

Opdrachtgever:
Dienst Weg- en Waterbouwkunde namens
Werkgroep C van de Technische Adviescommissie
voor de Waterkeringen

Bresgroei

Deel III: 2DH/3D ontwikkeling initiële bres

Verslag modelonderzoek Scheldebak en
nadere formulering breedtegroei-module

Verslag onderzoek

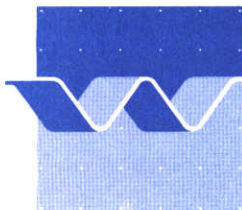
Juni 1996

Bresgroei

Deel III: 2DH/3D ontwikkeling initiële bres

Verslag modelonderzoek Scheldebak en
nadere formulering breedtegroei-module

H.J. Steetzel



| | | | |
|--|-------------------------------|--|--|
| 1. Rapport nr. H1242 - Deel III | 2. Serie nr. TAW-C | 3. Ontvanger catalogus nummer | |
| 4. Titel en sub-titel Bresgroei Deel III: 2DH/3D-ontwikkeling initiële bres Verslag modelonderzoek en andere formulering breedtegroeimodule | | 5. Datum rapport juni 1996 | 6. Kode uitvoerende organisatie H1242 |
| | | 8. Nr. rapport uitvoerende organisatie H1242 - Deel III | |
| 7. Schrijvers dr. ir. H.J. Steetzel | | 10. Projektnaam TAW-C-DIMCRIT | |
| 9. Naam en adres opdrachtnemer Waterloopkundig Laboratorium Postbus 152 8300 AD Emmeloord | | 11. Kontraktnummer DWW-672 | |
| | | 13. Type rapport Deelrapport uit serie | |
| 12. Naam en adres opdrachtgever Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044, 2600 GA Delft | | 14. Kode andere opdrachtgever | |
| | | 15. Opmerkingen WL-projeleider : H.J. Steetzel DWW-projeleider: A.W. Kraak/A.P. de Looff | |
| 16. Referaat Dit rapport gaat in op de resultaten van een modelonderzoek gericht op de breedtegroei van een initiële bres in een zanddam en de formulering van een conceptueel model voor breedtegroei. | | | |
| 17. Trefwoorden Bresgroei, fysisch onderzoek | | 18. Distributie systeem | |
| 19. Classificatie Vrij toegankelijk | 20. Classificatie deze pagina | 21. Aantal blz. | 22. Prijs |

Inhoud

Lijst van figuren

| | blz. |
|---|------|
| 1 Inleiding | 1 |
| 1.1 Achtergrond en doel | 1 |
| 1.2 Aanpak | 1 |
| 1.3 Opdracht | 1 |
| 1.4 Overzicht rapportage/onderzoek | 2 |
| 1.5 Opzet voorliggende rapport | 2 |
| 2 Opzet modelonderzoek | 5 |
| 2.1 Inleiding | 5 |
| 2.1.1 Algemeen | 5 |
| 2.1.2 Aansluiting onderzoek Scheldegoet | 5 |
| 2.1.3 Fasering | 5 |
| 2.2 Onderzochte aspecten | 5 |
| 2.2.1 Inleiding | 5 |
| 2.2.2 Overzicht | 6 |
| 2.3 Overzicht proeven | 6 |
| 2.3.1 Inleiding | 6 |
| 2.3.2 Stroomproef (T0) | 6 |
| 2.3.3 Geïsoleerde breedte-groei (T1 t/m T7) | 6 |
| 2.3.4 Gecombineerde breedte/diepte-groei (T8 en T9) | 7 |
| 3 Detaillering proevenprogramma | 9 |
| 3.1 Inleiding en uitgangspunten | 99 |
| 3.2 Inrichting van de faciliteit | 9 |
| 3.2.1 Scheldebak | 9 |
| 3.2.2 Lokaal assenstelsel | 9 |
| 3.2.3 Positie zanddam/drempel-constructie | 9 |
| 3.2.4 Drempelconstructie | 10 |
| 3.2.5 Positie initiële bres | 10 |
| 3.2.6 Overzicht deel-bassins | 11 |
| 3.3 Overzicht dwarsprofielen | 11 |
| 3.3.1 Basisprofiel | 11 |
| 3.3.2 Effect kruinhoogte | 12 |
| 3.3.3 Effect kruinbreedte (basisbreedte) | 12 |
| 3.3.4 Effect profielhelling | 12 |
| 3.3.5 Aanpassing t.b.v. effect drempelniveau | 12 |
| 3.3.6 Effect golfaanval | 12 |
| 3.3.7 Vormgeving initiële bres | 12 |

Inhoud (vervolg)

| | | |
|----------|--|-----------|
| | | blz. |
| 3.4 | Circulatie systeem | 13 |
| 3.4.1 | Algemeen | 13 |
| 3.4.2 | Uitwisselingsdebieten | 13 |
| 3.4.3 | Waterstanden | 14 |
| 3.5 | Te verrichten metingen | 16 |
| 3.5.1 | Overzicht | 16 |
| 3.5.2 | Waterstanden | 16 |
| 3.5.3 | Snelheden | 16 |
| 3.5.4 | Debiet | 17 |
| 3.5.5 | Profielontwikkeling in dwarsrichting | 18 |
| 3.5.6 | Profielontwikkeling in langsrichting | 18 |
| 3.5.7 | Ondersteunende metingen | 18 |
| 3.6 | Werkwijze per proef | 18 |
| 3.6.1 | Algemeen | 18 |
| 3.6.2 | Proef T0 | 18 |
| 3.6.3 | Proeven T1 t/m T8 | 19 |
| 3.6.4 | Proef T9 | 19 |
| 3.7 | Verkennde berekeningen | 19 |
| 3.7.1 | Inleiding | 19 |
| 3.7.2 | Geometrische beschrijving bresgroei | 20 |
| 3.7.3 | Morfologische beschrijving bresgroei | 21 |
| 3.7.4 | Waterstanden, debieten en snelheden | 21 |
| 3.7.5 | Resultaten | 22 |
| 4 | Beschrijving resultaten | 23 |
| 4.1 | Inleiding | 23 |
| 4.2 | Korte toelichting per proef | 23 |
| 4.2.1 | Proef T0 | 23 |
| 4.2.2 | Proef T1 t/m T8 | 23 |
| 4.2.3 | Proef T9 | 23 |
| 4.3 | Overzicht karakteristieke tijdsfasen | 24 |
| 4.3.1 | Bemonsteringsduur | 24 |
| 4.3.2 | Diverse afgeleide tijdstippen | 24 |
| 4.4 | Bresontwikkeling | 25 |
| 4.4.1 | Inleiding | 25 |
| 4.4.2 | Resultaten bresbreedteontwikkeling | 25 |
| 4.4.3 | Ontwikkeling kuilvorm | 26 |
| 4.5 | Waterstanden | 26 |
| 4.5.1 | Inleiding | 26 |
| 4.5.2 | Validatie individuele signalen | 26 |
| 4.5.3 | Resultaten | 26 |

Inhoud (vervolg)

| | blz. | |
|----------|---|-----------|
| 4.6 | Snelheden | 27 |
| 4.6.1 | Inleiding | 27 |
| 4.6.2 | Validatie individuele signalen | 27 |
| 4.6.3 | Resultaten meetsignalen | 27 |
| 4.6.4 | Resultaten video-analyse | 27 |
| 4.7 | Ondersteunende metingen | 28 |
| 4.7.1 | Pakkingsdichtheid | 28 |
| 4.7.2 | Korrel diameter | 28 |
| 4.7.3 | Watertemperatuur | 28 |
| 5 | Analyse meetresultaten | 29 |
| 5.1 | Inleiding | 29 |
| 5.2 | Ontwikkeling bresbreedte | 29 |
| 5.2.1 | Algemeen | 29 |
| 5.2.2 | Effect kruinhoogte | 29 |
| 5.2.3 | Effect kruinbreedte | 29 |
| 5.2.4 | Effect helling voorland | 29 |
| 5.2.5 | Effect golfaanval | 29 |
| 5.2.6 | Effect drempelniveau | 30 |
| 5.2.7 | Conclusies | 30 |
| 5.3 | Ontwikkeling bresgroeisnelheid | 30 |
| 5.3.1 | Algemeen | 30 |
| 5.3.2 | Effect kruinhoogte | 31 |
| 5.3.3 | Effect kruinbreedte | 31 |
| 5.3.4 | Effect helling voorland | 31 |
| 5.3.5 | Effect golfaanval | 31 |
| 5.3.6 | Effect drempelniveau | 31 |
| 5.3.7 | Conclusies | 31 |
| 5.4 | Waterbeweging in de bres | 32 |
| 5.4.1 | Algemeen | 32 |
| 5.4.2 | Totale bresdebiet | 32 |
| 5.4.3 | Eenheidsdebiet | 32 |
| 5.4.4 | Stroomsnelheden | 33 |
| 5.4.5 | Conclusies | 33 |
| 5.5 | Relatie bresgroei - waterbeweging | 33 |
| 5.5.1 | Algemeen | 33 |
| 5.5.2 | Effect kruinhoogte | 33 |
| 5.5.3 | Effect kruinbreedte | 34 |
| 5.5.4 | Effect helling voorland | 34 |
| 5.5.5 | Effect golfaanval | 34 |
| 5.5.6 | Effect drempelniveau | 34 |
| 5.5.7 | Conclusies | 34 |

Inhoud (vervolg)

| | blz. |
|--|-----------|
| 5.6 Volumetrische relaties | 34 |
| 5.6.1 Algemeen | 34 |
| 5.6.2 Effect kruinhoogte | 34 |
| 5.6.3 Effect kruinbreedte | 35 |
| 5.6.4 Effect helling voorland | 35 |
| 5.6.5 Effect golfaanval | 35 |
| 5.6.6 Effect drempelniveau | 35 |
| 5.6.7 Conclusies | 35 |
| 6 Modellerings breedtegroei | 37 |
| 6.1 Inleiding | 37 |
| 6.2 Uitgangspunten | 37 |
| 6.3 Basisformulering | 37 |
| 6.4 Conclusies | 39 |
| 7 Conclusies en aanbevelingen | 41 |
| 7.1 Conclusies | 41 |
| 7.2 Aanbevelingen | 41 |

Literatuur

Figuren

Lijst van figuren

- 3.2.1 Overzicht inrichting Scheldebak t.b.v. 2DH/3D-onderzoek bresgroei
- 3.3.1 Dwarsdoorsnede drempel/basisprofiel; Proef T4 / schets overige doorsneden
- 3.3.2 Langsaanzicht drempel/basisprofiel; Proeven T2/4/7/8/
- 3.3.3 Overzicht alle dwarsprofielen; Proeven T1 t/m T9
- 3.4.1 Schematische weergave circulatie
- 3.4.2 Relatie breedte - overhoogte voor gegeven debiet
- 3.5.1 Bovenaanzicht meetsectie; Positie instrumenten en meetraaien
- 3.7.1 Ontwikkeling waterstand en debiet; Resultaten bij opgelegde bresgroei
- 3.7.2 Ontwikkeling waterstand en debiet; Resultaten bij 'vrije' bresgroei

- 4.4.1 Ontwikkeling bresbreedte; Overzicht van alle proeven
- 4.4.2 Bovenaanzicht ontgrondingskuil; Berekende iso-lijnen
- 4.5.1 Overzicht ontwikkeling waterstanden; GHM1/6/7 en GHM8; Proef T1
- 4.6.1 Overzicht ontwikkeling snelheden; Buitenwater en afstr. kanaal; Proef T1
- 4.6.2 Ontwikkeling snelheden in bres; Resultaat analyse video-opnamen

- 5.2.1 Ontwikkeling bresbreedte; Overzicht per onderzoeksaspect
- 5.3.1 Ontwikkeling verbredingssnelheid; Overzicht voor alle proeven
- 5.3.2 Ontwikkeling verbredingssnelheid; Overzicht per onderzoeksaspect
- 5.4.1 Resultaat waterbeweging in afstroomkanaal, Verloop waterstand, snelheid en berekend debiet; Proef T2
- 5.4.2 Ontwikkeling snelheden in bres; Overzicht voor alle proeven
- 5.5.1 Relatie verbredingssnelheid; Overzicht voor alle proeven
- 5.5.2 Relaties verbredingssnelheid; Overzicht per onderzoeksaspect
- 5.6.1 Relatie verbredingssnelheid; Overzicht voor alle proeven
- 5.6.2 Relaties verbredingssnelheid; Overzicht per onderzoeksaspect
- 5.6.3 Relatie verbredingssnelheid; Overzicht voor alle proeven
- 5.6.4 Relatie verbredingssnelheid; Detail voor relevante proeven

- 6.3.1 Snelheidsafhankelijkheid C_b -waarde; Overzicht voor alle proeven
- 6.3.2 Tijdsontwikkeling C_b -waarde; Overzicht voor alle proeven
- 6.3.3 Tijdsontwikkeling X_{i_1} -waarde; Effect additionele golfaanval
- 6.3.4 Kwantificering V_c en X_{i_2} -waarde; Overzicht voor alle proeven

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doel

Op termijn zal de veiligheid van waterkeringen moeten worden getoetst aan een maatschappelijk aanvaardbare risiconorm met betrekking tot de (gedeeltelijke) inundatie van het gebied binnen een dijkkring. Hiervoor dient een relatie te worden gelegd tussen het dwarsprofiel van de waterkering en de schadeverwachting. De schade is hierbij gekoppeld aan de mate van inundatie waarbij de laatste in sterke mate wordt bepaald door de groei van het stroomgat.

Het voorliggende onderzoek dient om de kennis omtrent deze stroomgatontwikkeling te vergroten om uiteindelijk, voor een gegeven bedreiging en waterkering, een methode voor de berekening van de ontwikkeling van dit inundatie-debiet te kunnen vaststellen.

1.2 Aanpak

De nagestreefde methode voor de vaststelling van inundatie en schadeverwachting zal (waarschijnlijk) bestaan uit een theoretisch model voor bresgroei en inundatie. Hiertoe wordt in eerste instantie een mathematisch model voor de bresgroei ontwikkeld. De resultaten van het fysisch modelonderzoek vormen de basis voor deze modelontwikkeling.

Dit modelonderzoek heeft hierbij tot doel het inzicht in het erosieproces en het sedimenttransport dat optreedt tijdens de bresvorming en -ontwikkeling te vergroten. Analyse van de (model-)resultaten vormt de basis voor de verdere ontwikkeling van het mathematische model.

Omdat bresgroei (en inundatie) in principe een uitermate complex 3-dimensionaal proces is, is in het uitgevoerde fysisch onderzoek in eerste instantie de situatie met alleen de volledige overstroming van een zandlichaam bekeken. De opzet en resultaten van deze studie zijn samengebracht in deelrapport II van deze studie. In het hier beschreven vervolgonderzoek (deel III) is met name de breedte-ontwikkeling van een initiële bres onderzocht.

1.3 Opdracht

Op verzoek van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) namens Werkgroep C ('Zandige Kusten') van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) heeft het Waterloopkundig Laboratorium een offerte uitgebracht met kenmerk HK3721/H1242/HJS/MA, dd. 15 mei 1992, inzake het genoemde vervolgonderzoek naar bresgroei. Middels brief WB/CX-923246, dd. 20 juli 1992, werd (onder verplichtingenummers 31.1136/31.1608.01 van het project TAWC*DIMCRIT) opdracht verleend voor de uitvoering van dit onderzoek.

In aanvulling op dit onderzoek werd verder een offerte uitgebracht met kenmerk HK5867/H1242/HJS/GD, dd. 16 augustus 1993, inzake een nadere uitwerking en analyse van de verkregen resultaten, waartoe middels brief WB-934483, dd. 12 oktober 1993, (onder verplichtingenummer 3100/15763) eveneens opdracht werd verleend. In aansluiting hierop werd via een tweetal wijzigingsovereenkomsten, te weten DWW-762A onder kenmerk WB-942141 d.d. 21 april 1994 en DWW-762B onder kenmerk A/CX-951433 d.d. 28 maart 1995, de einddatum van het project opgeschoven.

Het voorliggende rapport (deel III) beschrijft de opzet en resultaten van het 2DH/3D-modelonderzoek, alsmede de resultaten van de nadere analyse van de verkregen resultaten.

Het modelonderzoek zelf is uitgevoerd in de Scheldebak van het Waterloopkundig Laboratorium 'de Voorst', in de periode oktober/december 1992. Een interim-rapportage over de proefresultaten alsmede over de resultaten van de analyse vond broksgwijze plaats in de periode januari 1993 t/m oktober 1994. De definitieve afronding van het totale rapport vond plaats in het najaar van 1995.

Vanuit Werkgroep C werd het onderzoek begeleid door de BegeleidingsGroep BresGroei (BG)², waarin zitting hadden: Ir. W.Th.J.N.P. Bakker (DGW/RIKZ), dr.ir. J. van de Graaff (TUD), ir. A.W. Kraak (DWW) en ir. P.J. Visser (TUD).

Het fysisch onderzoek werd uitgevoerd door H. Westhuis en B. Beld en stond onder leiding van dr.ir. H.J. Steetzel, die tevens verantwoordelijk is voor deze verslaggeving.

1.4 Overzicht rapportage/onderzoek

Omwille van de overzichtelijkheid is hier een overzicht gegeven van het uitgevoerde bresgroei-onderzoek, alsmede van de daarmee samenhangende rapportage.

Alle bresgroei-onderzoek is samengebracht in (WL-)project H1242. Onder dit projectnummer zijn een aantal deelprojecten te onderscheiden (vooralsnog deel I t/m IV). Verder is de rapportage per deelproject ondergebracht in twee banden. Band A vormt daarbij het hoofd rapport, terwijl in band B een nadere uitwerking is gegeven van een bepaald aspect van het onderzoek.

- Deel I Mathematisch model
 - band A Opzet en eerste resultaten;
 - band B Overzicht transportformuleringen.
- Deel II 2DV-ontwikkeling initiële bres
 - band A Verslag modelonderzoek Scheldegoot;
 - band B Analytisch model.
- Deel III 2DH/3D-ontwikkeling initiële bres
 - Verslag modelonderzoek Scheldebak (dit rapport);
- Deel IV Pragmatische modellering breedtegroei

In de delen I-B en II-B zijn de bijdragen van de Technische Universiteit Delft gebundeld en is ir. P.J. Visser (TUD) de (eerste) auteur.

1.5 Opzet voorliggende rapport

In *Hoofdstuk 2* is de motivering van de verschillende proeven gegeven, waarna in *Hoofdstuk 3* de gedetailleerde opzet van de proeven voor wat betreft de inrichting van de faciliteit, meetprocedures, etc. aan de orde komt.

In *Hoofdstuk 4* is een beschrijving gegeven van de nog onverwerkte meetresultaten.

De resultaten van de nadere analyse van deze modelresultaten zijn gegeven in *Hoofdstuk 5*,

waarin ook de resultaten met betrekking tot de onderzochte aspecten zijn samengebracht. In *Hoofdstuk 6* is op basis van de waargenomen afhankelijkheden een eerste versie gemaakt van een breedtegroei-module. Tenslotte zijn de voornaamste conclusies met betrekking tot de proefresultaten en de modelvorming samengevat in *Hoofdstuk 7*.

Voor de nadere uitwerking van de modelaanpassingen ten behoeve van de modellering van de breedtegroei ten behoeve van het mathematisch model kan worden verwezen naar deel I van de rapportage.

2 Opzet modelonderzoek

2.1 Inleiding

2.1.1 Algemeen

De uitvoering van het systematisch fysisch modelonderzoek is gericht op de vergroting van het inzicht in het erosieproces en het proces van sedimenttransport die optreden tijdens de lokale overstroming (initiële bres) van een doorgaande, geheel uit zand bestaande, uniforme waterkering, alsmede op de relatieve invloed van de vorm van het dwarsprofiel van de waterkering en de aanwezigheid van golfaanval op deze processen.

Dit inzicht is verkregen door de uitvoering van een fysisch modelonderzoek in de Scheldebak van het Waterloopkundig Laboratorium waarin, onder goed te beheersen condities, de ontwikkeling van een aantal verschillende dwarsprofielen tijdens het erosieproces is onderzocht. Ook de relatieve invloed van golfaanval op dit proces is door uitvoering van vergelijkende proeven vastgesteld.

2.1.2 Aansluiting onderzoek Scheldegoot

De proeven zijn zodanig ingericht dat een optimale aansluiting aanwezig was met het eerder uitgevoerde onderzoek in de Scheldegoot. De ingebouwde dwarsprofielen zijn dan ook identiek. Het enige verschil betreft het feit dat er in het huidige onderzoek als het ware sprake is van een zeer brede goot, waarin dus niet alleen de diepte- maar ook de breedtegroei een rol van betekenis speelt.

2.1.3 Fasering

Omdat bresgroei een gecompliceerd 3-dimensionaal, relatief snel verlopend proces is, is het fysisch onderzoek opgesplitst in twee onderdelen, te weten:

- Systematisch onderzoek naar de breedtegroei van een initiële bres;
- Onderzoek naar gecombineerde breedte/diepte-groei.

Bij de eerste serie proeven is de uiteindelijke ontwikkeling van de bresdiepte beperkt door de aanwezigheid van een harde constructie in de vorm van een drempel. Na erosie tot op het niveau van de drempel is in principe sprake van een geïsoleerde breedtegroei. Bij de laatste proef is deze drempel verwijderd. Meer details en achtergronden met betrekking tot deze constructie zijn gegeven in Paragraaf 3.2.4.

2.2 Onderzochte aspecten

2.2.1 Inleiding

Het basisdwarsprofiel van de onderzochte waterkering is gebaseerd op het dwarsprofiel zoals dit ook tijdens het eerder uitgevoerde Scheldegootonderzoek is gebruikt. Meer details hierover zijn gegeven in Paragraaf 3.3.

De relatieve invloed van een wijziging van het dwarsprofiel (breedte, hoogte, hellingen) of condities (met/zonder golfaanval) ten opzichte van het basisdwarsprofiel is steeds vastgesteld door onderlinge vergelijking van de in de verschillende proeven gemeten bresontwikkelingen.

2.2.2 Overzicht

Een overzicht van de geteste dwarsprofielen is samengebracht in Figuur 3.3.3. De effecten op het bresgroeiproces van de volgende parameters zijn onderzocht:

- Kruinbreedte van de waterkering in/naast de bres;
- Kruinhoogte van de waterkering naast de bres;
- Helling van het buitenbeloop;
- Aanwezigheid van golfaanval.

Opgemerkt moet worden dat proeven m.b.t. de invloed van de korreldiameter achterwege zijn gelaten. De relatieve invloed van de korreldiameter op de dieptegroei van een bres is reeds bekend op basis van de resultaten van het uitgevoerde Scheldegoot-onderzoek (H1242-II). Er wordt (voorlopig) van uit gegaan dat de invloed van de korreldiameter op de diepte- en breedtegroei vergelijkbaar is.

Bij de uitvoering van het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van duinzand ($D_{50} \approx 210 \mu\text{m}$).

2.3 Overzicht proeven

2.3.1 Inleiding

Er zijn zeven proeven uitgevoerd gericht op de geïsoleerde breedte-groei, alsmede een volledig drie-dimensionale proef. Bij de eerste serie is de dieptegroei van de bres beperkt door de aanwezigheid van een drempelconstructie. Een nadere detaillering van de proefopzet is gegeven in Hoofdstuk 3.

2.3.2 Stroomproef (T0)

Voordat er onderzoek is uitgevoerd naar de ontwikkeling van eroderende dammen, is voorafgaand enige ervaring opgedaan met stationaire stroming in het bassin.

T0 Verkennende proef met rondpompen van beschikbare pompdebiet over vaste dam/drempel.

2.3.3 Geïsoleerde breedte-groei (T1 t/m T7)

Er zijn zeven verschillende proeven uitgevoerd, waarbij proef T4 een centrale plaats inneemt. De onderlinge volgorde is op basis van uitvoeringstechnische overwegingen vastgesteld. Deze proeven kunnen in het kort als volgt worden omschreven:

T1 Onderzoek gericht op de invloed van het *drempelniveau* op het proces door uitvoering van een bresgroeioproef bij een lage waterstand (+0,65 m) en een lage waterkering (+0,60 m t.p.v. de initiële bres en +0,80 m t.p.v. de kruin). Dit

is in feite een reproductie van de basisproef (T4), echter nu met een relatief (0,10 m) hogere drempel!;

- T2 Onderzoek gericht op de invloed van de *kruinbreedte* door uitvoering van een proef met een, ten opzichte van het basisprofiel van proef (T4) smallere kruin (0,70 m i.p.v. 1,30 m);
- T3 Onderzoek gericht op de invloed van de aanwezigheid van een enige *kruinhoogte* (overhoogte = kruinniveau - waterstand = nihil), door uitvoering van een proef met een, ten opzichte van de basisproef, zeer lage kruin (kruinniveau +0,76 m d.w.z. 0,01 m boven waterstand);
- T4 De feitelijke basisproef met het *basisdwarsprofiel*; een ten opzichte van de initiële bres 0,20 m hoge, 1,30 m brede kruin, een 1:4 buitenbeloop en een 1:3 binnenbeloop;
- T5 Onderzoek gericht op de invloed van de *kruinhoogte* door herhaling van de basisproef (T4), maar nu voor een veel (0,20 m) hogere kruin;
- T6 Onderzoek naar invloed van additionele (loodrechte) *golfaanval* op het proces, door herhaling van de vorige proef (T5; hoog profiel i.v.m. ongewenste overslag/doorbraak) maar nu bij aanwezigheid van golfaanval;
- T7 Onderzoek naar de invloed van de helling van het *buitenbeloop* door herhaling van de basisproef (T4) met een, over voldoende lengte aanwezig, flauwer (1:10) buitenbeloop.

Een nadere detaillering van de verschillende proeven en gebruikte profielen is gegeven in Paragraaf 3.4.

2.3.4 Gecombineerde breedte/diepte-groei (T8 en T9)

Er is een volledige (half) 3D-proef uitgevoerd, door herhaling van proef T7 maar nu bij afwezigheid van de dieptegroei-beperkende drempelconstructie, alsmede een echte 3D proef.

- T8 Uitvoering van een volledige (half) 3-dimensionale proef door herhaling van proef T7 maar nu bij afwezigheid van de dieptegroei-beperkende drempelconstructie.
- T9 Uitvoering van een volledige 3-dimensionale proef door het verhogen van de waterstand tot de rand van de kruin, gevolgd door bresgroei vanuit het midden van de dam. Dit betrof een extra proef.

3 Detaillering proevenprogramma

3.1 Inleiding en uitgangspunten

In dit hoofdstuk is de opzet van het modelonderzoek in meer detail uitgewerkt. Achtereenvolgens komen hierbij aan de orde de inrichting van de faciliteit, de geteste dwarsprofielen en de werking van het circulatie-systeem. Vervolgens is nader ingegaan op de in het model verrichte metingen en de per proef gevolgde werkwijze.

Tot besluit is aan de hand van verkennende berekeningen het verwachte proefverloop bepaald.

3.2 Inrichting van de faciliteit

3.2.1 Scheldebak

De proeven zijn uitgevoerd in de Scheldebak van het Waterloopkundig Laboratorium. Deze faciliteit is mede gekozen vanwege het feit dat deze goed aansluit op het eerdere onderzoek in de Scheldegoet. Hierdoor kunnen identieke dwarsprofielen onder vergelijkbare condities worden getest.

De definitieve inrichting van deze faciliteit is schematisch weergegeven in Figuur 3.2.1.

De kleine pijltjes geven het circulatie patroon aan. Het water stroomt hierbij over de drempel/zanddam af, waarna een deel van het gesuspendeerde sediment van de eroderende zanddam neerslaat in het verdiepte deel (bakbodem $-0,5$ m). Onder vrij verval stroomt het water vervolgens naar de aanzuig/pompkelder (bakbodem $-1,4$ m). De hier geïnstalleerde pompen brengen het water vervolgens in de instroombak, waarna het weer ten goede komt aan het buitenwater tussen het golfschot en de dam.

3.2.2 Lokaal assenstelsel

In Figuur 3.2.1 is naast het globale assenstelsel (t.o.v. de linkeronderhoek van de faciliteit en maaiveld), tevens een lokaal assenstelsel gedefinieerd. Het nulpunt hiervan bevindt zich het snijpunt van de rechter opsluitwand en de voorzijde van het bovenste deel van het (basis-)dwarsprofiel. De niveaus zijn hierin gedefinieerd ten opzichte van de gootbodem $Z = +0,0$ m. De profielontwikkelingen in de bres zijn gegeven ten opzichte van dit lokale assenstelsel.

3.2.3 Positie zanddam/drempel-constructie

De positie van de zanddam, uitgedrukt in de afstand tussen het golfschot en de knik in het buitenbeloop van het (basis-)dwarsprofiel is gekozen op 16 m (zie Figuur 3.2.1).

Omdat de verwachte debieten bij toenemende breedte-groei van de bres zeer groot worden (en het waterstandsverschil over de dam daarmee al snel sterk reduceert) en omdat het 3D-bresgroei-proces zal worden gehinderd door de beperkte breedte van het bassin, is op basis van uitvoeringstechnische overwegingen de volledige damconstructie slechts over ongeveer de halve bakbreedte aanwezig.

De lengte waarover de bres zich zou kunnen ontwikkelen bedraagt in deze opzet dus $8,0$ m. Aan de buitenzijde (bovenstrooms) is de dam wel over de volledige (effectieve) bakbreedte ($14,0$ m) doorgetrokken.

3.2.4 Drempelconstructie

In/onder de zanddam is bij de meeste proeven een betonnen drempel aangebracht. Deze drempel legt een beperking op aan de optredende dieptegroei van de bres. Ofschoon deze constructie dus in principe het bresgroeiproces verstoort, wegen de hiermee samenhangende voordelen op tegen dit (overigens wezenlijk lijkende) nadeel. Het grote voordeel van deze constructie is dat de optredende debieten en dus het verwachte waterbezwaar beperkt(er) blijven. Een proef kan dus langer worden doorgezet. Een tweede belangrijk voordeel is dat na het bereiken van het drempelniveau het proces van breedteontwikkeling als het ware is geïsoleerd, waardoor de relatieve effecten van een verschillende kruingeometrie op de breedtegroei eenduidig kunnen worden vastgesteld. Overigens moet worden opgemerkt dat het hier beschreven fundamentele onderzoek primair gericht is op het krijgen/vergroten van inzicht in de processen die de bresgroei bepalen en dat het niet de bedoeling is/was om de ontwikkeling van een "echte bres" te reproduceren.

Het *niveau* van deze drempel is (voor de meeste proeven) gekozen op *0,30* m beneden het niveau van de initiële bres (= hoogte zanddam in Scheldegoot-onderzoek). Het effect van de feitelijke profielvorm beneden dit niveau (wel/geen ontgrondingskuil, schietend/stromend water, ...) leek op basis de resultaten van de Scheldegootproeven gering (ofschoon de meningen hierover verdeeld zijn). De aanwezigheid van een harde laag lijkt dan ook geen effect te hebben op de initiële ontwikkeling van de dieptegroei in de bres.

In feite is de situatie met een zanddam op een *0,40* m hoge drempel te zien als een proef met een *0,40* m lagere zanddam op een vlakke betonbodem. Bij een hoge dam op een drempel is echter het grote voordeel van een relatief lager (*0,40* m) gelegen achterland aanwezig, waardoor de effecten van (voortijdige) opstuwing in de afstroming door de bres wordt uitgesteld.

Om het *effect* van deze drempel op met name de breedte-groei tijdens het bresvormingsproces vast te stellen is het (relatieve) niveau van deze drempel in de proeven gevarieerd. Hierbij is ook gekeken naar de ontwikkeling van de bres bij afwezigheid van deze drempelconstructie. Deze situatie is overigens te beschouwen als een proef met een drempel op het niveau van de bakbodem.

Een dwarsdoorsnede van de betondrempel en het basisdwarsprofiel is gegeven in Figuur 3.3.1A. In deze figuur is tevens het resultaat van de gemeten 2DV-ontwikkeling van Scheldegootproef T5A gegeven. Figuur 3.3.1B geeft een overzicht van de additionele dwarsprofielen.

3.2.5 Positie initiële bres

Er is gekozen voor een half-symmetrische opstelling, waarbij de bresbreedte zich ontwikkelt vanaf de rechter opsluitwand (op $Y=0$ m) en deze wand dus fungeert als symmetrie-as. Deze keuze is met name gemaakt met het oog op het verwachte waterbezwaar (halve bres levert helft van het debiet). Op deze wijze sluit dit 3D-onderzoek overigens 'naadloos' aan op het 2DV-onderzoek in de Scheldegoot. De in de goot waargenomen profielontwikkelingen zijn in deze opzet (bij een gelijk dwarsprofiel) in principe overeenkomstig de tegen opsluitwand optredende ontwikkelingen (vervanging van de rechter opsluitwand door een glasplaat, zou,

afgezien van het effect van de nu wel aanwezige kruin, de reeds in de Scheldegoot gemeten profielontwikkeling te zien moeten geven!).

Teneinde ongewenste randeffecten bij het begin van de bresvorming (bij nog kleine debieten) zoveel mogelijk te voorkomen is voor de breedte van de initiële bres de halve (Schelde)-gootbreedte aangehouden, zijnde $0,40/2 = 0,20$ m, als aangegeven in Figuur 3.3.2. Deze figuur geeft een vooraanzicht/langsdoorsnede van de (zand)-dam.

Deze half-symmetrisch inrichting levert overigens in de eerste fase van de bresvorming (totdat de bresdiepte zodanig is dat de drempel de bresontwikkeling gaat beïnvloeden) een volledig drie-dimensionale ontwikkeling op.

3.2.6 Overzicht deel-bassins

In de bak zijn een viertal verschillende deel-bassins te onderscheiden, te weten:

- Instroom-bassin;
- Buiten-bassin;
- Binnen-bassin;
- Uitstroom-bassin.

Het buiten-bassin en het binnen-bassin nemen hierbij respectievelijk de plaats in van het buiten- en binnenwater.

Via het uitstroom-bassin (pompkelder) en het instroom-bassin wordt het onder vrij verval aanstromende water door middel van een pompstelsel weer aan het 'buitenwater' toegevoegd. Het instroom-bassin heeft hierbij tot doel de instroming van het buitenwater enigszins te reguleren (liefst zo uniform mogelijk).

De scheidingswand tussen het instroom- en het buitenbassin bestaat hiertoe uit een, aan palen bevestigde, rij schotten welke afzonderlijk kunnen worden opgetrokken waardoor aan de onderzijde een instroomspleet ontstaat. In de ideale situatie resulteert deze instroming alleen in een nette waterstandsverhoging en zijn additioneel opgewekte stromingspatronen minimaal. De definitieve instroming is in de stroomproef T0 nader uitgewerkt.

In Paragraaf 3.4 is uitgebreider ingegaan op dit circulatiesysteem.

3.3 Overzicht dwarsprofielen

3.3.1 Basisprofiel

Het basisprofiel is overeenkomstig het dwarsprofiel zoals dit tevens in het Scheldegootonderzoek (onderzoek H1242, deel II, band A) is gebruikt. Hierbij was echter sprake van een overstroming van de kruin over de volledige gootbreedte. In dit onderzoek is echter sprake van een lokale, initiële bres in de vorm van een geul. De rest van de waterkering is derhalve voorzien van een additionele kruin (het zogenaamde "grensprofiel"), als weergegeven in Figuur 3.3.1A. De kruinbreedte aan de basis (d.w.z. op het niveau van de initiële bres) is $1,30$ m terwijl de kruinhogte $0,20$ m bedraagt. Het buitenbeloop is onder $1:1$ en de taludhelling aan de binnenzijde bedraagt $1:2$. De breedte aan de top bedraagt derhalve $0,70$ m.

Dit basisprofiel komt bij proef T4 aan de orde. Een overzicht van alle geteste dwarsprofielen is gegeven in Figuur 3.3.3. Het basisprofiel is hierin steeds aangegeven met een dunne stippellijn.

3.3.2 Effect kruinhoogte

Om het effect van de kruinhoogte bij gelijkblijvende basisbreedte te onderzoeken is zowel een dwarsprofiel met een hogere als met een veel lagere kruin onderzocht.

In proef T5 is hiertoe een 0,20 m hogere kruin getest. De situatie met een zeer lage kruin (0,01 m boven de beginwaterstand) is getest in proef T3.

3.3.3 Effect kruinbreedte (basisbreedte)

Om het effect van de kruinbreedte te onderzoeken is naast het basisprofiel (T4) in proef T2 een situatie met een 0,60 m smallere kruin bekeken. De topbreedte van de kruin bedraagt hierbij 0,10 m in plaats van 0,70 m.

3.3.4 Effect profielhelling

Het effect van de voorlandhelling is onderzocht door in proef T7 een profiel met een relatief flauwer buitenbeloop (1:10 i.p.v. 1:4) te onderzoeken.

3.3.5 Aanpassing t.b.v. effect drempelniveau

Om de effecten van de drempel op het bresgroeiproces te bepalen is zowel een proef met een relatief hogere drempel, als een proef met een veel lagere drempel onderzocht.

Voor het eerste geval is in proef T1, voor het vaste drempelniveau van +0,40 m, een 0,10 m lagere dam bij een overeenkomstig lagere waterstand onderzocht. Dit is dus in feite te zien als een reproductie van de basisproef T4, maar nu met een 0,10 m hogere drempel.

In de voorlaatste laatste proef (T8) is sprake van een 0,40 m lager drempelniveau, waarbij de drempel afwezig is en het drempelniveau gelijk is aan de bodem van de bak.

3.3.6 Effect golfaanval

Het relatieve effect van additionele golfaanval is vastgesteld door herhaling van proef T5 (met de hoge kruin ter voorkoming van in dit onderzoek ongewenste effecten van golfoverslag) met golfaanval (in proef T6).

Voor de aansturing van het golfschot is hetzelfde stuursignaal gebruikt als bij de golfproef in de Scheldegoot. Hierbij is sprake van op het voorland brekende golven (diepte-verzadigd), met een golfhoogte van $H_g \approx 0,25$ m bij het golfschot.

3.3.7 Vormgeving initiële bres

De positie van deze initiële bres is al eerder aan de orde geweest.

Het niveau van de bres bevindt zich op 0,05 m beneden de beginwaterstand, dus in de meeste proeven (afgezien van T1) op +0,70 m.

De geulbreedte van de bres bedraagt 0,20 m terwijl voor het zijtalud is uitgegaan van een aanleghelling van 2:1. In Figuur 3.3.2 is een langsaanzicht gegeven van het drempel/basisprofiel, waarin ook de initiële bres zichtbaar is.

3.4 Circulatie systeem

3.4.1 Algemeen

In de, voor de nagestreefde begripsvorming, permanente situatie, heeft het debiet door de bres geen invloed op zowel de buiten- als de binnenwaterstand.

Omdat de ontwikkeling van een bres in de modelopstelling gepaard gaat met het afstromen van relatief grote hoeveelheden water en dit volume resulteert in een (eigenlijk ongewenste) verlaging van de buitenwaterstand is het afstromende water zo veel/lang mogelijk gerecirculeerd. Op deze wijze wordt de bruikbare proefduur significant verlengd. Bovendien kan door afschatting (meting) van de grootte van dit debiet tevens de afvoer door de bres worden bepaald.

In de volgende paragrafen komen de uitwisselingsdebieten (tussen de bassins) en de waterstanden in elk van de deel-bassins nader aan de orde.

Een schematisch overzicht is gegeven in Figuur 3.4.1. Achtereenvolgens is sprake van een instroomdebiet, een bresdebiet, een uitstroomdebiet en het retourdebiet.

3.4.2 Uitwisselingsdebieten

De grootte van het uitwisselingsdebiet tussen elk der bassins wordt in principe bepaald door de aanwezige waterstandsverschillen. Voor het pompdebiet is natuurlijk de beschikbare pompcapaciteit de bepalende factor. Voor het momentane debiet (uitgedrukt in m³/s) kunnen de volgende relaties worden gegeven.

Instroomdebiet

De grootte van het instroomdebiet $Q_i(t)$ van het instroom-bassin naar het 'buiten'-bassin is gelijk aan:

$$Q_i(t) = A_i^* m_i \sqrt{2g [h_i(t) - h_0(t)]} \quad (3.4.1)$$

waarin A_i^* de totale grootte van de, zich onder water bevindende openingen in de scheidingswand tussen het instroom-bassin (niveau h_i) en het buitenwater (niveau h_0).

Bij gegeven h_0 -niveau, mag het optredende verval geen aanleiding geven tot overstroming van de scheidingswand. Voor een horizontale spleet bij de bodem van ca. 0,10 m hoogte over een lengte van ca. 5,0 m (dus $A_i^* \approx 0,5 \text{ m}^2$) en een afvoercoëfficiënt van $0,5 < m_i < 1,0$ levert dit voor $Q_i \approx 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ een verval van $0,05 < \Delta h < 0,20 \text{ m}$. De hierbij door de openingen optredende instroomsnelheid bedraagt circa 1,0 m/s.

Bresdebiet

Het bresdebiet $Q_b(t)$ (met subscript b van bres/breach) kan in het geval van een volkomen overlaat (voor $h_1 \leq (Z_b + \frac{2}{3}(h_0 - Z_b))$) worden beschreven door:

$$Q_b(t) = B_b(t) m_b \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g [h_0(t) - Z_b(t)]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.4.2)$$

en voor de onvolkomen overlaat situatie (voor $h_1 > (Z_b + \frac{2}{3}(h_0 - Z_b))$) door:

$$Q_b(t) = B_b(t) m_b' (h_1(t) - Z_b(t)) \sqrt{2g [h_0(t) - h_1(t)]} \quad (3.4.3)$$

waarin m_b en m'_b de afvoercoëfficiënten voor respectievelijk de volkomen en de onvolkomen (gestuwde) overlaatsituatie. In deze formuleringen zijn naast de beide waterstanden h_0 en h_1 , tevens de bresdiepte (uitgedrukt in het bresniveau Z_b) en de bresbreedte B_b nog onbekende tijdsfuncties.

Uitstroomdebiet

Voor de grootte van uitstroomdebiet $Q_u(t)$ gelden voor respectievelijk de volkomen en de onvolkomen overlaat (respectievelijk $h_u \leq (Z_u + \frac{2}{3}(h_1 - Z_u))$ en $h_u > (Z_u + \frac{2}{3}(h_1 - Z_u))$):

$$Q_u(t) = B_u m_u \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g} [h_1(t) - Z_u]^{\frac{3}{2}} \quad (3.4.4)$$

en:

$$Q_u(t) = B_u m'_u (h_u(t) - Z_u) \sqrt{2g [h_1(t) - h_u(t)]} \quad (3.4.5)$$

waarin h_1 het niveau van de binnen-waterstand, h_u de waterstand in de pompkelder, B_u de breedte van de overlaat (2,0 m) en Z_u het (vaste) overstortniveau naar de pompkelder. De m -waarden in deze debietrelaties hebben betrekking op de afvoercoëfficiënten voor elk van deze typen overlaten.

Retourdebiet

De grootte van het momentane retourdebiet $Q_r(t)$ wordt begrensd door enerzijds het aangeboden/beschikbare watervolume (waterstand in de pompkelder: h_u) en anderzijds door de grootte van de maximaal beschikbare pompcapaciteit, volgens:

$$0 \leq Q_r(t) \leq \min \left\{ \frac{(h_u(t) - h_{uc}) A_u}{\Delta t}, Q_{rmax} \right\} \quad (3.4.6)$$

waarin A_u het oppervlak van de pompkelder en h_{uc} het aanzuigniveau van de pompen. In de kelder zijn drie pompen geïnstalleerd met elk een capaciteit van 150 à $200 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, waarmee de totale, maximaal beschikbare pompcapaciteit gelijk is aan $Q_{rmax} \approx 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

In de stationaire evenwichtssituatie (eind van een proef) is het debiet Q op elk van de bassinranden gelijk aan de ingestelde pompcapaciteit: $Q = Q_i = Q_b = Q_u = Q_r$.

Figuur 3.4.2 geeft de relatie tussen de overhoogte en de bresbreedte aan bij een gegeven grootte van het debiet. De stippellijn geeft hierbij de grootte van de snelheid aan.

3.4.3 Waterstanden

De grootte van de waterstanden (uitgedrukt in m t.o.v. de bak-bodem) in elk der bassins volgt uit de volumebalans per deel-bassin.

Instroombassin

Voor het waterniveau in het instroom-bassin $h_i(t)$ geldt:

$$h_i(t+\Delta t) = h_i(t) + \frac{Q_r(t) - Q_i(t)}{A_i} \Delta t \quad (3.4.7)$$

Het oppervlak van dit deel-bassin bedraagt $A_i \approx 25 \text{ m}^2$.

Bij de start van een proef is de waterstand gelijk aan de waarde in het 'buiten'-bassin zodat $h_i(t=0) = h_o(t=0)$. Tijdens de proef mag deze niet te hoog worden (geen overstroming scheidingswanden). Bij een h_o -niveau van $+0,75 \text{ m}$ levert met het eerder berekende verval een maximale waterstand op van $+0,80$ à $+0,95 \text{ m}$ ($< 1,25 \text{ m} = \text{muurhoogte}$).

Buitenbassin

De momentane waterstand in dit buiten-bassin $h_o(t)$ volgt uit:

$$h_o(t+\Delta t) = h_o(t) + \frac{Q_i(t) - Q_b(t)}{A_o} \Delta t \quad (3.4.8)$$

met als (karakteristieke) beginwaarde $h_o(t=0) = +0,75 \text{ m}$. Het totale 'buiten'-oppervlak bedraagt $A_o \approx 375 \text{ m}^2$, dit inclusief de oppervlakten buiten de (deels open) scheidingswanden en het deel achter het golfschot. Deze scheidingswanden zijn uitgevoerd in de vorm van, op klossen staande, perronstukken.

Binnenbassin

De waterstand in het binnen-bassin $h_l(t)$ kan gedefinieerd worden volgens:

$$h_l(t+\Delta t) = h_l(t) + \frac{Q_b(t) - Q_u(t)}{A_l} \Delta t \quad (3.4.9)$$

waarbij op $t=0$ geldt: $h_l(t=0) = Z_u$ met als overstortniveau $Z_u = +0,10 \text{ m}$. Hierbij is specifiek gekozen voor $Z_u > +0,0 \text{ m}$ en dus $h_l(0) > +0,0 \text{ m}$, opdat een kleine verhoging van de waterstand in dit bekken, zonder al te veel wrijvingsverliezen, vrijwel direct aanleiding zal zijn voor afvoer van water naar het uitstroom-bassin/pompkelder.

Bij de start van een proef kan eventueel ook een hogere initiële waterstand worden gekozen, dus $h_l(t=0) > Z_u$. De hierdoor beschikbare extra waterschijf kan dan worden gebruikt om de initiële verlaging van de waterstand in het buitenbekken te compenseren.

De totale grootte van het 'binnen'-bassin bedraagt ongeveer $A_o \approx 180 \text{ m}^2$.

Uitstroombassin

Voor het eigenlijke uitstroom-bassin (pompkelder) volgt de waterstand uit $h_u(t)$:

$$h_u(t+\Delta t) = h_u(t) + \frac{Q_u(t) - Q_r(t)}{A_u} \Delta t \quad (3.4.10)$$

met $A_u \approx 10 \text{ m}^2$. Voor het geval dat $h_l(t=0) \leq Z_u$ is de initiële waterstand in de pompkelder gelijk aan $h_u(t=0) = h_{uc}$, zijnde de kritische waterstand (aanzuigniveau van de pompen). Dit niveau bedraagt $h_{uc} = -1,00 \text{ m}$.

Voor een hogere waterstand in het binnen-bassin met $h_1(t=0) \leq Z_u$ geldt echter dat $h_u(t=0) = h_1(t=0)$. Opgemerkt moet worden dat de feitelijke, momentane waterstand in deze kelder alleen van belang is voor de bepaling van de grootte van de momentane pompcapaciteit $Q_r(t)$ (met een mogelijke variatie $0 \leq Q_r(t) \leq Q_{rmax}$).

3.5 Te verrichten metingen

3.5.1 Overzicht

Met betrekking tot de in het model te verrichten metingen is onderscheid gemaakt tussen:

- Lokale metingen (waterstanden, snelheden, debieten);
- Bresontwikkeling (breedte-ontwikkeling, profielen);
- Ondersteunende metingen.

De te onderzoeken 2DH/3D-ontwikkeling van de initiële bres kan worden gesplitst in:

- Diepte-ontwikkeling: $Z_b(t)$ (dwarsraai);
- Breedte-ontwikkeling: $B_b(t)$ (langsradi).

Omwille van de eenduidigheid van de meetresultaten is voor elk van de proeven dezelfde opstelling van de meetinstrumenten gehandhaafd. Een overzicht van de meetinstrumenten is gegeven in Tabel 3.5.1.

3.5.2 Waterstanden

De lokale waterstanden zijn met behulp van capaciteieve golfhoogtemeters (GHM's) gemeten op een achttal discrete posities als aangegeven in Figuur 3.5.1 en Tabel 3.5.1. Dit betreft een continue registratie waarbij de signalen zijn weggeschreven naar een PC.

3.5.3 Snelheden

De lokale snelheden zijn gemeten in een aantal discrete posities als aangegeven in Figuur 3.5.1. Deze snelheden zijn bepaald op een vaste hoogte boven de bodem, waarbij zowel de momentane snelheid in x- als in y-richting is vastgelegd. Hierbij is waar mogelijk aangesloten op de, voor het (in een later stadium) uitvoeren van berekeningen m.b.v. 2DH- (of zelfs 3D-)stromingsmodellen, benodigde gegevens. SHM1 t/m SHM5 bevonden zich alle op 0,35 m boven de gootbodem. SHM6 bevond zich, naast GHM8, in het midden van de goot op ca. 1,5 m van de overstort.

Voor het verkrijgen van een over-all stroombeeld zijn bovendien drijvermetingen uitgevoerd. Deze methode is ook toegepast om incidenteel de snelheid in het stroomgat te bepalen. De optredende snelheden zijn hierbij afgeleid uit de video-registratie.

| kanaal | instrument nr. | | x [m] | y [m] | opmerkingen |
|--------|----------------|---|-------|-------|------------------------|
| 1 | GHM | 1 | -3,0 | 0,5 | op (blauwe) meethalk |
| 2 | GHM | 2 | -3,0 | 2,5 | idem |
| 3 | GHM | 3 | -3,0 | 5,5 | idem |
| 4 | GHM | 4 | -3,0 | 9,0 | idem |
| 5 | GHM | 5 | -9,0 | 9,0 | op driepoot |
| 6 | GHM | 6 | -9,0 | 1,0 | idem |
| 7 | GHM | 7 | -15,0 | 5,0 | idem |
| 8 | GHM | 8 | | | op balkje (naast SHM6) |
| 9 | SHM | 1 | x | -3,0 | 1,5 |
| 10 | | | y | | |
| 11 | SHM | 2 | x | -3,0 | 4,0 |
| 12 | | | y | | |
| 13 | SHM | 3 | x | -3,0 | 7,25 |
| 14 | | | y | | |
| 15 | SHM | 4 | x | -6,0 | 9,0 |
| 16 | | | y | | |
| 17 | SHM | 5 | x | -9,0 | 5,0 |
| 18 | | | y | | |
| 19 | SHM | 6 | x | | op balkje (naast GHM8) |

Tabel 3.5.1 Overzicht kanalen, meetinstrumenten en posities

In het totaal werd via 19 verschillende kanalen bemonsterd met een frequentie van 25 Hz.

3.5.4 Debiet

De grootte van het debiet door de bres is niet rechtstreeks gemeten, maar is achteraf bepaald. Hiertoe zijn twee methoden beschikbaar, te weten een directe en een indirecte methode. In het eerste geval volgt een schatting van het debiet uit het produkt van waargenomen bresbreedte en gemeten waterstanden en snelheden.

Een kwalitatief goede en kwantitatief redelijke afschatting van de grootte van het bresdebiet kan indirect worden bepaald aan de hand van de meting van het uitstroomdebiet. Hiertoe is in het afstroomgedeelte (voor de overstort naar de pompkelder) zowel de waterdiepte (GHM8) als de snelheid (SHM6) worden gemeten. De relatie tussen dit uitstroomdebiet en het debiet door de bres is reeds besproken in Paragraaf 3.4.

3.5.5 Profielontwikkeling in dwarsrichting

De verdieping van de initiële bres $Z_b(t)$ is zoveel mogelijk visueel vastgelegd, waarbij speciale aandacht is gegeven aan de momenten waarop de overgang tussen karakteristieke fasen in het bresgroeiproces optrad.

3.5.6 Profielontwikkeling in langsrichting

De ontwikkeling van de breedte van de bres $B_b(t)$ (breedtegroei) is nauwkeurig vastgelegd door een vaste opstelling met twee videocamera's. Hiertoe is een camera gericht op een aanzicht vanaf de binnenzijde van de bres terwijl een tweede camera hoog boven de dam de breedteontwikkeling en het stroombeeld in bovenaanzicht registreert. Omwille van de plaatsbepaling is hiertoe een duidelijk zichtbaar rasterwerk aangebracht.

Een derde (niet vaste) camera is gebruikt voor het vastleggen van een aantal relevante detailprocessen.

3.5.7 Ondersteunende metingen

Bij de zogenaamde ondersteunende metingen zijn te noemen:

- Dichtheidsmeting(en);
- Zeefanalyse(s);
- Watertemperatuur.

Deze metingen zijn op gezette tijden en posities uitgevoerd.

3.6 Werkwijze per proef

3.6.1 Algemeen

In het volgende is de gevolgde werkwijze per proef nader toegelicht, waarbij een onderscheid is gemaakt tussen de stroomproef T0, de basisset T1 t/m t8 en de extra proef T9.

3.6.2 Proef T0

De eerste test was voornamelijk gericht op het testen van het circulatie-systeem en had enerzijds tot doel de grootte van het pompdebiet te bepalen en anderzijds de instroming naar het buitenbassin zo 'net' mogelijk te maken.

Hiertoe werden met name in het aanstroomkanaal naar de pompkelder met behulp van een Ott-molen diverse snelheidsverticalen en snelheidsraaien gemeten. Door dit te doen voor een aantal combinaties van ingeschakelde pompen kon het totale debiet worden vastgesteld.

De optimale instroming naar het buitenbassin werd verkregen door het aanbrengen van duikschotten en het variëren van de grootte van de spleet (zie Figuur 3.4.1). Het effect van diverse configuraties werd onderzocht door het gebruik van drijvertjes (dan wel koffiemelkpoeder).

3.6.3 Proeven T1 t/m T8

Bij alle proeven werd het zand in overmaat en goed verdicht aangebracht waarna het vervolgens werd afgewerkt onder het voor de specifieke proef benodigde dwarsprofiel. Vervolgens werd, na het aanbrengen van de diverse plaatsmarkeringen op de zanddam, de tegen de zijwand gelegen initiële geul gegraven en voorzien van een zandzakje. Nadat alle benodigde apparatuur in gereedheid was gebracht werd vervolgens het waterpeil in de deelbassins opgevoerd tot het gewenste niveau.

Na een nadere controle/afstelling van alle opname apparatuur werd begonnen met bemonstering van video- en meetsignalen waarna na een afgesproken tijdsduur (meestal twee minuten) het zandzakje in de initiële bres werd verwijderd. Op deze wijze werd een eenduidig begin van de proef gemarkeerd en bestond bovendien achteraf de mogelijkheid om de signalen in de aanloopfase, dus voor het verwijderen van het zandzakje, nader af te regelen (snelheden gelijk aan nul en waterstanden onderling gelijk).

Tijdens het verloop van elke proef werd het tijdsverloop van de verticale ontwikkeling van de initiële geul genoteerd, alsmede het waargenomen breedteverloop van de bres. Daarnaast werd ook het tijdstip genoteerd waarop de pompcapaciteit werd overtroffen en het waterstands niveau in de pompkelder begon op te lopen (het bresdebiet is vanaf dat moment groter dan de aanwezige pompcapaciteit).

Andere karakteristieke tijdstippen zoals het tijdstip waarop de overhang van volkomen naar onvolkomen overlaat plaatsvond en natuurlijk het moment waarop de pompen werden uitgeschakeld werden ook genoteerd.

Tot dit uitschakelen van de pompen werd besloten als de breedtegroei nog slechts marginaal was en/of de totale dam bijna was verdwenen. De bemonstering van snelheden en waterstand werd overigens doorgezet tot dat er een evenwichtssituatie in de goot aanwezig was (alle waterstanden gelijk en alle snelheden gelijk aan nul). Ook deze eindsituatie werd gebruikt voor de nadere afregeling van de meetsignalen.

In sommige gevallen werd de eindsituatie ingemeten, waarmee een indruk werd verkregen van de in de bres aanwezige dwarsprofielen.

3.6.4 Proef T9

Bij de extra proef T9 werd, afgezien van een aantal kleinere aanpassingen in wezen de zelfde aanpak gevolgd als bij de voorafgaande proeven.

De initiële geul bevond zich in tegenstelling tot de vorige proeven echter niet tegen maar op 3 m uit de wand en was bovendien veel kleiner; slechts 0,02 m breed en 0,02 m diep.

Het begin van de proef viel samen met een langzame maar gestage verhoging van de buitenwaterstand welke werd doorgezet tot sprake was van een lokale doorbraak van de zanddam. Na afloop van de proef werd de gevormde ontgrondingskuil in detail ingemeten.

3.7 Verkennende berekeningen

3.7.1 Inleiding

De bresgroei is gerelateerd aan de karakteristieken van de afstroming van water door de bres (o.a. gemiddelde snelheid). De beschrijving van de hieraan ten grondslag liggende (transport)-formuleringen vormen een belangrijk onderdeel van deze studie.

Om alvast enig inzicht te verkrijgen in de met de bresgroei gepaard gaande waterstandsveranderingen, snelheden en debieten is een aantal verkennende berekeningen uitgevoerd.

Hierbij is in eerste instantie de (verwachte) bresgroei met behulp van een tweetal, (van te voren) opgelegde, geometrie beschrijvende formuleringen beschreven ("*opgelegde bresgroei*"). Door vervolgens per (kleine) tijdstap Δt , de onderling gekoppelde vergelijkingen voor debieten en waterstanden op te lossen kan inzicht in de optredende debieten, snelheden en waterstanden worden verkregen.

In tweede instantie is hetzelfde gebeurd, maar dan voor een eerste (voorlopige) morfologische beschrijving van het bresgroeiproces ("*vrije bresgroei*").

3.7.2 Geometrische beschrijving bresgroei

De te kwantificeren bresgroei kan schematisch worden weergegeven door een geometrische beschrijving van het bresniveau en de bresbreedte. Hierbij wordt dus gemakshalve van uitgegaan dat de vorm van de bres kan worden beschreven door een eenvoudige rechthoekige doorsnede.

De (verticale) ontwikkeling van het *bresniveau* Z_b (tijdens het proces van kruinverlaging en dus nadat de volledige kruinbreedte is geërodeerd) kan worden beschreven door een algemene relatie volgens:

$$Z_b(t) = Z_b(0) - K_z t^{m_z} \quad \text{voor } \{t \geq t_z\} \text{ met } Z_b(t) \geq Z_d \quad (3.7.1)$$

waarin:

- $Z_b(0)$ het initiële bresniveau: meestal $Z_b(0) = +0,70$ m;
- K_z een (niet-dimensieloze) constante met $K_z > 0$;
- m_z een macht met $m_z = O(1)$;
- Z_d het niveau van de drempel (meestal $Z_d = +0,40$ m).

Voor de totale *bresbreedte* $B_b(t)$ kan in principe een soortgelijke relatie worden gegeven. Omdat echter gewerkt wordt met een half-symmetrische opstelling is aanvullend de (halve) bresbreedte b_b gedefinieerd als de positie van de zijkant van de bres ten opzichte van de symmetrie-as van de initiële bres (op $Y = +0,0$ m t.p.v. de rechter opsluitwand).

Voor $b_b(t)$ geldt dan:

$$b_b(t) = b_b(0) + K_b t^{m_b} \quad \text{met } b_b(t) \leq 8,0 \text{ m} \quad (3.7.2)$$

waarin:

- $b_b(0)$ de initiële bresbreedte met $b_b(0) = \frac{1}{2} B_b(0) = 0,20$ m;
- K_b een (niet-dimensieloze) constante met $K_b > 0$;
- m_b een macht met $m_b = O(1)$.

De grootte van het stroomvoerende oppervlak A_b voor de volkomen overlaat situatie is nu gelijk aan:

$$A_b = b_b \frac{2}{3} [h_0(t) - Z_b(t)] \quad (3.7.3)$$

waarin de rechter term de waterdiepte in de bres geeft bij een volkomen overlaat.

3.7.3 Morfologische beschrijving bresgroei

De *morfologische* beschrijving van de bresgroei komt in principe later aan de orde.

Voor de groei van de *bresdiepte* geldt bijvoorbeeld:

$$dZ_b/dt = \mathbf{F}\{H_0(t), Z_b(t), \dots\} \quad (3.7.3)$$

of:

$$dZ_b/dt = \mathbf{F}\{\bar{v}_b(t), \dots\} \quad (3.7.4)$$

De toename van de (halve) *bresbreedte* zou kunnen worden beschreven door:

$$db_b/dt = \mathbf{F}\{\bar{v}_b(t), \dots\} \quad (3.7.5)$$

zodat:

$$b_b(t) = \int_{t_0}^t (db_b/dt) dt \quad (3.7.6)$$

In het huidige onderzoek dient een relatie te worden gelegd tussen de (gemeten geometrische) bres-ontwikkeling aan de gemeten waterbeweging in/nabij de bres.

3.7.4 Waterstanden, debieten en snelheden

De waterstanden, debieten en snelheden zijn (als afhankelijke variabelen) uitgaande van zowel een opgelegde als "vrije" bresgroei nu eenvoudig te berekenen.

De ontwikkeling van de buitenwaterstand h_0 volgt dan uit:

$$h_0(t) = h_0(0) + \frac{1}{A_0} \int_0^t [Q_i(t) - Q_b(t)] dt \quad (3.7.7)$$

terwijl voor de binnenwaterstand h_1 geldt:

$$h_1(t) = h_1(0) + \frac{1}{A_1} \int_0^t [Q_b(t) - Q_u(t)] dt \quad (3.7.8)$$

De hierbij optredende debieten zijn beschreven door de eerder gegeven vergelijkingen.

De optredende gemiddelde (water-)snelheid \bar{v}_b in de bres tijdens de volkomen overlaat situatie volgt uit:

$$\bar{v}_b = \frac{Q_b}{A_b} = m_b \sqrt{\frac{2}{3} g [h_o(t) - Z_b(t)]} \quad (3.7.9)$$

3.7.5 Resultaten

Enkele indicatieve resultaten van uitgevoerde berekeningen zijn gegeven Figuur 3.7.1 en 3.7.2.

Voor een *opgelegde bresgroei*, $Z_b(t)$ en $B_b(t)$, is zowel het verwachte tijdsverloop van de waterstanden als de debieten berekend (Figuur 3.7.1).

Bij een *"vrije bresgroei"* is de verbredings- en verdiepingssnelheid recht evenredig verondersteld met de bresgemiddelde snelheid \bar{v}_b . Figuur 3.7.2 geeft de berekende ontwikkeling voor $Q_{rmax} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. In het kader van de voorbereidingen van de proeven zijn er nog vele andere berekeningen gemaakt. Onder andere werd daarbij aandacht besteedt aan de kwantificering van het effect van een iets hogere beginwaterstand in het binnen-bassin. Ook het nut van het circulatiesysteem kon aldus worden onderschreven; de ontwikkeling van de bresbreedte voortijdig stopt dan reeds spoedig als gevolg van het opgeheven waterstandsverschil tussen het buiten- en binnen-bassin.

4 Beschrijving resultaten

4.1 Inleiding

In de navolgende paragraaf is een korte beschrijving gegeven van de verschillende proeven. Vervolgens zijn de onbewerkte meetresultaten van de proeven gepresenteerd voor wat betreft:

- Bresontwikkeling;
- Waterstanden;
- Snelheden;
- Ondersteunende metingen.

Hierbij werd de gedetailleerde bresontwikkeling vastgesteld aan de hand van de analyse van de gemaakte video-opnamen. Waterstanden en snelheden werden afgeleid uit de opgeslagen signalen. In het totaal ging het daarbij om ruim 9 uur signaal op 19 verschillende 25Hz-kanalen (ruim 15 miljoen meetwaarden).

De nadere verwerking en analyse van deze gegevens komt in het volgende hoofdstuk aan de orde.

4.2 Korte toelichting per proef

4.2.1 Proef T0

Het doel van deze proef was het vaststellen van het maximaal haalbare debiet, alsmede het verkrijgen van een nette instroming.

Analyse van de uitgevoerde raai- en verticale metingen in het kanaal naar de pompkelder laten zien dat de capaciteit van elk van de geplaatste pompen in orde *120 à 130 l/s* bedraagt, waarmee de totale pompcapaciteit gelijk is aan *0,375 m³/s*.

Mede naar aanleiding van deze, wat tegenvallende, resultaten werd besloten om ten behoeve van de 3D-proeven (T8 en T9) in ieder geval extra pompcapaciteit in te huren. Tevens werd voorafgaand aan de proeven het leidingstelsel van de pompen ingekort waardoor, als gevolg van een reductie van de optredende wrijvingsverliezen, het maximaal haalbare debiet werd opgehoogd tot circa *0,5 m³/s*.

4.2.2 Proef T1 t/m T8

De verschillende proeven verliepen eigenlijk geheel volgens verwachting en gaven in het algemeen dan ook geen aanleiding tot aanvullende opmerkingen.

Proef T5 werd bijgewoond door een delegatie van Werkgroep C.

Tijdens proef T6 werd de zwaarte van de golfaanval stapsgewijze opgevoerd door het uitsturingpercentage van de golfmachine op te schroeven (na *3,5* minuut na de start van de proef *40 %*, na *19* minuten *80 %* en pas na *38* minuten *100 %*).

4.2.3 Proef T9

In deze extra proef werd een echte 3D-situatie nagebootst, dit met maximale waterstand en dus maximaal verval. Deze proef leverde dan ook de meest spectaculaire video-opnamen en

liet zien dat het proces van bresgroei op kleinere schaal tenminste kwalitatieve gelijkenis vertoont met een doorbraak op grotere schaal als bijvoorbeeld beschreven in [de Looff, 1990].

4.3 Overzicht karakteristieke tijdsfasen

4.3.1 Bemonsteringsduur

Een overzicht van de proeven met betrekking tot de duur van de bemonstering is gegeven in Tabel 4.3.1. Per proef is hierin aangegeven op welk tijdstip de bemonstering van de verschillende signalen werd gestart en beëindigd en wat de totale duur van de bemonstering was.

| Proef | datum | start bemonstering | start overstroming | einde bemonstering | duur bemonstering |
|-------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| T1 | 13/11/92 | 15:07.36 | 15:08.40 | 16:09.28 | 1:01.52 |
| T2 | 17/11/92 | 14:42.47 | 14:44.47 | 15:24.59 | 0:42.12 |
| T3 | 19/11/92 | 14:46.01 | 14:48.01 | 15:26.57 | 0:40.56 |
| T4 | 23/11/92 | 13:50.00 | 13:52.00 | 14:36.56 | 0:46.56 |
| T5 | 25/11/92 | 14:09.00 | 14:09.00 | 15:22.00 | 1:13.00 |
| T6 | 27/11/92 | 14:43.00 | 14:45.00 | 15:38.56 | 0:55.56 |
| T7 | 02/12/92 | 13:21.00 | 13:23.00 | 15:16.52 | 1:55.52 |
| T8 | 07/12/92 | 13:52.00 | 13:54.00 | 15:03.56 | 1:11.56 |
| T9 | 09/12/92 | 14:05.00 | 14:15.00 | 14:41.20 | 0:36.20 |

Tabel 4.3.1 Overzicht tijdsduur bemonstering per proef

Als blijkt uit de tabel varieert de duur van de meting van een half tot twee uur. Proef T5 werd hierbij iets langer doorgezet om ook een situatie met slechts marginale breedtegroei te beschouwen.

4.3.2 Diverse afgeleide tijdstippen

Naast het begin- en eindtijdstip van de proeven werd in een aantal gevallen genoteerd op welk moment de pompcapaciteit werd overtroffen en/of er sprake was van de overgang van een volkomen naar een onvolkomen overlaat. Een overzicht van de per proef van toepassing zijnde tijdstippen is gegeven in Tabel 4.3.2. Het feitelijke begin van de verbreding van de bres trad meestal op na twee tot drie minuten.

| Proef | start overstroming t_0 [s] | pompdebiet overtroffen [s] | einde volkomen overlaat [s] | pompen uitgeschakeld [s] |
|-------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| T1 | 60 | - | - | 3370 |
| T2 | 120 | 960 | - | 1920 |
| T3 | 120 | - | 2940 | 3120 |
| T4 | 120 | 960 | 1200 | 2400 |
| T5 | 120 | 1380 | 2640 | 5450 |
| T6 | 120 | - | - | 2580 |
| T7 | 120 | 1380 | 2340 | 2640 |
| T8 | 120 | - | - | 3750 |
| T9 | 600 | - | - | 1920 |

Tabel 4.3.2 Overzicht karakteristieke tijdstippen per proef

Een aantal van de getalswaarden ontbreekt of omdat het karakteristieke tijdstip niet werd genoteerd of niet als zodanig herkenbaar was.

Hierbij moet verder worden opgemerkt dat de wel gegeven waarden vaak slechts een indicatie zijn.

4.4 Bresontwikkeling

4.4.1 Inleiding

Ten aanzien van de ontwikkeling van de bres zijn in het volgende de resultaten van de breedte-ontwikkeling beschreven en is kort ingegaan op de vormgeving van de ontgrondingskuil.

4.4.2 Resultaten bresbreedteontwikkeling

Een eerste indruk omtrent de breedtegroei werd verkregen uit de tijdens de proef gemaakte notities. Na afloop van de gehele proevenserie is een beter tijdsverloop bepaald uit de analyse van de van boven af gemaakte video-opnamen. Deze laatste breedte-ontwikkeling is voor alle uitgevoerde proeven samengebracht in Figuur 4.4.1.

Hierbij moet worden opgemerkt dat het hierbij steeds gaat om de eenzijdige breedtegroei, dit afgezien van de 3D-proef (T9) waarbij er wel sprake is van een tweezijdige groei. Als mag blijken uit de genoemde figuur is er in dit geval dan ook sprake van een initieel veel bredere bres.

In alle gevallen is er sprake van een in de tijd afnemende mate van breedtegroei, dit als gevolg van het gestaag afnemende waterstandsverschil. De nadere analyse zal zich met name moeten richten op de kwantificering van juist deze breedtegroeisnelheid.

4.4.3 Ontwikkeling kuilvorm

Om een idee te krijgen omtrent de vorm van het onderwaterprofiel zijn tijdens, maar met name na, enkele van de uitgevoerde proeven dwarsprofielen gemeten. De meest uitgebreide inmeting vond plaats na afloop van de laatste proef (T9). De kuilvorm als afgeleid uit de na afloop van deze 3D-proef uitgevoerde peilingen is gegeven in Figuur 4.4.2.

Opvallend hierin is de vrij geprononceerde overstortrand aan de buitenzijde die meer langgerekt dan cirkelvormig is. Evenwijdig aan de as van de dam is sprake van een geleidelijke helling onder ongeveer $1:3$.

4.5 Waterstanden

4.5.1 Inleiding

Per proef is het tijdsverloop van de waterstand in een achttal posities gemeten, te weten vier posities op 3 m (GHM1 t/m GHM4), twee op 9 m (GHM5 en GHM6) en een op 15 m van de dam (GHM7). De laatste waterstandsmeter (GHM8) was geplaatst in het afstroomkanaal naar de pompput en had mede ten doel om samen met aldaar geplaatste snelheidsmeter (SHM6) informatie over de grootte van het (afstroom)debiet te verkrijgen.

4.5.2 Validatie individuele signalen

Ofschoon de basiscalibraties (ijkingswaarden) van de gebruikte golfhoogtemeters reeds redelijke resultaten gaven, zijn ten behoeve van de verdere verwerking van de waterstandssignalen deze instellingen eerst nog geverifieerd aan de hand van een tweetal uitgangspunten.

Ten eerste zal aan het begin van de proef de waterstand in het bovenbassin overal gelijk moeten zijn en wel aan de via een peilschaal ingestelde (en vooral afgesproken) waarde. Dit geldt ook in de evenwichtssituatie aan het eind van de proef (bij uitgeschakelde pompen) waarbij bovendien geldt dat de waterstand in het afstroomkanaal ook gelijk aan deze waarde moet zijn.

Om dit te bewerkstelligen is van elk signaal zowel in de inlooffase (van het begin van de bemonstering tot de start van de overstroming) als in de eindfase, de tijdsgemiddelde waarde bepaald (met tijdsinterval van 1 minuut). Per signaal is op basis hiervan de basiscalibratie (nulpuntsverschuiving) zodanig bijgesteld dat aan deze uitgangspunten werd voldaan.

4.5.3 Resultaten

In Figuur 4.5.1 is als voorbeeld voor proef T1 het waterstandsverloop in zowel een aantal bovenstroomse punten (GHM1, GHM6 en GHM7; kanaal 1, 6 en 7) als het benedenstroomse punt in het afstroomkanaal (GHM8; kanaal 8) gegeven.

Met betrekking tot deze figuur is duidelijk herkenbaar het begin van de proef (begin van de afname van de buitenwaterstand en het oplopen van de binnenwaterstand), het bereiken van de maximale pompcapaciteit (de discontinuïteit in het verloop van de waterstand in het afstroomkanaal) en natuurlijk het moment waarop de pompen werden uitgezet (plotseling oplopen binnenwaterstand). De verschillende tijdstippen komen overeen met de reeds in Tabel 4.3.2 gegeven tijdsindicaties. De slingering in het afstroomkanaal heeft vermoedelijk

te maken met het schoksgewijze ledigen van de pompkelder en de daardoor veroorzaakte oscillaties.

4.6 Snelheden

4.6.1 Inleiding

Per proef is het tijdsverloop van de snelheid in een zestal posities gemeten, te weten drie posities op 3 m (SHM1 t/m SHM3), een op 6 m (SHM4) en een op 9 m van de dam (SHM5), waarbij overal zowel de x- als de y-component van de horizontale snelheid werd bepaald. De laatste snelheidsmeter (SHM6) was geplaatst in het afstroomkanaal naar de pompput. In het totaal gaat het hierbij dus om elf continue signalen.

Naast deze directe meting is aan de hand van de analyse van video-beelden de snelheid van het water in de bres geschat (zie Paragraaf 4.6.4).

4.6.2 Validatie individuele signalen

Ofschoon de basiscalibratie (ijkingswaarden) van de gebruikte snelheidsmeters reeds redelijke resultaten gaven, is ten behoeve van de verdere verwerking deze instelling eerst nog geverifieerd.

Dat voor deze afregeling gebruik is gemaakt van het feit dat er zowel in de aanloofase als in de evenwichts/eindsituatie sprake is van een stilstand water mag duidelijk zijn.

Om dit te bewerkstelligen is van elk signaal zowel in de inloofase (van het begin van de bemonstering tot de start van de overstroming) als in de eindfase, de tijdsgemiddelde waarde bepaald (met tijdsinterval van 1 minuut). Per signaal is vervolgens de basiscalibratie (nulpuntsverschuiving) zodanig bijgesteld dat zoveel mogelijk aan deze randvoorwaarden werd voldaan.

4.6.3 Resultaten meetsignalen

In Figuur 4.6.1 is voor Proef T1 de x-component van de watersnelheid in een tweetal bovenstroomse punten (SHM1 en SHM5; kanaal 9 en 17) als het benedenstroomse punt in het afstroomkanaal (SHM6; kanaal 19) gegeven.

Duidelijk herkenbaar zijn hier natuurlijk het begin van de proef (begin van het oplopen van de snelheid) en het moment waarop de pompen werden uitgezet (plotseling afnemen van de snelheid).

Als blijkt uit deze resultaten bedraagt de snelheid in het buitenwater maximaal enkele decimeters per seconde, terwijl de snelheden in het afstroomkanaal oplopen tot orde een meter per seconde.

4.6.4 Resultaten video-analyse

De snelheden in de bres zelf zijn niet gemeten. Een indicatie omtrent de hier opgetreden snelheden is achteraf verkregen uit de analyse van de video-opnamen, waarbij de verplaatsing van al dan niet opzettelijk in het water gebrachte drijvende voorwerpen werd gevolgd.

De optredende snelheid werd gebaseerd op de tijdsduur die nodig was voor het afleggen van een bepaald traject.

De aldus verkregen resultaten zijn voor de verschillende proeven gegeven in Figuur 4.6.2, waarbij de verschillende meetpunten betrekking hebben op snelheden op verschillende afstanden uit de rand van de bres.

4.7 Ondersteunende metingen

4.7.1 Pakkingsdichtheid

Voorafgaand aan een aantal proeven is op een tweetal posities door middel van een steekring een zandmonster genomen. Na weging van de gedroogde monsters is de dichtheid ρ bepaald door de massa van het monster te delen op het steekringvolume (100 cm^3). Gegeven deze dichtheid volgt het poriënpercentage p uit:

$$p = \frac{\rho_k - \rho}{\rho_k} 100 \% \quad (4.7.1)$$

Hierbij is uitgegaan van het soortelijk gewicht van het kwartzand van $\rho_k = 2650 \text{ kg/m}^3$. Het gemiddelde poriëngehalte over alle proeven bedraagt $38,9 \pm 2,8 \%$, waarbij het resultaat per individuele monsterneming/proef varieert van $35,8$ tot $43,5 \%$. De gemiddelde pakkingsdichtheid sluit overigens goed aan bij de in de Scheldegoot aanwezige waarde van $38,7 \pm 2,1 \%$.

4.7.2 Korreldiameter

De gestoken zandmonsters zijn tevens aan een zeefanalyse onderworpen. Voor het gebruikte (duin-)zand geldt: $D_{50} = 208 \text{ } \mu\text{m}$ ($D_{10} = 150 \text{ } \mu\text{m}$ en $D_{90} = 293 \text{ } \mu\text{m}$). Deze waarde is iets lager dan die van het duinzand dat in het Scheldegootonderzoek werd gebruikt ($D_{50} = 218 \text{ } \mu\text{m}$).

4.7.3 Watertemperatuur

De watertemperatuur tijdens de proeven was nauwelijks aan variatie onderhevig en bedroeg gemiddeld $15 \text{ } ^\circ\text{C}$.

5 Analyse meetresultaten

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de in Hoofdstuk 4 beschreven resultaten nader uitgewerkt, waarbij door combinatie van beschikbare gegevens getracht is te komen tot het boven water krijgen van het voor met name de horizontale bresgroei verantwoordelijke fysische proces.

De conclusies met betrekking tot de specifiek onderzochte aspecten komen hierbij ook aan de orde, terwijl de hierop gebaseerde breedtegroeimodule in Hoofdstuk 6 aan de orde komt.

5.2 Ontwikkeling bresbreedte

5.2.1 Algemeen

De gemeten ontwikkeling van de bresbreedte is voor alle uitgevoerde proeven gegeven in de reeds genoemde Figuur 4.4.1. In het volgende zal eerst deze ontwikkeling per onderzoeksaspect worden beschouwd. Een overzicht van de breedteontwikkeling per deelaspect is gegeven in Figuur 5.2.1 en nader toegelicht in de volgende paragrafen. Hierbij is steeds uitgegaan van proef T4 als zijnde de referentietest.

5.2.2 Effect kruinhoogte

Bij overeenkomstige hydraulische condities leidt een hogere (T5) en een lagere kruin (T3) in de loop van de tijd tot respectievelijk een kleinere en grotere breedte van de bres.

5.2.3 Effect kruinbreedte

Een relatief smallere kruin (T2 vs. T4) resulteert in een grotere bresbreedte op vergelijkbare tijdstippen na aanvang van de proef.

5.2.4 Effect helling voorland

Als blijkt uit de figuur resulteert een flauwere helling van het voorland in een duidelijk geringere breedte van de bres.

5.2.5 Effect golfaanval

Bij het beschouwen van het effect van additionele golfaanval moet een vergelijking worden gemaakt tussen de resultaten van proef T5 en T6, waarbij in beide gevallen de dam was voorzien van een hoge kruin. Golfaanval (proef T6) heeft daarbij duidelijk een vergroting van de bresbreedte tot gevolg; na 40 minuten 6,4 i.p.v. 4,8 m.

Het discontinuë verloop in de ontwikkeling van de bresbreedte voor proef T6, heeft te maken met het stapsgewijs intensiveren van de zwaarte van de golfaanval. De golfmachine werd hierbij 1,5 minuut na de start van de overstroming aangezet, waarna na respectievelijk 17 en 36 minuten de uitsturing werd verhoogd van respectievelijk 40 naar 80 % en van 80 naar 100 % (van de maximale golfhogte).

5.2.6 Effect drempelniveau

Ten aanzien van het effect van het drempelniveau is een viertal proeven van belang, te weten proef T4 als referentieproef, proef T1 als representatie van een situatie met een iets hogere drempel en de proeven T8 en T9 als representatie van een situatie met een zeer lage drempel. Vergelijking van de resultaten van proef T4 en T1 laat zien dat een hogere drempel uiteindelijk aanleiding geeft tot een geringere bresbreedte. In eerste instantie, zeg de eerste 5 minuten, is er natuurlijk nog geen verschil in de breedtegroei aanwezig aangezien de drempel dan nog geen rol van betekenis speelt. Daarna is er echter wel sprake van een significant verschil.

Vergelijking van de situatie van proef T4 en T8 (veel lagere drempel) laat zien dat ook hier in het begin geen verschil aanwezig is in de ontwikkeling van de bresbreedte. Deze fase duurt iets langer dan bij de vergelijking van de resultaten van T4 en T1, iets wat ook logisch is gezien het feit dat het hoogste drempelniveau bij deze twee proeven lager ligt en dus ook pas in een later stadium van het proces zal worden bereikt. Na dit tijdstip vertoont de situatie met afwezigheid van een drempel (T8) een geringere breedtegroei. Dit lijkt in tegenspraak met de eerdere conclusie, maar heeft vermoedelijk ook te maken met een tijdens deze proef sterk afnemende bovenwaterstand.

De resultaten van de extra proef (T9) zijn met het oogpunt op de breedtegroei als een herhaling van proef T8 te beschouwen. Rekening houdend met de tweezijdigheid van de breedtegroei in proef T9, vallen de resultaten in de nog relevante eerste tien minuten na de start van de proef vrijwel samen. De onderlinge verhouding tussen de bresbreedte op vergelijkbare tijdstippen overtreft de factor twee enigermate, iets wat vermoedelijk te maken heeft met de bij T9 gebruikte hogere beginwaterstand.

5.2.7 Conclusies

De ontwikkeling van de bresbreedte blijkt kwalitatief redelijk goed te begrijpen. In het volgende is de tijdsontwikkeling van de groeisnelheid van de bres in beschouwing genomen.

5.3 Ontwikkeling bresgroeisnelheid

5.3.1 Algemeen

Gelet op de nagestreefde fysische modellering is met name de groeisnelheid van de bresbreedte van belang. In het volgende is dan ook, vergelijkbaar aan de opzet van Paragraaf 5.2, de tijdsontwikkeling van de tijdsgradiënt van de breedtegroei nader uitgewerkt. De groeisnelheid β is hierbij gedefinieerd als:

$$\beta(t) = \frac{db(t)}{dt} \quad (5.3.1)$$

Opgemerkt moet worden dat het hierbij dus per definitie gaat om de enkelzijdige groei van de bres, waardoor de tijdsontwikkeling van de bresbreedte in het geval van de hier onderzochte half-symmetrische opstelling dus volgt uit:

$$b(t) = b_o + \int_t \beta(t) dt \quad (5.3.2)$$

Voor proef T9 geldt echter:

$$b(t) = b_o + 2 \int_t \beta(t) dt \quad (5.3.3)$$

De uit de waargenomen breedteontwikkeling afgeleide breedtegroeisnelheid is voor alle uitgevoerde proeven samengebracht in Figuur 5.3.1, waarbij de berekende verbredingssnelheid β gemakshalve is uitgedrukt in m/min. Initieel blijkt de snelheid 0,2 tot 0,4 m/min, waarna deze gestaag afneemt tot slechts enkele cm's per min in de eindfase.

In het volgende zal deze ontwikkeling per onderzoeksaspect worden beschouwd. Een overzicht van de ontwikkeling van de breedtegroei is per aspect gegeven in Figuur 5.3.2.

5.3.2 Effect kruinhoogte

Een hogere of lagere kruin komt direct tot uitdrukking in de grootte van de verbredingssnelheid, waarbij een lage kruin een hogere en een hoge kruin een lagere snelheid laat zien.

5.3.3 Effect kruinbreedte

Ook het effect van de kruinbreedte is vrij duidelijk; een smallere kruin leidt tot een grotere erosiesnelheid.

5.3.4 Effect helling voorland

Ten aanzien van het effect van de voorlandhelling resulteert een flauwere helling in een relatief lagere erosiesnelheid.

5.3.5 Effect golfaanval

De aanwezigheid van golfaanval leidt tot een grotere erosiesnelheid.

5.3.6 Effect drempelniveau

Ten aanzien van het effect van het drempelniveau blijkt opnieuw dat er in de beginfase nauwelijks verschillen aanwezig zijn tussen de diverse proeven. Voor een nadere interpretatie dient een relatie te worden gelegd met de in de bres optredende waterbeweging.

5.3.7 Conclusies

Beschouwing van de tijdsontwikkeling van de bresgroeisnelheid geeft reeds inzichtelijke resultaten. Meer fysisch inzicht in de achtergronden hiervan kan worden verkregen door deze erosiesnelheid te koppelen aan de waterbeweging in de bres. De kwantificering hiervan komt in de volgende paragraaf aan de orde.

5.4 Waterbeweging in de bres

5.4.1 Algemeen

Een goede kwantificering van de momentane waterbeweging in de bres is nodig om een fysische relatie te leggen met de optredende erosieprocessen.

Ten aanzien van deze waterbeweging zijn verschillende niveaus van detail te onderkennen, te weten, het totale debiet Q_b uitgedrukt in m^3/s , het debiet q_b in $m^3/m^1/s$ en een gemiddelde snelheid v_b in m/s .

5.4.2 Totale bresdebiet

De tijdsontwikkeling van het totale debiet kan in principe op een drietal verschillende manieren worden bepaald, te weten:

- uit het produkt van waargenomen bresbreedte B , de visueel waargenomen snelheden in de bres v_b en de geschatte waterdiepte boven de drempel d_b (eventueel afgeleid uit gemeten bovenstroomse waterstanden);
- uit bewerking van de waterstands- en snelheidssignalen als gemeten in het afstroomkanaal;
- uit bewerking van de snelheden en waterstanden in de bovenstroomse sectie door het debiet per instroomvak af te schatten.

De laatste bewerking is ingewikkeld, levert vermoedelijk onnauwkeurige resultaten en is daarom ook buiten beschouwing gelaten. De eerste methode levert slechts incidentele waarden.

Een voorbeeld van een resultaat van de tweede methode is gegeven in Figuur 5.4.1, waarin het (gladgestreken) tijdsverloop is gegeven van het debiet in het afstroomkanaal. Het debiet is hierbij bepaald uit het produkt van de snelheid (SHM6) en het van de waterstand afhankelijke effectieve doorstroomprofiel.

Als blijkt uit deze figuur neemt het debiet na aanvang van de overstroming vrij snel toe tot de waarde die gerelateerd is aan de grootte van de pompcapaciteit. Deze laatste blijkt gelijk aan $0,5 m^3/s$. Bij het bereiken van de pompcapaciteit neemt de waterstand in het afstroomkanaal versneld toe (bovenste figuur) en daarmee de snelheid af (middelste figuur).

5.4.3 Eenheidsdebiet

Een goede indicatie omtrent de grootte van het eenheidsdebiet q_b kan worden verkregen door het produkt van optredende snelheden en geschatte waterdiepten te beschouwen, door deze onder gebruikmaking van een overlaatformulering direct af te schatten uit de bovenstroomse waterstand of door het in de vorige sectie besproken totaaldebiet te delen door de waargenomen bresbreedte.

Bij de verdere verwerking is in principe gebruik gemaakt van de schatting met behulp van overlaatformules, waarbij de aldus verkregen resultaten zijn vergeleken met de uitkomsten van de beide andere methoden.

In de fase waarop de pompcapaciteit bereikt is en het totale debiet dus gelijk blijft neemt het eenheidsdebiet omgekeerd evenredig af met de toename in de bresbreedte.

5.4.4 Stroomsnelheden

De stroomsnelheid in de bres v_b is bepaald uit overlaatformules waarbij een vergelijking is gemaakt met de visueel waargenomen snelheden (zie Paragraaf 4.6.4).

De resultaten van deze bewerking zijn samengebracht in Figuur 5.4.2. Het vaststellen van de snelheden in het geval van een lage drempel (T8 en T9) is op deze wijze echter nogal problematisch.

5.4.5 Conclusies

Nu de waterbeweging in de bres ook in meer kwantitatieve zin bekend is, zal in de volgende paragraaf de relatie met de waargenomen breedtegroeisnelheid aan de orde komen.

5.5 Relatie bresgroei - waterbeweging

5.5.1 Algemeen

In het volgende is getracht een relatie te leggen tussen de waargenomen breedtegroeisnelheid van de bres en de karakteristieken van de waterbeweging.

In eerste instantie is daarbij gekeken naar de relatie met de watersnelheid in de bres; in de volgende sectie komen ook meer volumetrische benaderingen aan de orde.

De directe relatie tussen de geschatte snelheden in de bres en de eenzijdige verbredingssnelheid is gegeven in Figuur 5.5.1. Hiertoe is bij elk van de momentane waarden van de erosiesnelheid de bij het betreffende tijdstip van toepassing zijnde watersnelheid bepaald. De verschillende datapunten per individuele proef worden hierbij nu dus in de tijd gezien van rechts naar links doorlopen; de lagere watersnelheden in de eindfase gaan samen met marginale erosiesnelheden.

Afgezien van de resultaten voor proef T8 en T9 (met onjuiste, te hoge snelheden) lijkt er een grootschalig verband zichtbaar te worden, waarbij een toenemende snelheid in de bres samengaat met een grotere zijdelingse erosiesnelheid van de dam.

Een nadere presentatie van deze resultaten per onderzoeksaspect is gegeven in Figuur 5.5.2.

5.5.2 Effect kruinhoogte

Een hogere of lagere kruin komt direct tot uitdrukking in de grootte van de verbredingssnelheid, waarbij voor een bepaalde stroomsnelheid in de bres een lage kruin een hogere en een hoge kruin een lagere verbredingssnelheid laat zien. Dit verschil is het sterkst aanwezig in de beginfase waarbij de stroomsnelheden nog groter zijn dan zeg 1,3 m/s. In de eindfase waarbij de waterstand in de bres is gezakt, lijkt de aanwezigheid van een hogere of lagere kruin iets minder relevant te worden. De verbredingssnelheid wordt dan haast onafhankelijk van de exacte hoogte van de kruin. De relatie voor de extra lang doorgezette T5-proef laat zien dat bij verdere afname van de snelheid tot orde 1,05 m/s de verbredingssnelheid zeer sterk reduceert. Blijkbaar is er hierbij dus sprake van een soort van 'begin-van-bresgroei' (of eigenlijk 'eind-van bresgroei').

5.5.3 Effect kruinbreedte

Het effect van de kruinbreedte blijft vrij eenduidig; een smallere kruin resulteert bij dezelfde hydraulische condities in de bres tot een grotere erosiesnelheid.

5.5.4 Effect helling voorland

Ten aanzien van het effect van de voorlandhelling resulteert een flauwere helling bij dezelfde stroomsnelheden in een relatief lagere erosiesnelheid. Dit blijkt nog sterker het geval bij lagere stroomsnelheden.

5.5.5 Effect golfaanval

De aanwezigheid van golfaanval leidt over de gehele linie tot een grotere erosiesnelheid. Ten opzichte van de situatie zonder golfaanval lijkt er naast deze amplificatie-factor echter ook sprake van een verschuiving van het 'begin-van-bresgroei'-punt.

5.5.6 Effect drempelniveau

Ten aanzien van het effect van het drempelniveau blijkt een hogere drempel (met lagere snelheden in de bres) aanleiding te geven tot een relatief grotere bresgroeisnelheid. Dit lijkt een onverwachte uitkomst maar heeft alles te maken met de grootte van het te eroderen volume; dit is immers veel kleiner bij een hogere ligging van de drempel.

5.5.7 Conclusies

De gegeven relaties tussen waterbeweging en bresgroeisnelheid leveren inzichtelijke verbanden, waarbij onder andere de aanwezigheid van een 'begin-van-bresgroei'-criterium naar voren komt. Een nadere koppeling met het te eroderen volume (doorsnede van de dam) lijkt noodzakelijk en zal dan ook in de volgende sectie nader worden uitgewerkt.

5.6 Volumetrische relaties

5.6.1 Algemeen

Naast de hydraulische condities is de bres zal ook het te eroderen damvolume een rol van betekenis spelen. In het volgende is de erosiesnelheid van de dam dan ook niet meer uitgedrukt in m maar in m³ per tijdseenheid.

Deze volumetrische erosiesnelheid is bepaald uit het produkt van de eerder bepaalde verbredingssnelheid β (in m/min) en de damdoorsnede boven het drempelniveau A_d .

Een overzicht van deze bewerking is gegeven in Figuur 5.6.1 en in detail in Figuur 5.6.2. Een bespreking van deze resultaten is gegeven in het volgende, waarbij steeds een vergelijking gemaakt is met die van Figuur 5.5.2.

5.6.2 Effect kruinhoogte

Ten opzichte van de in Figuur 5.5.2 gegeven relaties is er door het mede beschouwen van het te eroderen volume een duidelijke reductie in de spreiding van de verbanden voor de

verschillende proeven verkregen. In de eindfase vallen de datapunten welhaast samen. Dit geldt echter nog niet voor de beginfase waarbij een hogere of lagere kruin nog steeds een respectievelijk kleinere of grotere volumetrische erosiesnelheid vertoont. Vermoedelijk speelt hierbij het verschil tussen het droge en het natte deel van de doorsnede nog een rol van betekenis.

5.6.3 Effect kruinbreedte

In vergelijking tot het in Figuur 5.5.2 gegeven verband is er nu sprake van een veel betere beschrijving van het kruinbreedte-effect. Voor de situatie waarbij de snelheden beneden 1,3 m/s zijn is sprake van een kruinbreedte-onafhankelijke volumetrische erosie; bij een bepaalde snelheid hoort slechts een bepaalde erosiewaarde (in m^3/min). Initieel lijkt echter een smallere kruin juist minder snel te eroderen (iets wat mogelijkwijze te maken heeft met de sterk gekromde toestroming en dus overschatte stroomsnelheidswaarden).

5.6.4 Effect helling voorland

Het effect van het te eroderen volume komt duidelijk naar voren bij het bekijken van het effect van een afwijkende helling van het voorland. Het verschil als eerder gegeven in Figuur 5.5.2 valt bij deze beschouwing volledig weg en maakt dat de datapunten van proeven T4 en T7 op elkaar vallen.

5.6.5 Effect golfaanval

Beschouwing van de volumetrische erosiewaarden hebben geen effect op de eerdere conclusies ten aanzien van het effect van de golfaanval (zie Paragraaf 5.5.5), daar in beide proeven hetzelfde dwarsprofiel aanwezig was.

5.6.6 Effect drempelniveau

Naar aanleiding van de nog verwarrende resultaten van Figuur 5.5.2 is het effect van een hogere drempel (proef T1) nu verdwenen en vallen de resultaten in het verlengde van die van proef T4. Het effect van een wijziging in het drempelniveau wordt dus volledig afgedekt door het volgen van deze volumetrische benadering.

5.6.7 Conclusies

Het toepassen van een volumetrische benadering bij de vaststelling van de erosiesnelheden maakt dat het overgrote deel van de onderzochte aspecten eenvoudig kan worden verklaard.

Teneinde het af te voeren sedimentvolume te relateren aan het stroomcapaciteit in de bres is in Figuur 5.6.3 de volumetrische erosiesnelheid uitgezet als functie van het eenheidsdebiet. Afgezien van de resultaten van de golf-proef T6 lijkt er welhaast sprake van een lineair verband.

Figuur 5.6.4 geeft dezelfde relatie, waarbij nu echter de resultaten van de golf-proef en de 3D-proeven achterwege zijn gelaten. Bovendien zijn tevens de eerste twee meetpunten van elke proef (de aanloopfase) verwijderd.

Dit opent dan ook de weg naar een inzichtelijke rekenmodule voor de breedte-groei, waarbij de breedtegroeisnelheid in principe omgekeerd evenredig is met de doorsnede van de dam, evenredig is met het eenheidsdebiet door de bres en een dimensieloze snelheidsafhankelijke factor (zie Hoofdstuk 6). Mogelijke verbeteringen hierin kunnen nog verkregen worden door het apart in beschouwing nemen van het natte en het droge (instortende) oppervlak van de doorsnede.

6 Modelling breedtegroei

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is een voorzet gegeven voor een eerste versie van een in een rekenmodel te gebruiken bresgroeimodule. Bij de formulering ervan is rekening gehouden met de in Hoofdstuk 5 gegeven resultaten van de analyse van de beschikbare meetgegevens en verschillende, in de volgende paragraaf nader gespecificeerde, overwegingen.

6.2 Uitgangspunten

Bij de formulering van de breedtegroeimodule is gestreefd naar een zo eenvoudig mogelijk, fysisch inzichtelijke opzet, waarbij gebruik is gemaakt van met name de ruimtgemiddelde concentratie in de nabijheid van de bresuiteinden.

6.3 Basisformulering

Conform de in Hoofdstuk 5 gepresenteerde resultaten is de breedtegroei β (in m/s) recht evenredig met het quotiënt van de grootte van het eenheidsdebiet q_b (in $\text{m}^3/\text{m}^1/\text{s}$) en de damdoorsnede A_d (in m^2), conform:

$$\beta = C'_b \frac{q_b}{A_d} \quad (6.3.1)$$

waarin C'_b een niet-dimensieloze, snelheidsafhankelijke constante, die gerelateerd is aan de ruimtgemiddelde sedimentconcentratie nabij de rand van de bres.

Het eenheidsdebiet q_b in de formulering volgt hierbij uit de normale overlaatrelaties. Ten aanzien van de damdoorsnede A_d is vooralsnog geen onderscheid gemaakt tussen het droge en het natte deel van de doorsnede.

De dimensie van C'_b (in m) hangt daarbij samen met de breedte van de randzone b_r , waarin deze ruimtgemiddelde concentratie \bar{c} is gedefinieerd. Er geldt daarbij immers:

$$\beta A_d = q_b b_r \bar{c} \quad (6.3.2)$$

ofwel:

$$\beta = b_r \bar{c} \frac{q_b}{A_d} \quad (6.3.3)$$

Als de breedte van deze randzone b_r evenredig is met de waterdiepte in de bres d_b (niet onwaarschijnlijk uitgaande van een min of meer vaste profielvorm in deze richting) gaat deze uitdrukking over in:

$$\beta = C_b \frac{q_b d_b}{A_d} \quad (6.3.4)$$

waarin de C_b -parameter een dimensieloze constante is en te interpreteren is als:

$$C_b = \bar{c} \frac{b_r}{d_b} \quad (6.3.5)$$

De C_b -waarde hangt daarbij dan samen met de dieptegemiddelde concentratie in de randzone \bar{c} . Uitgaande van een breedtezone b_r gelijk aan drie maal de waterdiepte d_b en een bovengrens voor de dieptegemiddelde concentratie in deze zone van $\bar{c} \approx 5\%$, geldt als orde van grootte $C_b \leq 0,15$.

In hoeverre de C_b -waarde nog afhankelijk is van de snelheid in de bres mag blijken uit nadere analyse van de beschikbare meetgegevens.

Uitgaande van Vgl.(6.3.4) kan de snelheids-afhankelijkheid van de C_b -waarde worden afgeleid uit de mede in Figuur 5.6.4 gegeven meetdata. Uit Vgl.(6.3.4) volgt immers:

$$C_b = \frac{\beta A_d}{q_b d_b} \quad (6.3.6)$$

De resultaten van deze bewerking zijn samengebracht in Figuur 6.3.1, waarin per proef (T1 t/m T7) de relatie tussen de snelheid in de bres v_b en de C_b -waarde is gegeven. De variatie in de C_b -waarde is relatief gering, waarbij alle proeven zonder golfaanval $C_b = 0,06 \sim 0,08$ als resultaat leveren.

De aanwezigheid van golfaanval (proef T6) leidt tot een vergroting van de C_b -waarde.

Bij lagere snelheden stopt de breedtegroei en neemt de berekende C_b -waarde, conform de verwachting, sterk af.

Beschouwing van de grootte van de C_b -waarde leidt uitgaande van een breedtezone b_r gelijk aan opnieuw drie maal de waterdiepte d_b tot een niet onwaarschijnlijk lijkende, dieptegemiddelde concentratie in deze zone van $\bar{c} = 2 \sim 3\%$.

In Figuur 6.3.2 is per proef de tijdsontwikkeling van de berekende C_b -waarde gegeven. Hieruit blijkt dat er gemiddeld genomen sprake is van een 'echte' constante, waarbij de waarden van de referentieproef T4 netjes centraal liggen op $C_b \approx 0,07$. Afwijkingen hiervan treden op onder invloed van additionele golfaanval (relatief hogere C_b -waarden) en in het eindstadium van de proeven waarbij een kritische waarde van de snelheid bijna wordt onderschreden.

Een formulering die met beide aspecten rekening houdt is:

$$\begin{aligned} C_b &= \xi_1 \hat{C}_b & \{ V_b \geq \xi_2 V_c \} \\ C_b &= 0 & \{ V_b < \xi_2 V_c \} \end{aligned} \quad (6.3.7)$$

waarin ξ_1 een amplificatiefactor die het effect van additionele golfaanval verdisconteerd en \hat{C}_b de eerder gekwantificeerde basiswaarde (zonder golfaanval).

Deze relatie geldt overigens alleen voor $V_b > \xi_2 V_c$ en dus als de stroomsnelheden in de bres een kritieke waarde overtreffen, waarbij ξ_2 een reductiefactor op de kritieke waarde als gevolg van golfaanval.

Ten aanzien van de kwantificering van de amplificatiefactor ξ_1 kan gebruik worden gemaakt van de resultaten van de proeven T4, T5 en T6. In Figuur 6.3.3 is, uitgaande van de basiswaarde $\hat{C}_b = 0,07$, de tijdsontwikkeling van de amplificatiefactor ξ_1 gegeven. Gegeven het feit dat er bij de aansturing van het golfschot onderscheid kan worden gemaakt tussen een fase met nog geringe golfaanval (tot 20 minuten na de start; uitsturing 40%) en zware golfaanval (na 20 minuten; uitsturing 80%) dient de globale grootte van de ξ_1 -waarde in elk der fasen worden beschouwd.

Op basis van hiervan geldt dus voor geringe golfaanval $\xi_1 \approx 1,5$ en voor zware golfaanval $\xi_1 \approx 2,5$, hetgeen duidt op een significante versnelling van het breedtegroeiproces bij aanwezigheid van golfaanval.

Ten aanzien van de kwantificering van de kritieke waarde V_c kan gebruik worden gemaakt van de resultaten als reeds gegeven in Figuur 5.6.1, waarin de erosiesnelheid als functie van de snelheid in de bres gegeven is. Uit deze gegevens kan de snelheid waarbij er sprake is van erosiesnelheid nul door extrapolatie worden bepaald als gegeven in Figuur 6.3.4. Hieruit komt naar voren dat voor de kritieke snelheid blijkbaar bij benadering geldt $V_c \approx 1,0$ m/s. Beschouwing van de resultaten voor test T6 resulteert in $0,75$ m/s als kritieke waarde zodat voor de ξ_2 -waarde blijkbaar geldt $\xi_2 \approx 0,75$.

6.4 Conclusies

De voorgestelde formulering is eenvoudig en heeft de mogelijkheid tot het eenvoudig inbrengen van de effecten van golfaanval en/of grondeigenschappen. Bovendien is sprake van fysisch relevante parameters waardoor 'ontploffen' van de formulering eenvoudig kan worden voorkomen.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

De conclusies van het uitgevoerde onderzoek ten aanzien van de onderzochte aspecten kunnen als volgt worden samengebracht.

Een lagere en dus minder omvangrijke kruin resulteert bij de zelfde afvoercapaciteit (vergelijkbare hydraulische conditie in de bres) in een grotere verbredingssnelheid. De uitkomsten van de uitgevoerde analyse geven aan dat een en ander dan ook sterk gerelateerd is aan de grootte van de te eroderen doorsnede (volume per m¹).

Het effect van de kruinbreedte is vergelijkbaar met dat van de kruinhoogte. Een geringere kruinbreedte en dus een geringere doorsnede resulteert in toenemende erosiesnelheden.

Een flauwer voorland leidt tot een gereduceerde breedtegroeisnelheid, iets wat deels gerelateerd is aan de daarmee grotere dwarsdoorsnede, maar anderzijds ook te maken heeft met de toenemende wrijvingsverliezen tijdens de aanstroming van water naar de bres.

Additionele golfaanval leidt tot een vergroting van de erosiesnelheden, waardoor het proces sneller verloopt maar eveneens langer zal doorgaan. In termen van modellering: een extra opwoeling en een reductie van het begin van beweging.

De algemene conclusie is dat het proces van breedtegroei goed te beschrijven is door de doorsnede van de te eroderen dam en het eenheidsdebiet door de bres te beschouwen. Het effect van de stroomsnelheid komt tot uitdrukking in een soort dimensieloze factor die iets zegt over de gemiddelde concentratie.

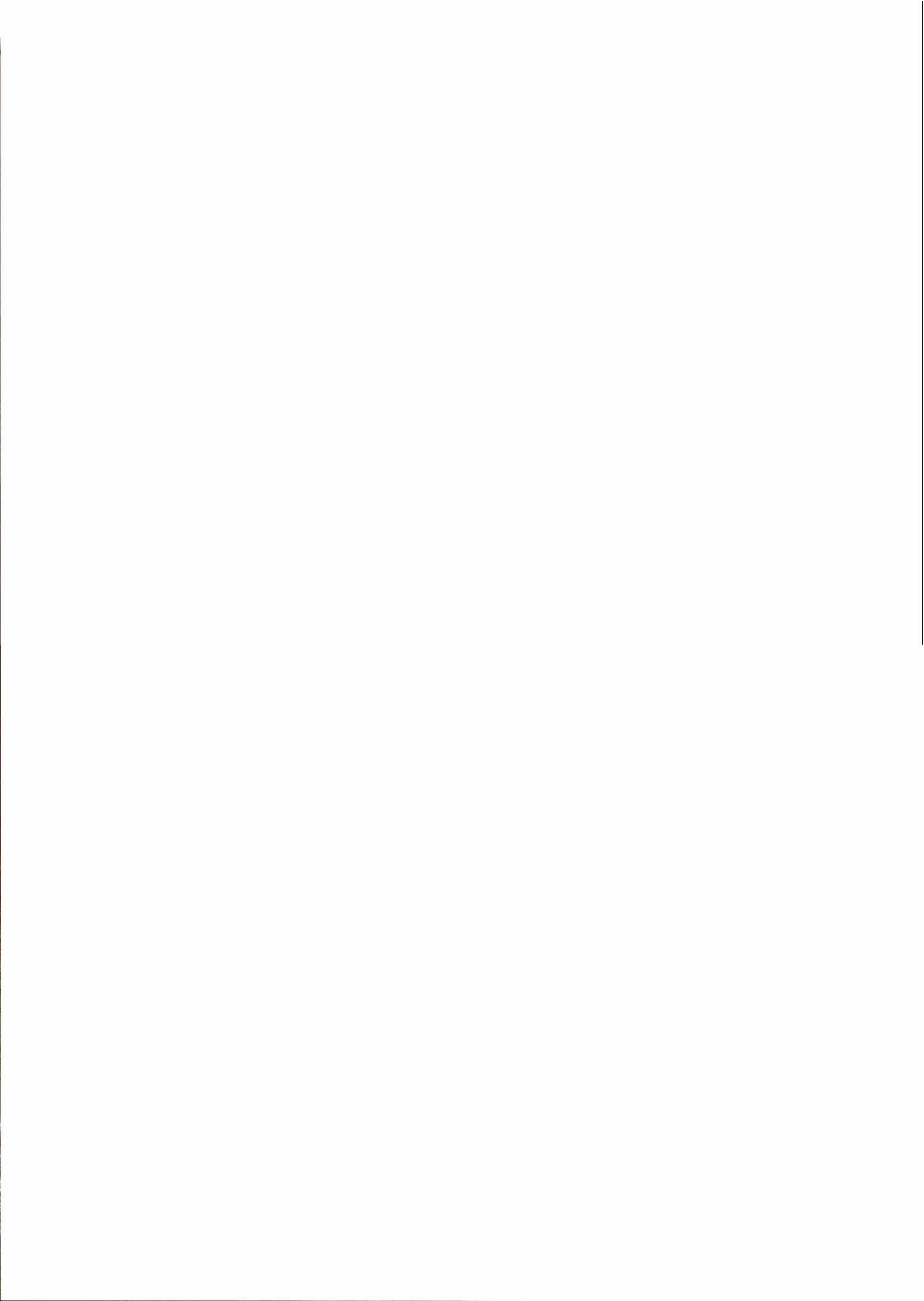
7.2 Aanbevelingen

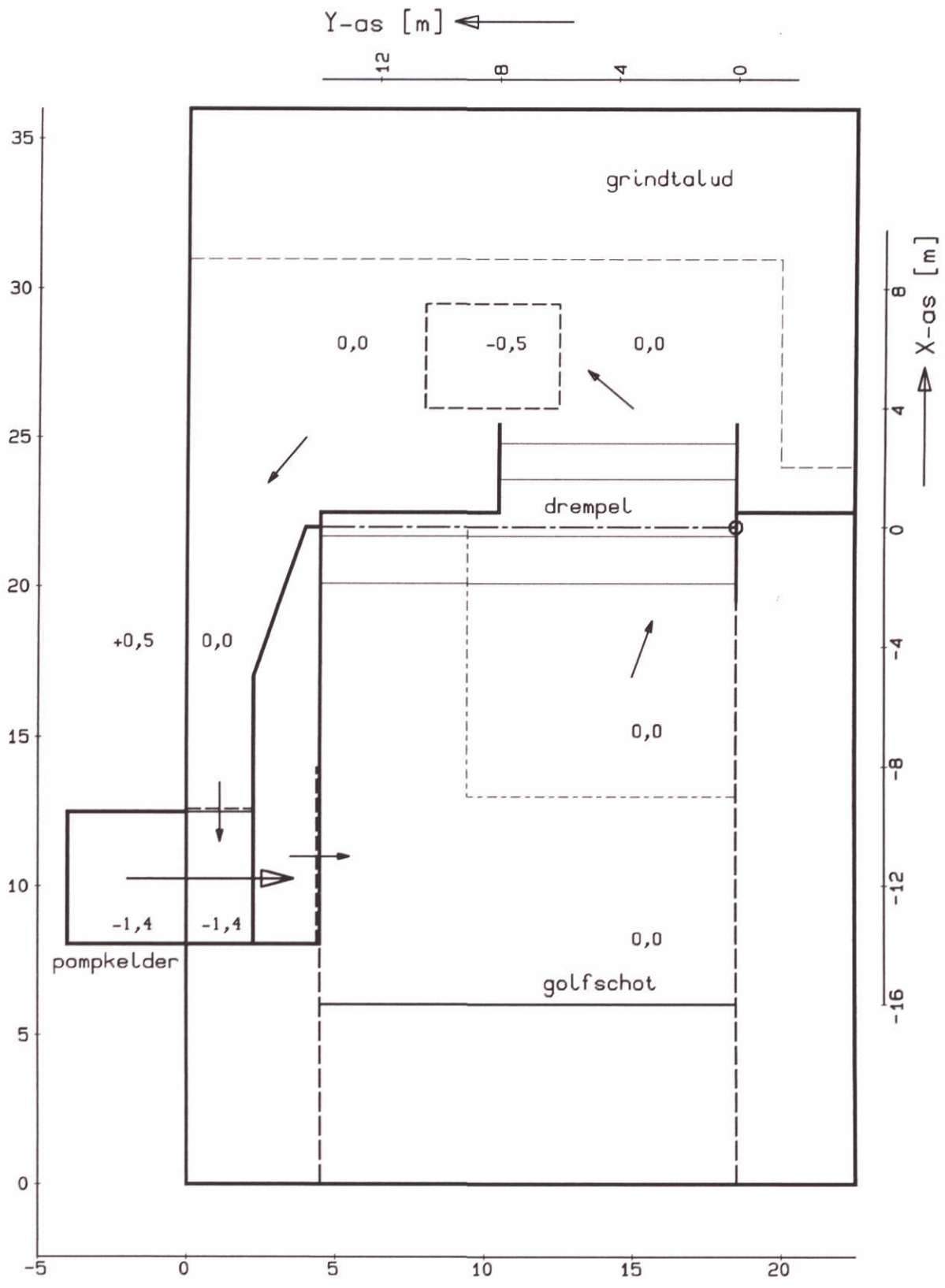
Aanbevolen wordt om de in Hoofdstuk 7 beschreven breedtegroeimodule te implementeren in de basisversie van het bresgroeiemodel en vervolgens dit model te valideren aan de hand van de in het prototype beschikbare meetgegevens (Zwinproeven).

De nog noodzakelijke verbeteringen betreffen de kwantificering van het effect van afwijkende materialen zoals klei en het verrekenen van het effect van verdedigingsconstructies. Ook ten aanzien van de formulering van met name de macht in de dimensieloze stroomsnelheidsfactor bestaat nog veel onzekerheid.

Literatuur

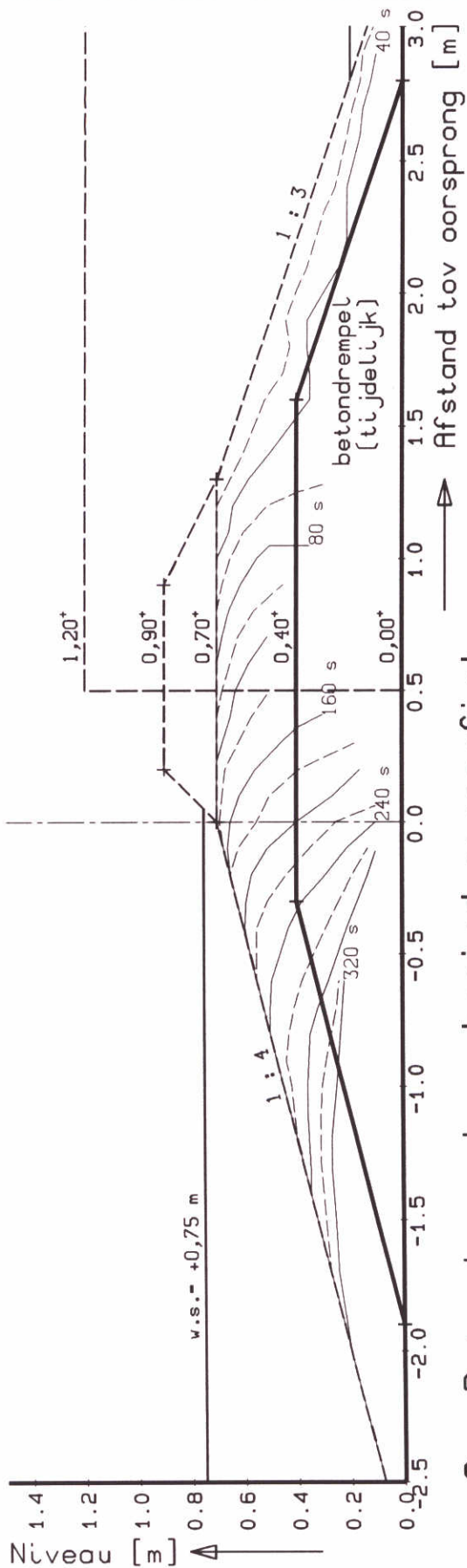
- Looff, A.P. de, 1990: Bresgroei in een zanddijk, feitenverslag van een proef, Rapport WBA-R-90.041, Afd. Advisering Waterbouw, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat, Delft.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1992a: Bresgroei; Deel II: 2DV ontwikkeling initiële bres, Band A: Verslag modelonderzoek Scheldegoot, augustus 1992.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1992b: Bresgroei; Deel II: 2DV ontwikkeling initiële bres, Band B: Analytisch model, augustus 1992.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1993: Bresgroei; Deel IV: Pragmatische modellering breedtegroei, december 1993.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1994: Bresgroei; Deel I: Mathematisch model, Band B: Inventarisatie sedimenttransport-formuleringen voor bresgroeimodellering, maart 1994.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1995: Bresgroei; Deel I: Mathematisch model, Band A: Hoofdrapport, juni 1996.



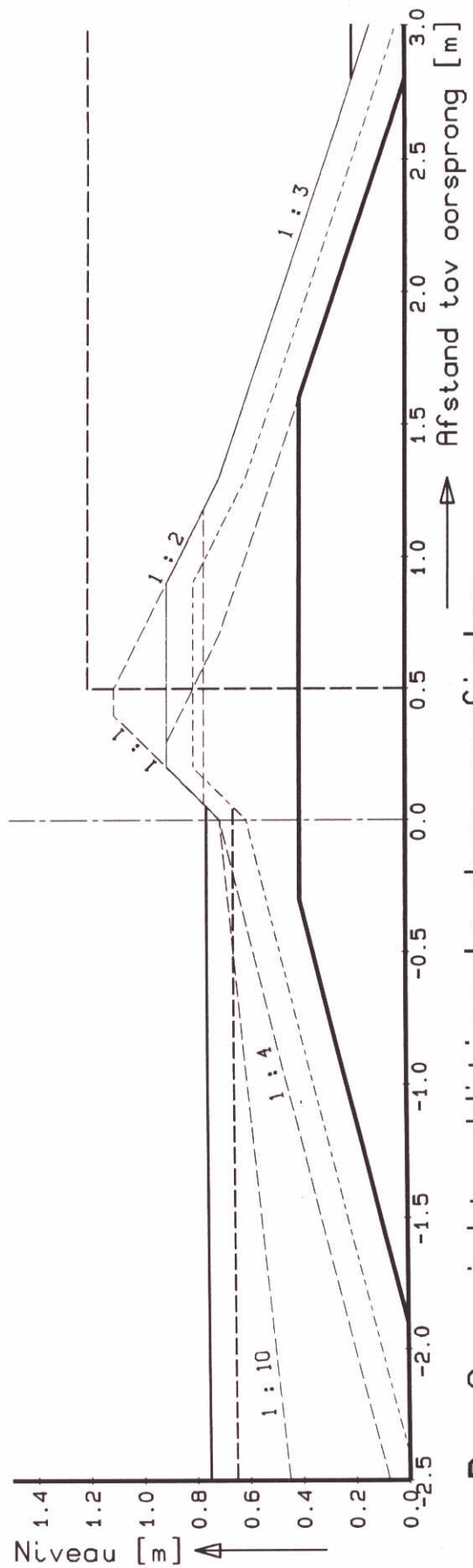


[niveau's tov bakbodem]

| | | |
|--|-----------|----------------|
| OVERZICHT INRICHTING SCHELDEBAK T.b.v. 2DH/3D-onderzoek bresgroei | | "SBAK" |
| | | Schaal 1 : 200 |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H1242-III | FIG.3.2.1 |



A - Betondrempel en basisdwarsprofiel
 (incl. resultaat 2DV-ontwikkeling Scheldegoot; proef T5A)



B - Overzicht additionele dwarsprofielen

DWARSDOORSNEDE DREMPEL/BASISPROFIEL
 Proef T4 / Schets overige doorsn.

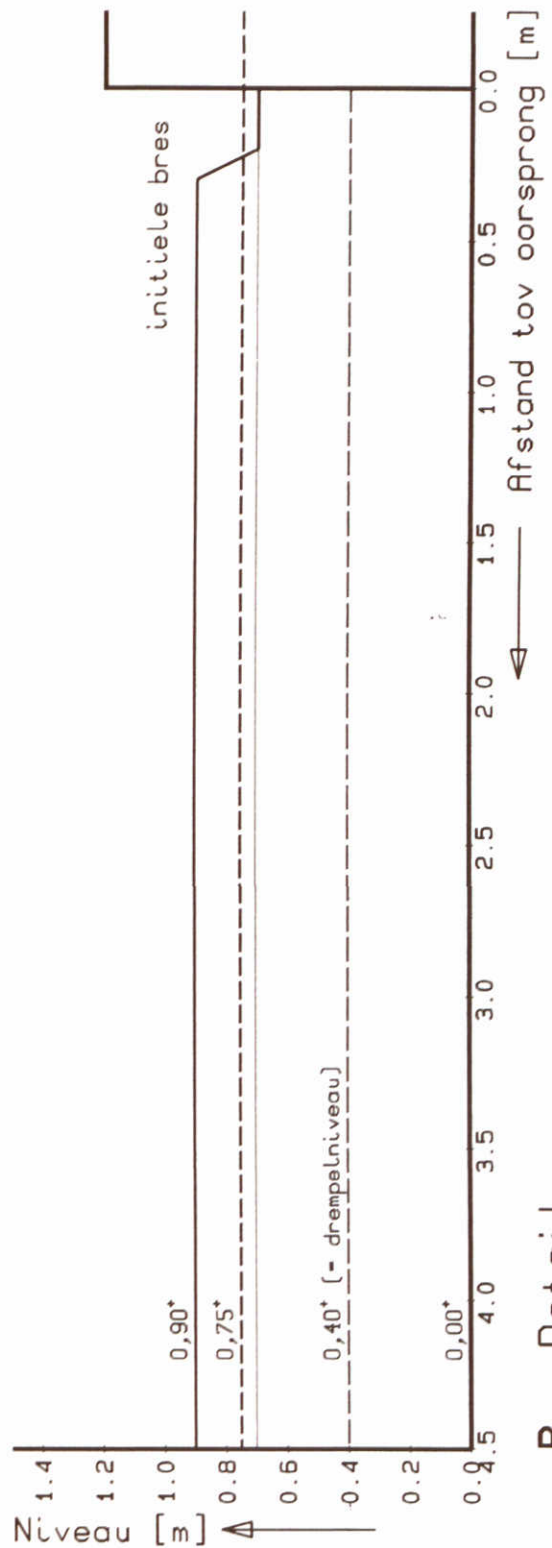
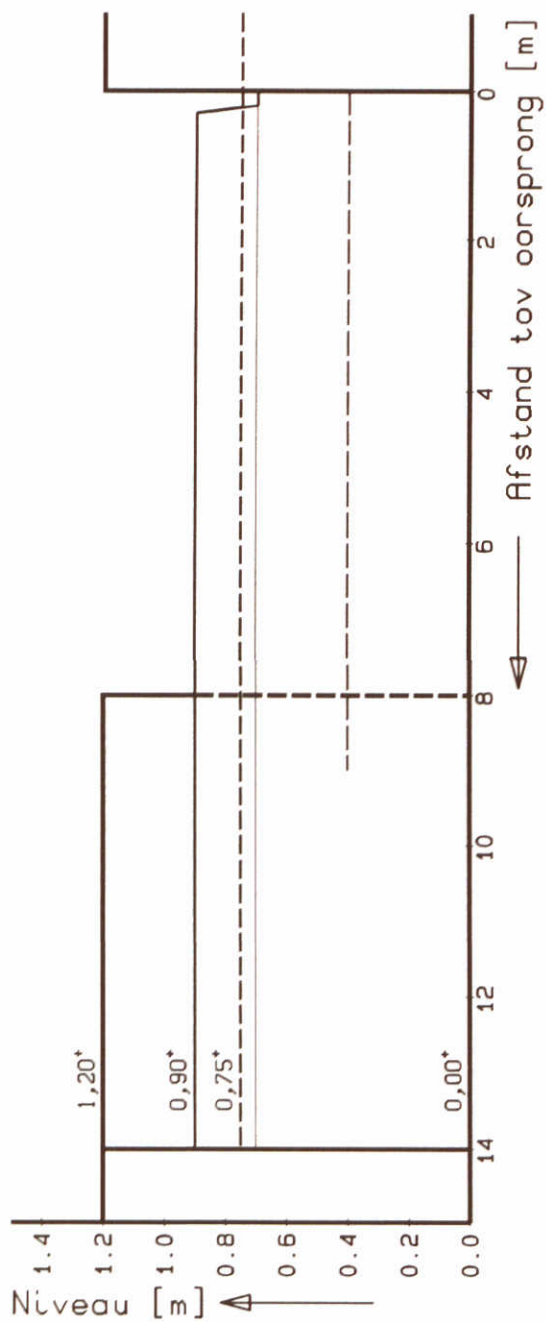
"DDRSN"

Schaal 1 : 25

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.3.3.1



LANGSAANZICHT DREMPSEL/BASISPROFIEL
Proeven T2/4/7/8

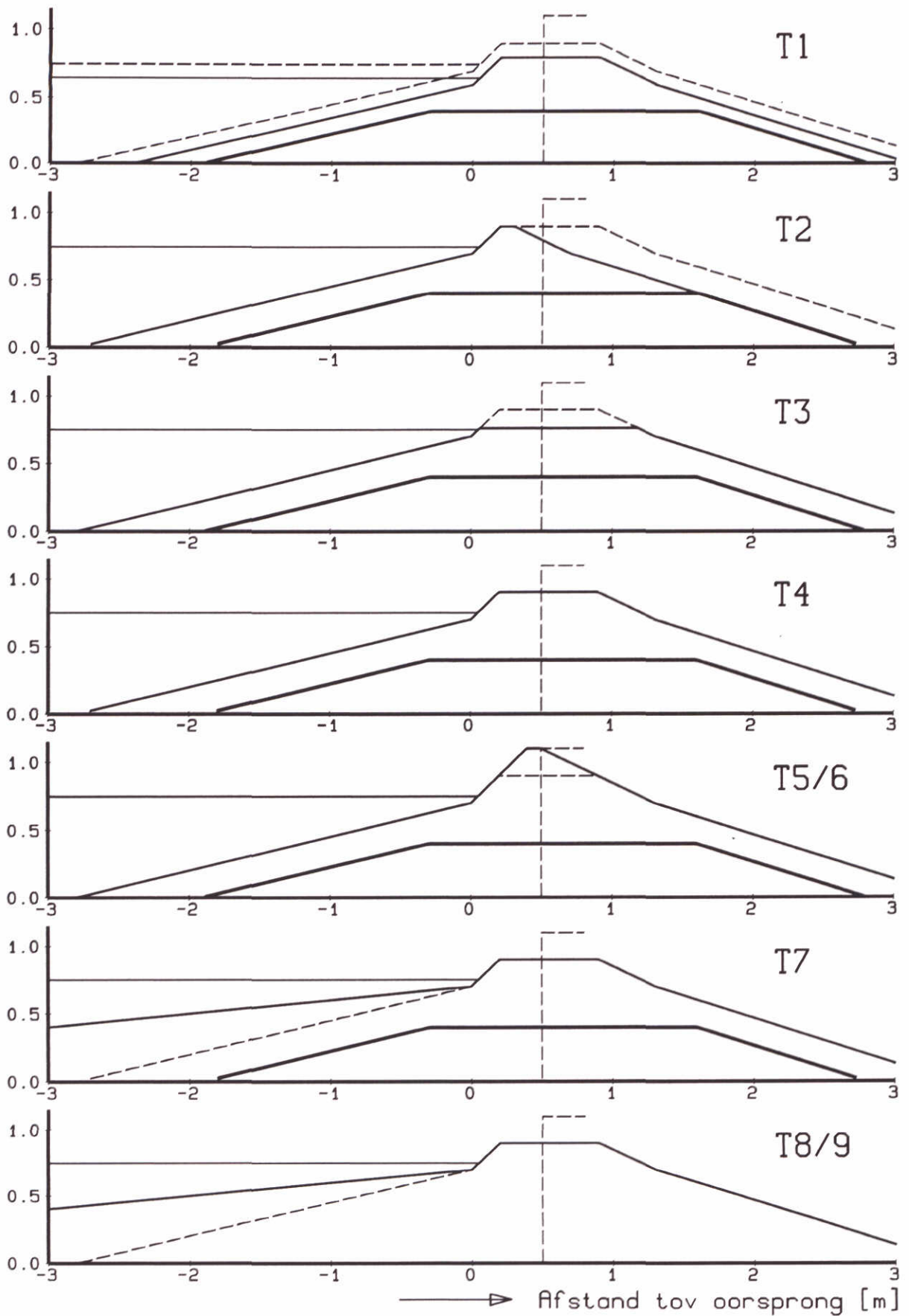
"LDRSN"

School 1 : 25

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.3.3.2



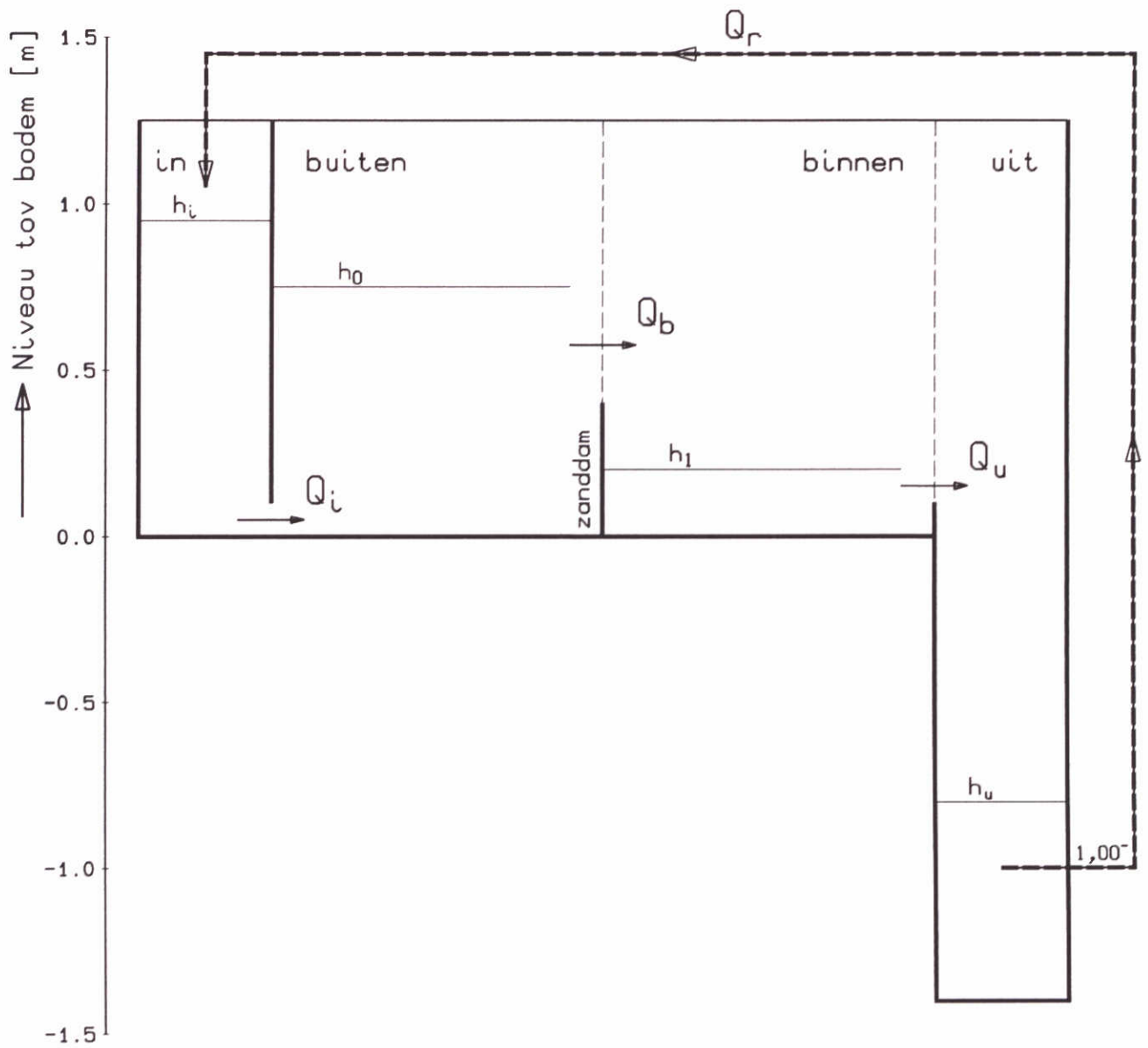
OVERZICHT ALLE DWARSPROFIELEN
 Proeven T1 t/m T9

"PROF"

Schaal 1 : 40

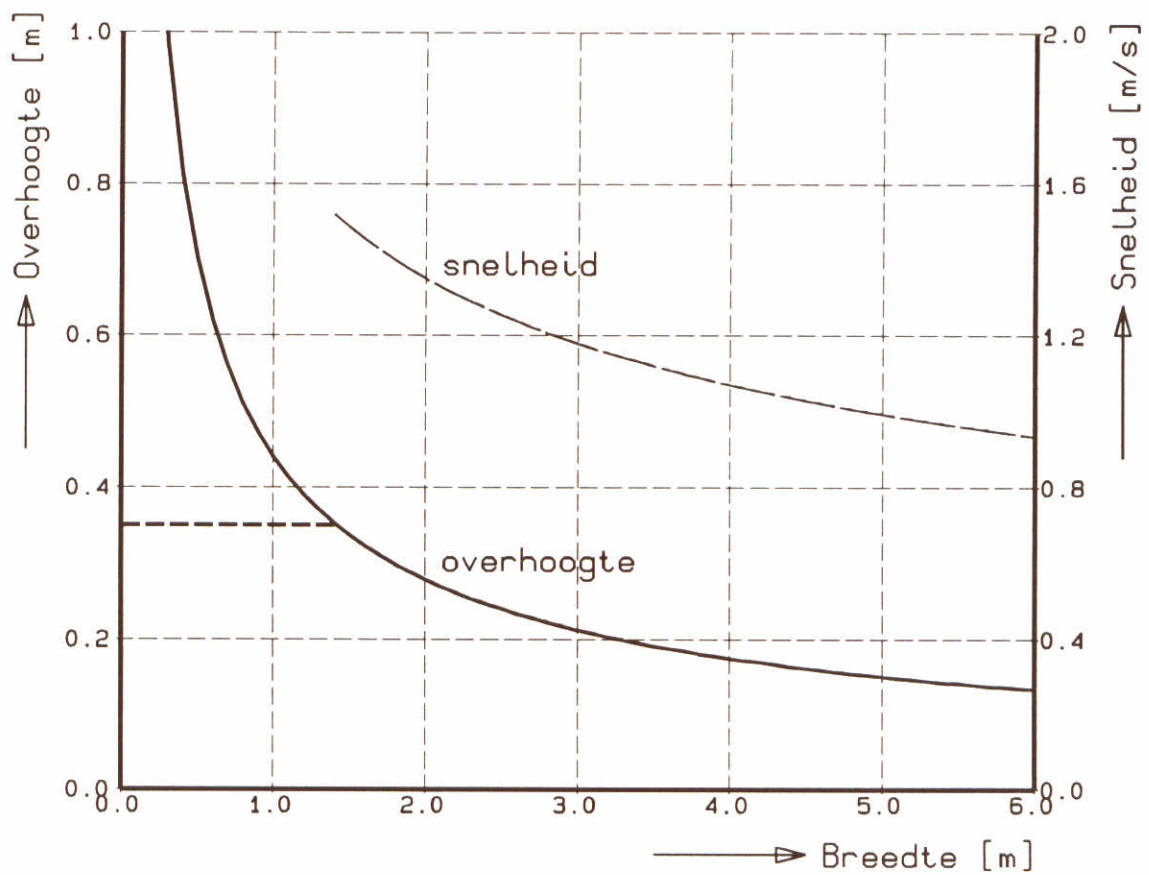
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III FIG.3.3.3



SCHEMATISCHE WEERGAVE CIRCULATIE

"BASSIN"



[overhoogte = buitenwaterstand - bresniveau]

RELATIE BREEDTE - OVERHOOGTE
voor gegeven debiet

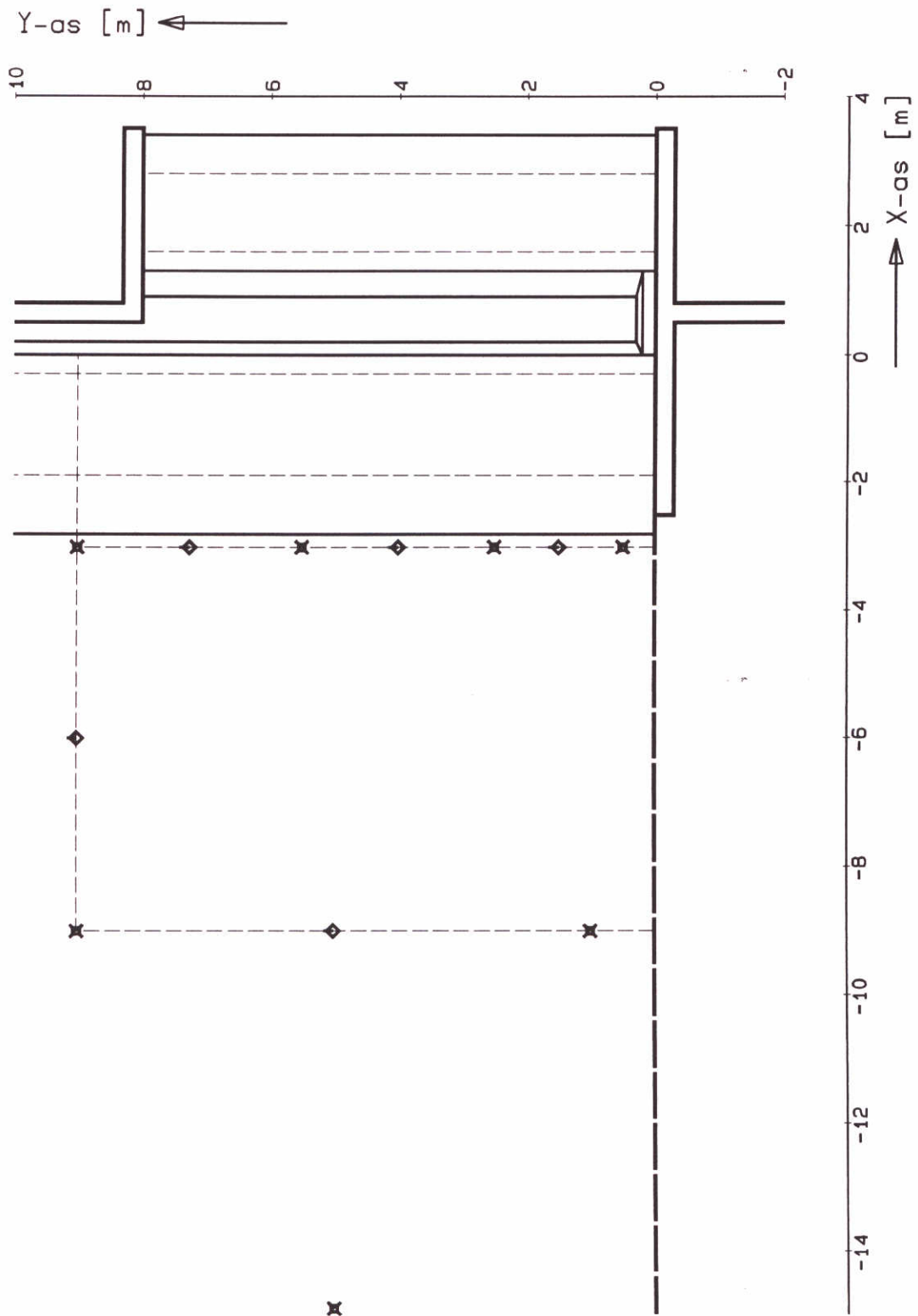
"BB-DH"

$Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.3.4.2



BOVENAANZICHT MEETSECTIE

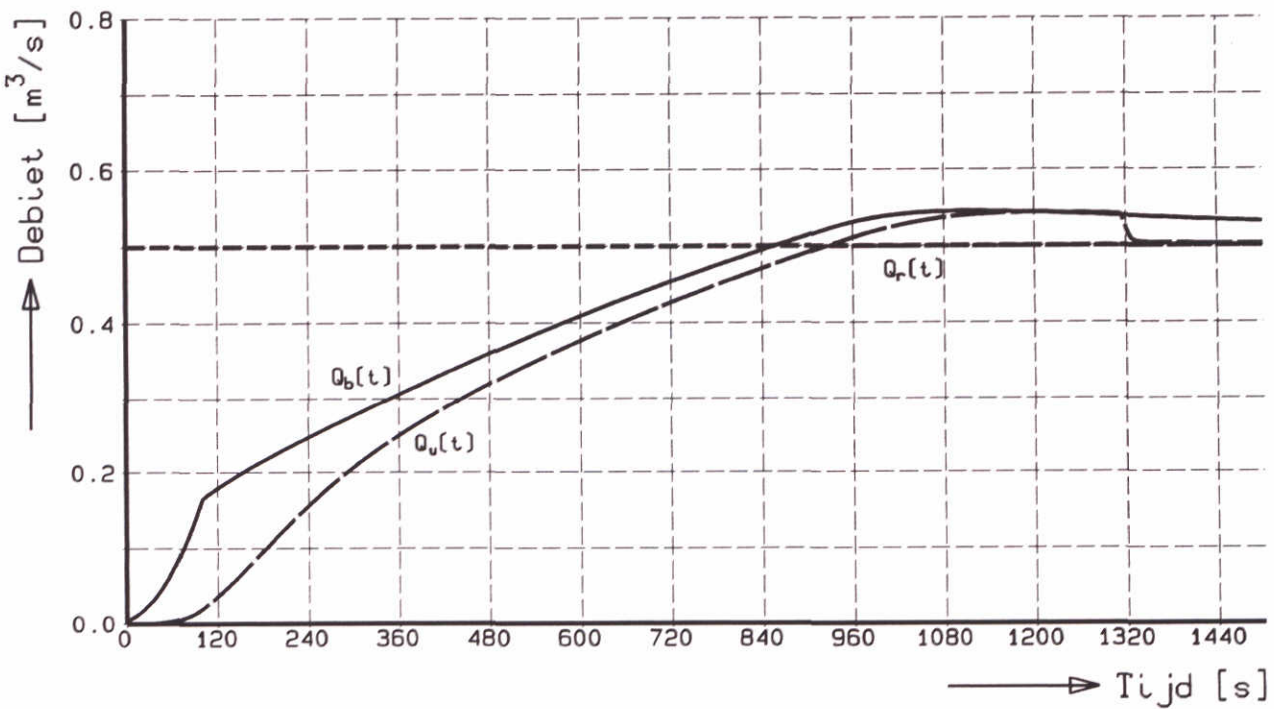
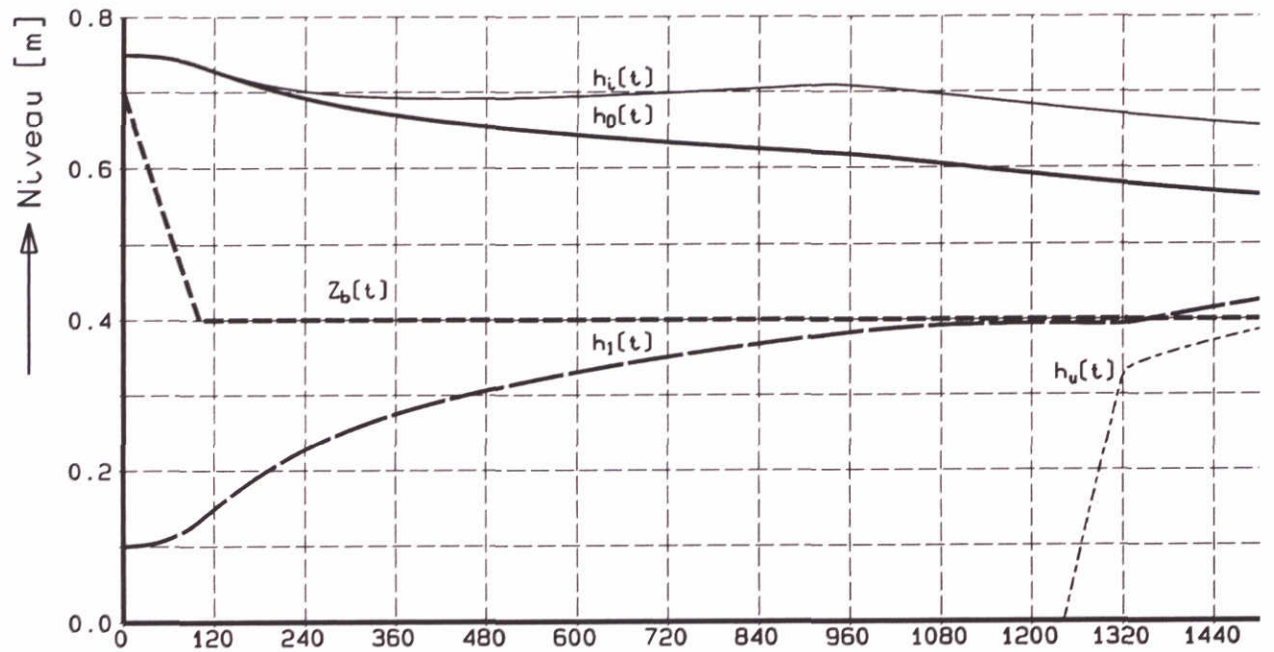
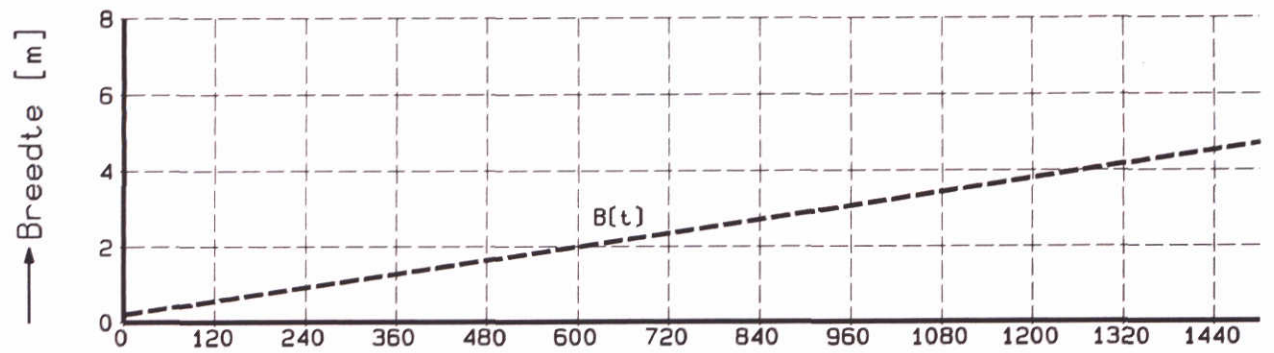
"BAZ"

Positie instrumenten en meetraaien

Schaal 1 : 100

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III FIG.3.5.1



ONTWIKKELING WATERSTAND EN DEBIET
 Resultaten bij opgelegde bresgroei

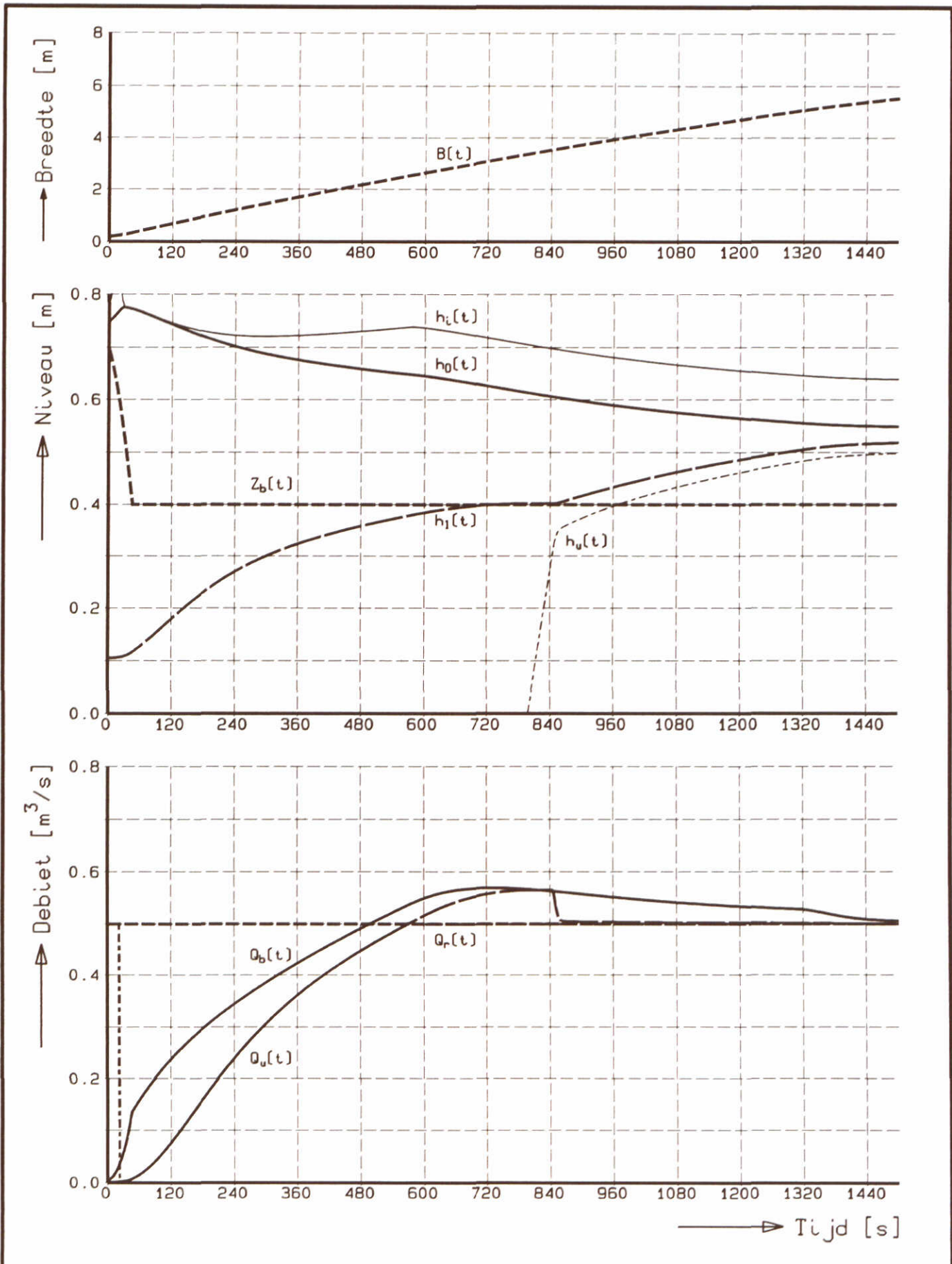
"CIRC1"

$Q_{rmax} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$

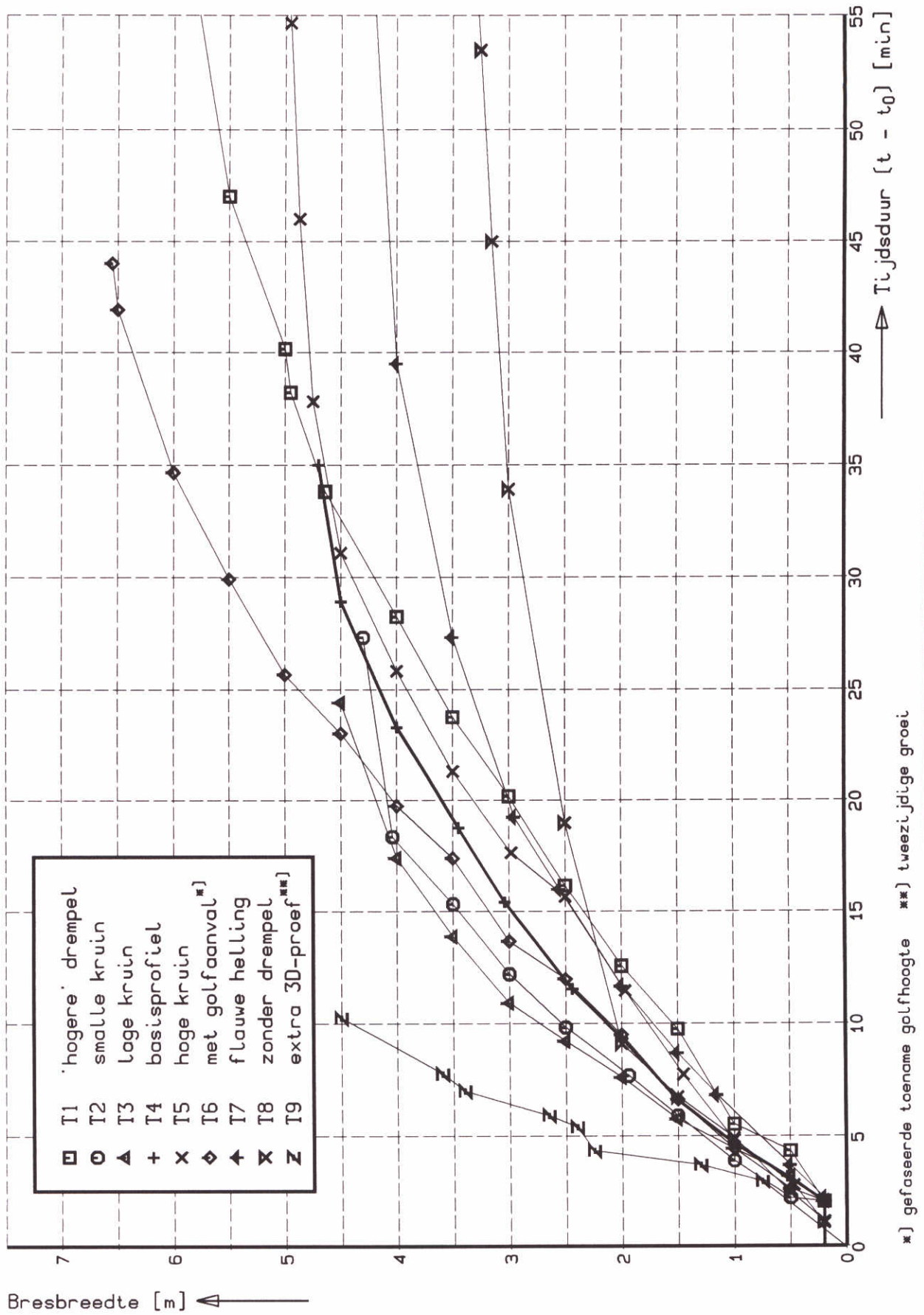
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.3.7.1



| | | |
|---|-----------|---------------------------------------|
| ONTWIKKELING WATERSTAND EN DEBIET Resultaten bij "vrije" bresgroei | | "CIRC2" |
| | | $Q_{rmax} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | H1242-III | FIG.3.7.2 |



ONTWIKKELING BRESBREEDTE
 Overzicht van alle proeven

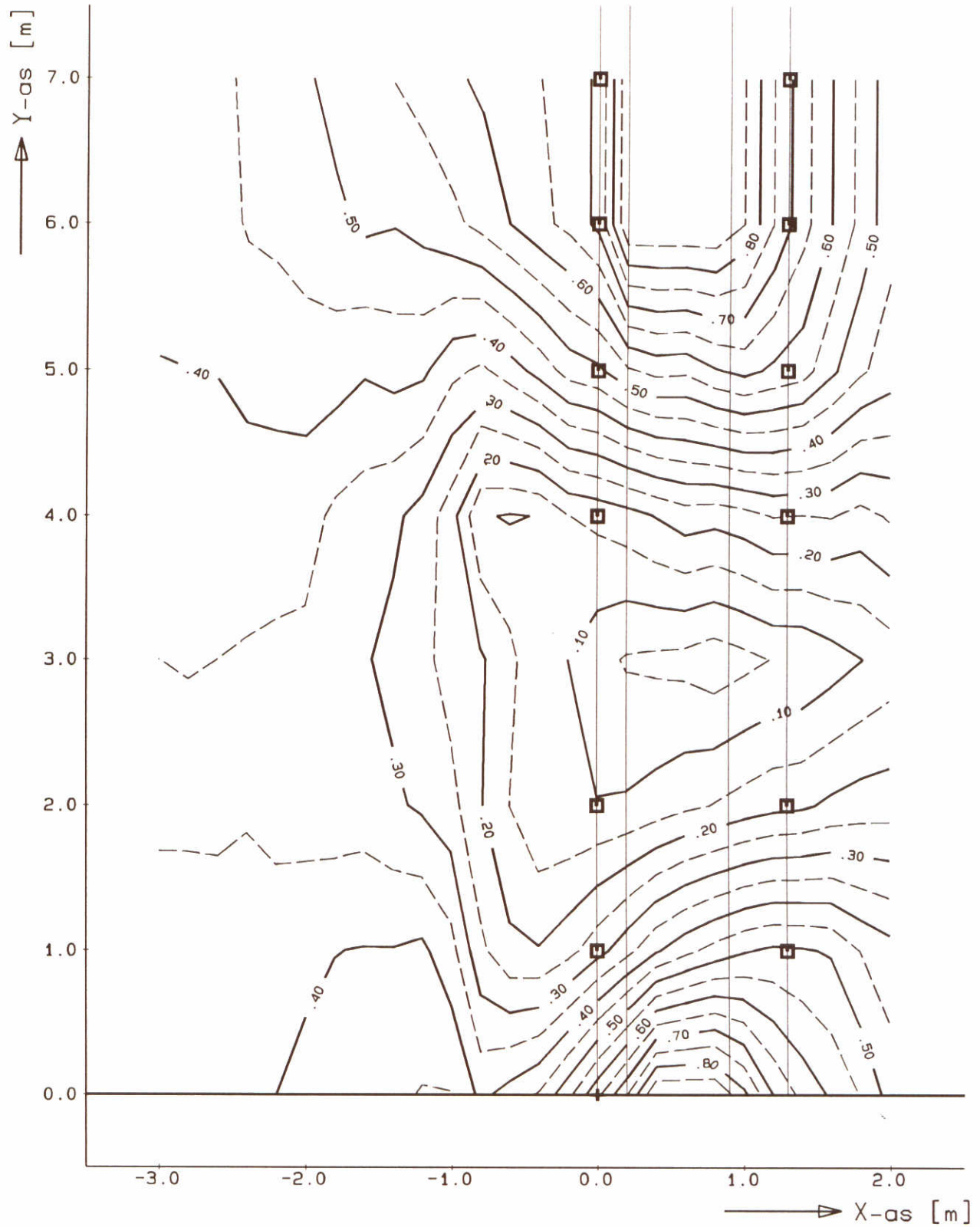
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T1/T9

'B(T)'

H1242-III

FIG.4.4.1



[niveau's tov bodem]

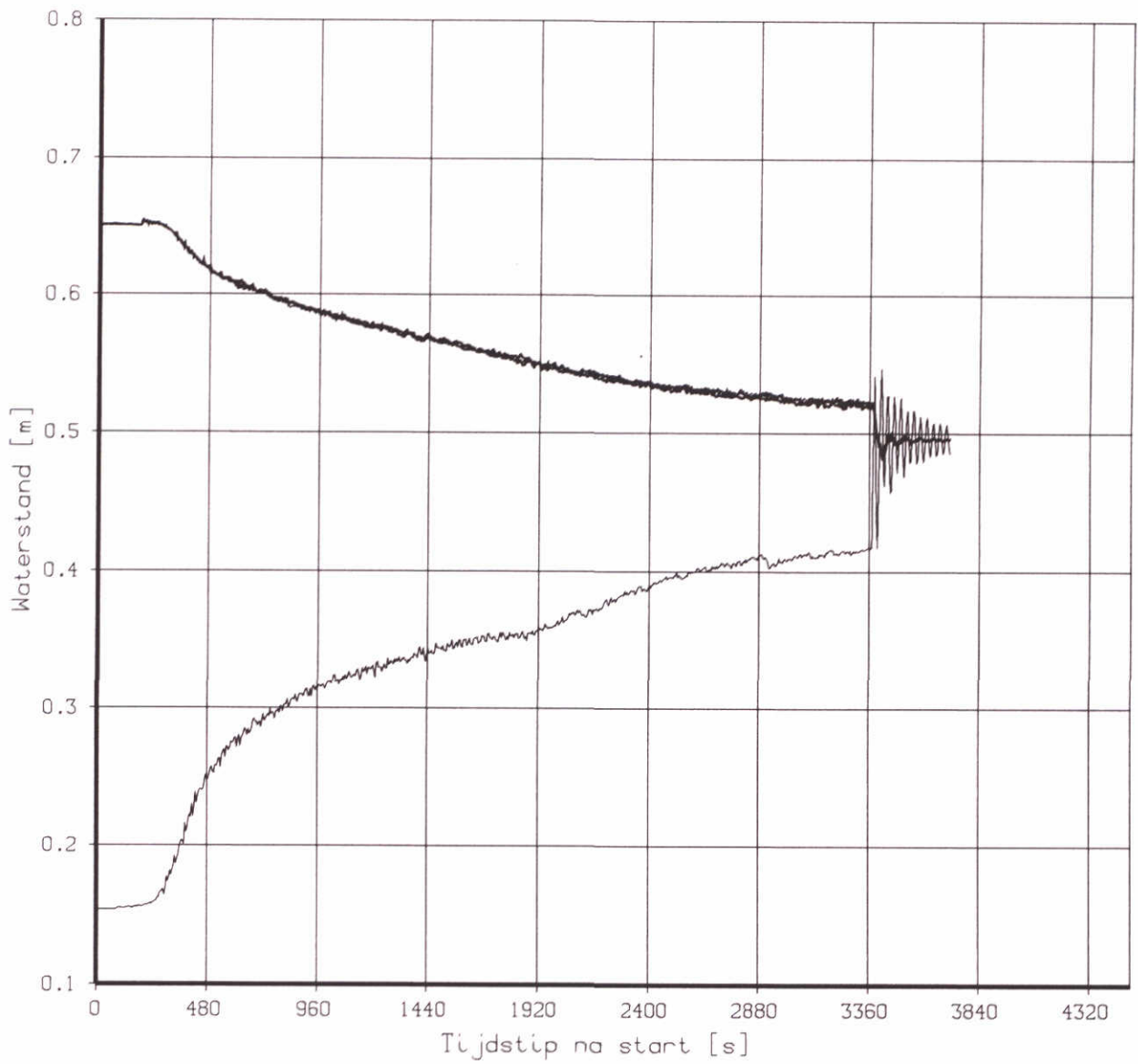
BOVENAANZICHT ONTGRONDINGSKUIL
Berekende iso-lijnen

'T9-BAZ'

Schaal 1 : 40

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III FIG.4.4.2

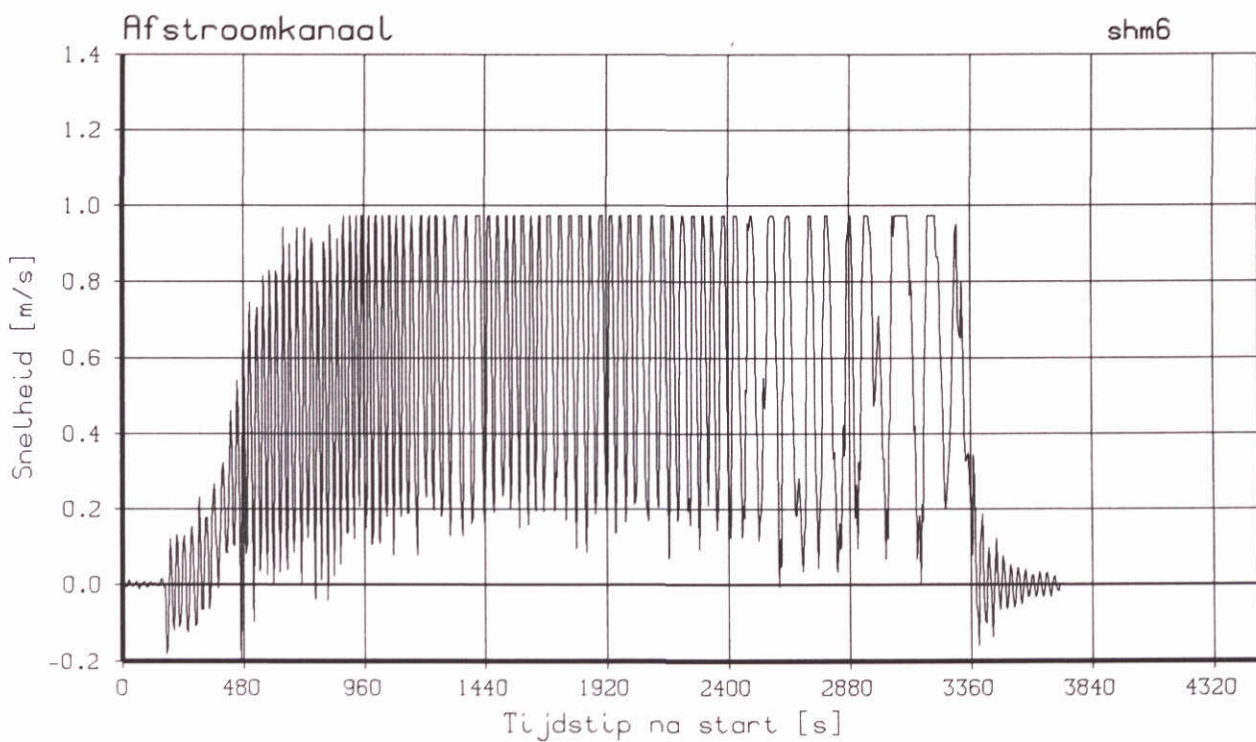
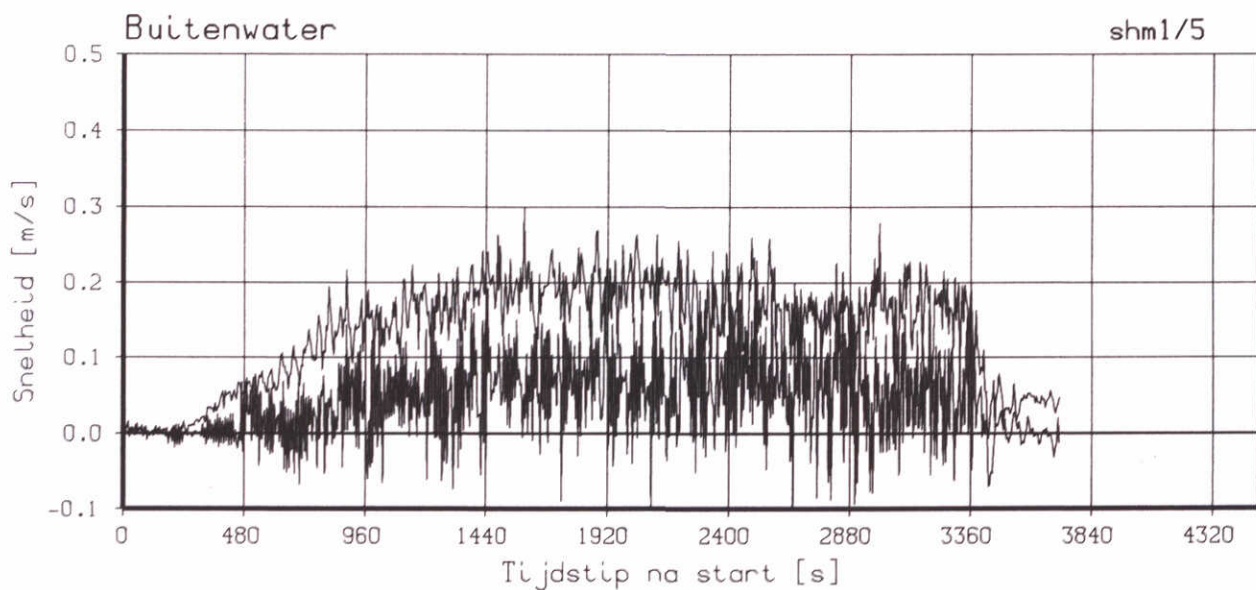


OVERZICHT ONTWIKKELING WATERSTANDEN
 Buitenwater [ghm1/6/7] en afstr.kanaal [ghm 8]

T1

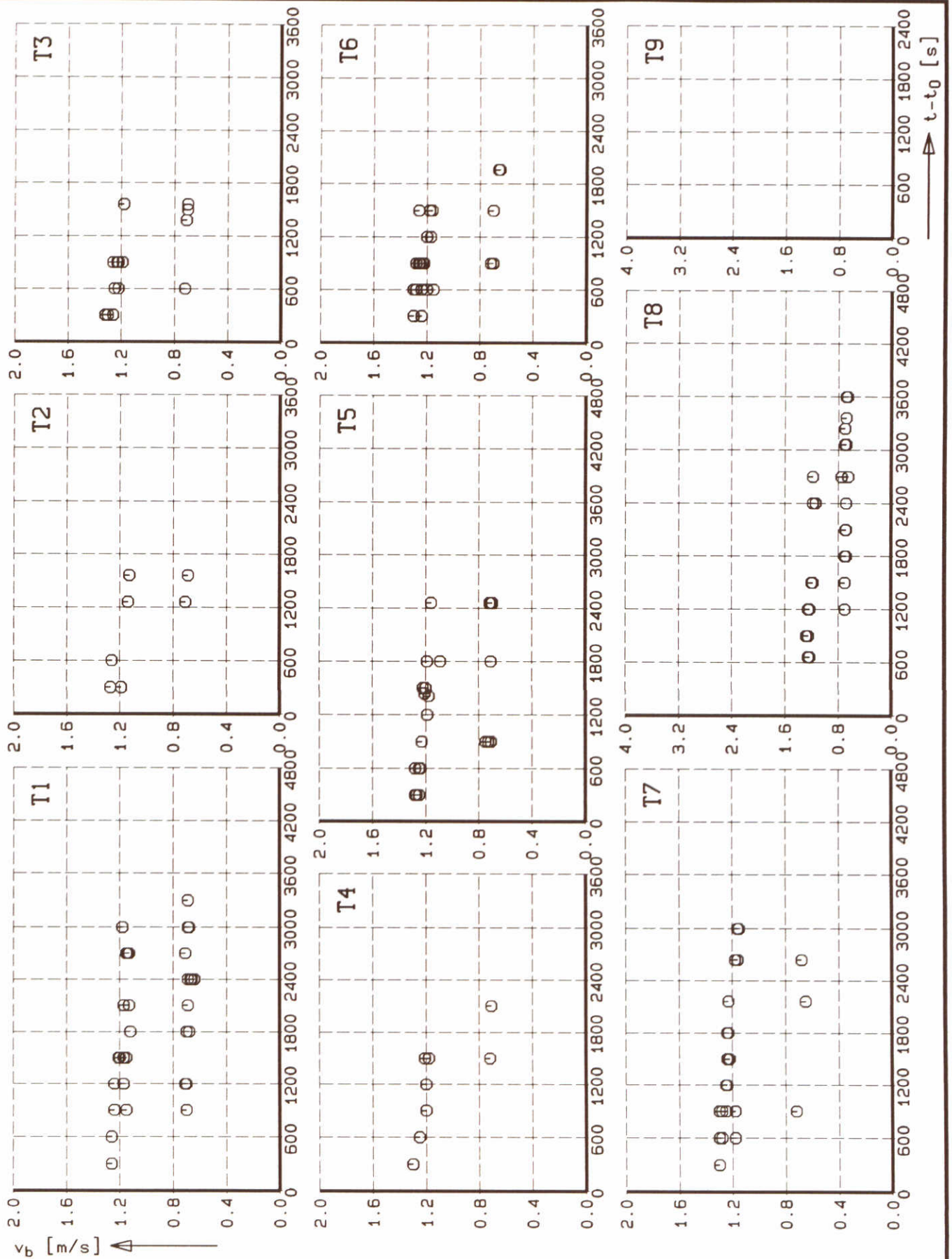
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III FIG.4.5.1



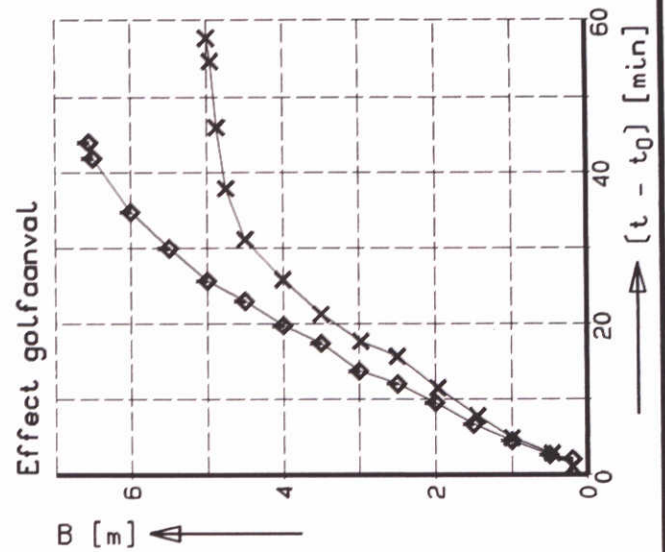
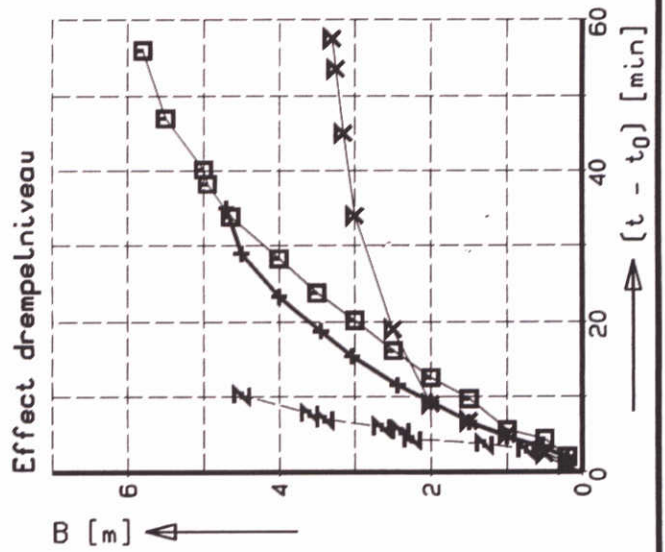
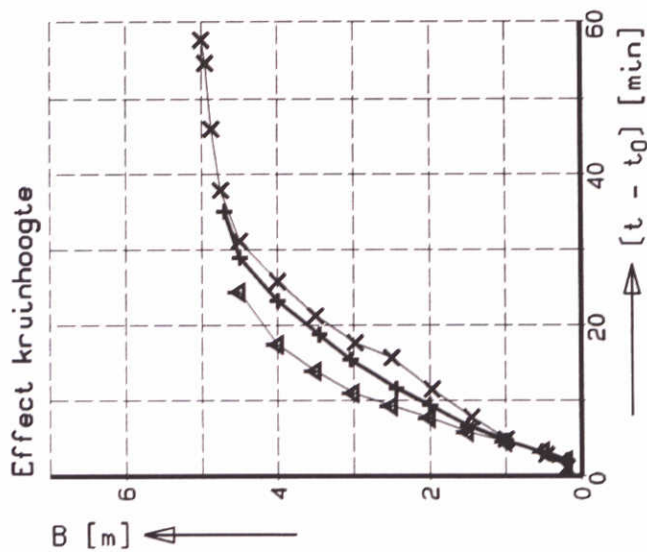
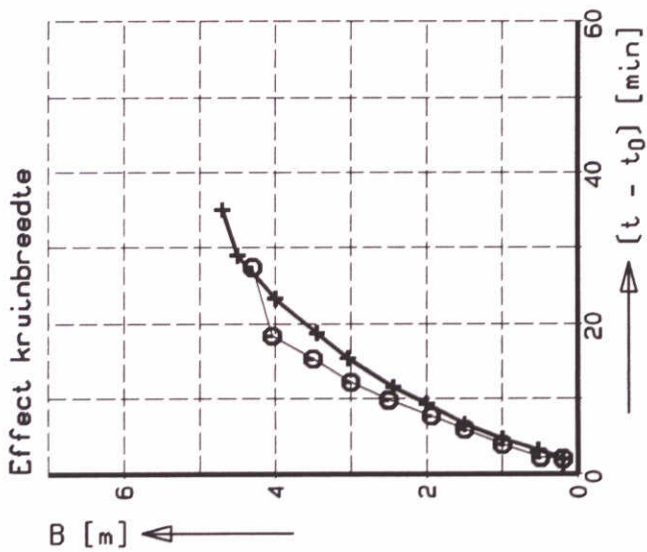
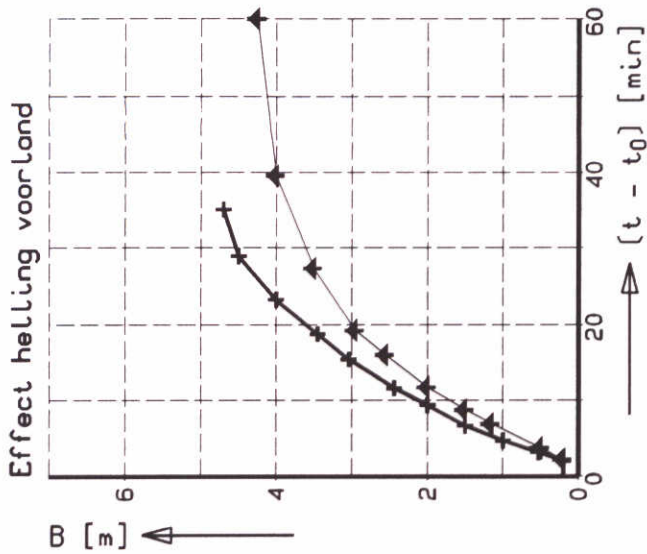
OVERZICHT ONTWIKKELING SNELHEDEN
 Buitenwater [shm1/5] en afstr.kanaal [shm 6]

T1



ONTWIKKELING SNELHEDEN IN BRES
 Resultaat analyse video-opnamen

T1/T9

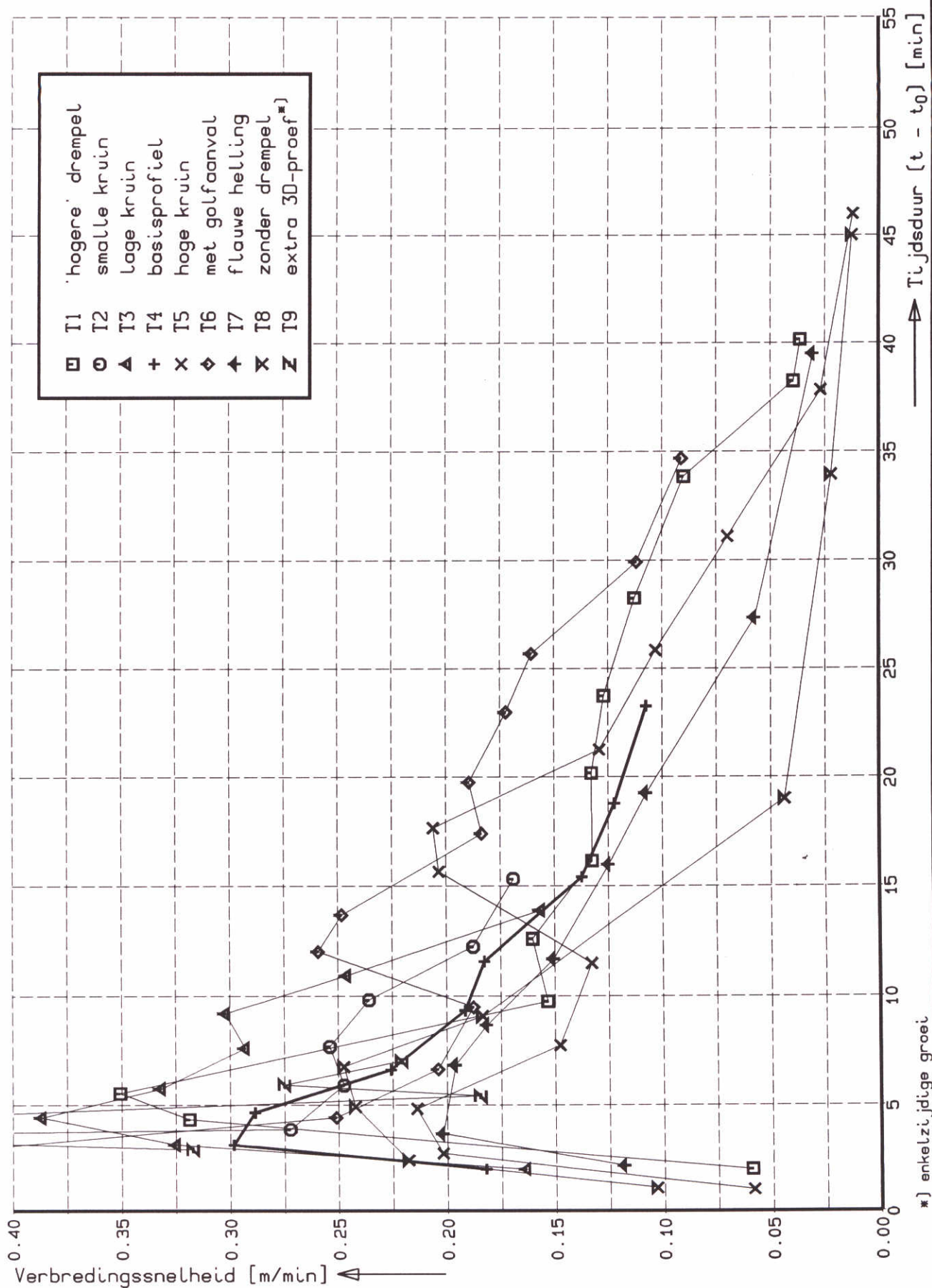


- T1 hogere drempel
- T2 smalle kruin
- T3 lage kruin
- T4 basisprofiel
- T5 hoge kruin
- T6 met golfaanval^{*})
- T7 flauwe helling
- T8 zonder drempel
- T9 extra 3D-proef^{**})

^{*}) gefas. toename golfoogte
^{**}) tweezijdige groei

ONTWIKKELING BRESBREEDTE
 Overzicht per onderzoeksaspect

| | |
|-----------|-----------|
| T1/T9 | Det-B(T) |
| H1242-III | FIG.5.2.1 |



ONTWIKKELING VERBREDINGSSNELHEID
Overzicht voor alle proeven

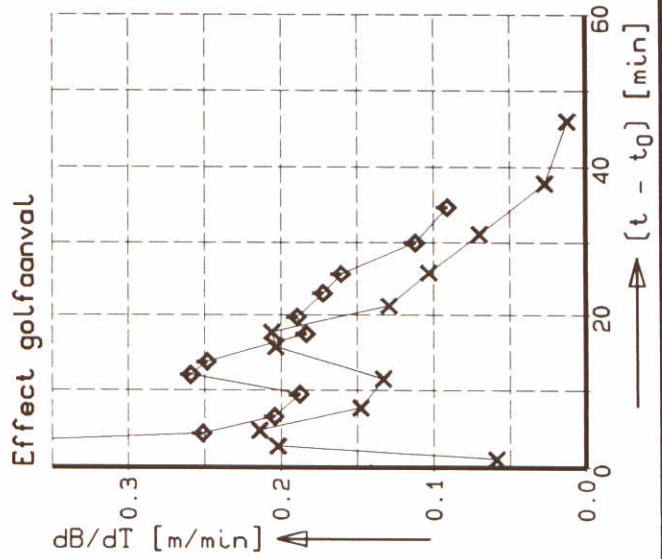
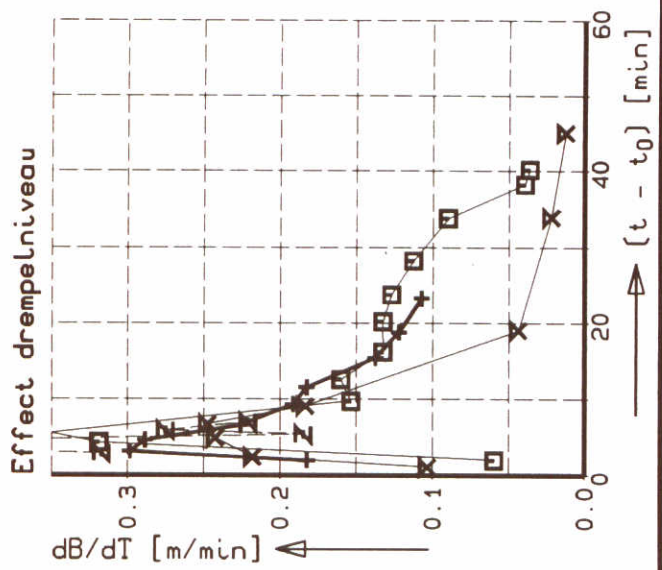
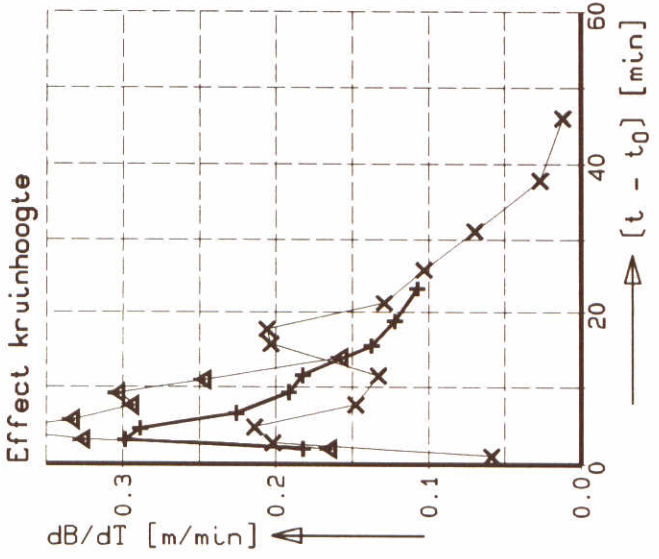
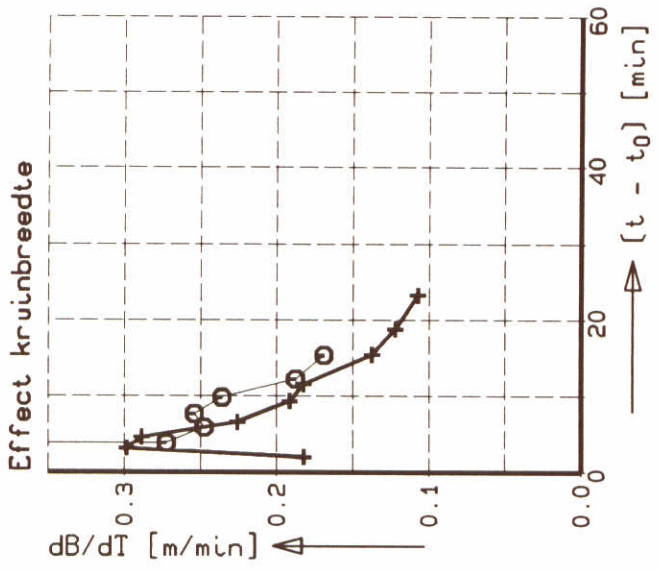
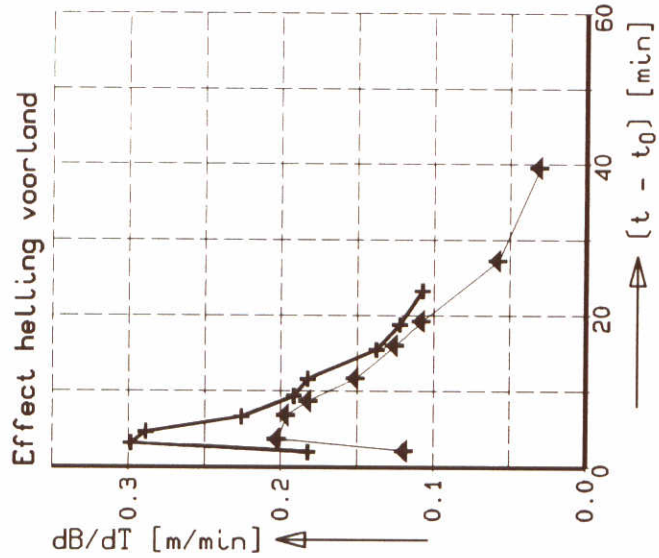
T1/T9

IpBt

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.5.3.1

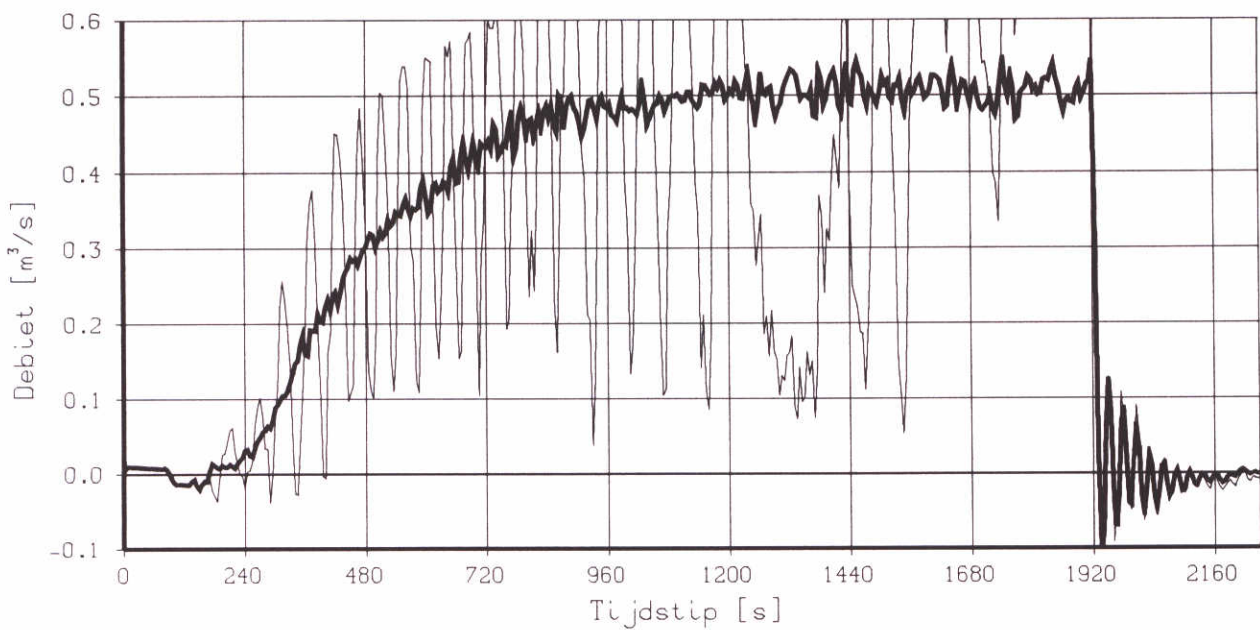
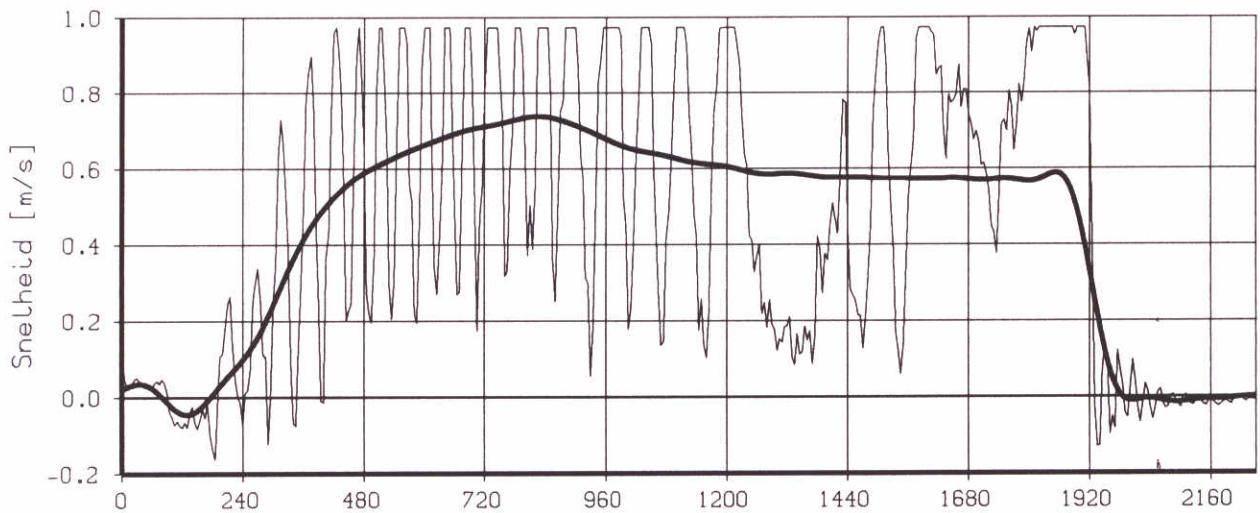
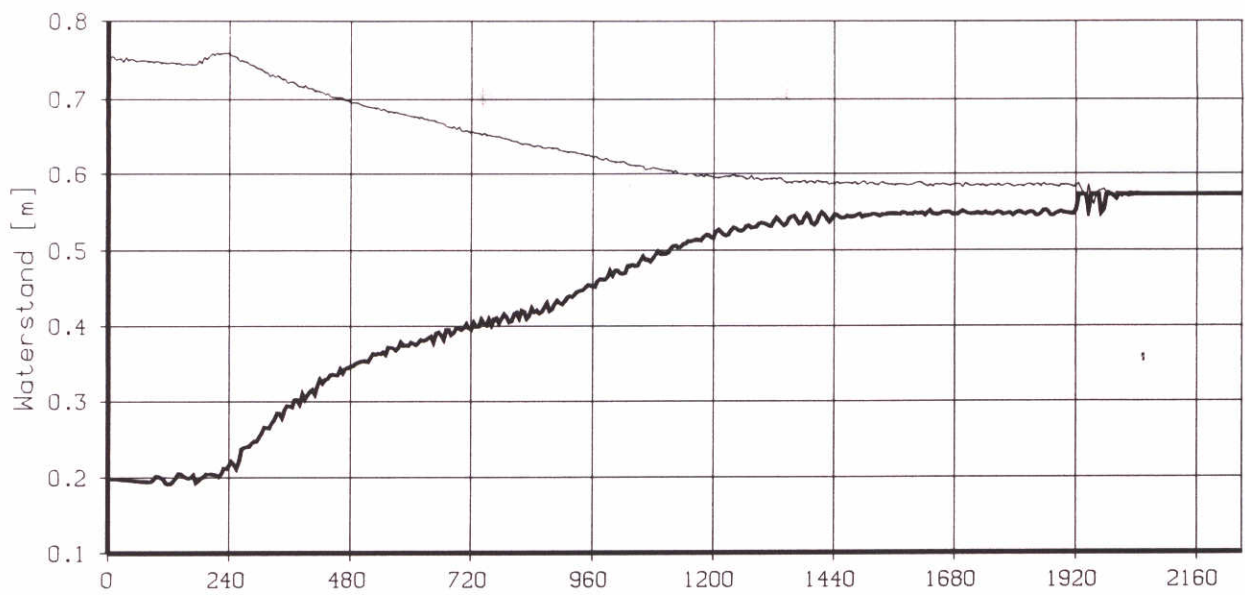


- T1 'hogere' drempel
 - T2 smalle kruin
 - T3 lage kruin
 - T4 basisprofiel
 - T5 hoge kruin
 - T6 met golfaanval
 - T7 flauwe helling
 - T8 zonder drempel
 - T9 extra 3D-proef
- T1
 ○ T2
 ▲ T3
 + T4
 × T5
 ◆ T6
 ▲ T7
 × T8
 Z T9

ONTWIKKELING VERBREDINGSSNELHEID
 Overzicht per onderzoeksaspect

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

| | |
|-----------|-----------|
| T1/T9 | Det-dBdT |
| H1242-III | FIG.5.3.2 |



RESULTAAT WATERBEWEGING IN AFSTROOMKANAAL

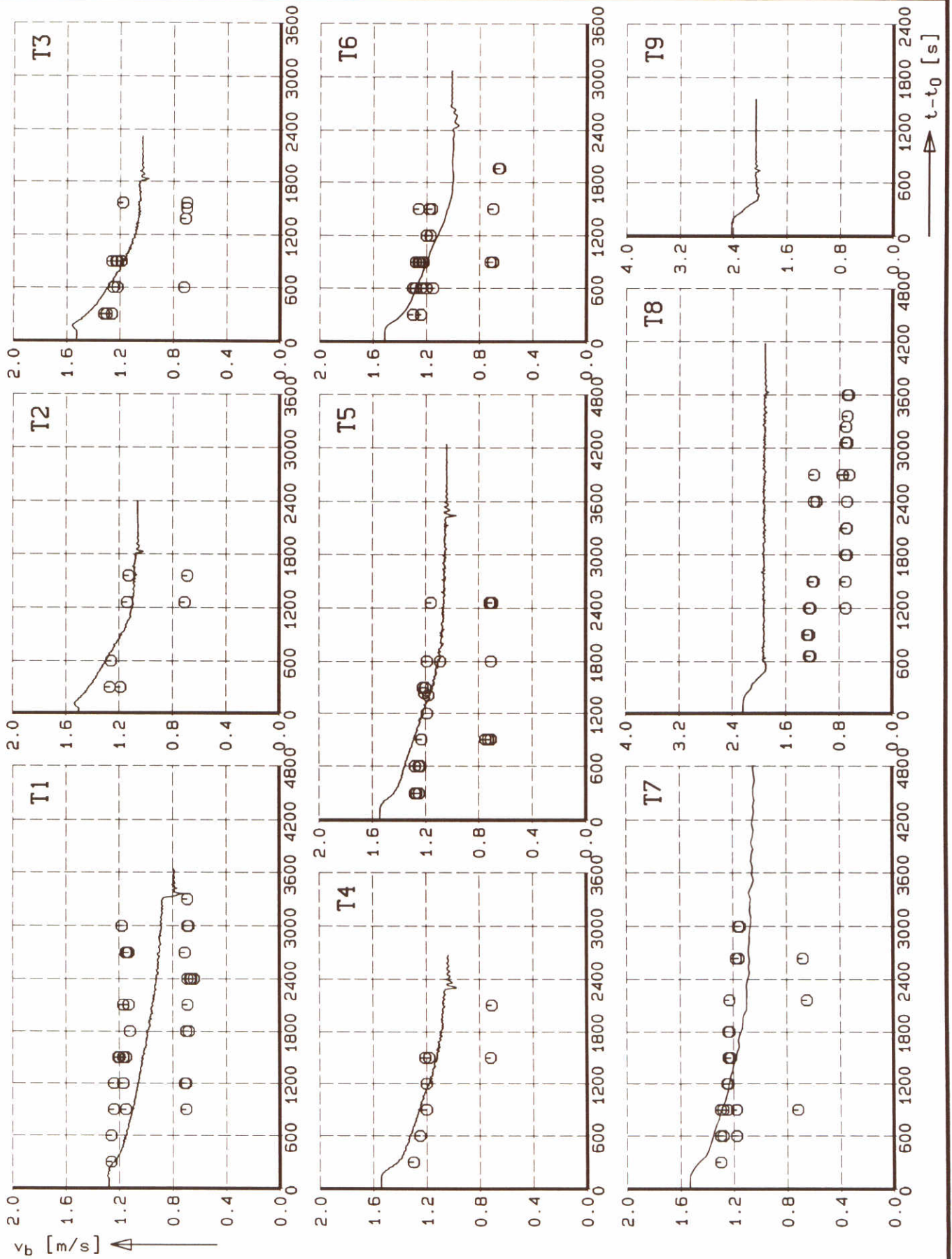
Verloop waterstand, snelheid en berekend debiet

T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

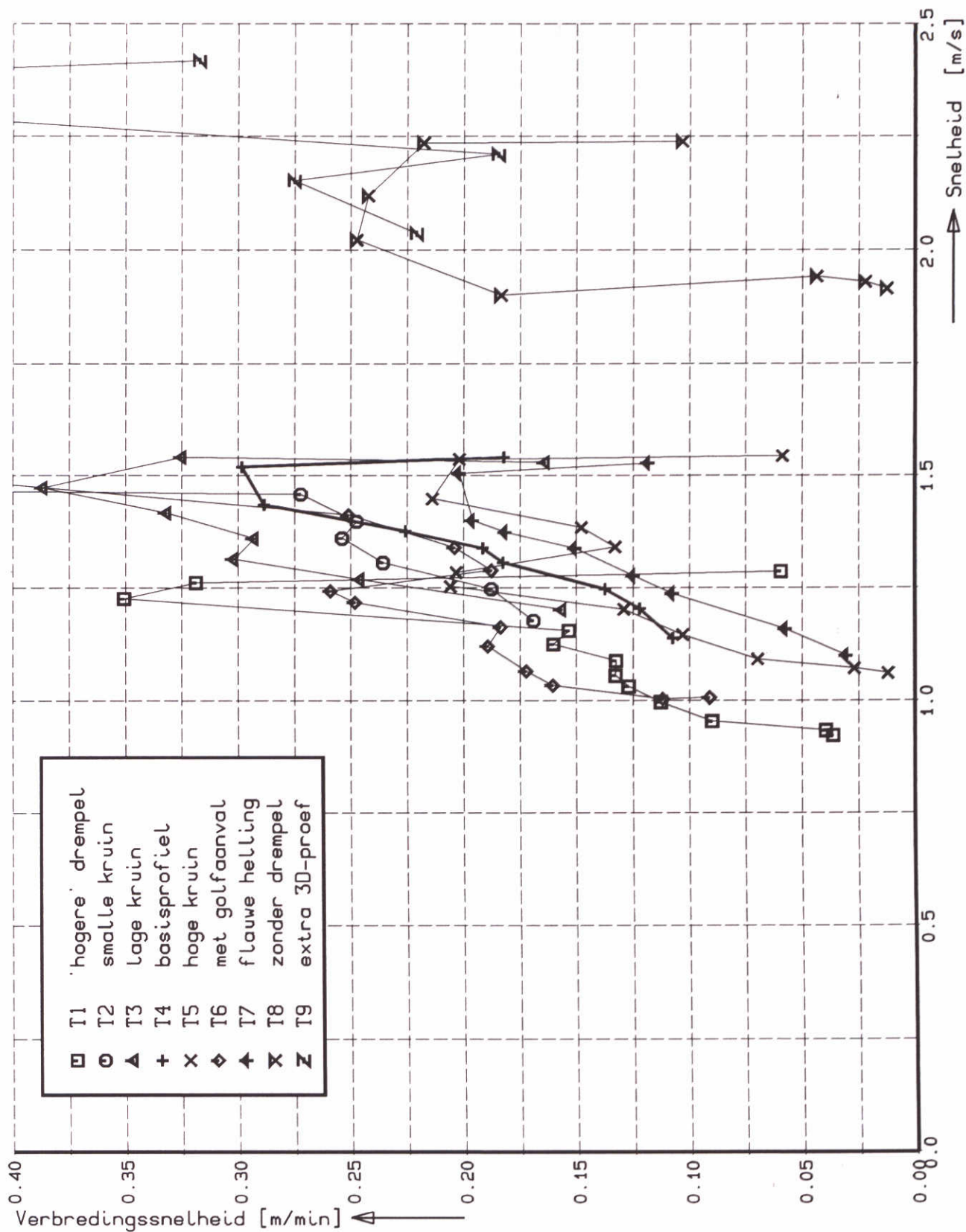
FIG.5.4.1



ONTWIKKELING SNELHEDEN IN BRES
 Overzicht voor alle proeven

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

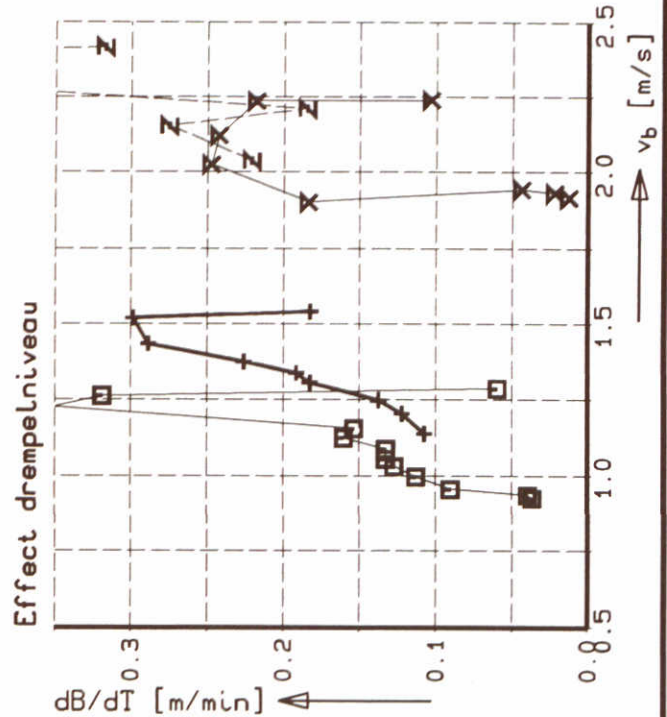
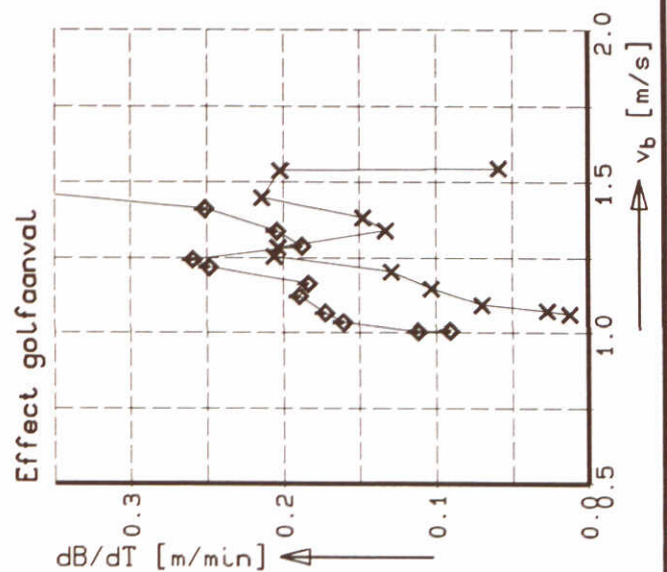
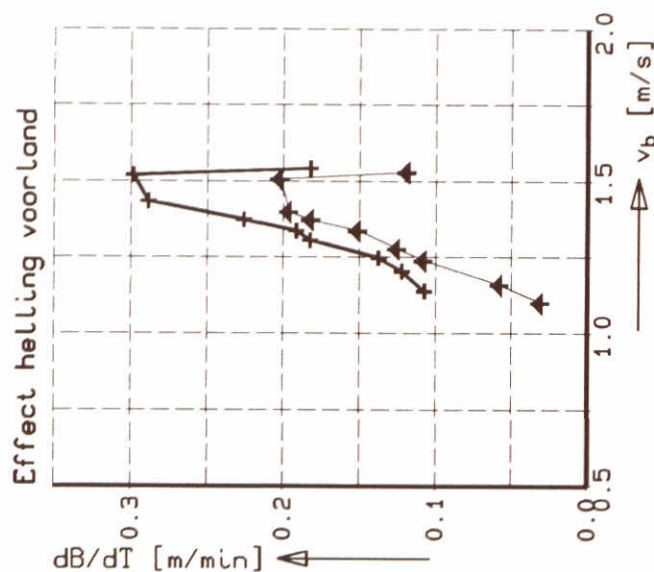
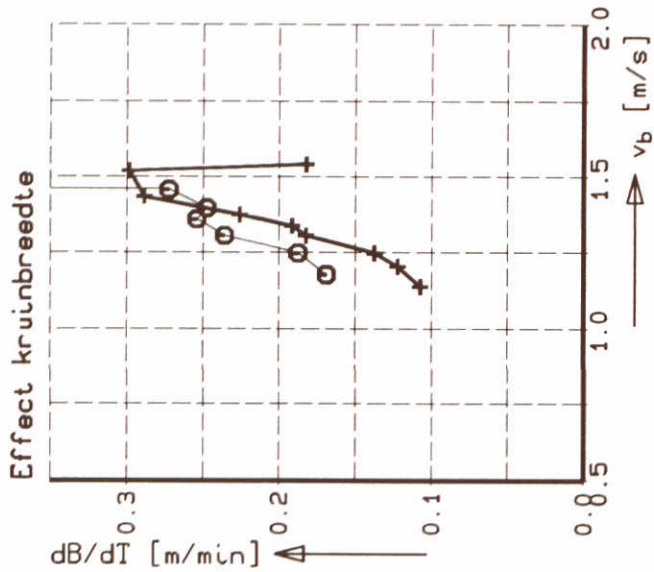
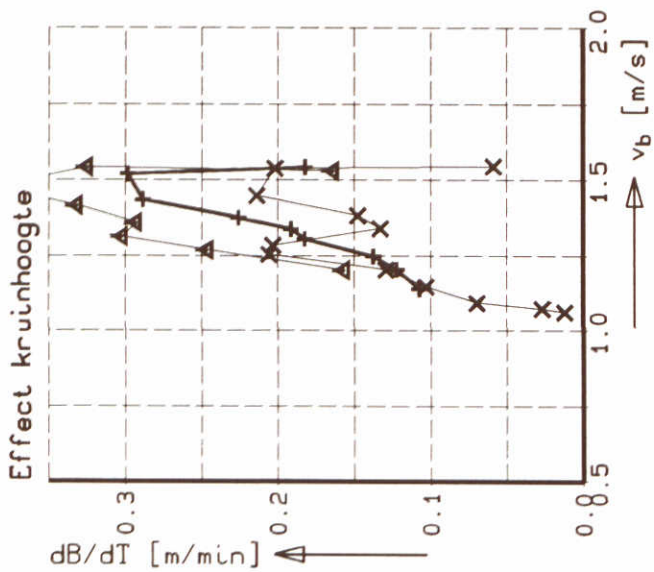
| | |
|-----------|-----------|
| T1/T9 | "v(t)" |
| H1242-III | FIG.5.4.2 |



RELATIE VERBREDINGSSNELHEID
 Overzicht voor alle proeven

T1/T9

dBdT [v]



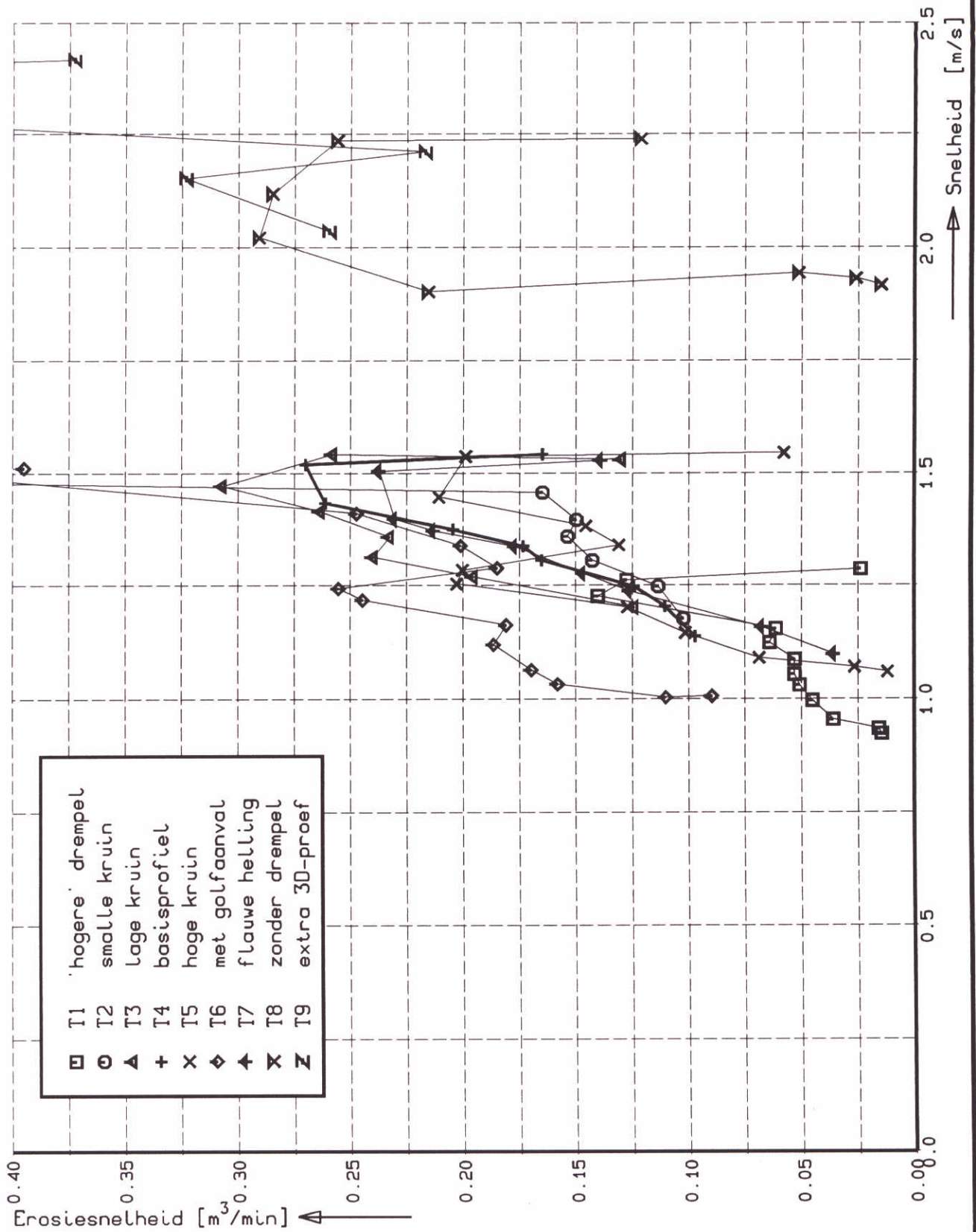
- T1 □ 'hogere' drempel
- T2 ○ smalle kruin
- T3 ▲ lage kruin
- T4 + basisprofiel
- T5 × hoge kruin
- T6 ◆ met golfaanval
- T7 ◀ flauwe helling
- T8 × zonder drempel
- T9 Z extra 3D-proef

RELATIES VERBREDINGSSNELHEID
Overzicht per onderzoeksaspect

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

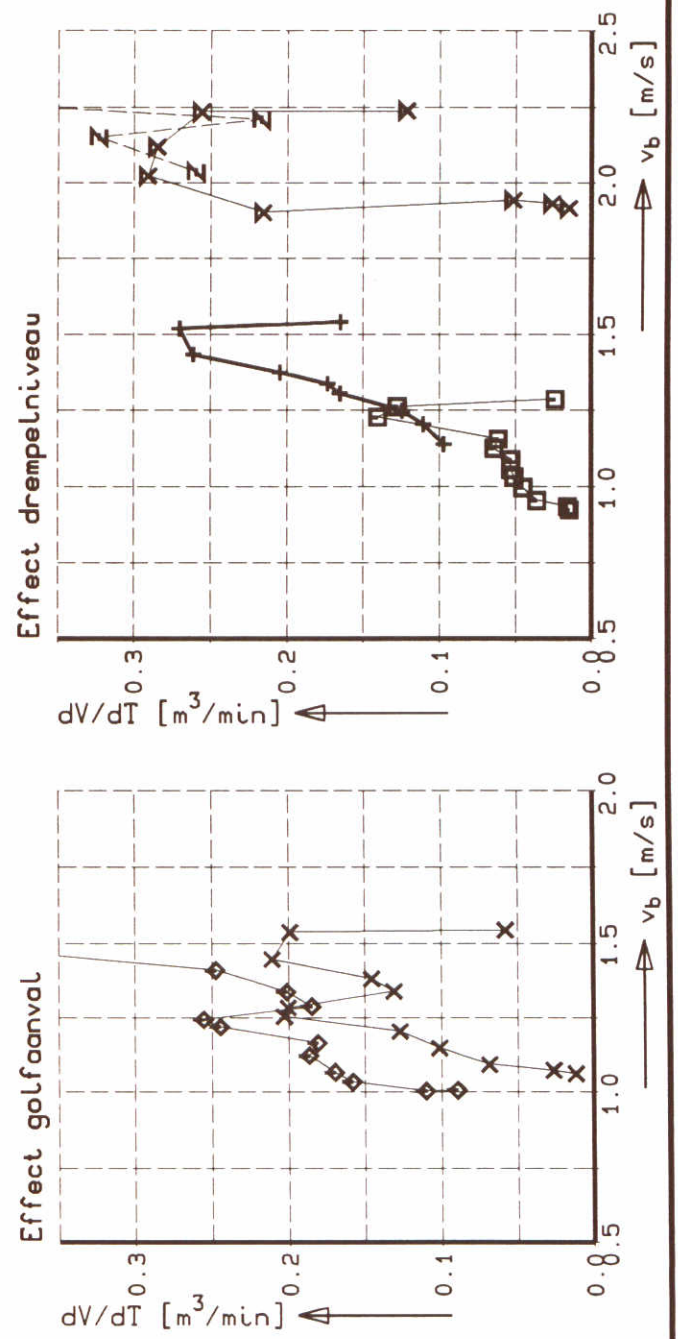
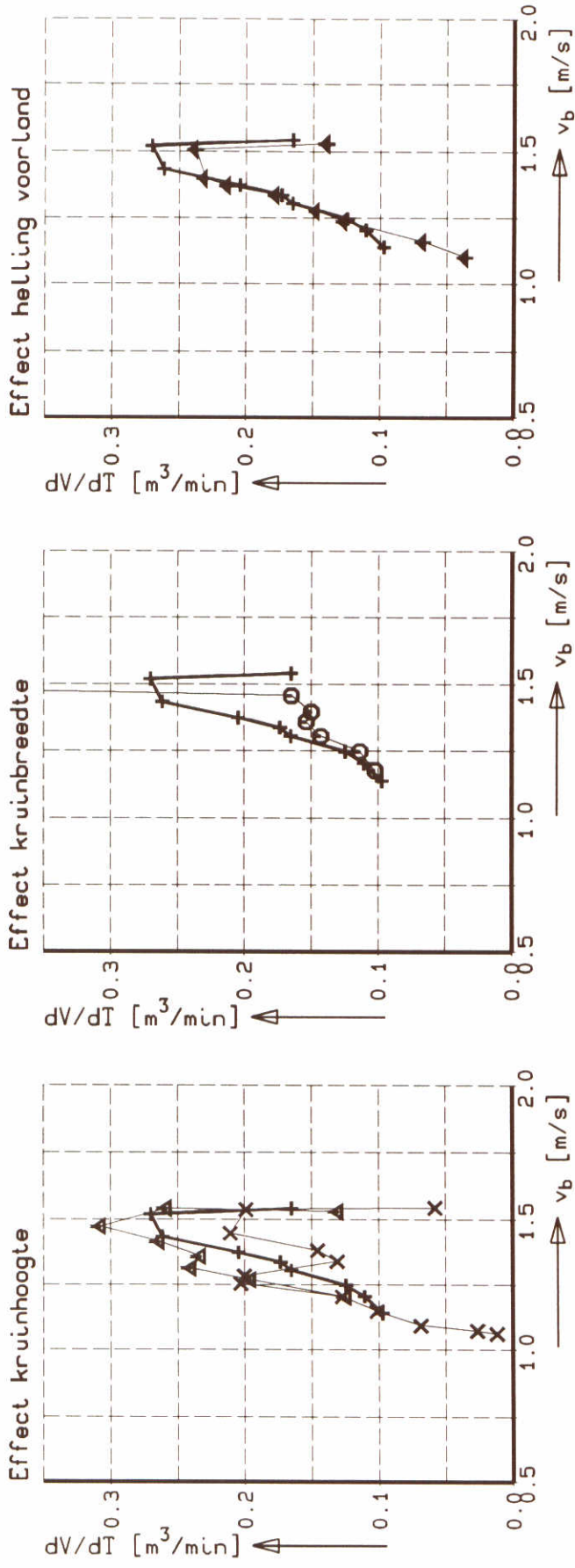
T1/T9 'Det-A(v)

H1242-III FIG.5.5.2



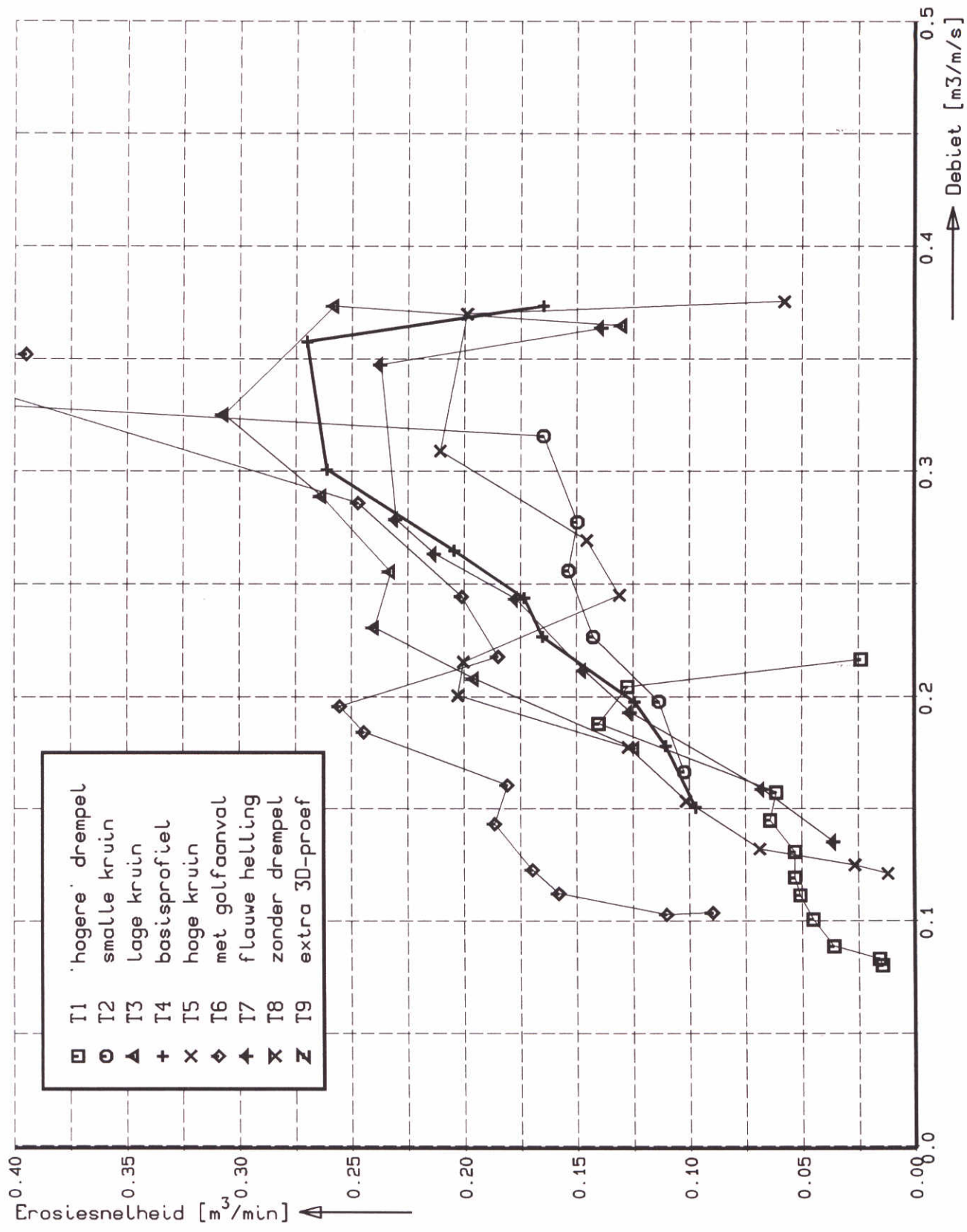
RELATIE EROSIESNELHEID
 Overzicht voor alle proeven

| | |
|-----------|-----------|
| T1/T9 | dVdT(v) |
| H1242-III | FIG.5.6.1 |



RELATIES EROSIESNELHEID
Overzicht per onderzoeksaspect

T1/T9 Det-V(v)



RELATIE EROSIESNELHEID
 Overzicht voor alle proeven

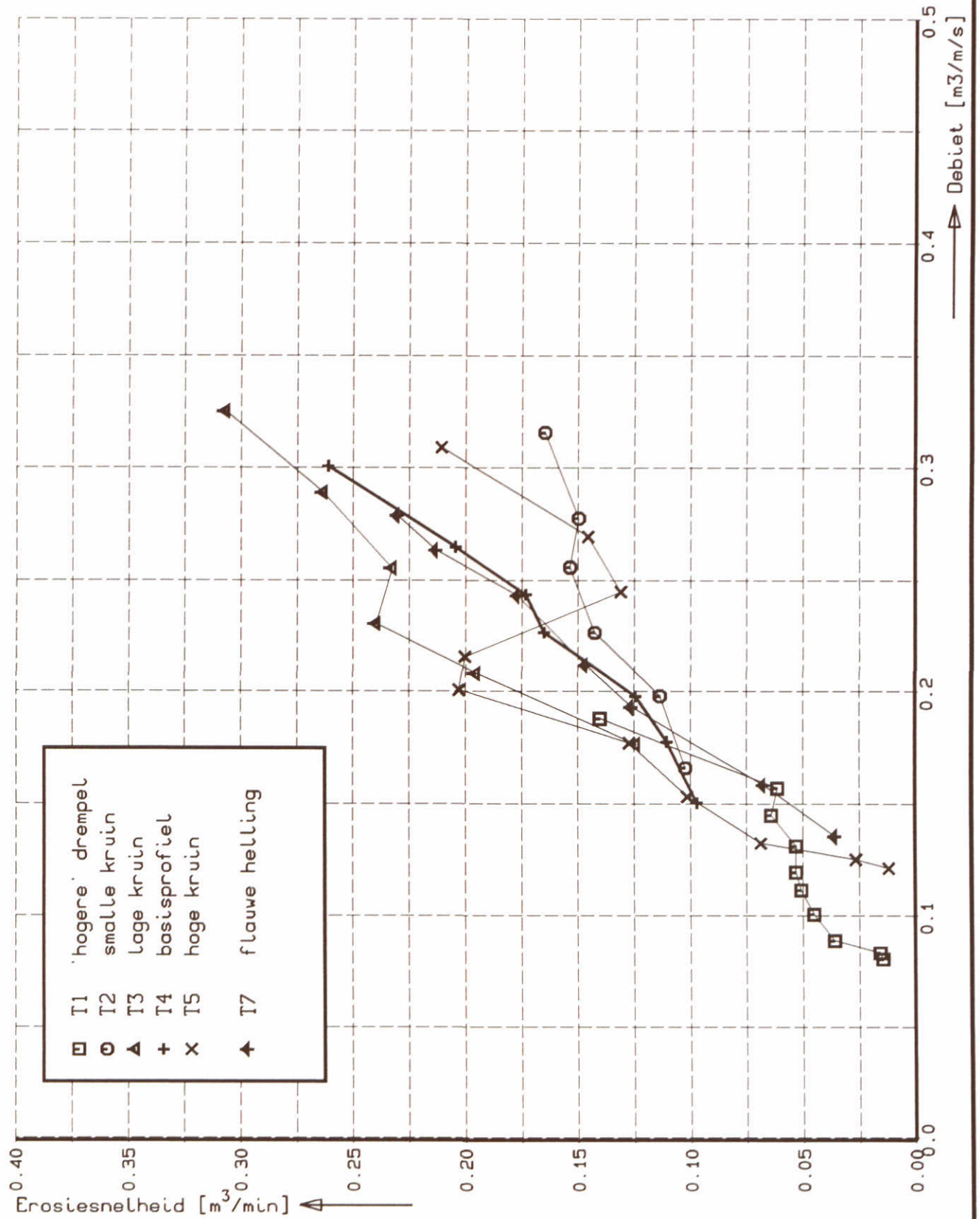
T1/T9

dVdT(q)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.5.6.3



RELATIE EROSIESNELHEID

Detail voor relevante proeven

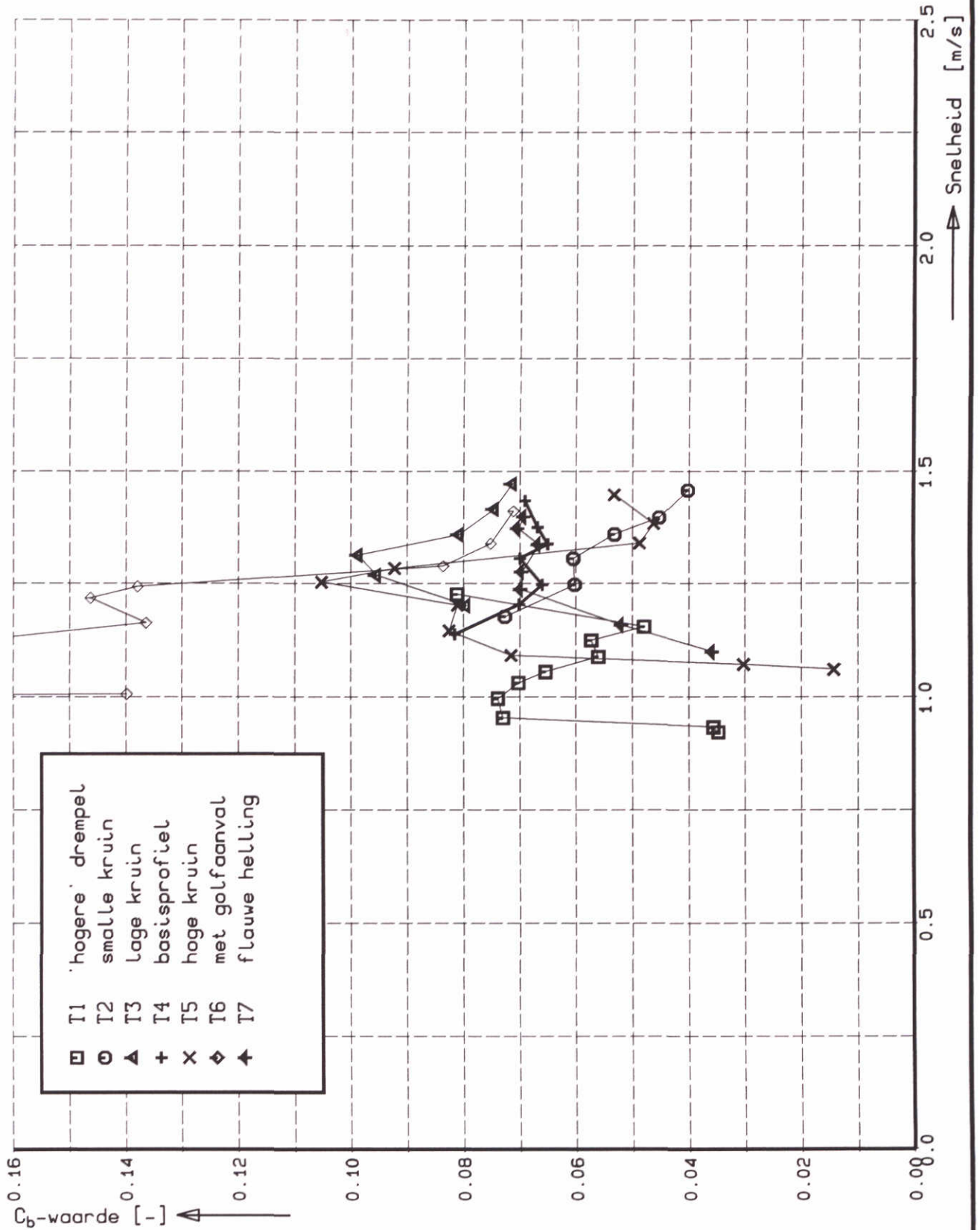
T1/T9

dVdT(q)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

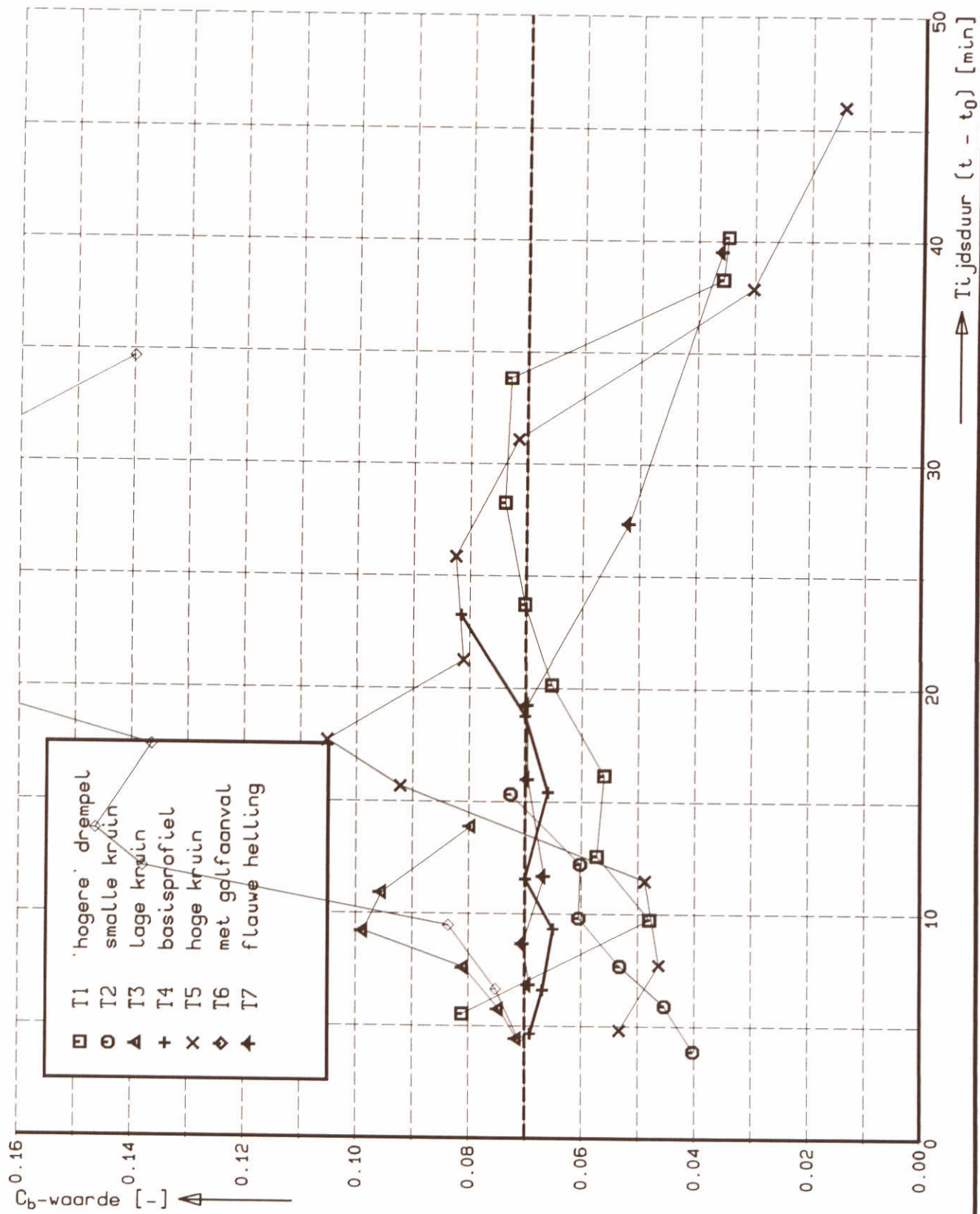
H1242-III

FIG.5.6.4



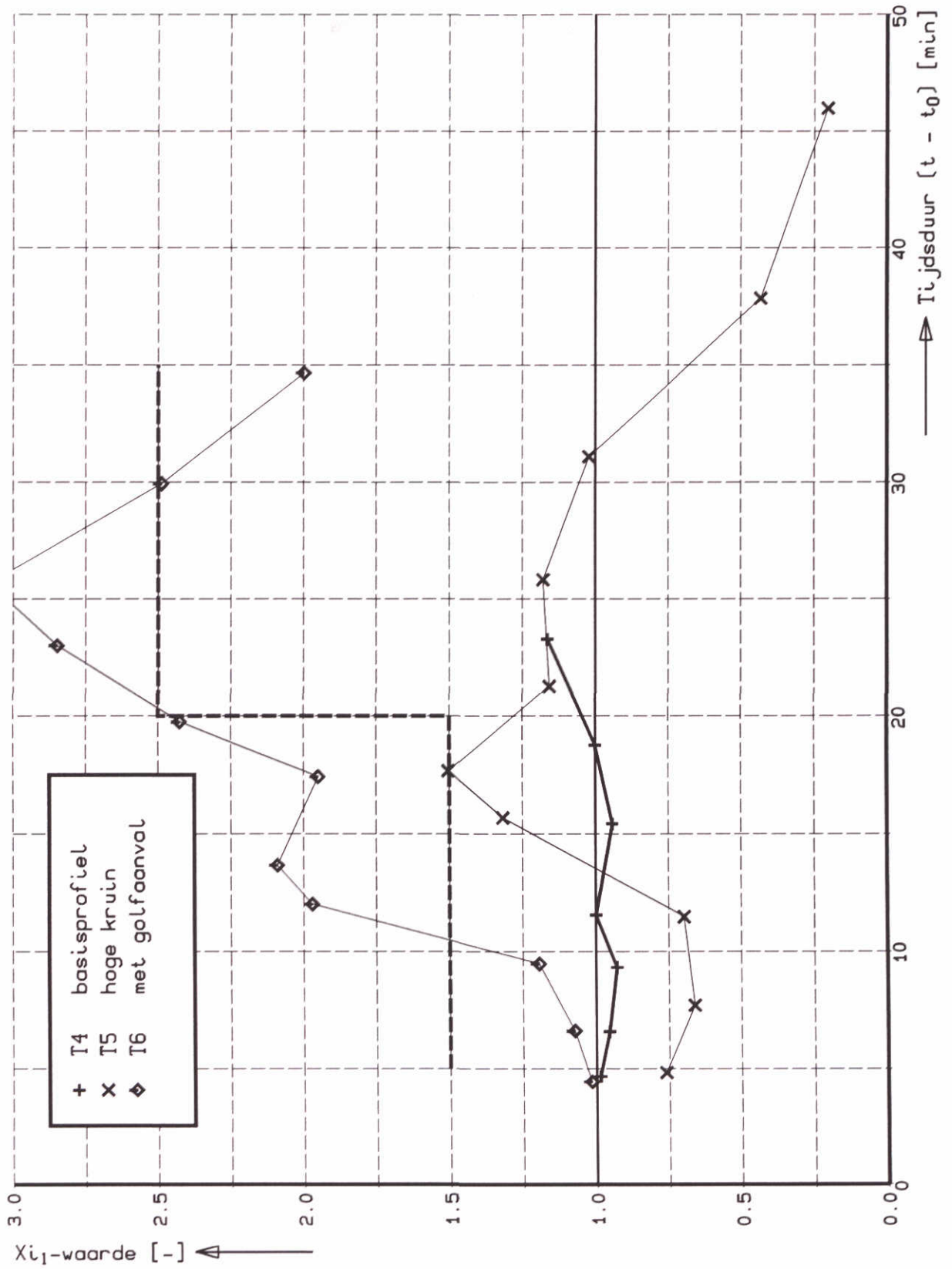
SNELHEIDSAFHANKELIJKHEID C_b -WAARDE
 Overzicht voor alle proeven

| | |
|-----------|-----------|
| T1/T7 | $C_b(v)$ |
| H1242-III | FIG.6.3.1 |



TIJDSONTWIKKELING C_b -WAARDE
 Overzicht voor alle proeven

| | |
|-----------|-----------|
| T1/T7 | $C_b(t)$ |
| H1242-III | FIG.6.3.2 |



TIJDSONTWIKKELING ξ_{i_1} -WAARDE
Effect additionele golfaanval

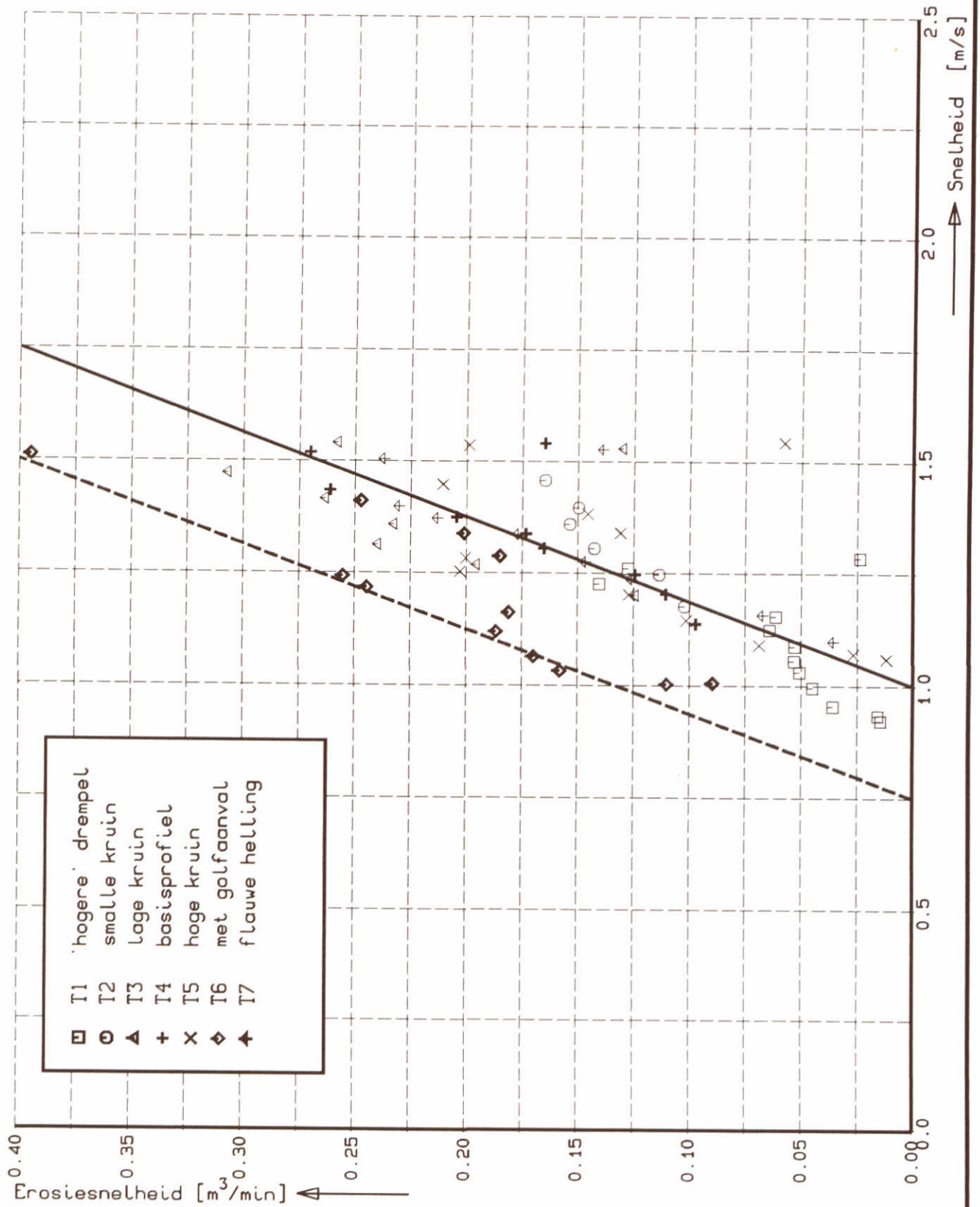
T1/T7

$\xi_{i_1}(t)$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.6.3.3



KWANTIFICERING V_c en X_{i2} -WAARDE
 Overzicht voor alle proeven

T1/T7

V_c

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H1242-III

FIG.6.3.4



locatie Delft
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 2569353
telefax 015 2619674
telex 38176 hydnl
e-mail info@wldelft.nl

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon 0527 242922
telefax 0527 243573
telex 42290 hylvo-nl
e-mail info@wldelft.nl

