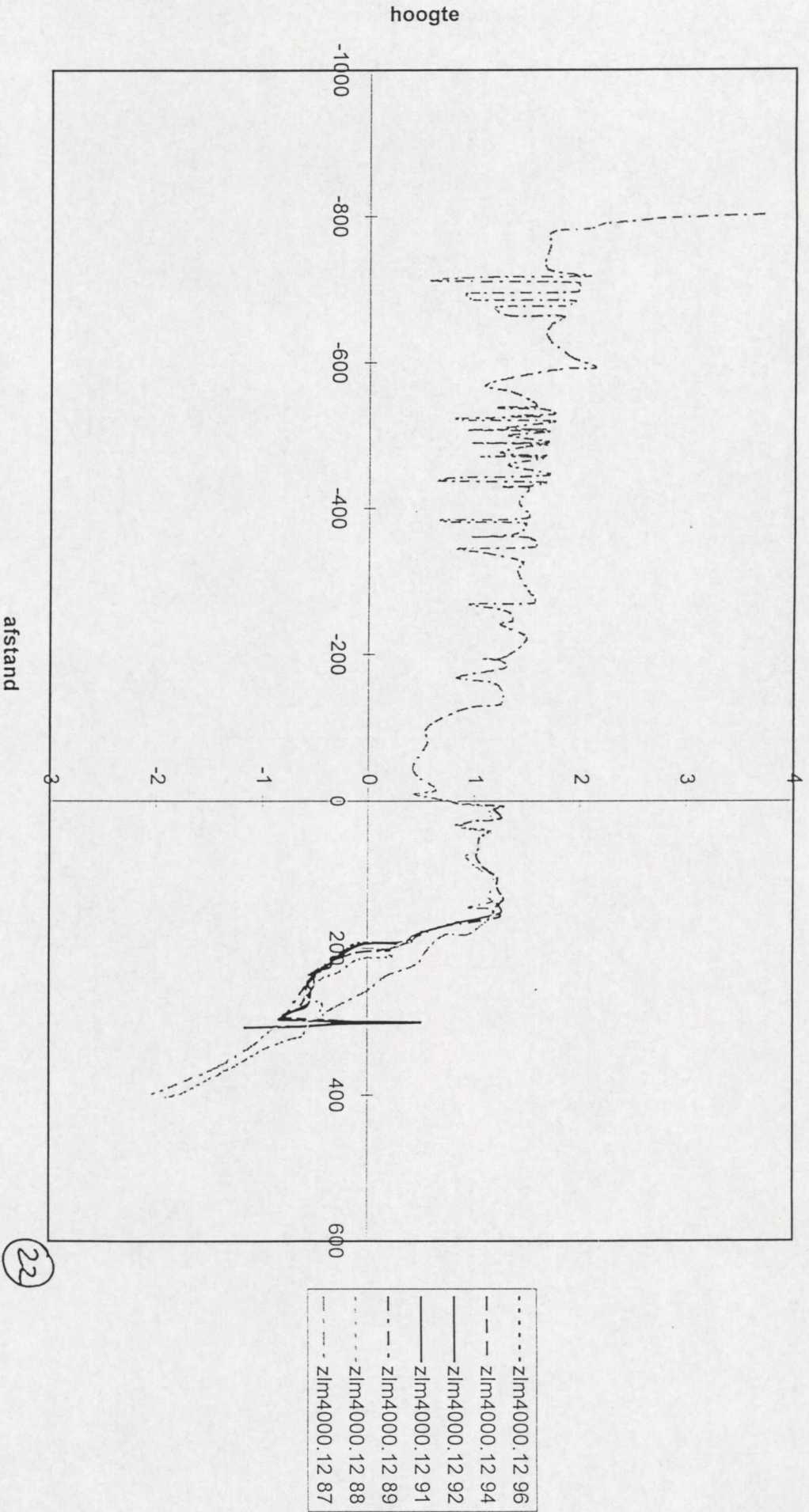
.....	zlm2800.12 96
-----	zlm2800.12 94
————	zlm2800.12 92
————	zlm2800.12 91
-----	zlm2800.12 89
.....	zlm2800.12 88
-----	zlm2800.12 87

21

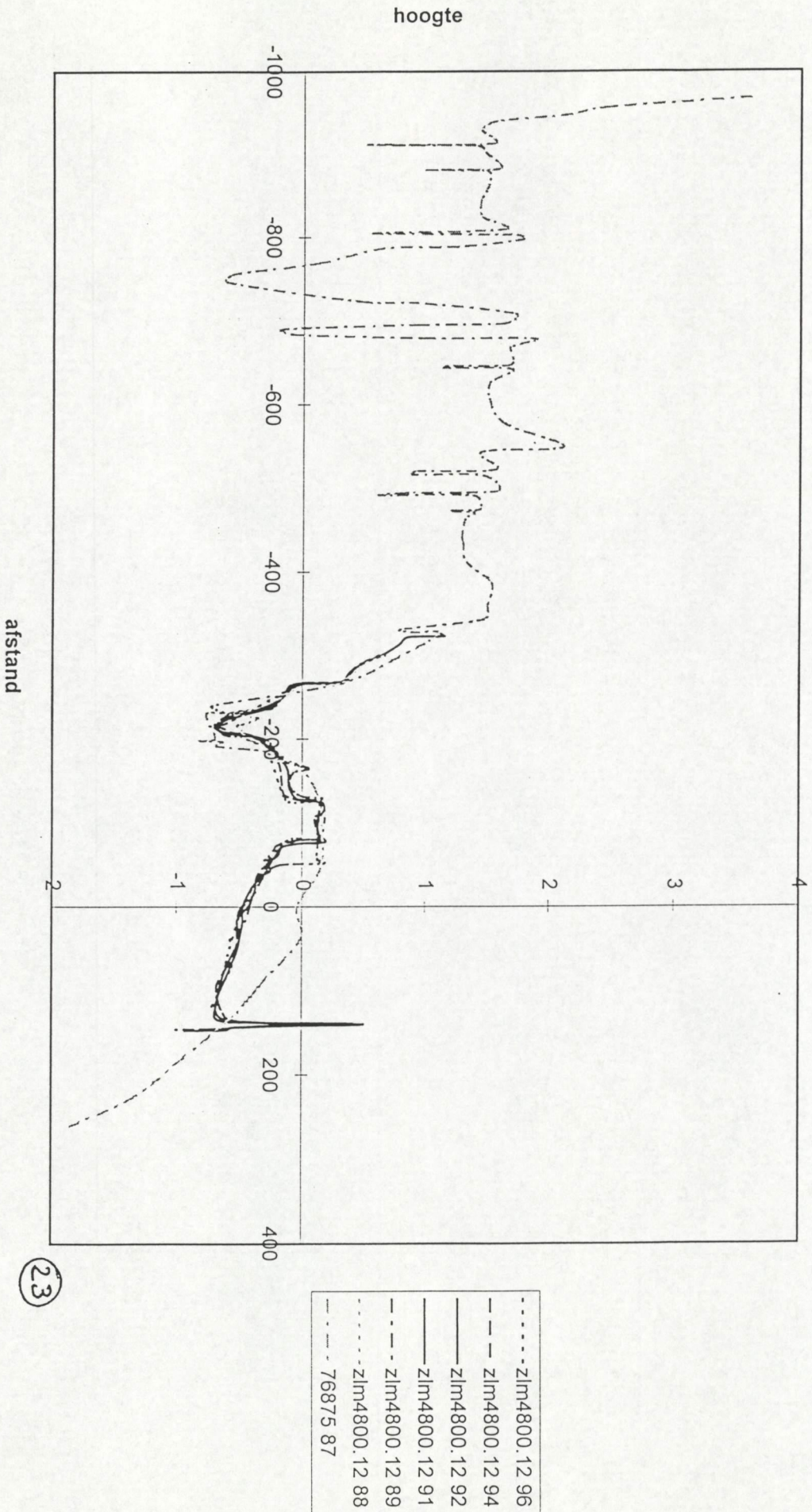
afstand

hoogte

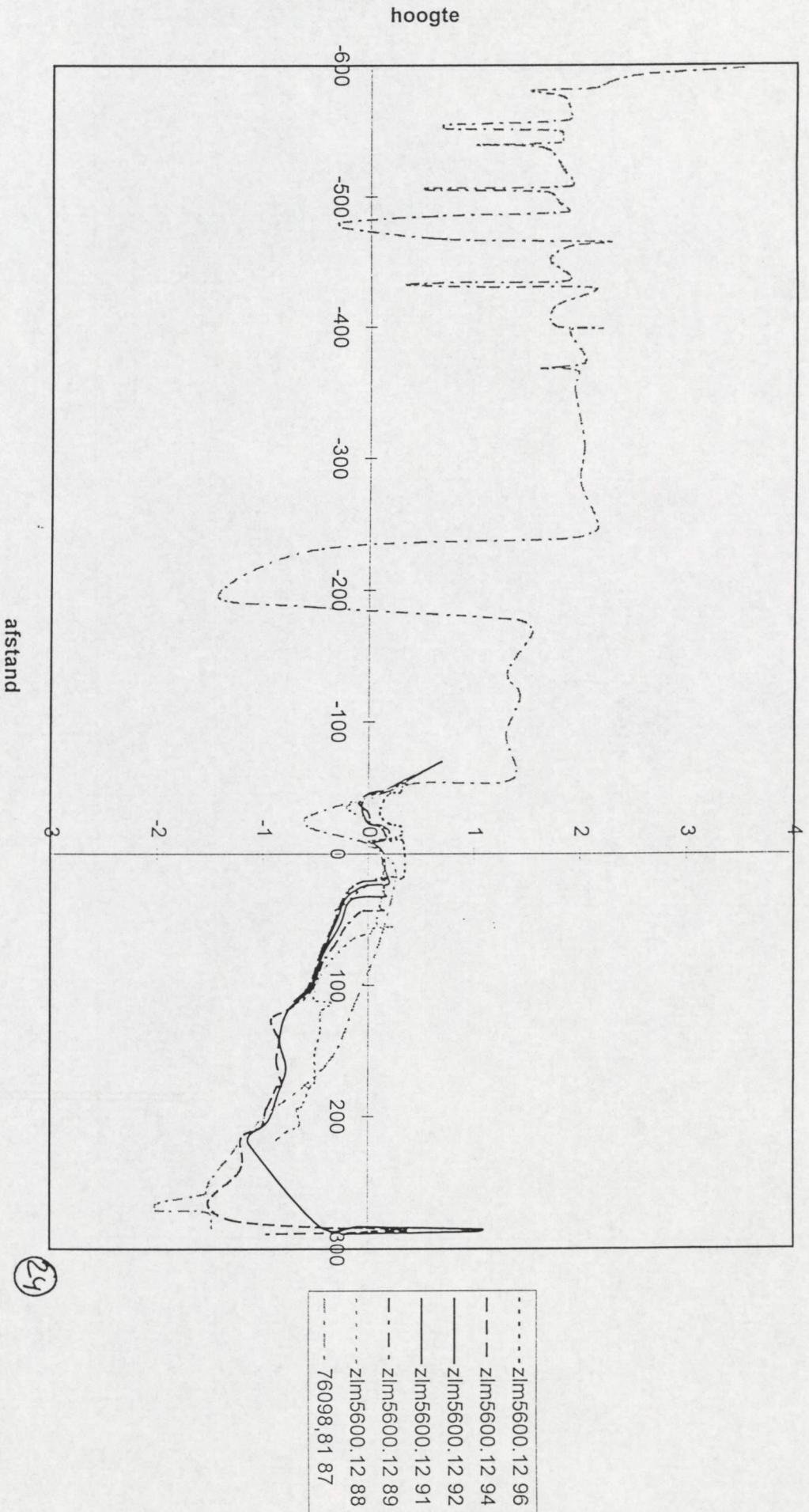
zlm4000



zlm4800



zlm5600



29