

**Vlaamse Overheid**  
Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust  
Afdeling kust – Vlaamse Hydrografie  
Oceanografisch Meteorologisch Station

# **Zeespiegelstijging langs de Belgische Kust in de tweede helft van de 20<sup>ste</sup> eeuw**

THV MeteoServices-Soresma



***Mei 2009***

**Opgesteld door Fritz Buyl, Myriam Sys en Marc De Keyser**  
**Bestek 16EH/05/20**

## INHOUDSTAFEL

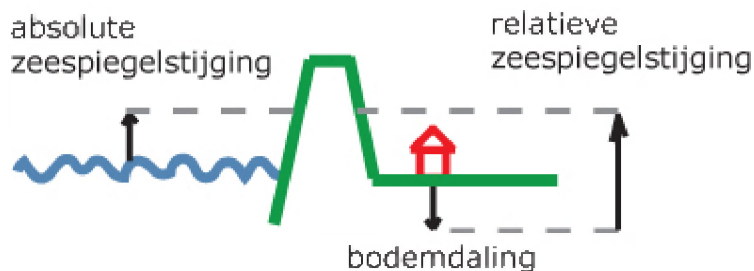
|           |                                                           |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------|----|
| 1         | Inleiding                                                 | 1  |
| 1.1       | Zeespiegelstijging                                        | 1  |
| 1.2       | Bepaling van de zeespiegelstijging                        | 1  |
| 1.3       | Zeespiegelverandering tgv aardbevingen of platentectoniek | 2  |
| 1.4       | Zeespiegelstijging door smelten van al het landijs        | 2  |
| 1.5       | Zeespiegelstijging door het uitzetten van de oceaan       | 3  |
| 1.6       | Zeespiegelstijging in de 20 <sup>ste</sup> eeuw           | 3  |
| 1.7       | Zeespiegelstijging in de 21 <sup>ste</sup> eeuw           | 4  |
| 1.8       | IPCC                                                      | 5  |
| 1.9       | Lokale verschillen in zeespiegelstijging t.o.v. mondiale  | 6  |
| 1.10      | Projecties voor België                                    | 6  |
| 1.11      | De Kuststreek                                             | 7  |
| 1.12      | Wat zijn de verwachtingen voor de verre toekomst?         | 8  |
| 1.13      | Samenvatting resultaten eerdere studies                   | 9  |
| 2         | Werkwijze en lineaire regressie                           | 17 |
| 3         | Resultaten                                                | 17 |
| 3.1       | Presentatie gegevens                                      | 17 |
| 3.1.1     | Jaargemiddelden                                           | 17 |
| 3.1.1.1   | Oostende                                                  | 18 |
| 3.1.1.1.1 | Hoogwater                                                 | 18 |
| 3.1.1.1.2 | Laagwater                                                 | 18 |
| 3.1.1.1.3 | MSL                                                       | 19 |
| 3.1.1.2   | Nieuwpoort                                                | 19 |
| 3.1.1.2.1 | Hoogwater                                                 | 19 |
| 3.1.1.2.2 | Laagwater                                                 | 20 |
| 3.1.1.2.3 | MSL                                                       | 20 |
| 3.1.1.3   | Zeebrugge                                                 | 21 |
| 3.1.1.3.1 | Hoogwater                                                 | 21 |
| 3.1.1.3.2 | Laagwater                                                 | 21 |
| 3.1.1.3.3 | MSL                                                       | 22 |
| 3.1.1.4   | Overzicht resultaten                                      | 22 |
| 3.1.2     | Maandgemiddelden                                          | 22 |
| 3.1.2.1   | Oostende                                                  | 23 |
| 3.1.2.1.1 | Hoogwater                                                 | 23 |
| 3.1.2.1.2 | Laagwater                                                 | 29 |
| 3.1.2.1.3 | MSL                                                       | 35 |
| 3.1.2.1.4 | Tabel r-waarden                                           | 41 |
| 3.1.2.2   | Nieuwpoort                                                | 42 |
| 3.1.2.2.1 | Hoogwater                                                 | 42 |
| 3.1.2.2.2 | Laagwater                                                 | 48 |
| 3.1.2.2.3 | MSL                                                       | 54 |
| 3.1.2.2.4 | Tabel r-waarden                                           | 60 |
| 3.1.3     | Zeebrugge                                                 | 61 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2.3.1 Hoogwater                                               | 61 |
| 3.1.2.3.2 Laagwater                                               | 67 |
| 3.1.2.3.3 MSL                                                     | 73 |
| 3.1.2.3.4 r-waarden                                               | 79 |
| 3.2 Invloed van 18.6-jarige cyclus op de hoogte van de zeespiegel | 80 |
| 3.2.1 Inleiding                                                   | 80 |
| 3.2.2 Zeespiegelverandering voor de drie locaties                 | 81 |
| 3.2.3 Moving averages                                             | 81 |
| 3.2.3.1 Hoogwater Oostende                                        | 81 |
| 3.2.3.2 Laagwater Oostende                                        | 83 |
| 3.2.3.3 MSL Oostende                                              | 84 |
| 3.2.3.4 Conclusie                                                 | 85 |
| 4 IPCC – Rapport van 2 februari 2007                              | 86 |
| 5 Besluit                                                         | 86 |
| 6 Bijlage: Theorie lineaire regressie                             | 87 |

# **1 INLEIDING**

## **1.1 Zeespiegelstijging**

De relatieve zeespiegelstijging op een bepaalde plaats op Aarde is de som van de toename van de hoogte van het zeeniveau (absolute zeespiegelstijging) en de lokale bodembeweging (zie Fig. 1).



*Fig. 1: Relatieve versus absolute zeespiegelstijging*

Absolute zeespiegelstijging kan worden veroorzaakt door veranderingen in

- de totale hoeveelheid water in de oceanen (toename van de massa) – (eustatische zeespiegelstijging)
- de dichtheid van het aanwezige oceaanwater (toename van het volume) – (sterische zeespiegelstijging)

Het smelten van gletsjers en ijskappen en veranderingen in rivierafvoer zijn voorbeelden van processen die bijdragen aan de toename van de massa. De grootste bijdrage aan de toename van het volume komt van het krimpen of uitzetten van oceaanwater door een temperatuurverandering in reactie op een verandering van de luchttemperatuur. Het smelten van zeeijs heeft geen invloed op de hoogte van de zeespiegel: drijvend zeeijs verplaatst net zoveel water als het eigen gewicht (wet van Archimedes). Als zeeijs smelt, wordt het verplaatste water vervangen door smeltwater.

Ook bodemdaling speelt een belangrijke rol, maar is erg plaatsafhankelijk. Nederland, bijvoorbeeld, ondergaat momenteel een bodemdaling van enkele centimeters per eeuw, door inklinking van de bodem en door naijleffecten van de laatste ijstijd.

## **1.2 Bepaling van de zeespiegelstijging**

De zeespiegelstijging wordt bepaald met behulp van

- peilschalen langs de kust
- satellieten
- klimaatmodellen

Peilschalen langs de kust meten niet alleen getijden maar ook de relatieve zeespiegelstijging. Sommige van deze meetreeksen beslaan meer dan 100 jaar. Om uit die gegevens de zeespiegelstijging af te kunnen leiden is nauwkeurige informatie over de lokale bodembeweging nodig, met name over de (nog steeds doorwerkende) reactie op het



verdwijnen van de gletsjers uit de ijstijden. Deze bodembeweging wordt zo goed mogelijk bepaald met behulp van geologische modellen van de aardkorst. Toch is deze relatie tussen relatieve zeespiegelstijging en absolute zeespiegelstijging een bron van onzekerheid.

Sinds 1993 kunnen veranderingen in de zeespiegel over de hele wereld zeer nauwkeurig worden waargenomen met satellieten. Het nadeel is dat deze satellieten niet alleen langjarige trends in de zeespiegel ten gevolge van klimaatveranderingen registreren maar ook variaties die veroorzaakt worden door natuurlijke schommelingen in de oceaancirculatie. Om de invloed van deze schommelingen op de resultaten uit te filteren, zijn veel langere meetreeksen nodig dan de nu beschikbare 13 tot 14 jaar. Daarom zullen de peilschalen voorlopig nog een belangrijke rol blijven spelen.

Verwachtingen voor het toekomstige zeeniveau worden berekend met behulp van klimaatmodellen. In deze modellen worden de natuurkundige vergelijkingen die de stromingen in de atmosfeer en de oceaan bepalen opgelost op een rekenrooster. Klimaatmodellen zijn vergelijkbaar met de modellen die worden gebruikt voor de weersverwachtingen, alleen willen we nu niet een week vooruit kijken maar een eeuw. De berekeningen worden gedaan op een veel grover rooster dan deze voor de weersverwachtingen, omdat ze anders te veel computertijd zouden kosten. In dergelijke klimaatsimulaties moet een toekomstscenario worden gekozen voor bijvoorbeeld de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer.

### **1.3 Zeespiegelveranderingen tgv aardbevingen of platentectoniek**

De globale zeespiegel kan drastisch veranderen door een verandering van de beschikbare oceaانبekkens.

Een typisch voorbeeld hiervan is de uitdroging van het Middellands Zeebekken tijdens het laat-Mioceen (zo'n 5.9 miljoen jaar geleden). Tijdens deze periode was de Middellandse Zee volledig afgesloten van de globale oceaانبekkens. Dit, in combinatie met de meer zuidelijke ligging van het gebied, zorgde ervoor dat het grootste gedeelte van het water van de Middellandse Zee verdampte. De herverdeling van deze waterhoeveelheid zorgde wereldwijd voor een zeespiegelstijging van ongeveer 10 m. Toen de Straat van Gibraltar zich opnieuw opende, stroomde het oceaanwater terug in het bassin van de Middellandse Zee waardoor de globale zeespiegel opnieuw daalde met enkele tientallen meter en dit vermoedelijk binnen een termijn van enkele weken.

### **1.4 Zeespiegelstijging door smelten van al het landijs**

De ijskappen van Antarctica, Groenland en al het resterende landijs (zoals de gletsjers in Alaska, Canada, de Himalaya en op IJsland) bevatten in totaal momenteel bijna 29 miljoen kubieke kilometer zoet water (1 kubieke kilometer is 1 000 000 000 000 liter water).

Wanneer al het ijs zou smelten geeft dit

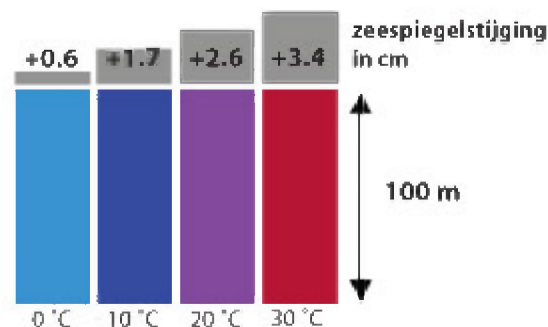
- Antarctica: potentieel 61 meter zeespiegelstijging
- Groenland: 7 meter zeespiegelstijging
- Overig landijs: 0.5 meter zeespiegelstijging

Al dit landijs kan niet in korte tijd smelten. Maar ook gedeeltelijk en langzaam smelten van de ijskappen kan een aanzienlijke zeespiegelstijging tot gevolg hebben.

### **1.5 Zeespiegelstijging door het uitzetten van de oceaan**

Wanneer de luchttemperatuur stijgt zal ook de temperatuur van de oceaan stijgen, eerst aan het oppervlak en later ook op grotere diepte. Als gevolg van de opwarming zal het oceaanwater uitzetten. Hoeveel het water uitzet bij een bepaalde temperatuurstijging hangt sterk af van de temperatuur van het zeewater zelf: warm water zet meer uit dan koud water. Ook het zoutgehalte en de diepte waarop het water zich bevindt zijn van belang voor de uitzetting.

Voor het bepalen van de zeespiegelstijging door uitzetting van het zeewater is het dus niet alleen van belang om te weten hoeveel de luchttemperatuur stijgt, maar ook hoe snel die warmte wordt opgenomen in de oceaan en tot op welke diepte die opwarming merkbaar is. Als voorbeeld staat in Fig. 2 uitgebeeld wat de gevolgen zijn voor de zeespiegel wanneer een waterkolom over 100 meter diepte 1 graad Celsius warmer wordt, voor verschillende waarden van de watertemperatuur. Het plaatje geldt voor zout water aan het zeeoppervlak.



*Fig. 2: Zeespiegelstijging door uitzetting bij 1° C opwarming over een diepte van 100 meter.*

### **1.6 Zeespiegelstijging in de 20<sup>ste</sup> eeuw**

Wereldwijd is de zeespiegel gedurende de twintigste eeuw gestegen met ongeveer 14-20 centimeter (1.4-2.0 millimeter per jaar) De belangrijkste oorzaken hiervan zijn:

- de uitzetting van het zeewater
- het smelten van gletsjers en landijs
- het smelten van de Groenlandse ijskap

De ijskap van Antarctica is in de twintigste eeuw gegroeid. Omdat het er zo extreem koud is smelten alleen de randen van de ijskap bij de waargenomen stijging van de luchttemperatuur. De neerslag boven het continent (in de vorm van sneeuw) neemt toe, omdat de warmere lucht wel veel meer vocht kan vasthouden. De groei van Antarctica heeft de zeespiegelstijging in de twintigste eeuw getemperd met ongeveer 1 centimeter.

Ook de zeer trage aanpassing van de ijskappen sinds de laatste IJstijd (18 000 jaar geleden) had in de twintigste eeuw nog een zeespiegelstijging van ongeveer 2.5 cm tot gevolg.

De zeespiegel stijgt de laatste jaren sneller dan de eerder genoemde 1.4-2.0 millimeter per jaar: satellietmetingen laten een zeespiegelstijging van ruim 3 millimeter per jaar zien voor de periode 1993-2005. Omdat de reeks van satellietmetingen zo kort is kan niet worden uitgesloten dat deze versnelling (deels) veroorzaakt wordt door natuurlijke schommelingen in het zeeniveau door variaties in zeestromingen.

### 1.7 Zeespiegelstijging in de 21<sup>ste</sup> eeuw

Verwachtingen van de zeespiegelstijging zijn gebaseerd op berekeningen met klimaatmodellen voor verschillende toekomstscenario's (zie Fig. 3), met een hoge en een lage uitstoot van broeikasgassen bijvoorbeeld.

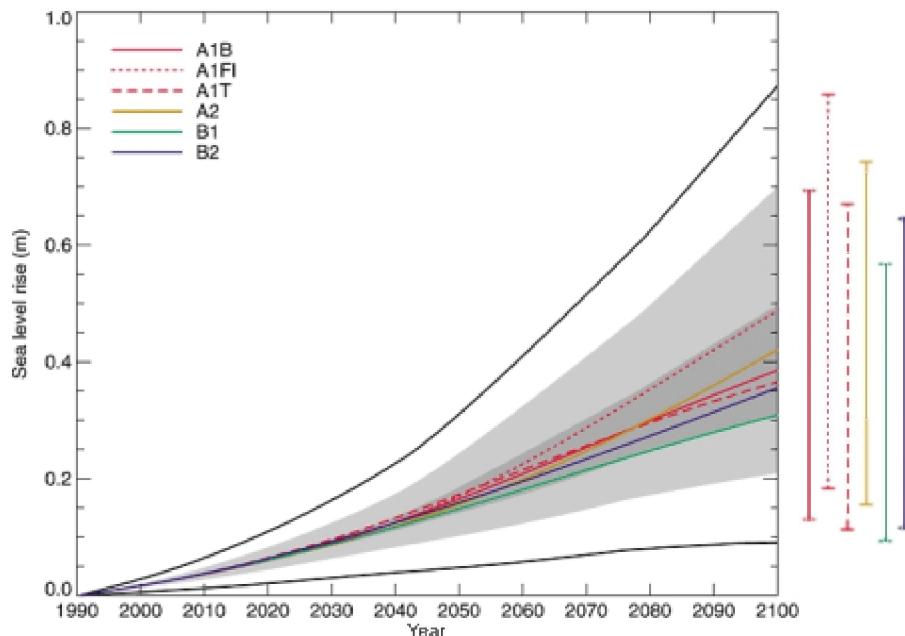


Fig. 3: Verwachte wereldwijde zeespiegelstijging in de 21<sup>ste</sup> eeuw (bron: IPCC rapport, 2001)

In het derde IPCC rapport (verschenen in 2001) staat vermeld dat in het jaar 2100 de zeespiegel 9 tot 88 centimeter hoger zal zijn dan in 1990, ten gevolge van

- de uitzetting van het zeewater (ongeveer 75% van het totaal)
- het smelten van gletsjers en landijs (25%)
- het smelten de Groenlandse ijskap (10%)
- de toegenomen sneeuwval op Antarctica zal de zeespiegelstijging met 20% verminderen

2 februari 2007 verscheen de vierde editie van het IPCC rapport, met daarin de nieuwste berekeningen van de klimaatmodellen.

Hoeveel de zeespiegel zal stijgen in de komende eeuw(-en) hangt sterk af van

- de stijging van de luchttemperatuur, omdat die voornamelijk bepaalt hoe snel het landijs smelt en hoe snel en waar de oceanen zullen opwarmen.
- de hoeveelheid broeikasgassen die door de mens in de atmosfeer wordt uitgestoten, omdat die bepaalt hoe sterk de luchttemperatuur zal stijgen.

Omdat de menselijke uitstoot een onzekere factor is, worden de stijging van de luchttemperatuur en van de zeespiegel berekend voor verschillende scenario's voor de uitstoot (gekleurde lijnen *Fig. 3*; rood= scenario met sterke economische groei en veel gebruik van fossiele brandstoffen; groen= scenario met wereldwijde aanpak van milieuproblemen)

Naar verwachting zal in het jaar 2100 de luchttemperatuur 1.4 tot 5.8°C hoger zijn dan in 1990 (IPCC, 2001). Hoe groter de stijging van de luchttemperatuur is, hoe groter ook de zeespiegelstijging.

De grote spreiding in de schatting voor de zeespiegelstijging voor het jaar 2100 is niet alleen een gevolg van het rekenen met verschillende toekomstscenario's. De klimaatmodellen waarmee deze berekeningen gedaan worden, zijn het soms ook oneens met elkaar. Bepaalde natuurkundige processen zijn (nog) moeilijk in een model te representeren, zodat nog niet precies bekend is hoe groot hun bijdrage aan de zeespiegelstijging op een bepaald moment is. De meest onzekere factoren zijn de effectiviteit waarmee warmte uit de atmosfeer wordt opgenomen in de oceaan en veranderingen in de zoetwaterkringloop (veranderingen in de rivierafvoer, het grondwaterpeil, etcetera).

## **1.8 IPCC**

Het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) is in 1988 opgericht door de World Meteorological Organization en het United Nations Environmental Programme. Eens per 5 à 6 jaar beoordeelt het IPCC de kennis op het gebied van klimaat en klimaatverandering, en de menselijke invloed op het klimaat. In 1995 verscheen het Second Assessment Report (SAR), en in de zomer van 2001 het Third Assessment Report (TAR). In februari 2007 verscheen dan het vierde rapport. De resultaten hiervan komen later nog aan bod.

Drie IPCC werkgroepen bereiden elk een rapport voor op basis van de actuele inzichten. Werkgroep I richt zich op de wetenschappelijke aspecten van het klimaatsysteem en de natuurlijke en door de mens veroorzaakte veranderingen daarin. Werkgroep II houdt zich bezig met de effecten van door de mens veroorzaakte klimaatveranderingen, de noodzakelijke aanpassingen en de mogelijkheden daartoe. Werkgroep III brengt mogelijke beleidsmaatregelen in kaart die door de mens veroorzaakte klimaatveranderingen moeten tegengaan.

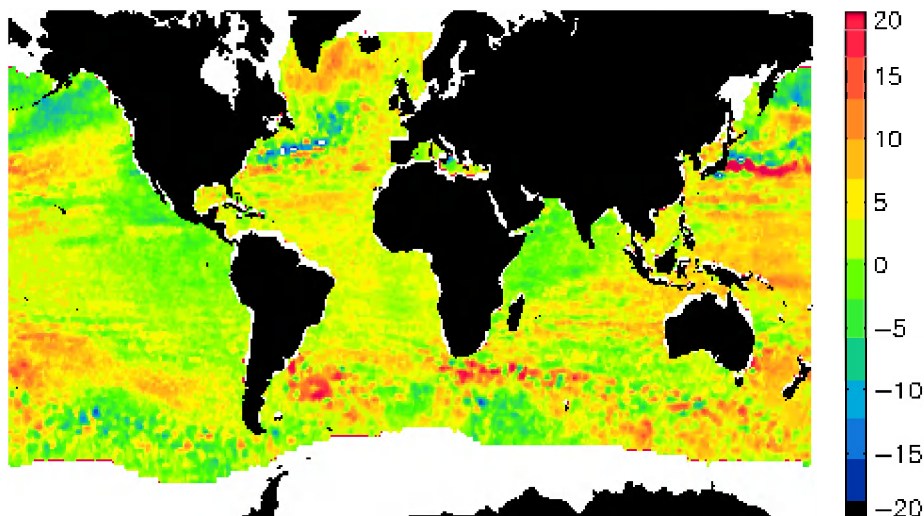
## **1.9 Lokale verschillen in zeespiegelstijging t.o.v. mondiale**

Het lokale zeeniveau kan sterk afwijken van het wereldgemiddelde niveau:

- Variaties in de temperatuur en het zoutgehalte van het zeewater veroorzaken bulten en kuilen in het zeeoppervlak, die (net als hoge- en lagedrukgebieden in de atmosfeer) specifieke stromingspatronen veroorzaken. De regionale variaties in temperatuur en zoutgehalte kunnen zo blijven bestaan.
- Bij de kust speelt de opzet van water door de wind een rol.

Satellieten brengen elke twee weken het hele aardoppervlak in kaart (zie Fig. 4). Deze metingen laten gebieden zien waar de zeespiegelstijging wel 10 keer zo groot is als het gemiddelde van ruim 3 mm/jaar, en ook gebieden waar zeespiegeldaling optreedt.

De beschikbare meetreeksen zijn alleen nog te kort om eventuele trends in het zeeniveau veroorzaakt door klimaatveranderingen te kunnen onderscheiden van variaties die worden veroorzaakt door natuurlijke schommelingen in oceaanstromingen. Ook met behulp van klimaatmodellen wordt geprobeerd het wereldwijde patroon van zeespiegelstijging te bepalen. De modellen zijn het echter onderling niet eens, wat aangeeft dat de resultaten nog zeer onzeker zijn.



*Fig. 4: Zeespiegelstijging in mm/jaar voor de periode 1993-2005 gemeten door satellieten (bron: Colorado State University)*

## **1.10 Projecties voor België**

Op wereldvlak is de verwachte gemiddelde temperatuursstijging vrij goed bekend, maar dit geldt niet voor de regionale spreiding van de klimaatverandering. En zeker niet als het gaat over de waterkringloop. Bovendien is het oppervlak van België klein ten opzichte van de

resolutie van de globale klimaatmodellen. Maar toch zijn er, afhankelijk van de verschillende scenario's en modellen, enkele trends waar te nemen:

- De temperaturen stijgen in alle onderzochte gevallen en dit zowel tijdens de zomer als tijdens de winter. Aan het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw zou de temperatuurstijging, in vergelijking met het eind van de 20<sup>ste</sup> eeuw, 1,7 tot 4,9°C bedragen in de winter, 2,4 tot 6,6 °C tijdens de zomer.
- De projecties voor de evolutie van de neerslag tegen het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw vermelden een stijging met 6 tot 23% in de winter, en een evolutie voor de zomer gaande van een status quo tot een daling met 50%.

### **1.11 De kuststreek**

De stijging van het gemiddelde zeepeil is een aspect van de klimaatverandering waarover nog heel wat onzekerheid bestaat: zo varieert de gemiddelde stijging voor alle scenario's samen voor de periode van 1999 tot 2100 van 9 tot 88 cm. Bovendien ondergaat het vasteland zelf een aanpassing ten gevolge van de laatste ijstijd. Vermoedelijk zal het bodemniveau in het noordelijk deel van België in de loop van de 21<sup>ste</sup> eeuw daardoor dalen met 5 cm.

Door de klimaatverandering krijgen de kustgebieden te maken met drie soorten impact:

- toename van het risico van overstromingen bij stormen.
- erosie van de kust.
- verdwijnen of verder verschuiven naar het binnenland van de natuurlijke vochtige gebieden.

Andere gevolgen die als minder belangrijk worden beschouwd zijn de stijging van de grondwaterspiegel, het binnendringen van zout water in het grondwater en de verzilting van de bodem.



*Fig 5: blauwe gebieden overstroomd bij respectievelijke zeespiegelstijging*

Bovenstaande figuur geeft een overzicht van de eventueel getroffen streken door een vergelijking te maken tussen de gebieden die momenteel onder het gemiddelde zeeniveau liggen en de gebieden die daar door een stijging van de zeespiegel met 1 meter of met 8 meter ook onder zouden vallen. Door een stijging van de zeespiegel met 1 meter zou

63.000 hectare onder de zeespiegel komen te liggen. Hierbij mogen we niet uit het oog verliezen dat dit een geleidelijk proces is dat zich ook na de 21<sup>ste</sup> eeuw nog verder zal zetten. Als men de lijn doortrekt zou over duizend jaar de stijging 1.5 tot 10 meter kunnen bedragen. Dit betekent dat bijna één tiende van het Belgische grondgebied (bijna 3700 km<sup>2</sup>) onder water zou kunnen komen te liggen.

De Belgische Kust is 65 kilometer lang en wordt voor meer dan de helft beschermd door een dijk. Langs een groot deel van de kust wordt de bescherming van het binnenland voorzien door de stranden en de duinen. De erosie treft de stranden niet altijd even sterk: sommige stranden blijven stabiel en groeien zelfs nog aan. Maar een groot deel van de kust is onderhevig aan erosie. Bij storm kan het gebeuren dat grote hoeveelheden zand worden weggerukt van duinen en stranden. Ook de getijden en de zeestromingen langs de kust spelen een belangrijke rol in het erosieproces. Er zijn talrijke golfbrekers aangelegd om de impact ervan te minimaliseren. Ook wordt er op bepaalde plaatsen langs de kust zand aangevoerd als compensatie voor de erosie.

Er zijn dus goede redenen om aan te nemen dat de erosie zal toenemen als gevolg van een stijgende zeespiegel. Sommige modellen tonen ook aan dat het aantal zware stormen zou toenemen wat op zijn beurt de erosie erger maakt.

Alhoewel sommige aspecten ver van zeker zijn, blijft dit verschijnsel een zorgenkind. De administratie die verantwoordelijk is voor de bescherming van de kust (Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust, MDK), houdt in haar beleid inzake de gevolgen van de klimaatverandering rekening met de termijn waarop de genomen beslissingen gevolgen hebben: voor de ophoging van de stranden volgt MDK gewoon de ontwikkeling. Dat betekent dat het mogelijk is om in de toekomst zand aan te voeren waar het nodig is. Maar als het om bouwwerken zoals dijken gaat, wordt er rekening gehouden met een stijging van de zeespiegel met 60 centimeter in de 21<sup>ste</sup> eeuw.

Een laatste belangrijk punt heeft betrekking op het estuarium van de Schelde en haar bijrivieren die nog een getijdenwerking kennen. Na de overstromingen van 1976, die waren veroorzaakt door een storm in de Noordzee, is een 'Sigmaplan' opgesteld voor de bescherming van het bekken van de Zeeschelde (het Sigmaplan is echter niet volledig gerealiseerd). Maar de grote stormen van 1990 hebben aangetoond dat het veiligheidsniveau nog steeds onvoldoende is. Om het huidige veiligheidsniveau te verbeteren wordt een 'gecontroleerd overstromingsgebied' voorbereid, om opnieuw plaats te voorzien waar het water zich tijdelijk kan opstapelen in geval van een heel hoog tij, om zo de bereikte hoogte te verminderen.

Na afronding van de voorziene werken zal het risico, voor de huidige klimaatsomstandigheden, liggen op één overstroming in 350 jaar. Met betrekking tot de toekomst zal het risico op overschrijding tot 2050 opnieuw één keer op 70 jaar voorkomen en tegen 2100 één keer op 20 jaar. Om het risico te verminderen, onder andere met het oog op de klimaatverandering, wordt het Sigmaplan momenteel geactualiseerd.

## **1.12 Wat zijn de verwachtingen voor de verre toekomst?**

Ook wanneer de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer op een gegeven moment niet meer toeneemt zal de zeespiegel nog vele eeuwen blijven stijgen door de zeer trage

- opname van atmosferische warmte in de oceaan en
- smelt van ijskappen en gletsjers

Door de uitzetting van het zeewater zal de zeespiegel in het jaar 3000 ongeveer 0.5 tot 4 meter hoger zijn dan nu, afhankelijk van de uiteindelijke hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer.

Waarschijnlijk zal een aanzienlijk deel van het landijs in de komende 1000 jaar verdwijnen. De kleinere gletsjers kunnen maximaal een halve meter zeespiegelstijging veroorzaken. De Groenlandse ijskap is zeer kwetsbaar voor klimaatveranderingen. In het jaar 3000 zal de zeespiegel door het smelten van de Groenlandse ijskap naar schatting gestegen zijn met 1 tot 6 meter.

Het oostelijk deel van de Antarctische ijskap blijft voorlopig wel in stand: daar moet de luchttemperatuur met maar liefst 20°C stijgen voordat het ijs gaat smelten. Het westelijk deel, dat genoeg zoet water bevat voor 6 meter zeespiegelstijging, is volop in beweging en veel gevoeliger voor temperatuurveranderingen. Er zijn een aantal fysische processen die er voor kunnen zorgen dat dit deel van de ijskap veel sneller verdwijnt dan alleen op grond van de stijging van de luchttemperatuur te verwachten valt. Zo kunnen de ijsplaten (de uitlopers van de ijskap in zee) losraken van de oceaانبodem doordat de zeespiegel stijgt, waardoor de ijskap sneller in zee gaat stromen en de afkalving groter wordt. Ook kan een stijging van de zeewatertemperatuur zorgen voor extra afsmelting aan de onderkant van deze ijsplaten. De kans dat het westelijk deel van de Antarctische ijskap in de komende 100 jaar helemaal smelt is zeer klein. Hoe groot de kans is dat het in de loop van de komende 1000 jaar gebeurt is moeilijk in te schatten, omdat de processen die een rol spelen bij de snelle afbraak nog heel slecht begrepen zijn.

## **1.13 Samenvatting resultaten eerdere studies**

- 1993: “Synopsis of the tidal observations along the Belgian Coast – conclusions with respect to the high water, the mean sea level and the low water levels. “  
Ing. C. Van Cauwenberghe

Lineaire regressie werd toegepast op de waarden van HW, MSL en LW tov TAW voor Oostende en Vlissingen (waarvoor de informatie werd verstrekt door Rijkswaterstaat Nederland)

Voor Oostende werden 2 periodes bestudeerd, namelijk 1835-1852 en 1927-1991 (met uitzondering van de periode tijdens de Tweede Wereldoorlog). Over de twee periodes wordt een stijging van 0.01 m/10jaar gevonden. Indien enkel met de tweede periode rekening wordt gehouden, wordt een stijging van 0.02 m/10 jaar voor HW, een stijging van 0.015 m/10 jaar voor MSL en een stijging van 0.01 m/10 jaar voor LW gevonden.



Bij omzetting van de data voor Vlissingen naar TAW over een periode van 102 jaar (1890-1991) wordt een stijging van 0.03 m/10 jaar bij HW, 0.02 m/10jaar voor MSL en een stijging van 0.015 m/10 jaar bij LW gevonden.

*(zie fig 6 en fig 7)*

- 1995: "Relative sea level rise: further analysis."  
Ing. C. Van Cauwenberghe

Ook hier werd lineaire regressie toegepast op de waarden van HW, MSL en LW tov TAW voor Oostende. De lineaire regressie werd toegepast op de jaarlijkse waarde van HW, LW en MSL, waarbij de lineaire correlatiecoëfficiënt (Pearson r) en het 95 % betrouwbaarheidsinterval werd bepaald. Voor de 3 waarden (HW, MSL en LW) werd een toename van 0.01 m/10 jaar gevonden indien de 2 perioden 1835-1852 en 1927-1944 (behalve de 4 jaar tijdens WO II) in rekening worden gebracht.

Indien echter enkel rekening wordt gehouden met de tweede, en meest betrouwbare periode wordt voor HW een stijging van 0.02 m/10 jaar, voor MSL een stijging van 0.04 m/10 jaar en voor LW een stijging van 0.01 m/10jaar gevonden. Wat mooi overeenstemt met de bekomen waarden in een eerdere studie (zie hoger – 1993). Nochtans liggen de correlatiecoëfficiënten aan de hoge kant.

Ook voor Vlissingen worden 2 periodes bekeken, namelijk 1890-1994 en een periode 1927-1994, deze laatste om vergelijking met Oostende mogelijk te maken.

De eerste periode geeft een stijging van 0.033 m/10 jaar voor HW, 0.021 m/10jaar voor MSL en een stijging van 0.018 m/10 jaar voor LW.

De tweede periode geeft ongeveer dezelfde waarden voor HW, namelijk een stijging van 0.0336 m/10 jaar, maar geeft enkele verschillen voor LW en MSL, namelijk een stijging van 0.017 m/10 jaar voor MSL en een stijging van 0.011 m/10 jaar voor LW.

De correlatiecoëfficiënten liggen hoger dan deze voor Oostende.

De resultaten van de lineaire regressie voor Nieuwpoort (1967-1994) en Zeebrugge (1964-1994) vallen tegen, zij tonen immers niet dezelfde trend als Oostende en Vlissingen. Voor Nieuwpoort zijn de r-waarden voldoende hoog, maar de toename bedraagt meer dan 0.03 m/10 jaar voor HW, MSL en LW.

Voor Zeebrugge zijn de r-waarden voor HW, LW en MSL laag en negatief, hetgeen zou duiden op een daling van de zeespiegel. De verklaring hiervoor wordt gezocht in het feit dat voor beide stations de tijdreeksen niet voldoende lang zijn. Immers de periode voor Nieuwpoort (27 jaar) en Zeebrugge (31 jaar) bedragen slechts respectievelijk 1.5 en 1.67 van de nodale cyclus, terwijl dit voor Oostende (67 jaar) en Vlissingen (104 jaar) respectievelijk 3.65 en 5.64 keer de nodale cyclus is. Immers een nodale cyclus heeft een periode van 18.61 jaar.

*(zie fig 8, fig 9, fig 10 en fig 11)*

LINEAR TRENDS  
calculated on  
the Annual Values of HW, MSL and LW  
for OOSTENDE (Belgium).

\*\*\*\*\*

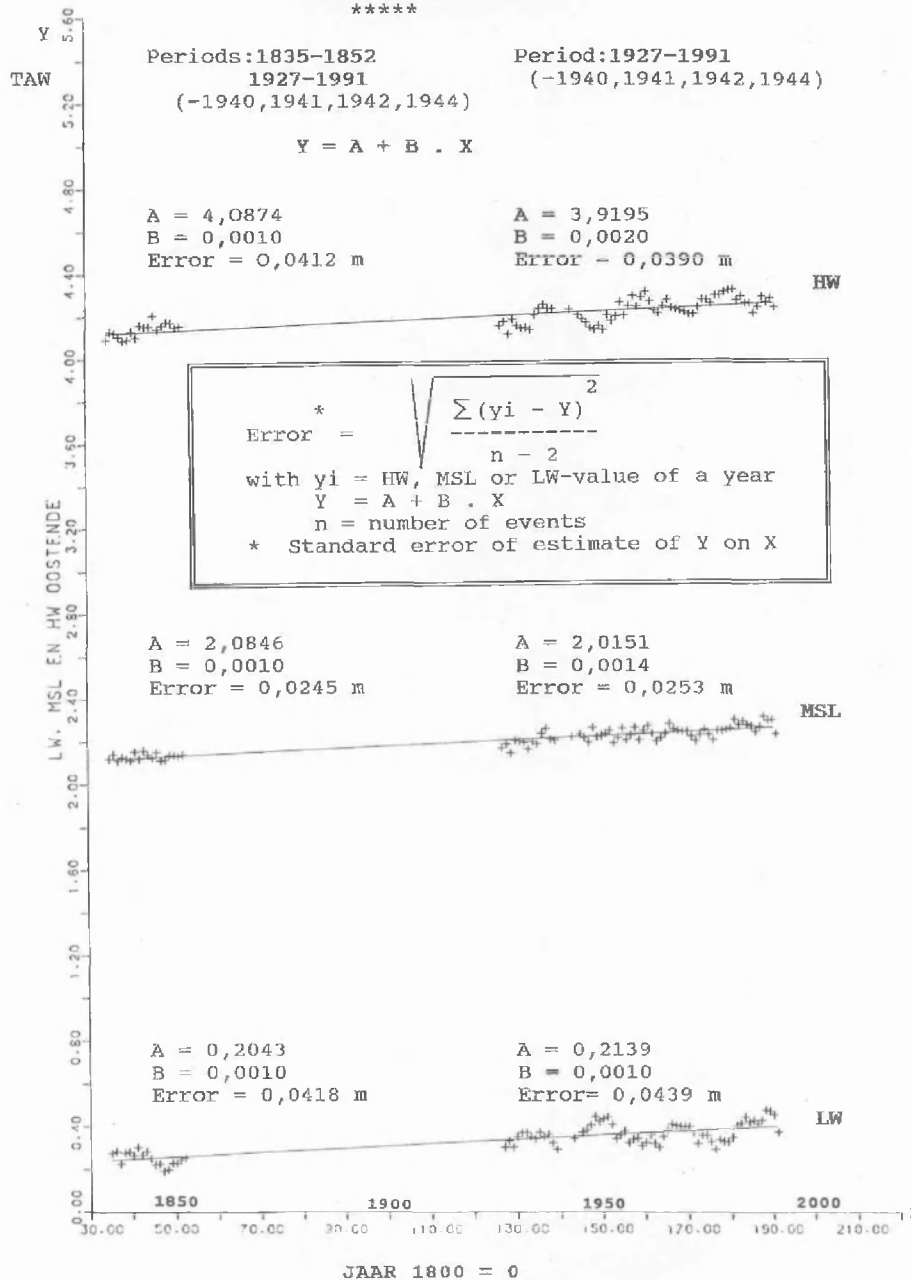


fig 6

LINEAR TRENDS  
calculated on  
the Annual Values of HW, MSL and LW  
for VLISSINGEN (The Netherlands).

\*\*\*\*\*

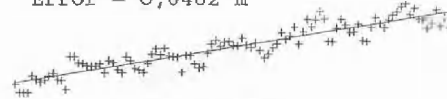
Period:1890-1991

$$Y = A + B \cdot X$$

$$A = 3,7255$$

$$B = 0,0033$$

$$\text{Error} = 0,0402 \text{ m}$$



HW

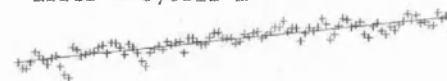
$$\text{Error} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - Y)^2}{n - 2}}$$

with  $y_i$  = HW, MSL or LW-value of a year  
 $Y = A + B \cdot X$   
 $n$  = number of events  
 \* Standard error of estimate of  $Y$  on  $X$

$$A = 1,8919$$

$$B = 0,0021$$

$$\text{Error} = 0,0312 \text{ m}$$

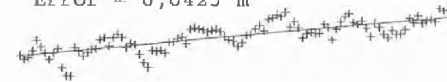


MSL

$$A = 0,1603$$

$$B = 0,0019$$

$$\text{Error} = 0,0423 \text{ m}$$



LW

Y  
TAW  
5.60  
5.20  
4.80  
4.40  
4.00  
3.60  
3.20  
2.80  
2.40  
2.00  
1.60  
1.20  
0.80  
0.40  
0.00

LW, MSL EN HW VLISSINGEN

1850 1900 1950 2000  
30.00 50.00 70.00 90.00 110.00 130.00 150.00 170.00 190.00 210.00 X

JAAR 1800 = 0

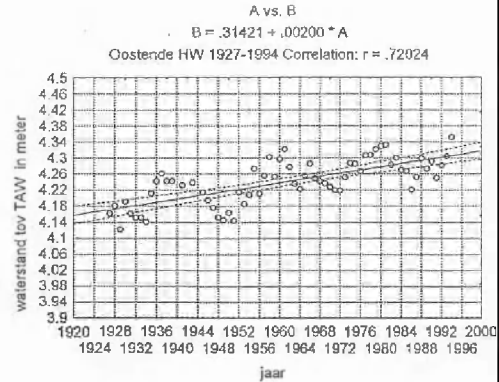
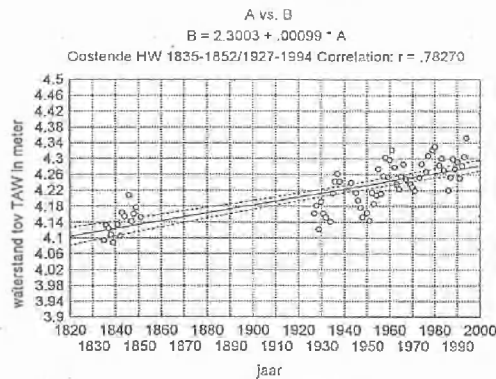
fig 7

LINEAR TRENDS  
calculated on  
the Annual Values of HW, MSL and LW  
for OOSTENDE (Belgium),  
\*\*\*\*\*

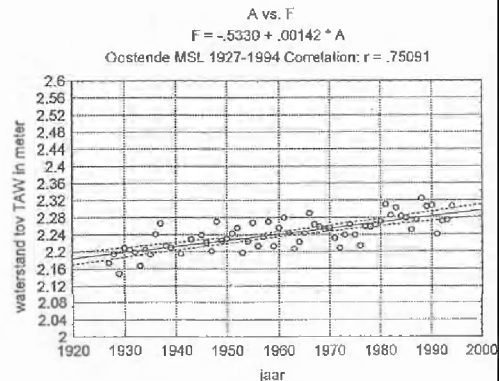
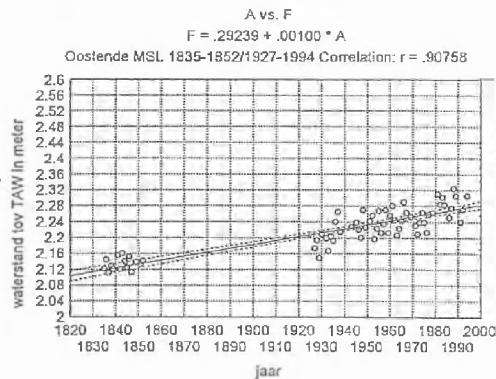
Periods: 1835-1852  
1927-1994  
(-1940, 1941, 1942, 1944)

Period: 1927-1994  
(-1940, 1941, 1942, 1944)

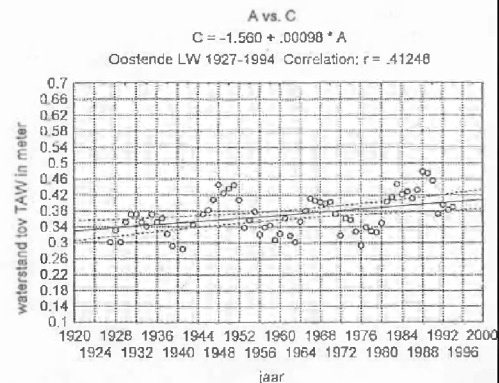
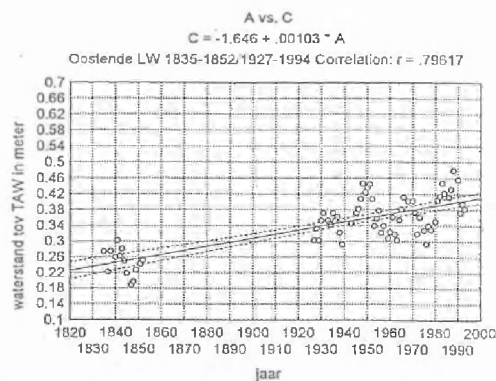
HW



MSL



LW



Regression  
95% confid.

fig 8

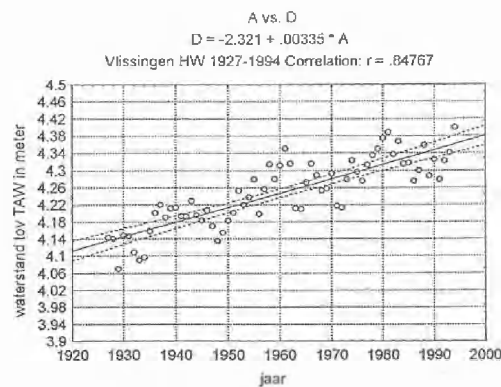
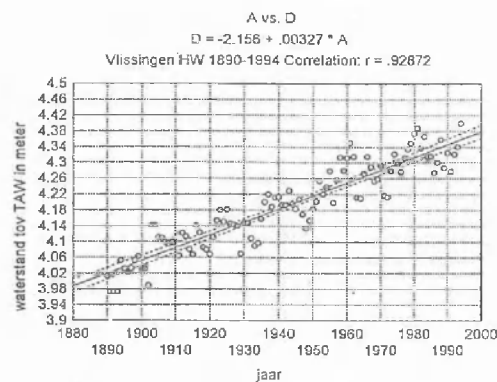
LINEAR TRENDS  
calculated on  
the Annual Values of HW, MSL and LW  
for VLISSINGEN (The Netherlands).

\*\*\*\*\*

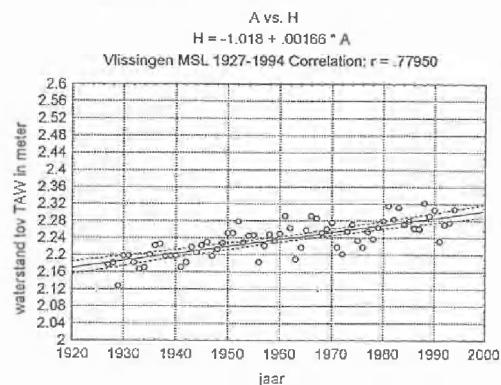
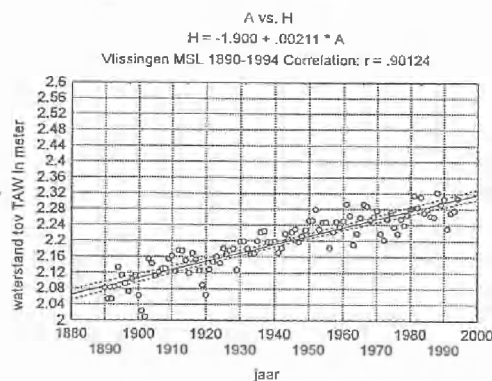
Period: 1890-1994

Period: 1927-1994

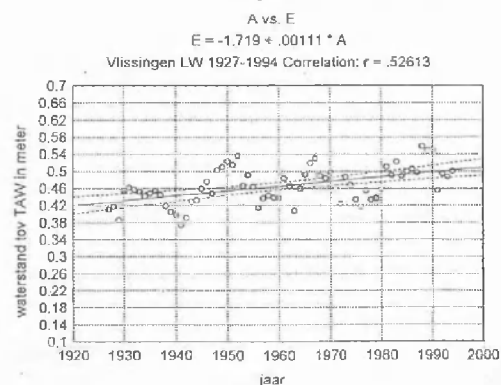
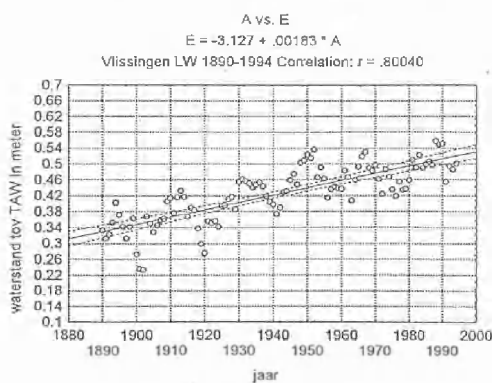
HW



MSL



LW



Regression  
95% confid.

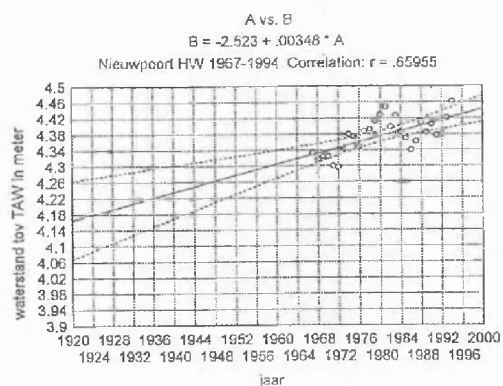
fig 9

**LINEAR TRENDS**  
calculated on  
the Annual Values of **HW**, **MSL** and **LW**  
for **NIEUWPOORT** (Belgium).

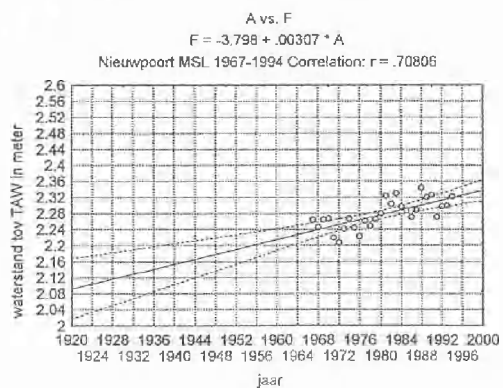
\*\*\*\*\*

Period: 1967-1994

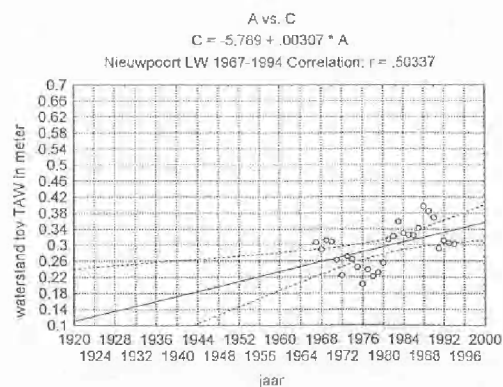
HW



MSL



LW



Regression  
95% confid.

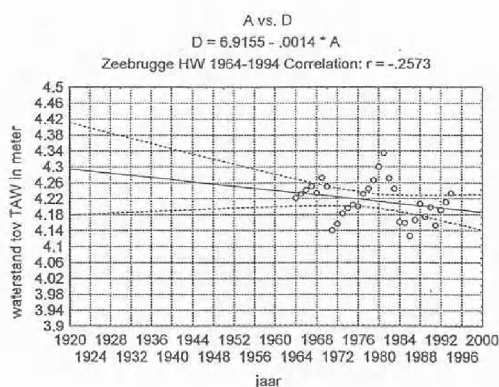
fig 10

LINEAR TRENDS  
calculated on  
the Annual Values of HW, MSL and LW  
for ZEEBRUGGE (Belgium).

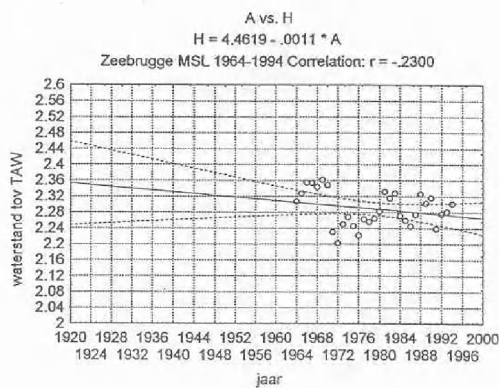
\*\*\*\*\*

Period: 1964-1994

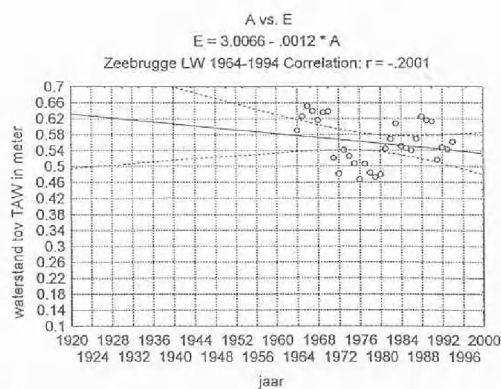
HW



MSL



LW



Regression  
95% confid.

fig 11

## **2 WERKWIJZE EN LINEAIRE REGRESSIE**

Deze studie steunt op de meetgegevens van de zeespiegelhoogte op drie verschillende locaties langs de Belgische kust: Nieuwpoort, Oostende en Zeebrugge. Voor elk van deze locaties werd de verandering van de zeespiegelhoogte bekeken op het moment van het hoogwater (hw), op het moment van het laagwater (lw) en vervolgens het gemiddeld zeeniveau (msl).

De hoeveelheid meetgegevens verschillen van locatie tot locatie; in Nieuwpoort beginnen de metingen voor het gemiddeld zeeniveau vanaf 1966, in Oostende vanaf 1945 en in Zeebrugge vanaf 1961. Voor de laag- en hoogwatergegevens beginnen de waarnemingen in Nieuwpoort vanaf 1959, in Oostende vanaf 1925 en in Zeebrugge vanaf 1959. Alle meetgegevens werden omgezet naar TAW (Tweede Algemene Waterpassing) en gedigitaliseerd.

Voor iedere maand werd per locatie en zowel voor hoogwater, laagwater als gemiddeld zeeniveau een gemiddelde waarde bepaald. Aan de hand van deze maandgemiddelden werd het jaargemiddelde bepaald. Met deze gegevens werd een grafiek gemaakt die de verandering van het hoogwater, laagwater en gemiddeld zeeniveau in de loop van de waarnemingsperiode weergeeft. Op de X-as staat de tijdslijn, op de Y-as het waterpeil. Aan de aldus bekomen spreiding werd een trendlijn volgens lineaire regressie toegevoegd.

Om de jaarlijkse zeespiegelschommeling te counteren, werden ook grafieken opgesteld die de verandering van het maandgemiddelde over de waarnemingsperiode weergeven. Dit geeft de verandering van de zeespiegel op een vast tijdstip tijdens het jaar. Dit voor iedere locatie en voor hoogwater, laagwater en het gemiddeld zeeniveau. Bij deze manier van evalueren kan worden opgemerkt dat vooral tijdens de wintermaanden (november tot en met april) de hoge windsnelheden (oa ten gevolge van de hogere frequentie aan stormen) voor een vrij grote spreiding van de gegevens rond de trendlijn zorgen. Dit uit zich in lage waarden voor de correlatiecoëfficiënt  $r$ .

Men moet eveneens rekening houden met de nodale cyclus of de ‘cyclische variatie in de getijslag’ die 18,6 jaar bedraagt en een relatieve amplitude van 3,8% heeft. Daarom is het ook interessant dat de verandering over deze periode bekeken wordt. Bij het onderzoeken van de impact van deze cyclus op de verandering van de zeespiegel werden een paar moeilijkheden ondervonden. Om dit te onderzoeken moet men beschikken over een voldoende lange periode met waarnemingen. Enkel te Oostende werden er voldoende lang waarnemingen gemaakt om een bepaalde evolutie te tonen.

## **3 RESULTATEN**

### **3.1 Presentatie van de gegevens**

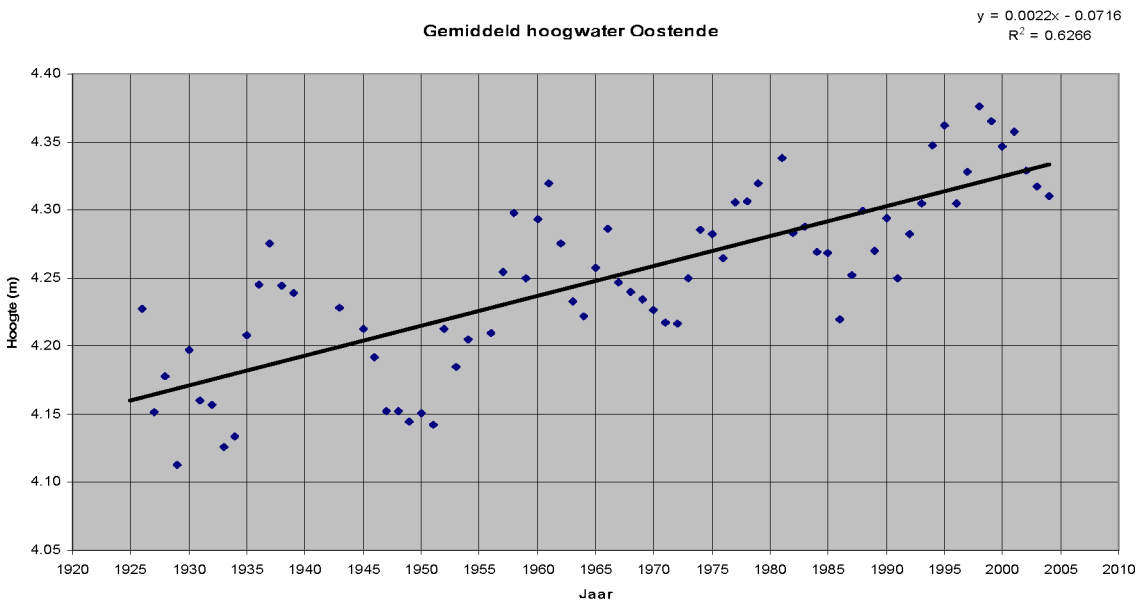
#### **3.1.1 Jaargemiddelden**

Per maand werden per locatie de gemiddelden gemaakt voor het hoogwater, laagwater en gemiddeld zeeniveau (MSL). Vertrekkend van deze maandgemiddelden werden de jaargemiddelden berekend. Deze jaargemiddelden werden op een grafiek uitgezet, met op de Y-as de hoogte en op de X-as de tijdsperiode van de waarnemingen.



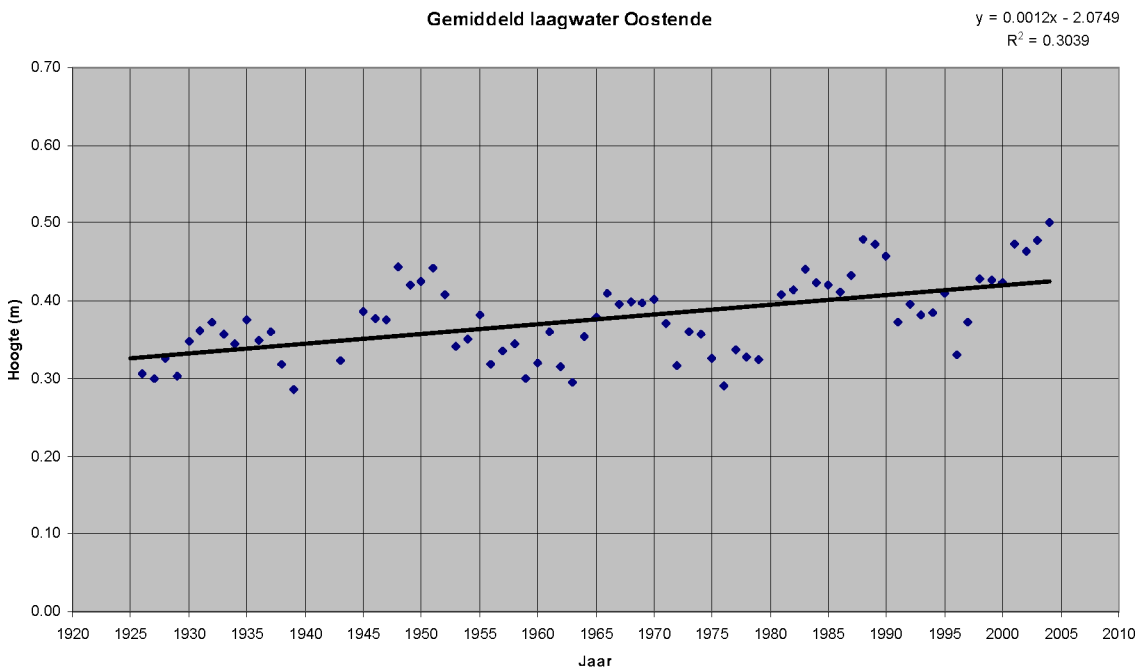
### 3.1.1.1 Oostende

#### 3.1.1.1.1 Hoogwater



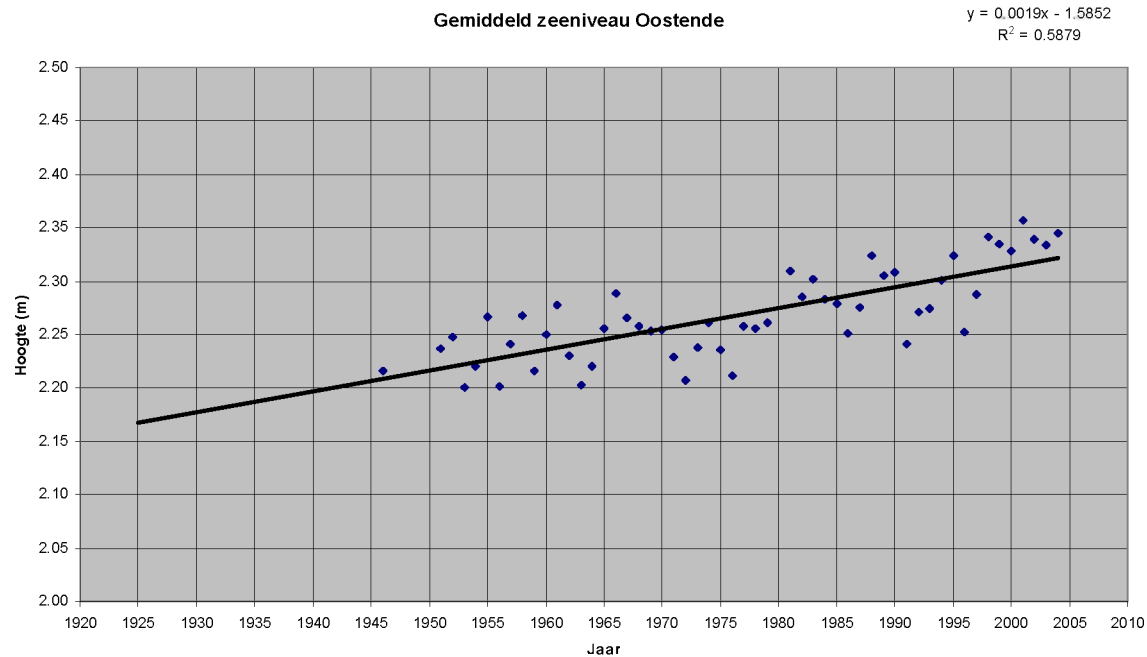
Waarnemingen vanaf januari 1926 tot december 2004 (-1940, 1941, 1942, 1944, 1955, 1980). Het hoogwater stijgt met 0.22 cm per jaar en  $r = 0.7916$ .

#### 3.1.1.1.2 Laagwater



Waarnemingen vanaf januari 1926 tot december 2004 (-1940, 1941, 1942, 1944, 1980). Het laagwater stijgt met 0.12 cm per jaar en  $r = 0.5513$ .

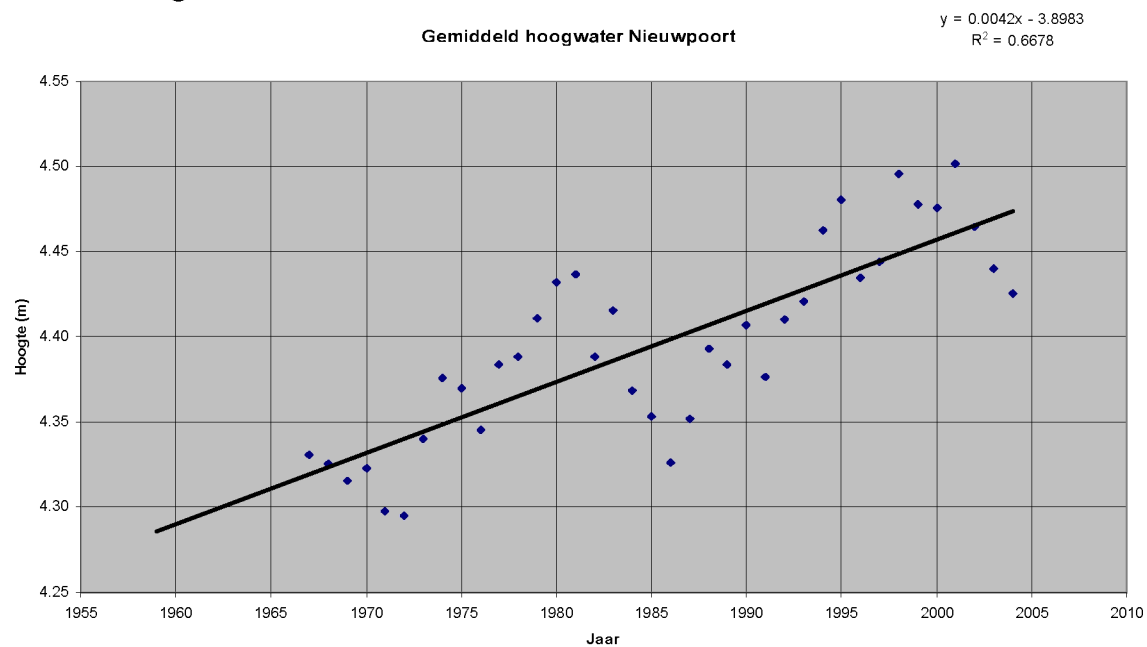
### 3.1.1.1.3 Gemiddeld Zeeniveau (MSL)



Waarnemingen vanaf januari 1946 tot december 2004 (-1947 tot 1950, 1980). Het gemiddelde zeeniveau stijgt met 0.19 cm per jaar en  $r = 0.7667$ .

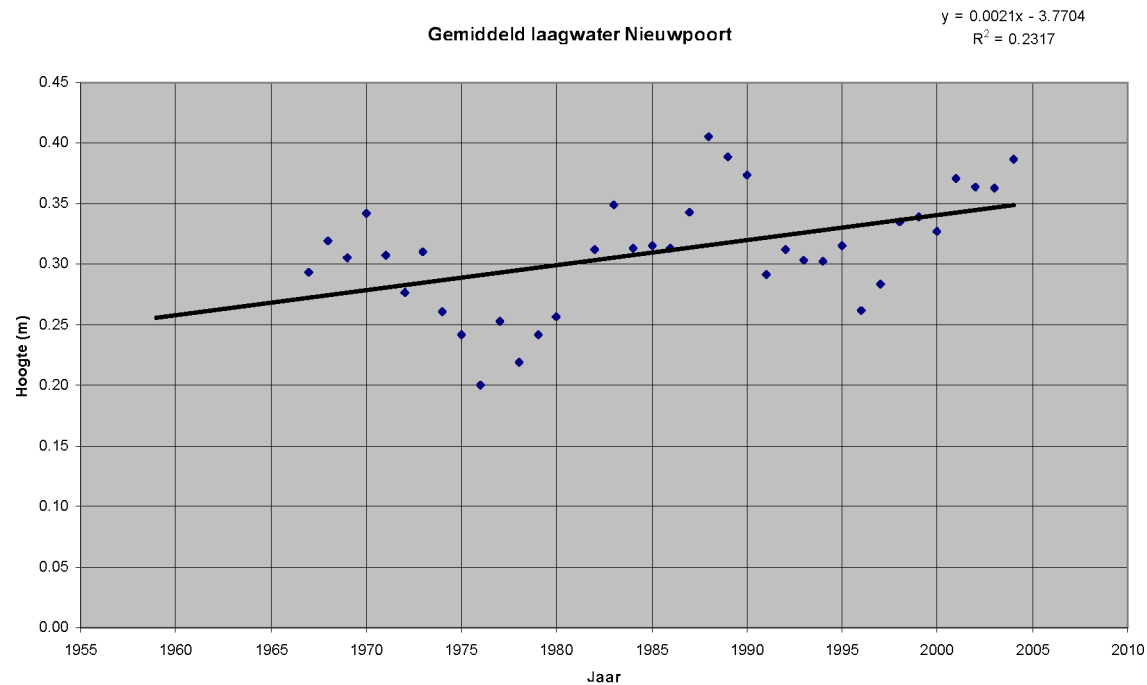
### 3.1.1.2 Nieuwpoort

#### 3.1.1.2.1 Hoogwater



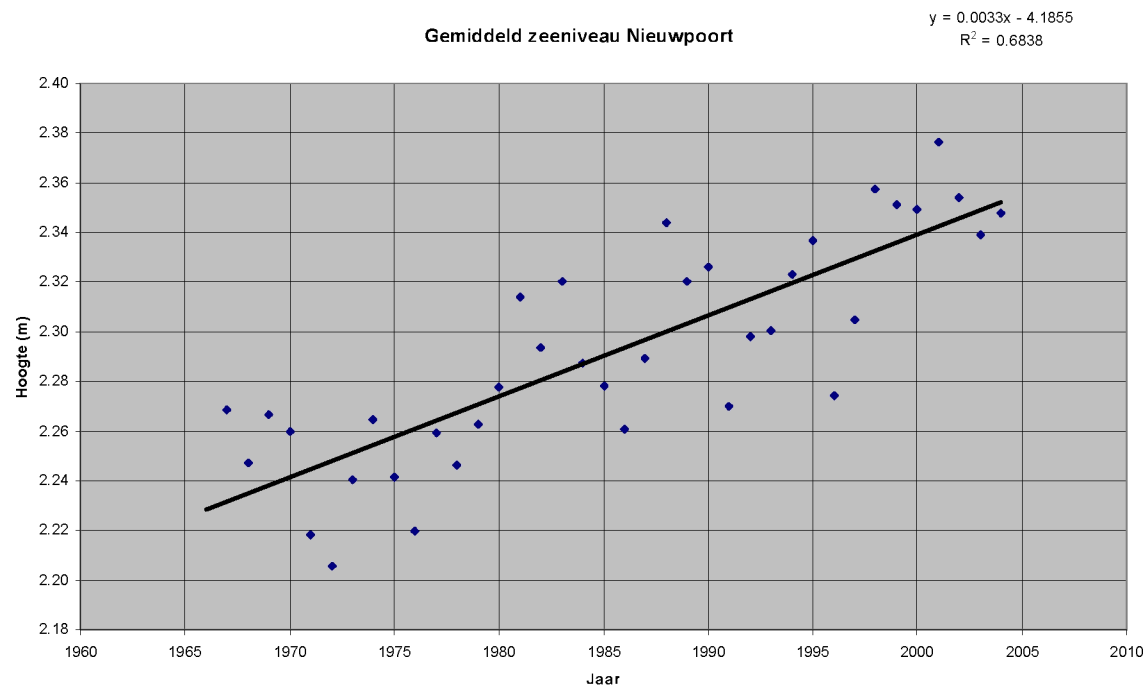
Waarnemingen vanaf januari 1967 tot december 2004. Het hoogwater stijgt met 0.42 cm per jaar en  $r = 0.8172$ .

### 3.1.1.2.2 Laagwater



Waarnemingen vanaf januari 1967 tot december 2004 (-1981). Het laagwater stijgt met 0.21 cm per jaar en  $r = 0.4814$ .

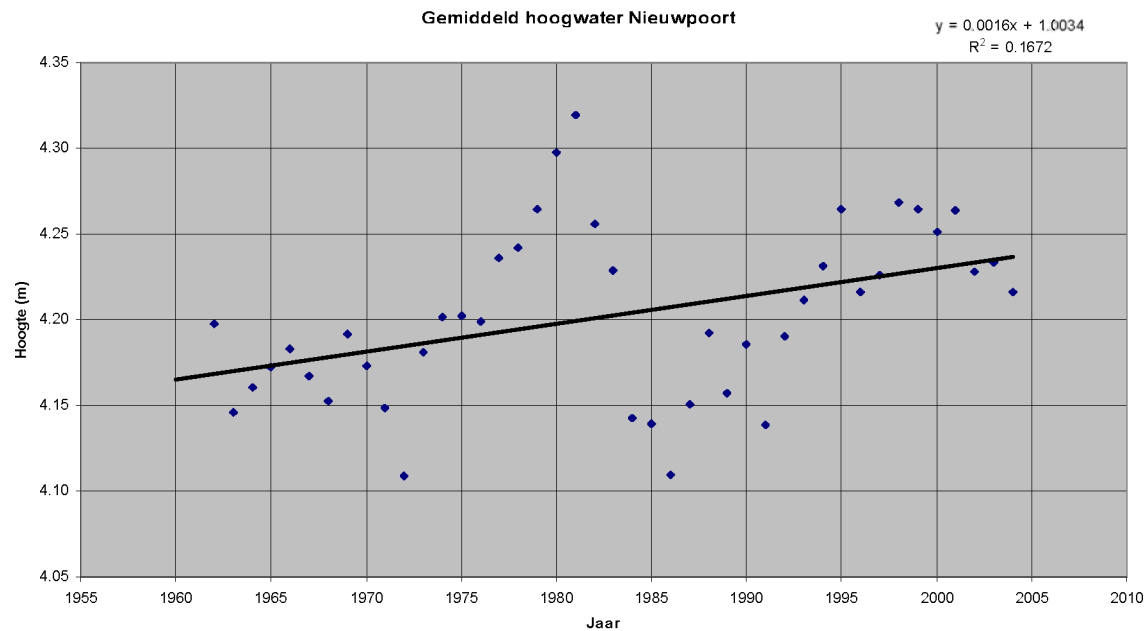
### 3.1.1.2.3 Gemiddeld Zeeniveau (MSL)



Waarnemingen vanaf januari 1967 tot december 2004. Het gemiddelde zeeniveau stijgt met 0.33 cm per jaar en  $r = 0.8269$ .

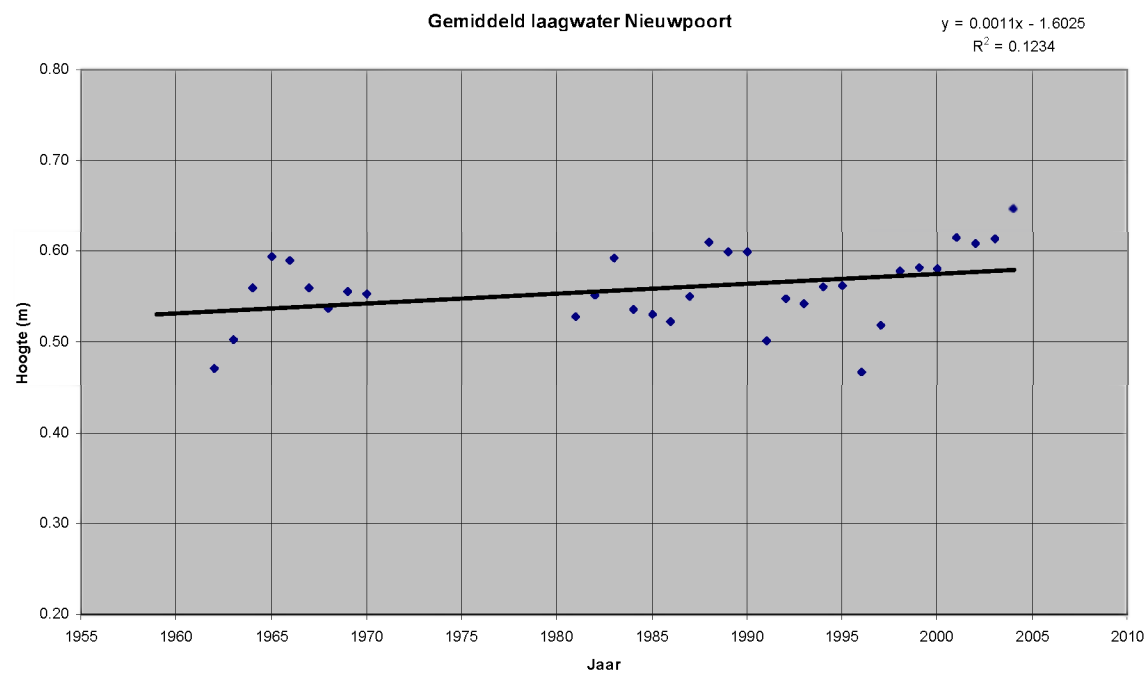
### 3.1.1.3 Zeebrugge

#### 3.1.1.3.1 Hoogwater



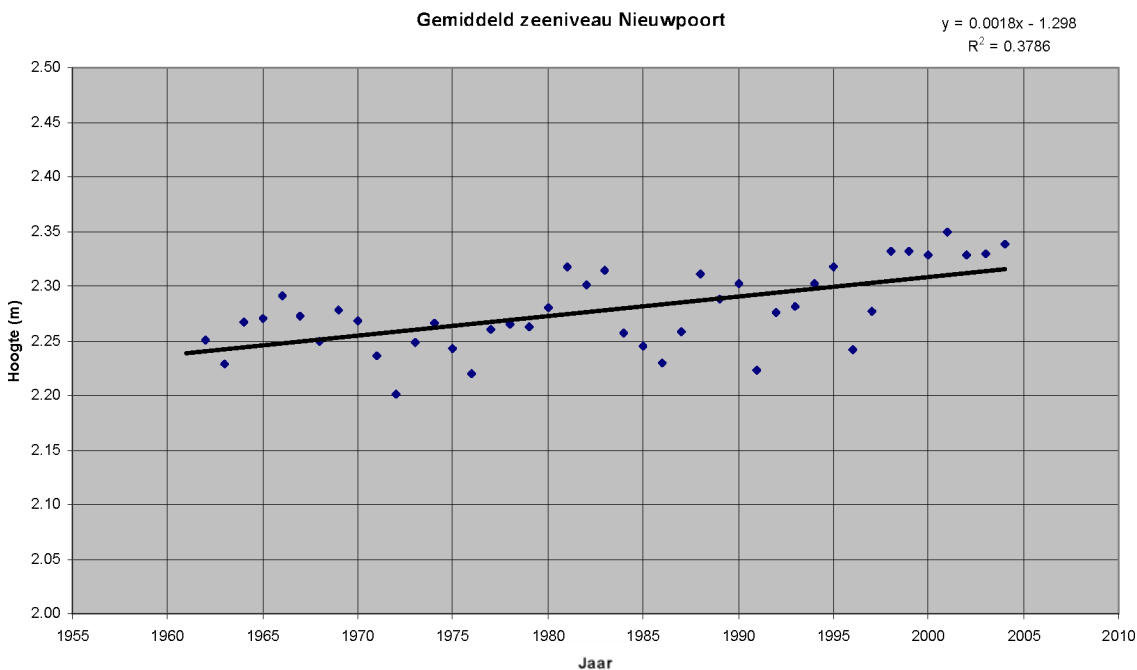
Waarnemingen vanaf januari 1962 tot december 2004. Het hoogwater stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.3919$ .

#### 3.1.1.3.2 Laagwater



Waarnemingen vanaf januari 1962 tot december 2004 (-1971 tot 1980). Het hoogwater stijgt met 0.11 cm per jaar en  $r = 0.3513$ .

### 3.1.1.3.3 Gemiddeld Zeeniveau (MSL)



Waarnemingen vanaf januari 1964 tot december 2004. Het hoogwater stijgt met 0.18 cm per jaar en  $r = 0.6153$ .

### 3.1.1.4 Overzicht resultaten

| Locatie    |     | zeespiegelstijging in cm/jaar | r-waarde |
|------------|-----|-------------------------------|----------|
| Oostende   | HW  | 0.22                          | 0.7916   |
|            | LW  | 0.12                          | 0.5513   |
|            | MSL | 0.19                          | 0.7667   |
| Nieuwpoort | HW  | 0.42                          | 0.8172   |
|            | LW  | 0.21                          | 0.4814   |
|            | MSL | 0.33                          | 0.8269   |
| Zeebrugge  | HW  | 0.16                          | 0.4089   |
|            | LW  | 0.11                          | 0.3513   |
|            | MSL | 0.18                          | 0.6153   |

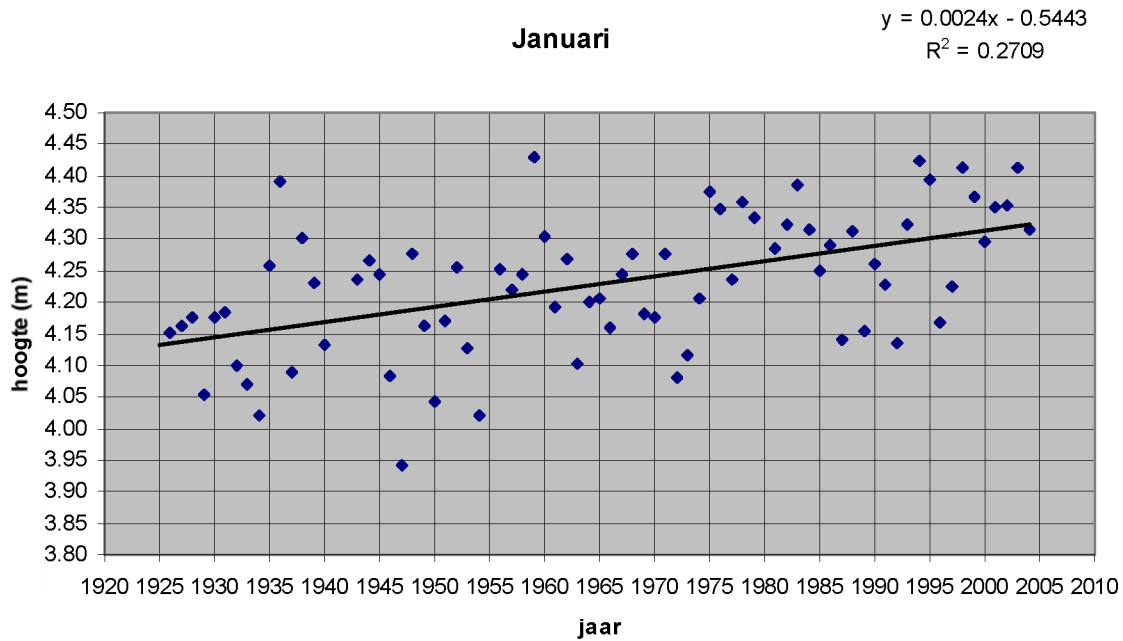
### 3.1.2 Maandgemiddelden

Bij het evalueren van de verandering van de zeespiegel tijdens het verloop van één jaar, stelt men vast dat de zeespiegel meestal stijgt naar het einde van het jaar toe. Vanuit deze vaststelling lijkt het aangewezen om de verandering van de zeespiegel ook te bekijken vertrekkend van het gemiddelde van elke maand apart uitgezet over de waarnemingsperiode. Het maandgemiddelde van HW, LW en MSL wordt voor januari tot december uitgezet ten opzichte van de waarnemingsperiode.

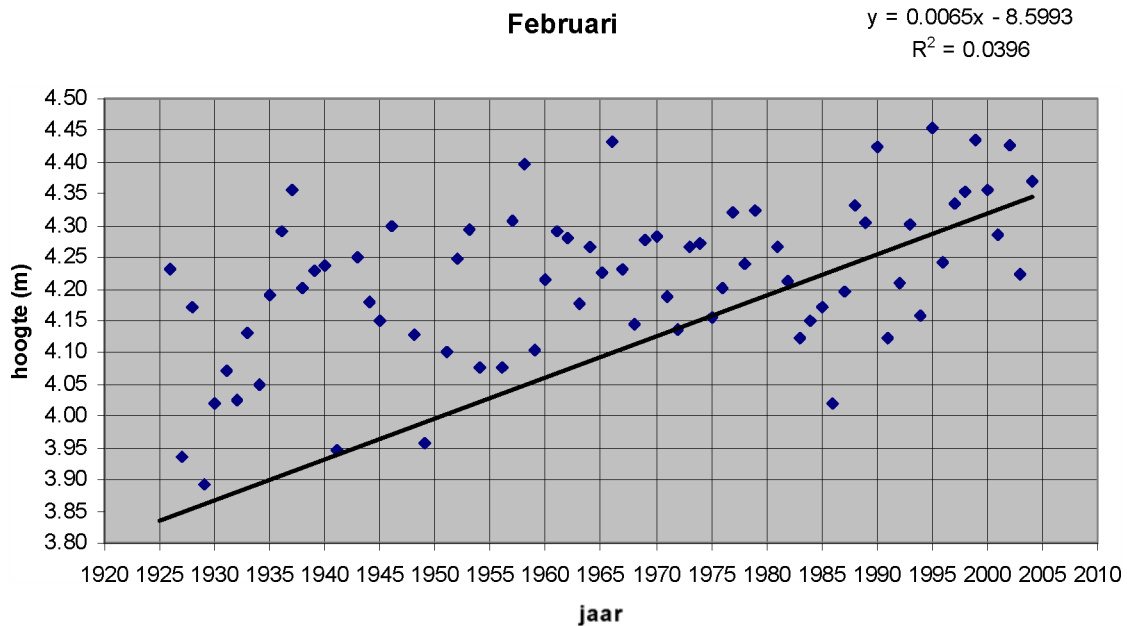
### 3.1.2.1 Oostende

#### 3.1.2.1.1 Hoogwater

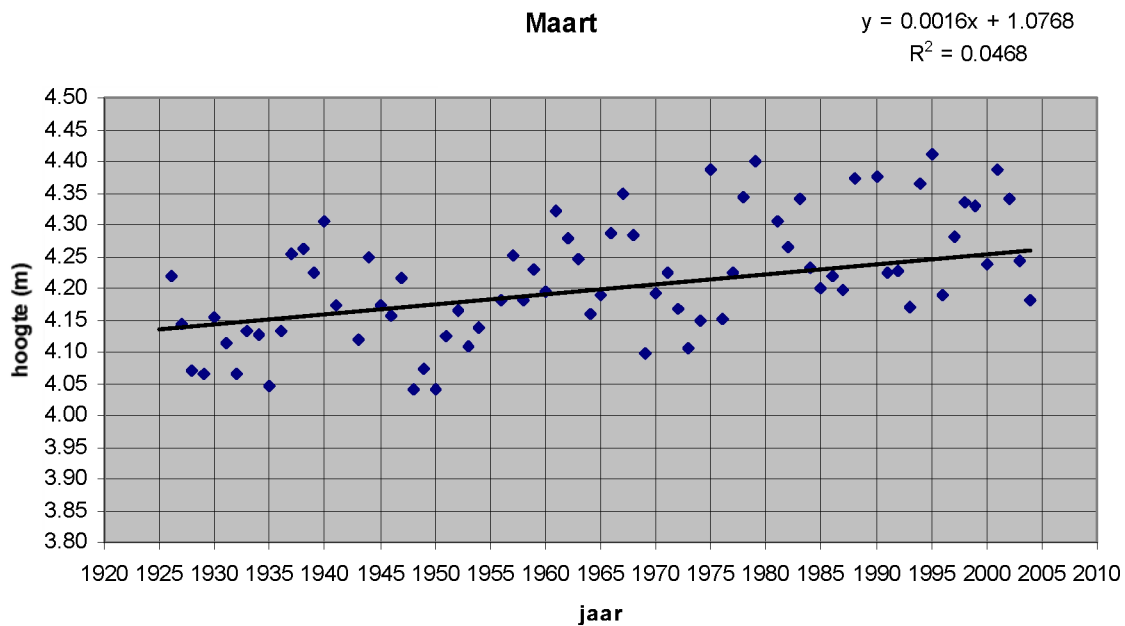
Waarnemingen vanaf jan 1959 tot 2005.



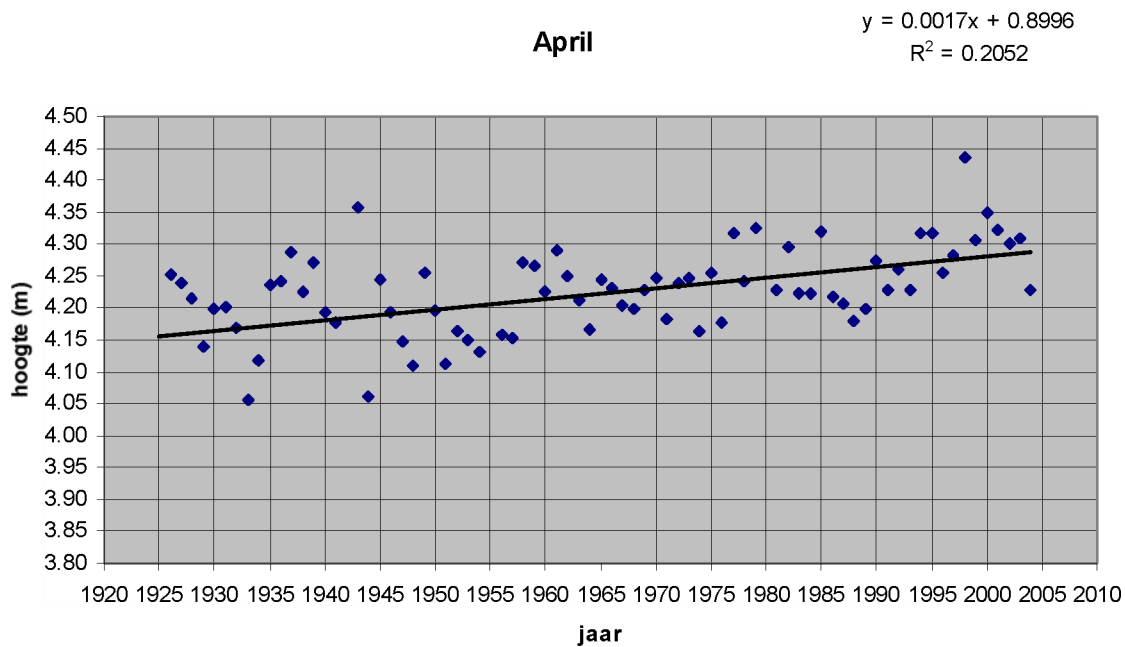
Het trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.5205$ .



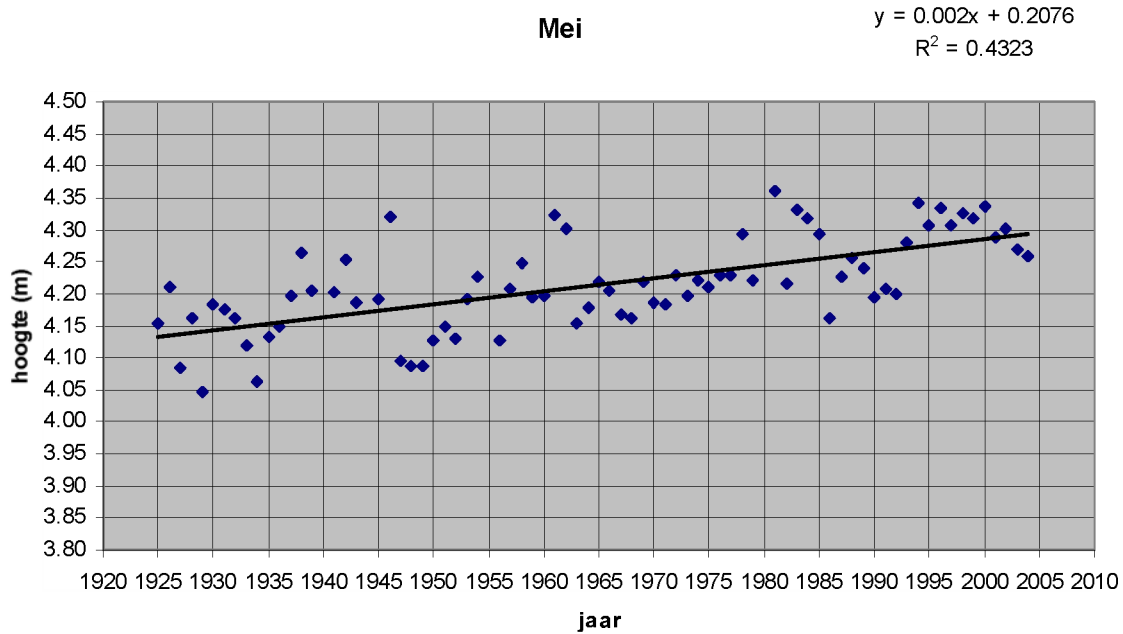
De trendlijn stijgt met 0.65 cm per jaar en  $r = 0.1990$ .



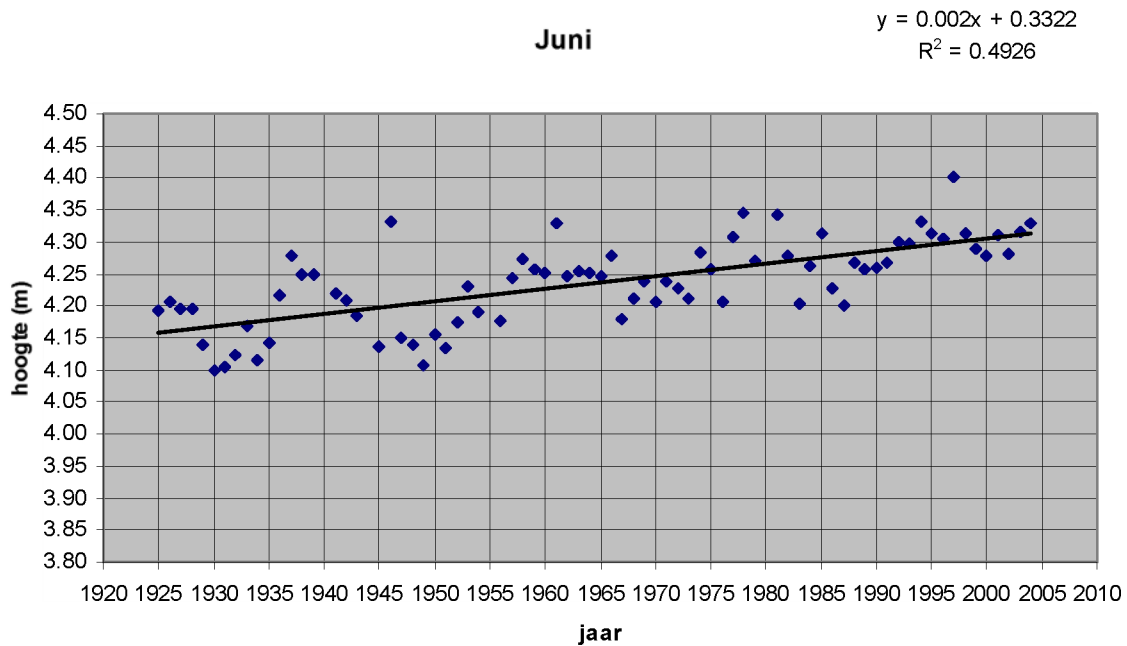
De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.2163$ .



De trendlijn stijgt met 0.17 cm per jaar en  $r = 0.4530$ .

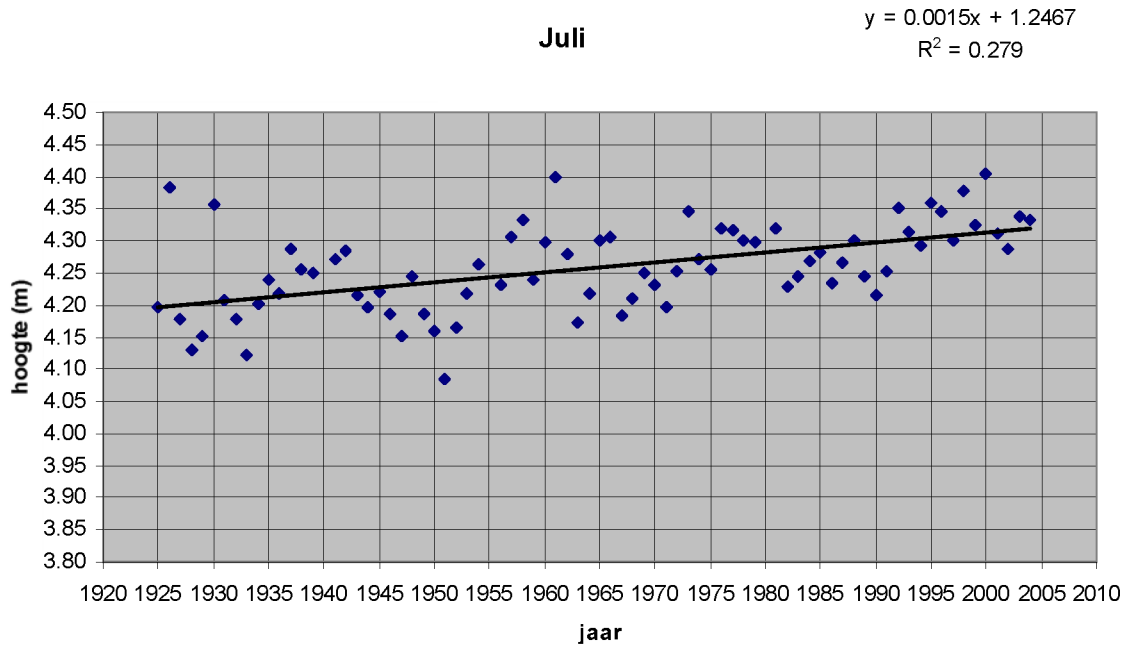


De trendlijn stijgt met 0.20 cm per jaar en  $r = 0.6575$ .

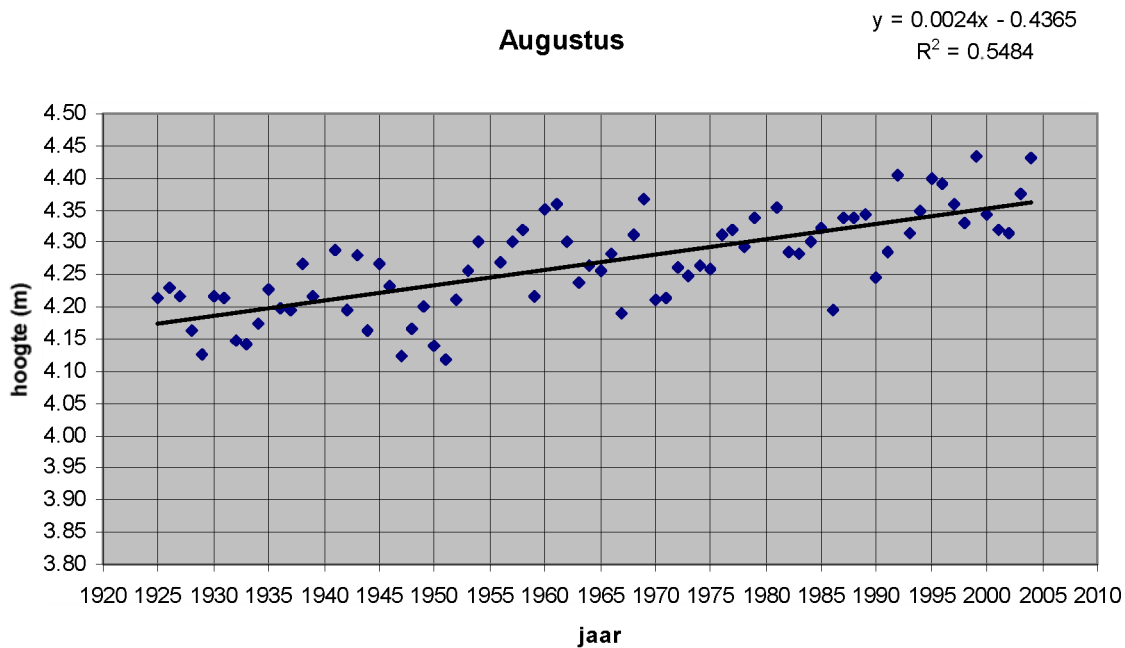


De trendlijn stijgt met 0.20 cm per jaar en  $r = 0.7019$ .

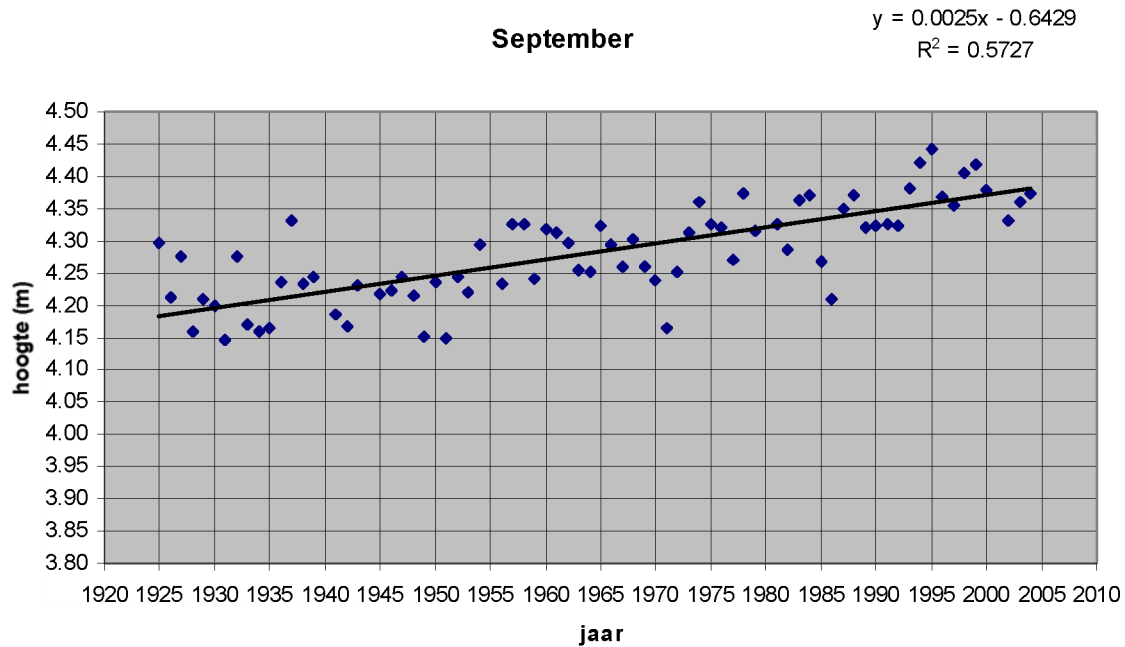




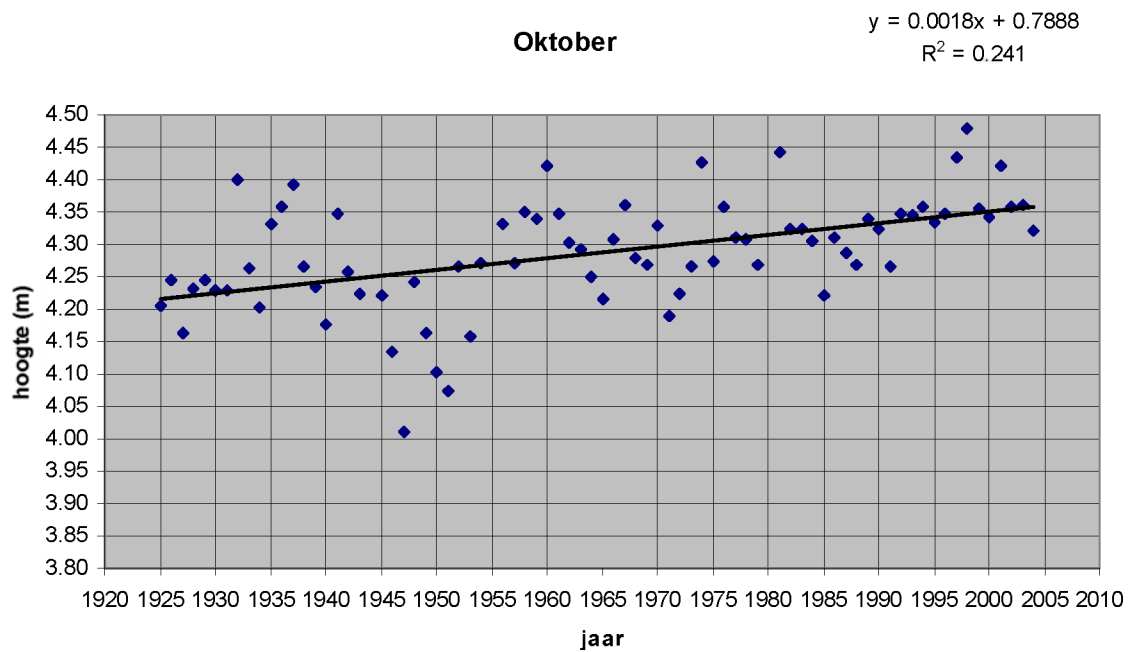
De trendlijn stijgt met 0.15 cm per jaar en  $r = 0.5282$ .



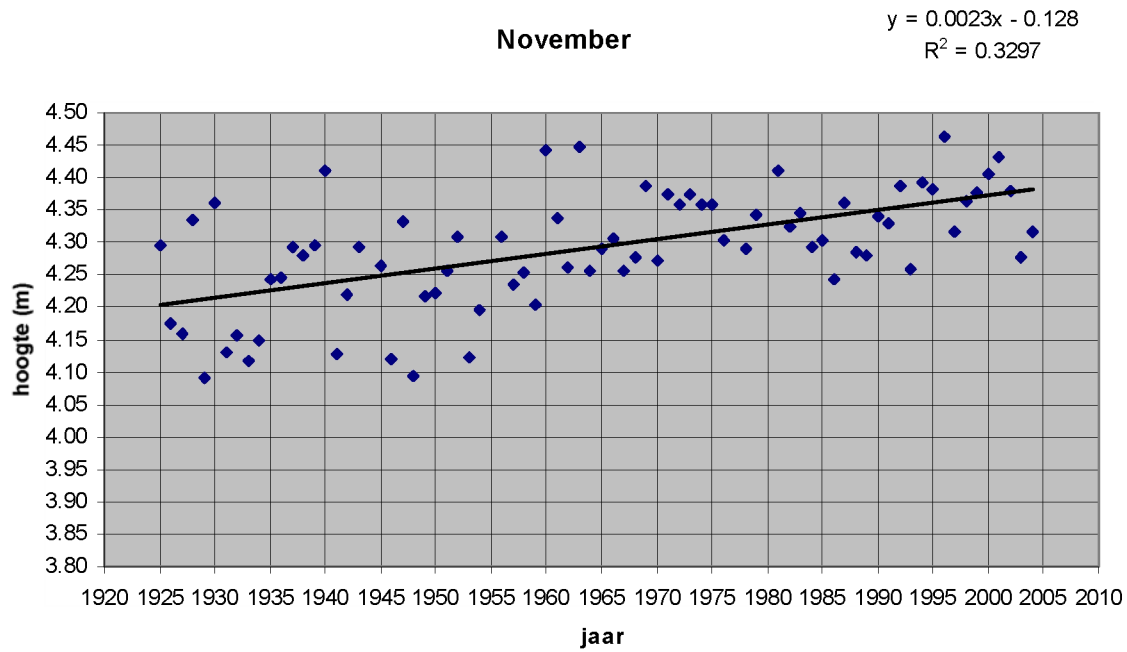
De trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.7405$ .



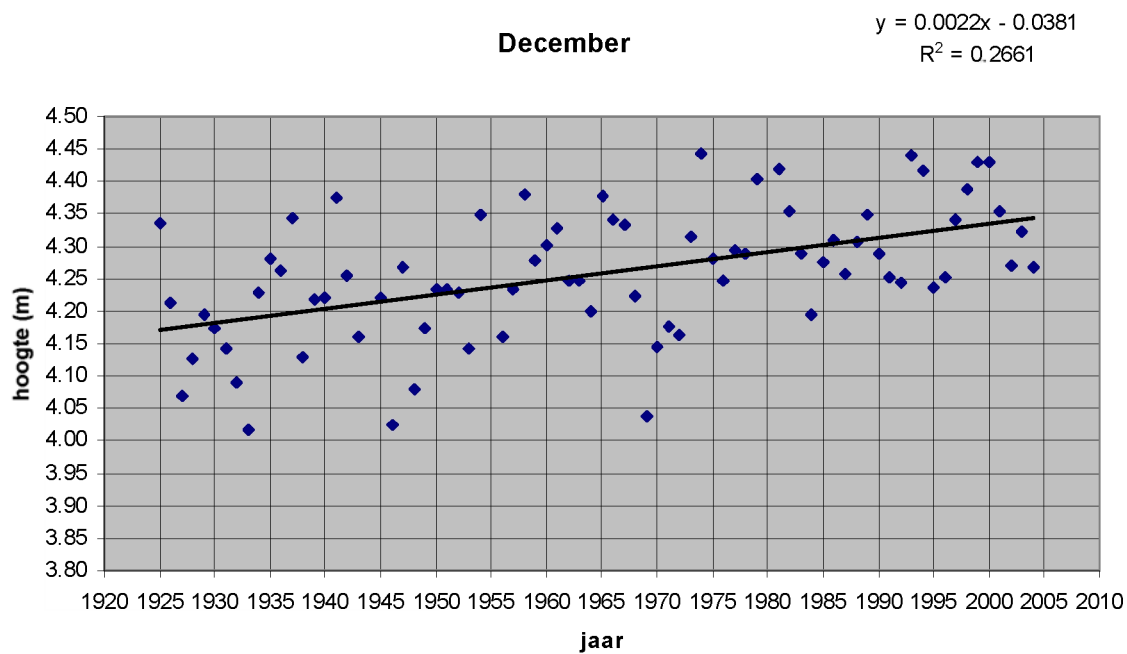
De trendlijn stijgt met 0.25 cm per jaar en  $r = 0.7568$ .



De trendlijn stijgt met 0.18 cm per jaar en  $r = 0.4909$ .

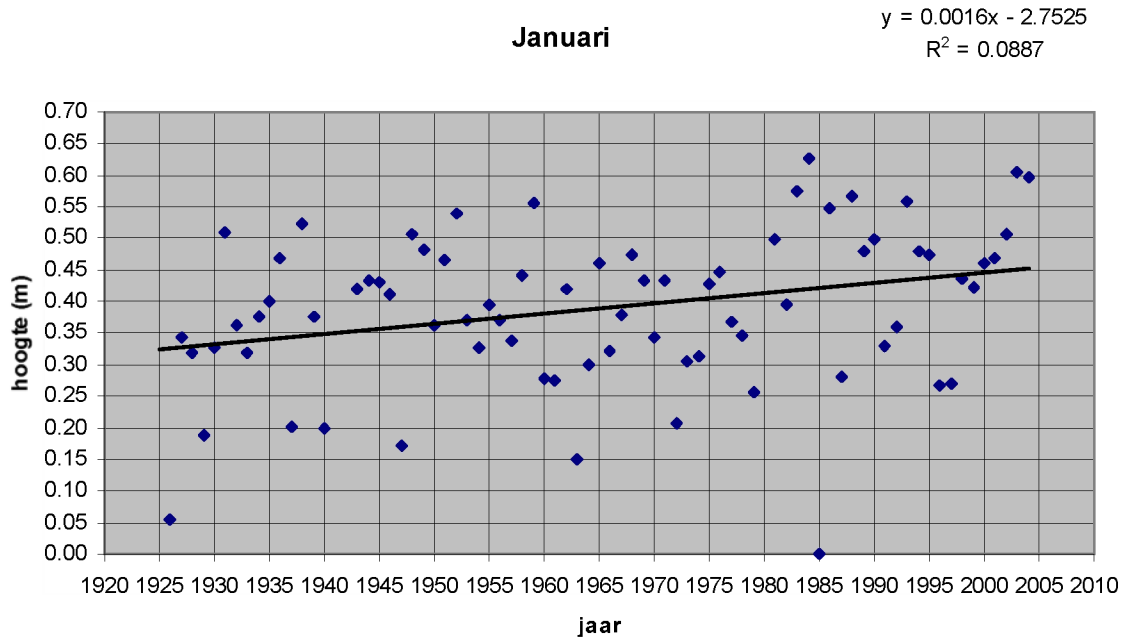


De trendlijn stijgt met 0.23 cm per jaar en  $r = 0.5742$ .

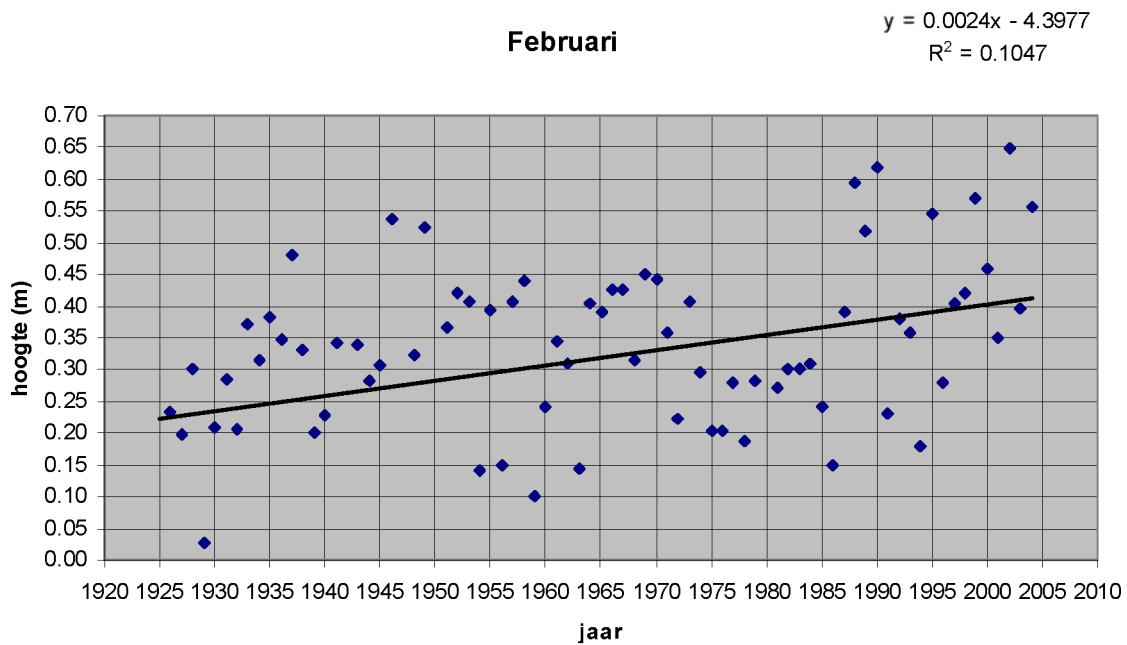


De trendlijn stijgt met 0.22 cm per jaar en  $r = 0.5158$ .

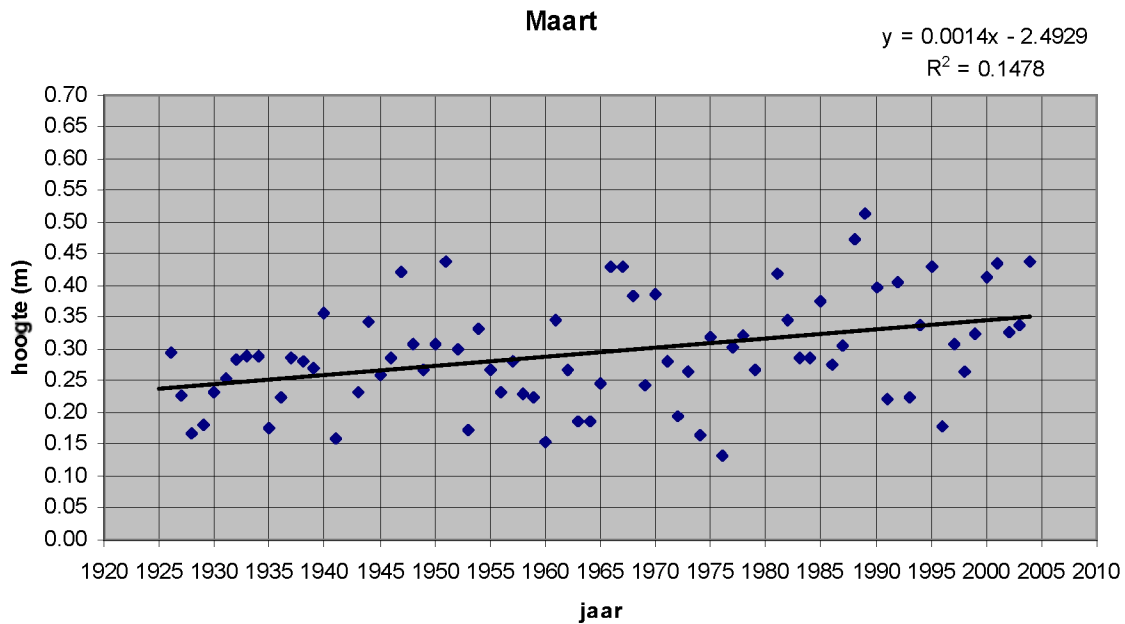
### 3.1.2.1.2 Laagwater



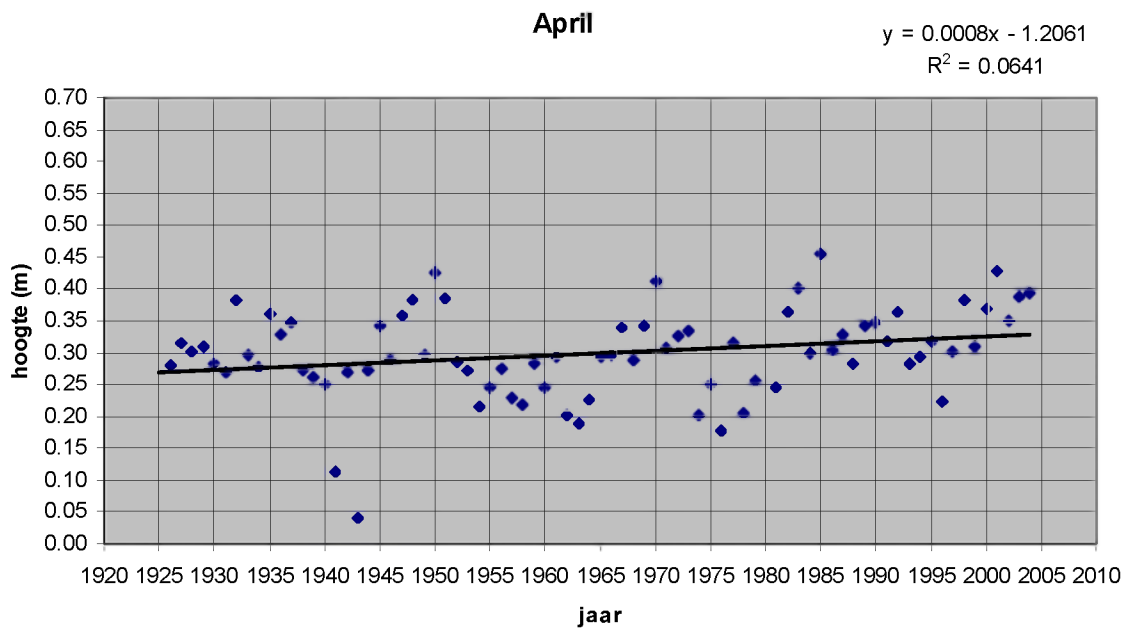
De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.2978$ .



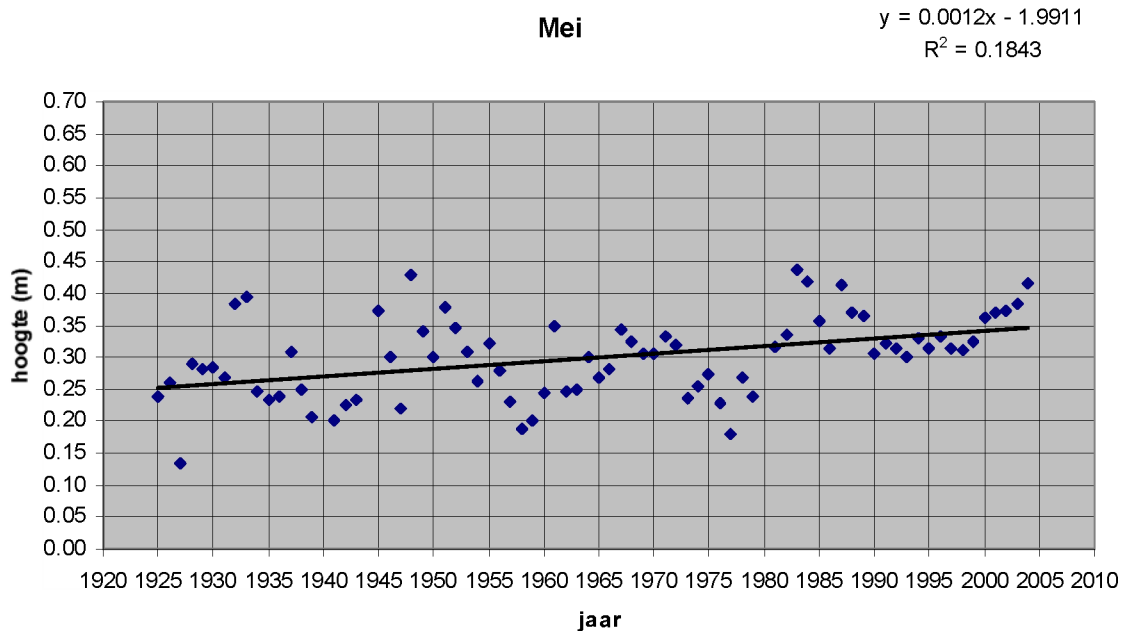
De trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.3236$ .



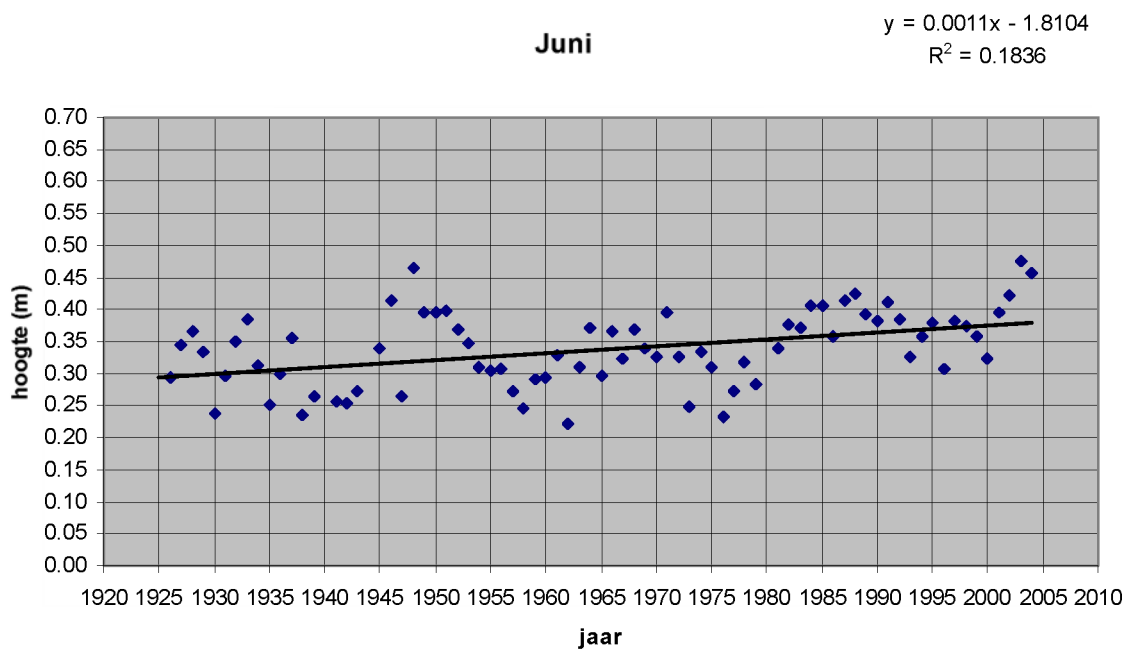
De trendlijn stijgt met 0.14 cm per jaar en  $r = 0.3844$ .



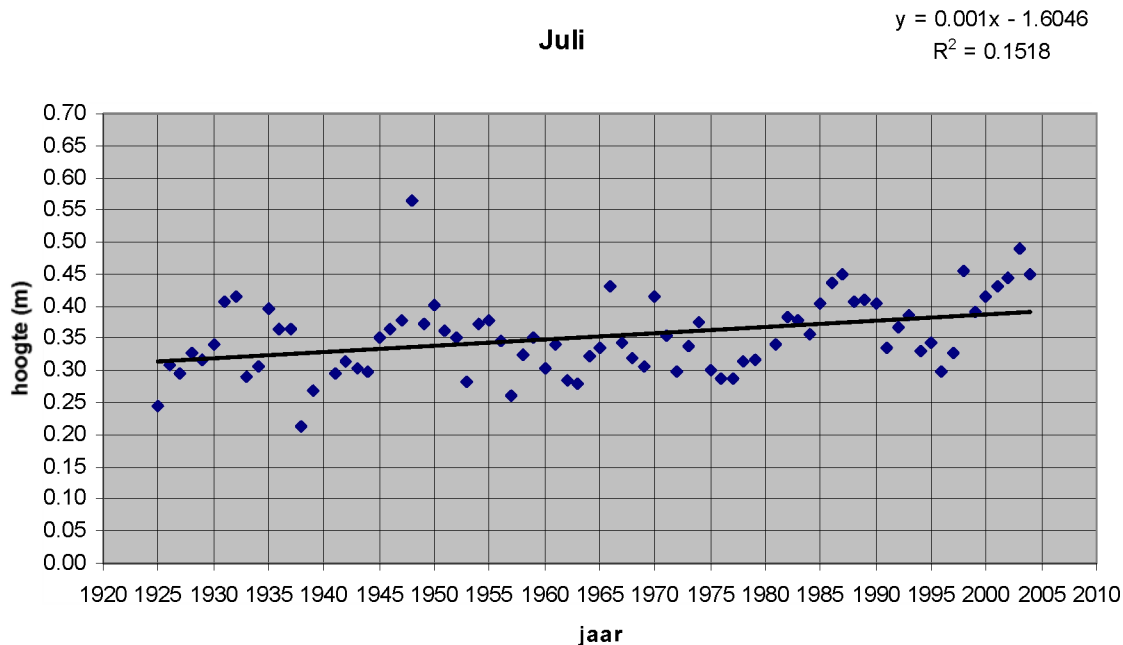
De trendlijn stijgt met 0.08 cm per jaar en  $r = 0.2532$ .



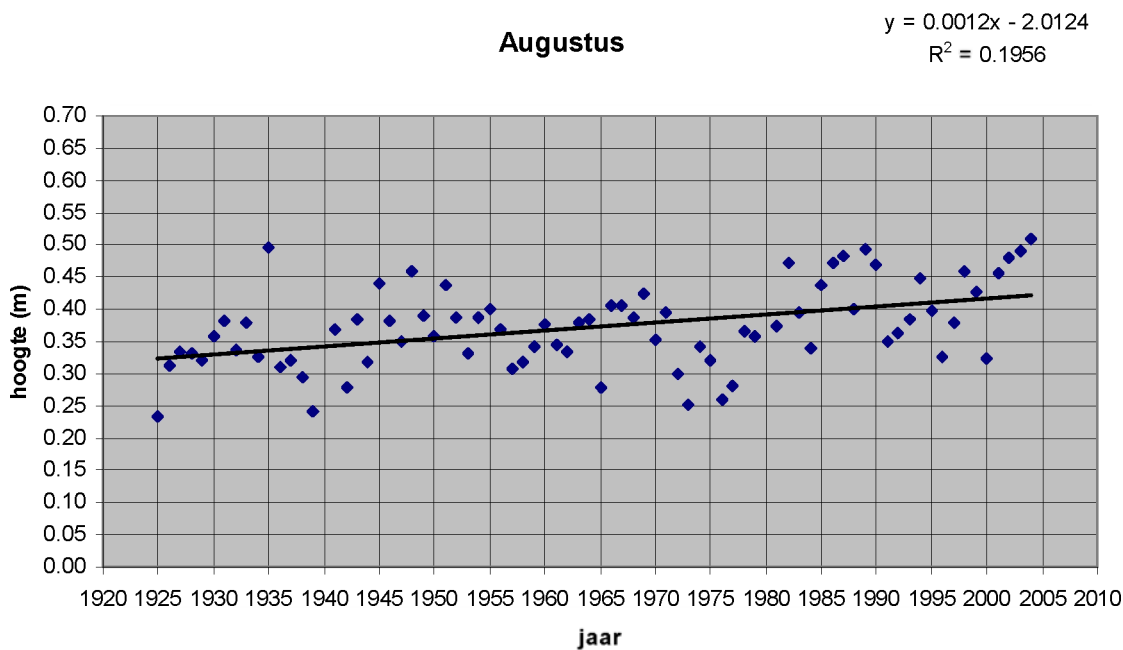
De trendlijn stijgt met 0.12 cm per jaar en  $r = 0.4293$ .



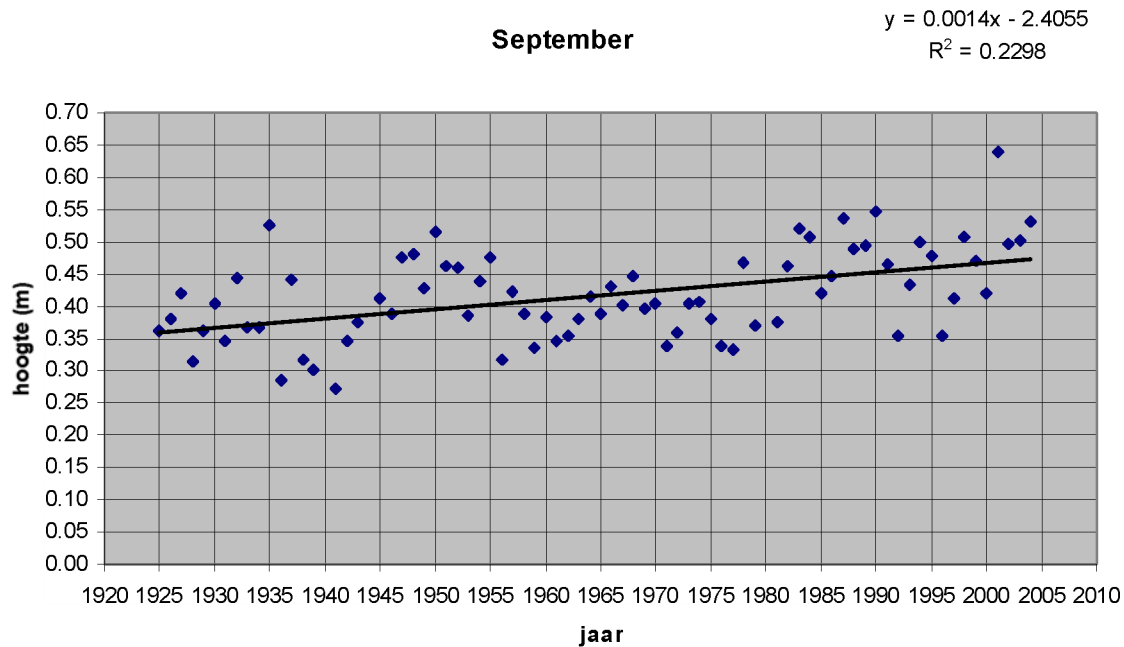
De trendlijn stijgt met 0.11 cm per jaar en  $r = 0.4285$ .



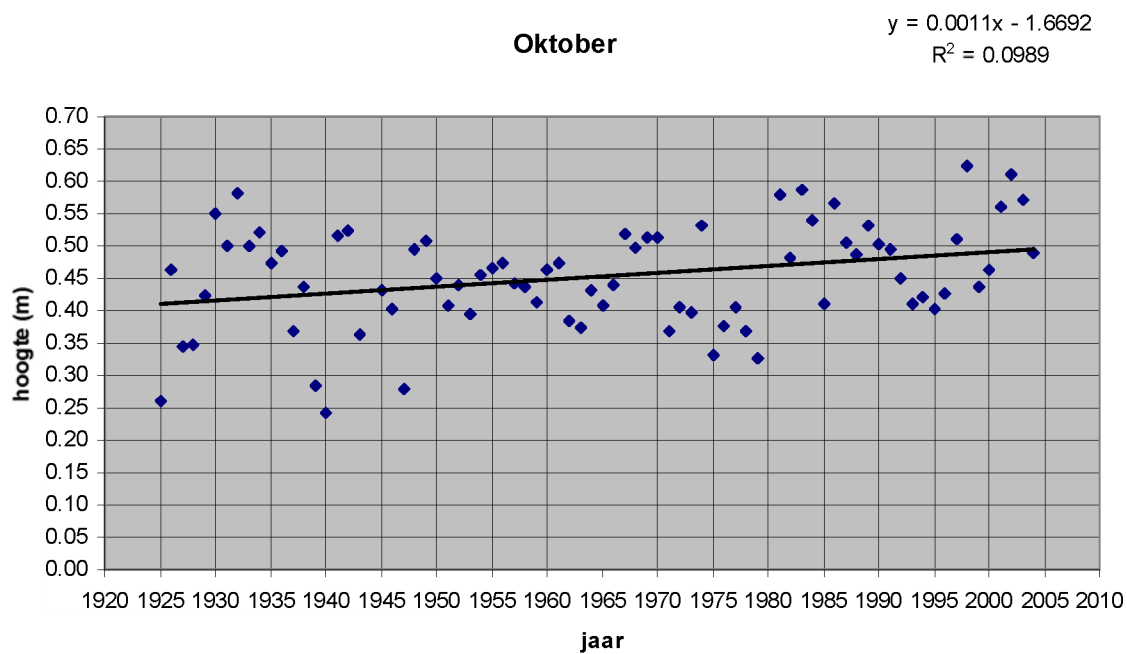
De trendlijn stijgt met 0.10 cm per jaar en  $r = 0.3896$ .



De trendlijn stijgt met 0.12 cm per jaar en  $r = 0.4423$ .

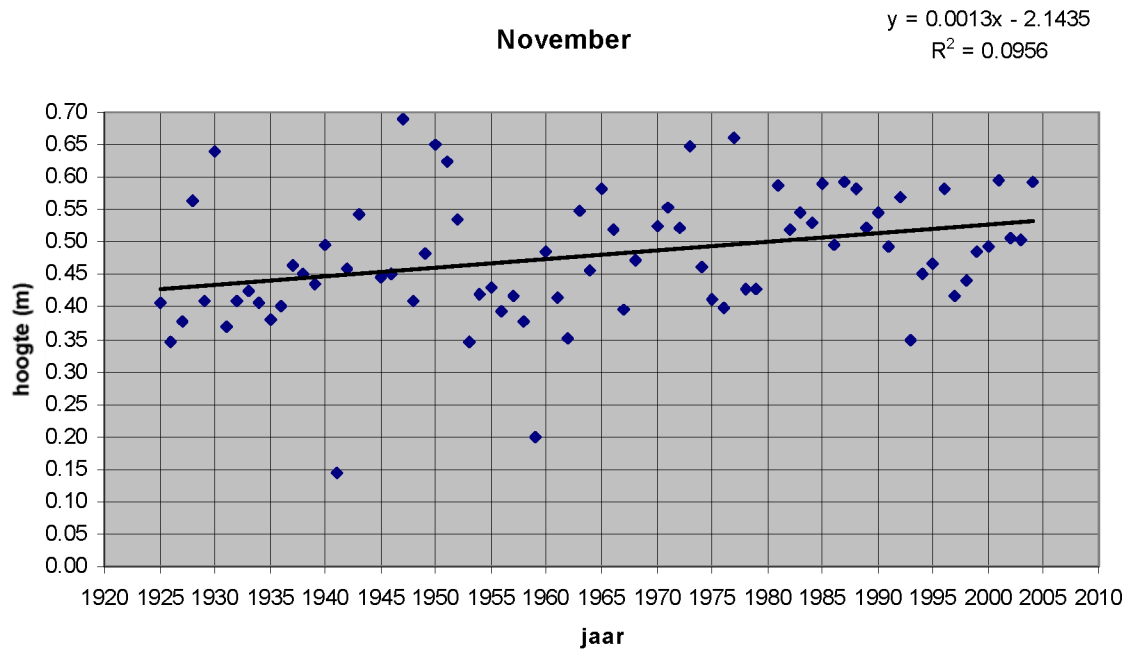


De trendlijn stijgt met 0.14 cm per jaar en  $r = 0.4794$ .

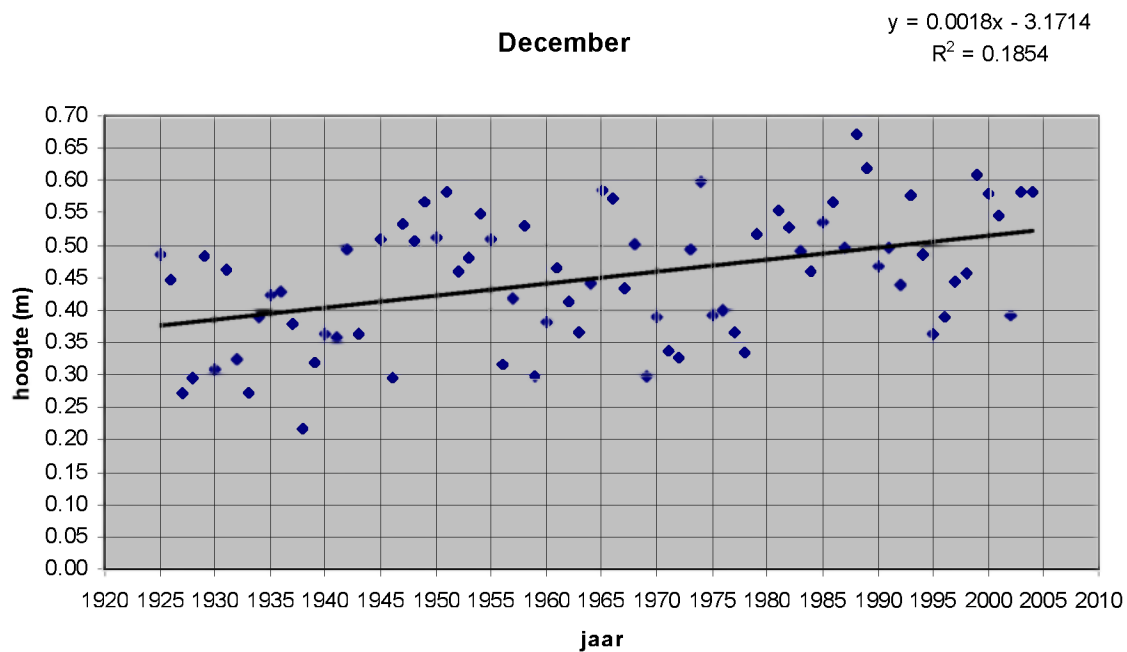


De trendlijn stijgt met 0.11 cm per jaar en  $r = 0.3145$ .



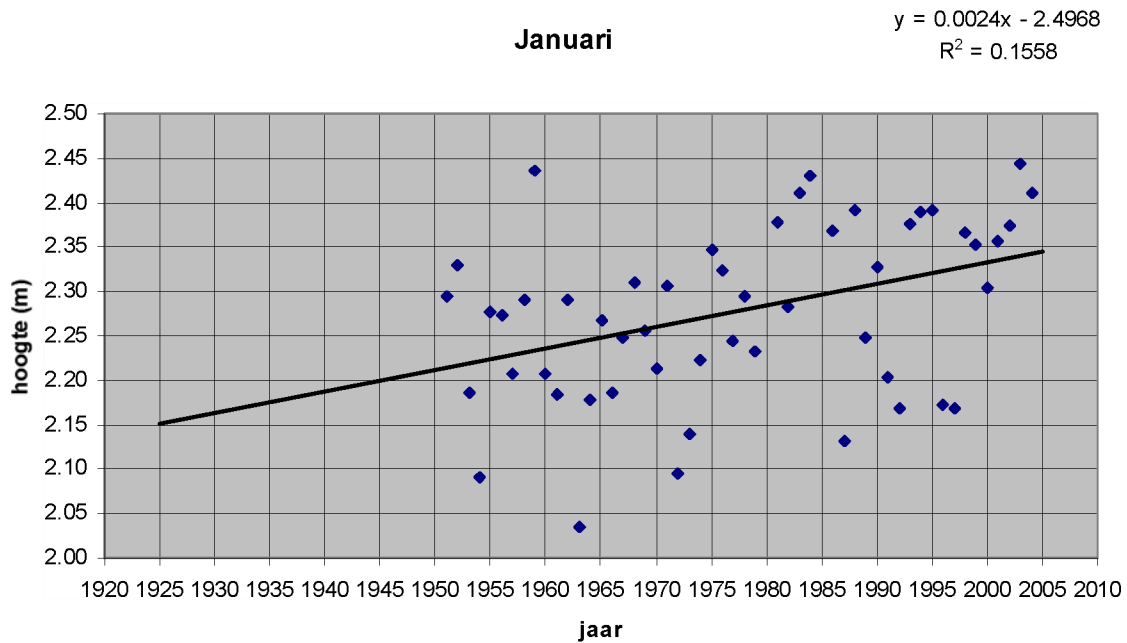


De trendlijn stijgt met 0.13 cm per jaar en  $r = 0.3092$ .

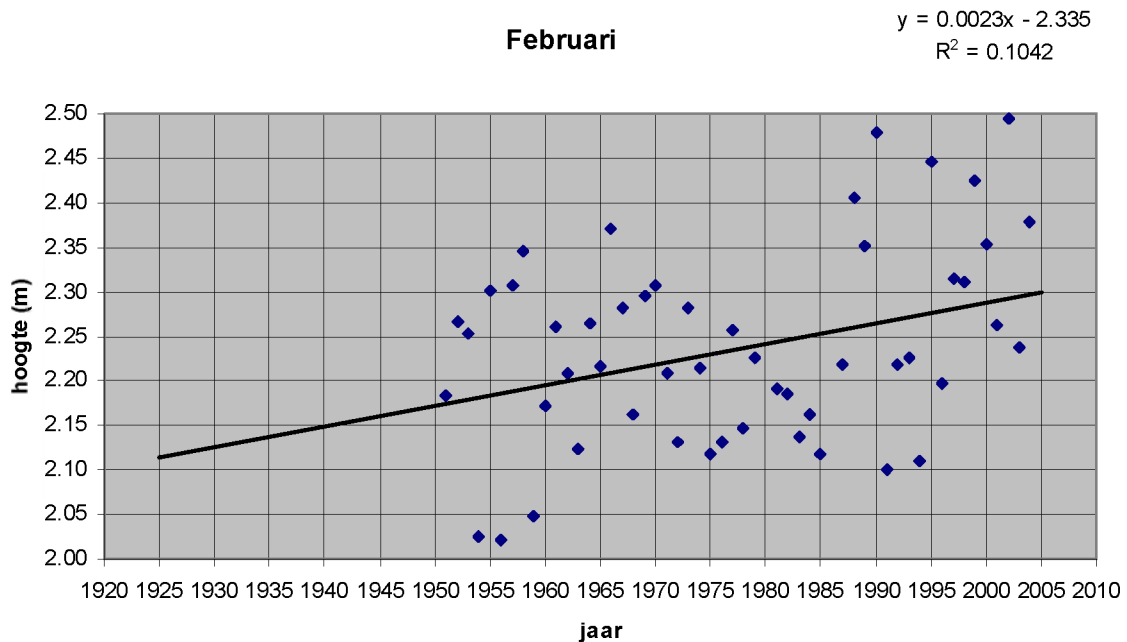


De trendlijn stijgt met 0.18 cm per jaar en  $r = 0.4306$ .

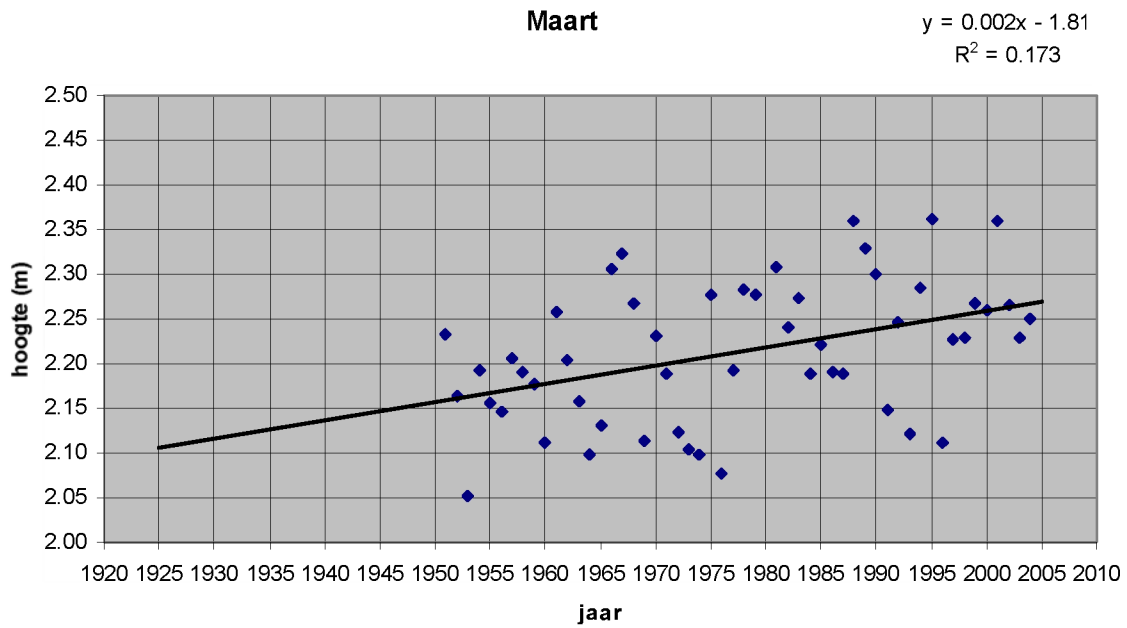
### 3.1.2.1.3 Gemiddeld Zeeniveau (MSL)



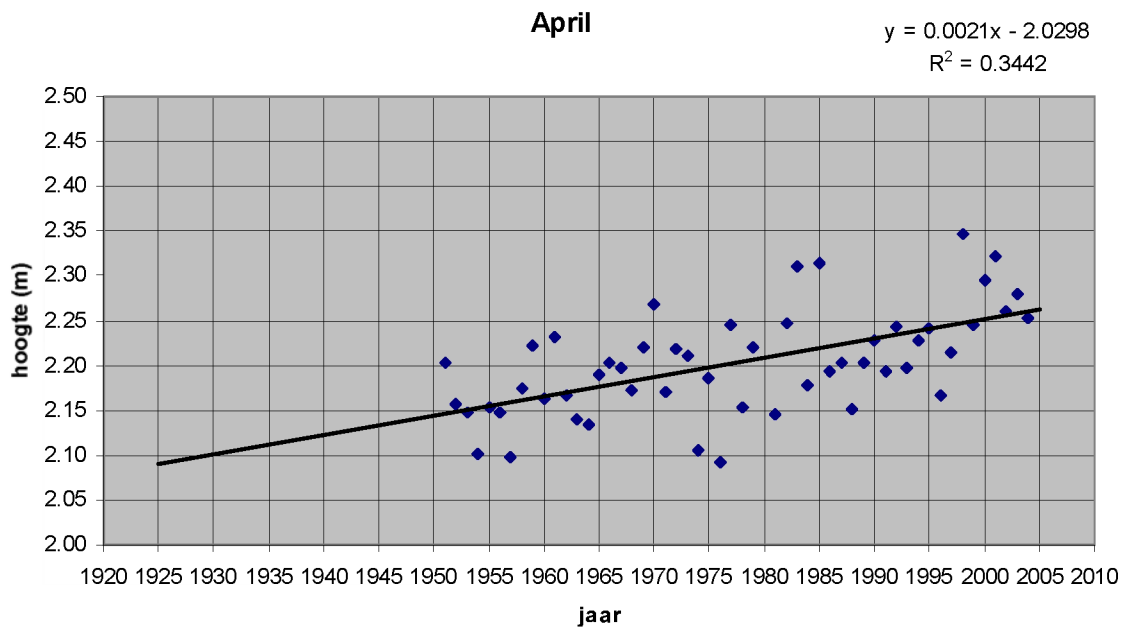
De trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.3947$ .



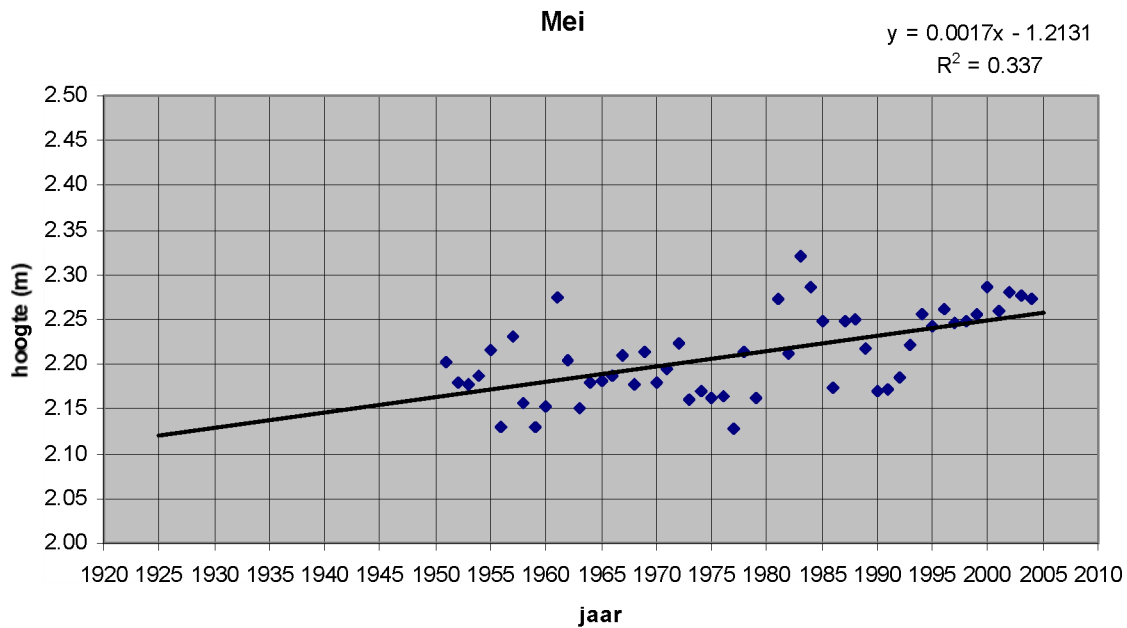
De trendlijn stijgt met 0.23 cm per jaar en  $r = 0.3228$ .



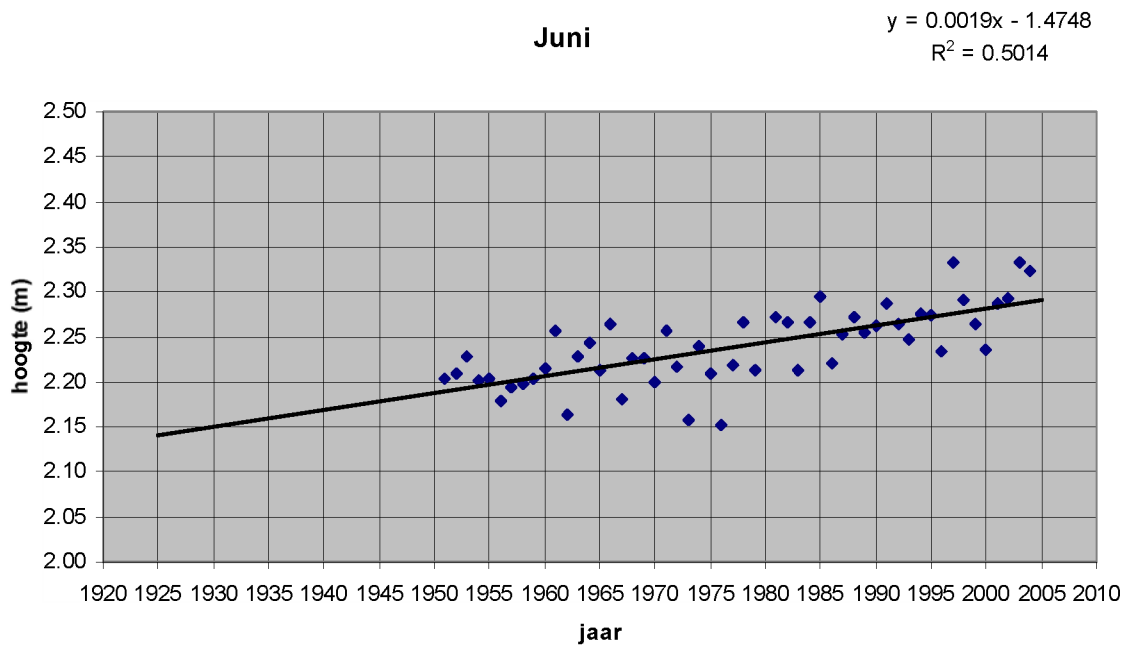
De trendlijn stijgt met 0.20 cm per jaar en  $r = 0.4159$ .



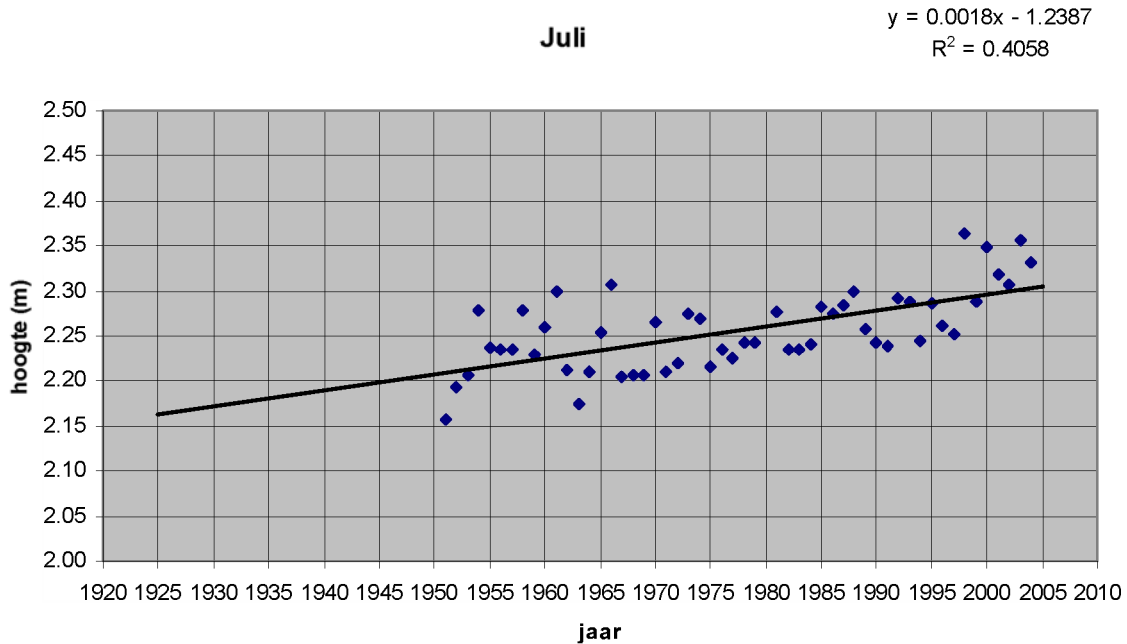
De trendlijn stijgt met 0.21 cm per jaar en  $r = 0.5867$ .



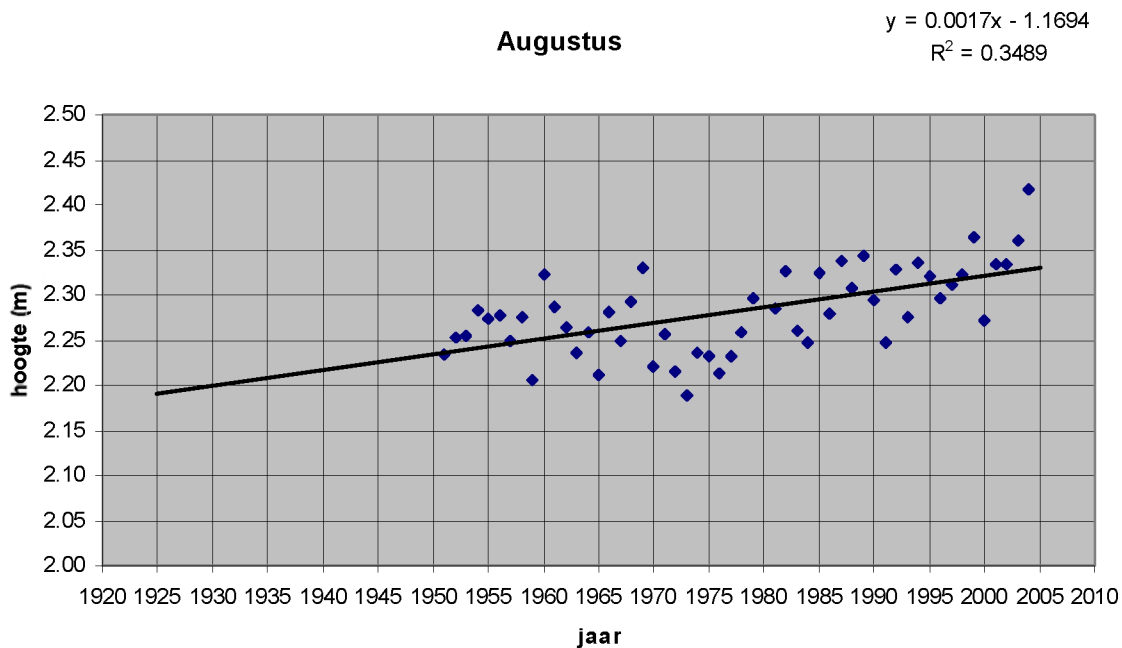
De trendlijn stijgt met 0.17 cm per jaar en  $r = 0.5805$ .



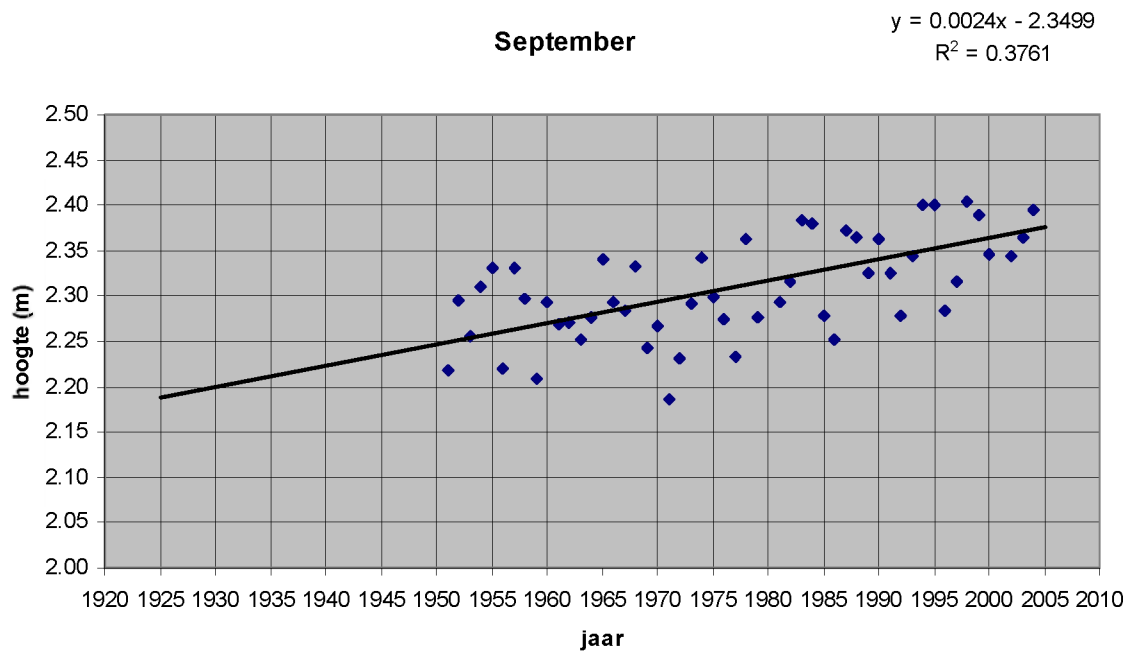
De trendlijn stijgt met 0.19 cm per jaar en  $r = 0.7081$ .



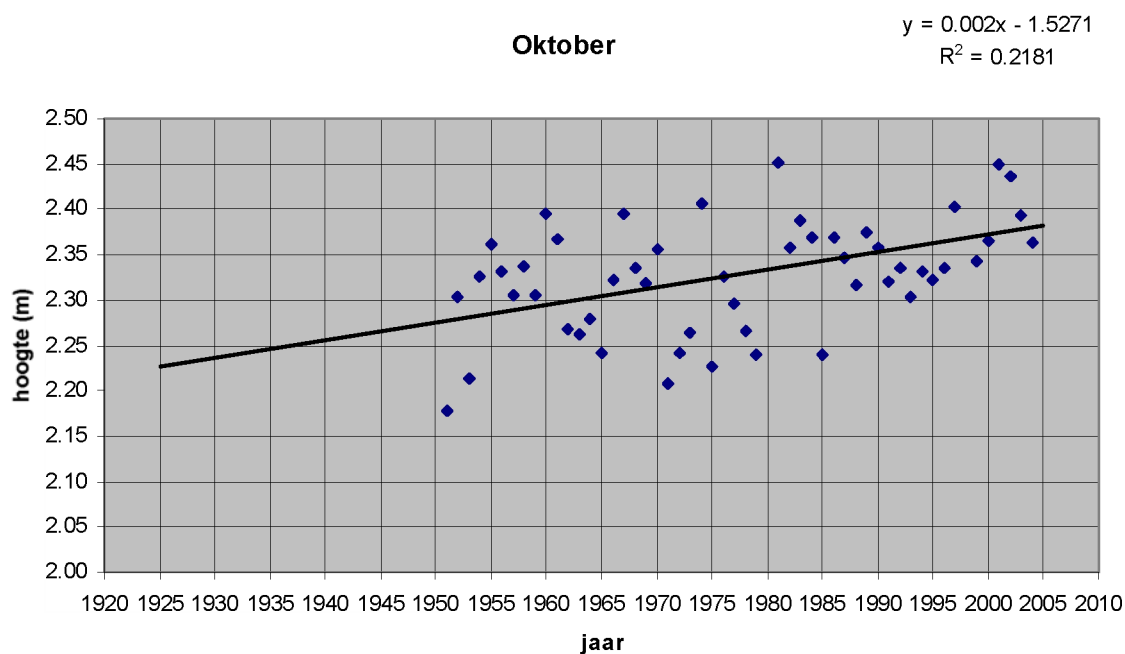
De trendlijn stijgt met 0.18 cm per jaar en  $r = 0.6370$ .



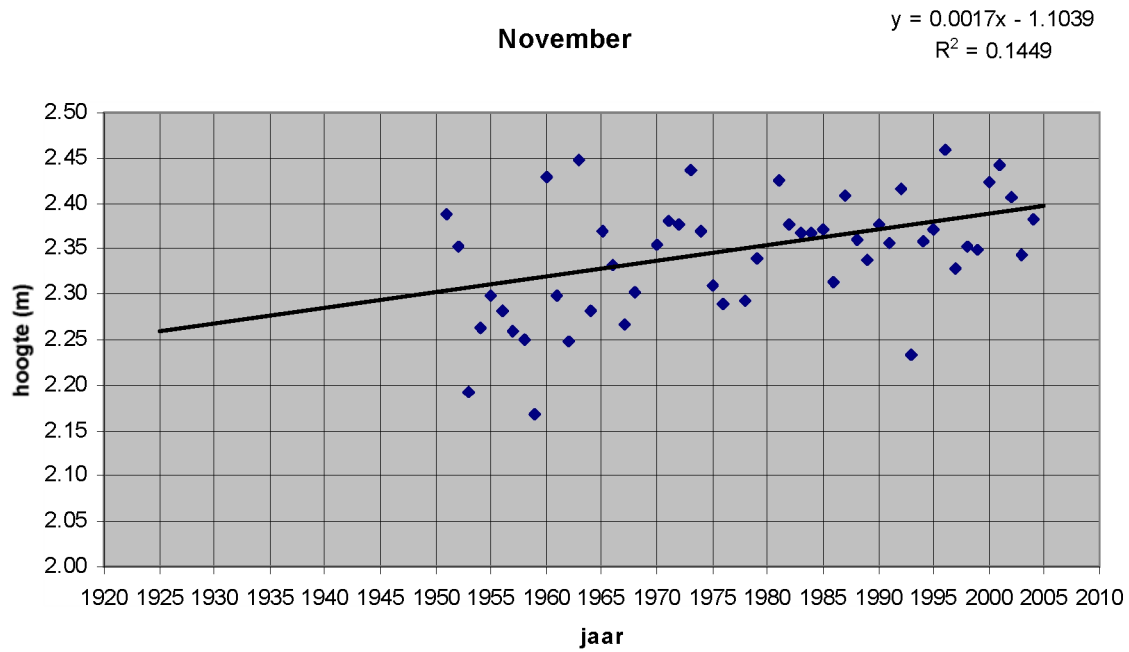
De trendlijn stijgt met 0.17 cm per jaar en  $r = 0.5907$ .



De trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.6133$ .

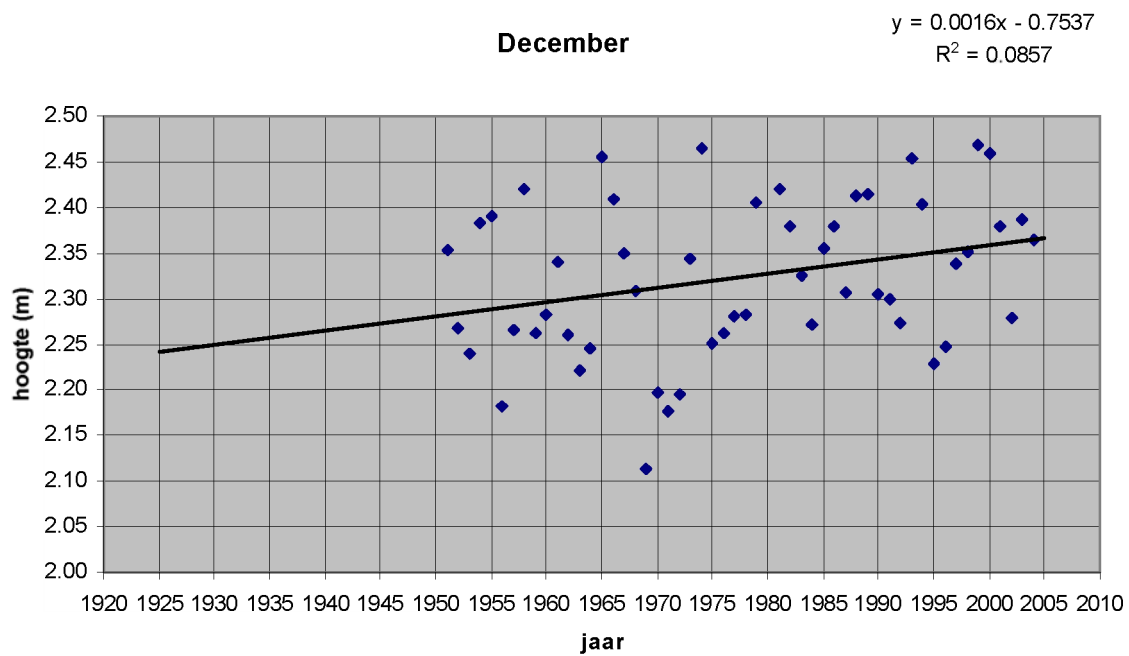


De trendlijn stijgt met 0.20 cm per jaar en  $r = 0.4670$ .



De trendlijn stijgt met 0.17 cm per jaar en  $r = 0.3807$ .

---



De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.2927$ .

### 3.1.2.1.4 Tabel r-waarden

De r-waarden zijn de correlatiecoëfficiënten.

| r         | Hoogwater | Laagwater | Gemiddeld Zeeniveau |
|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Januari   | 0.5205    | 0.2978    | 0.3947              |
| Februari  | 0.1990    | 0.3236    | 0.3228              |
| Maart     | 0.2163    | 0.3844    | 0.4159              |
| April     | 0.4530    | 0.2532    | 0.5867              |
| Mei       | 0.6575    | 0.4293    | 0.5805              |
| Juni      | 0.7019    | 0.4285    | 0.7081              |
| Juli      | 0.5282    | 0.3896    | 0.6370              |
| Augustus  | 0.7405    | 0.4423    | 0.5907              |
| September | 0.7568    | 0.4794    | 0.6133              |
| Oktober   | 0.4909    | 0.3145    | 0.4670              |
| November  | 0.5742    | 0.3092    | 0.3807              |
| December  | 0.5158    | 0.4306    | 0.2927              |

Voor laagwater zijn de r-waarden voor sommige maanden zo laag dat er geen conclusies getrokken kunnen worden. De r-waarden berekend per maand zijn over het algemeen lager dan de r-waarden bekomen met jaargemiddelden. Dit komt omdat over een heel jaar piekwaarnemingen ten gevolge van b.v. hoge windsnelheden worden uitgemiddeld. Het valt ook op dat de r-waarden voor de periode april-september beduidende hoger liggen dan voor de periode oktober-maart. Tijdens de periode oktober-maart komen er meer stormen voor dan tijdens de periode april-september.

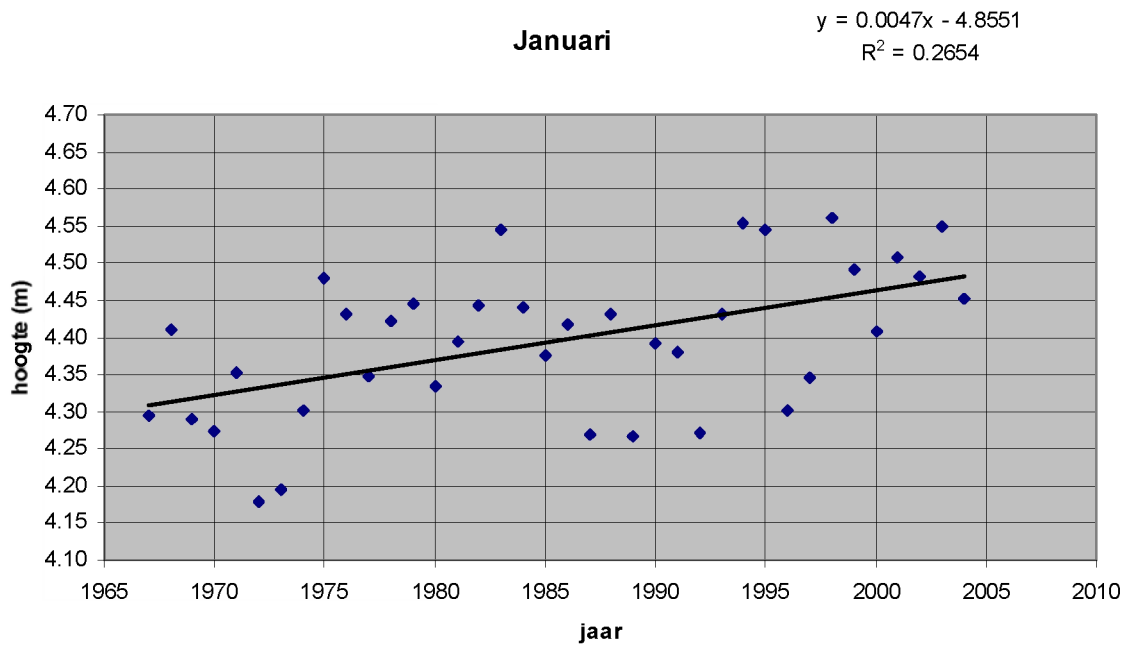
Het gemiddelde van de zeespiegelstijging berekend uit de maandgemiddelden ligt in de buurt van de stijgingswaarden die gevonden werden met gebruik van de jaargemiddelden.

| Stijging in cm/jaar | Gemiddelde van de maandwaarden | Berekend met de jaargemiddelden |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| HW                  | 0.24                           | 0.22                            |
| LW                  | 0.14                           | 0.12                            |
| MSL                 | 0.20                           | 0.19                            |

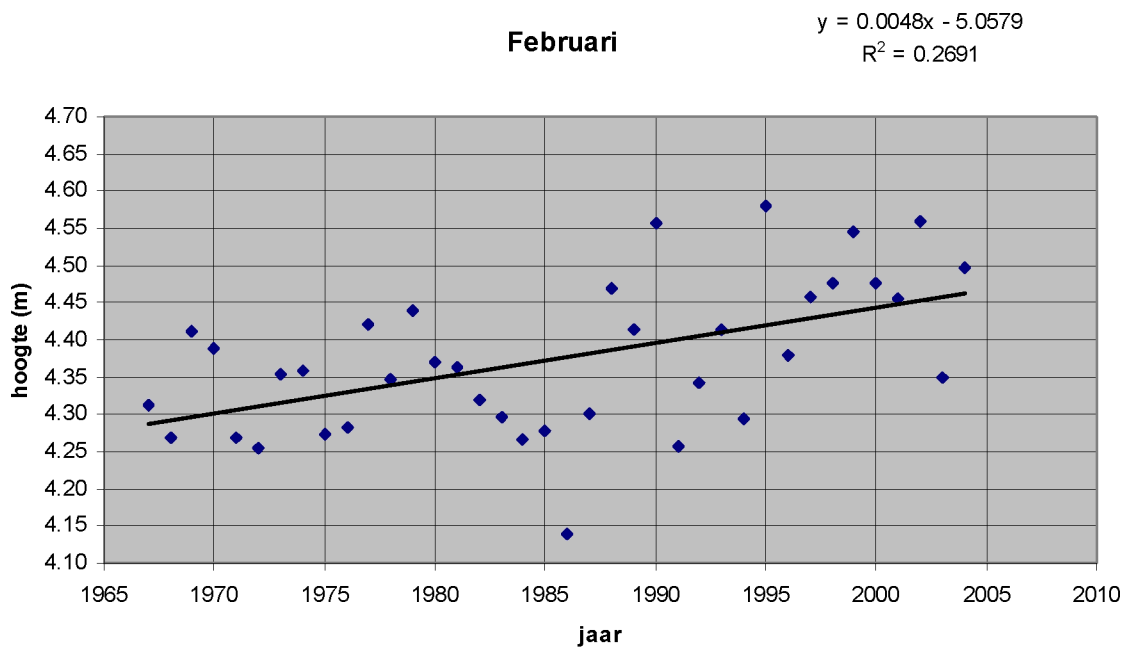


### 3.1.2.2 Nieuwpoort

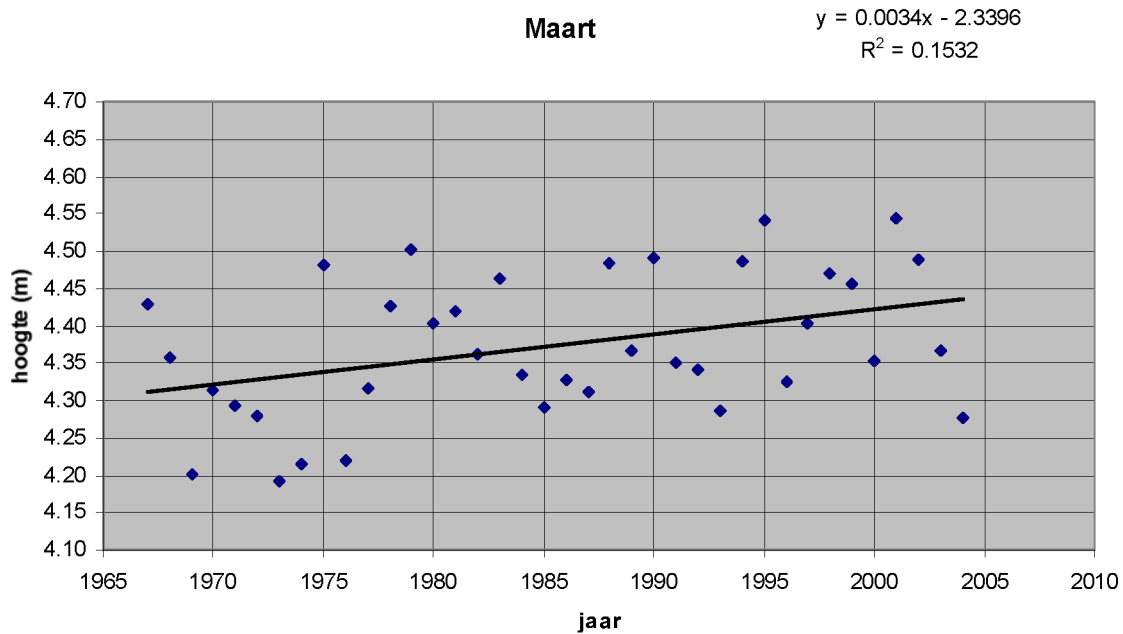
#### 3.1.2.2.1 Hoogwater



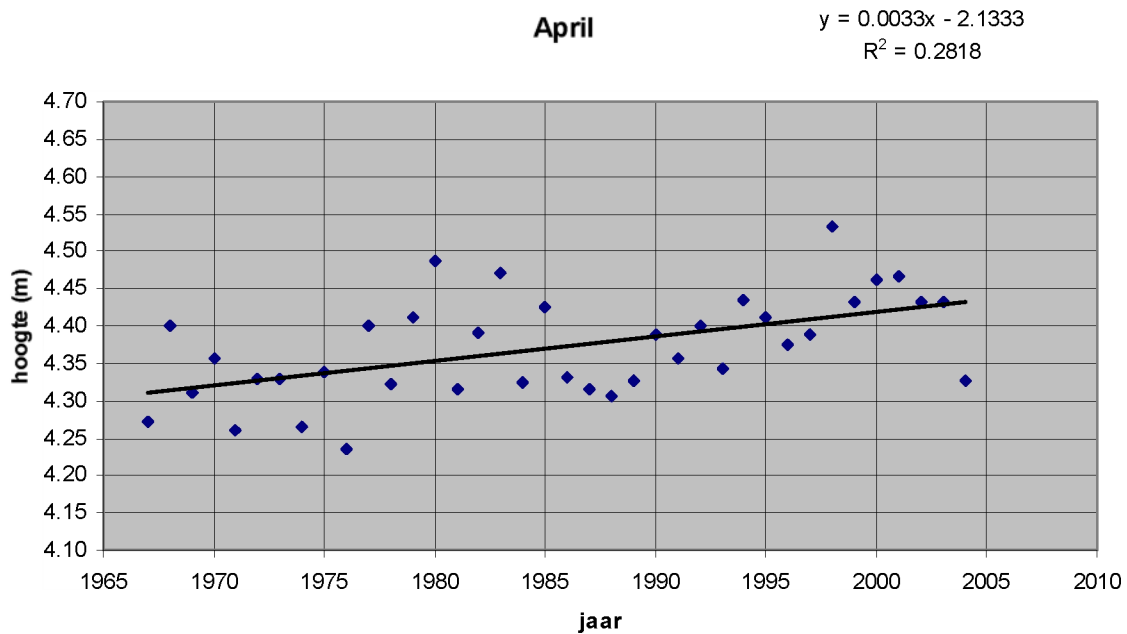
De trendlijn stijgt met 0.47 cm per jaar en  $r = 0.5152$ .



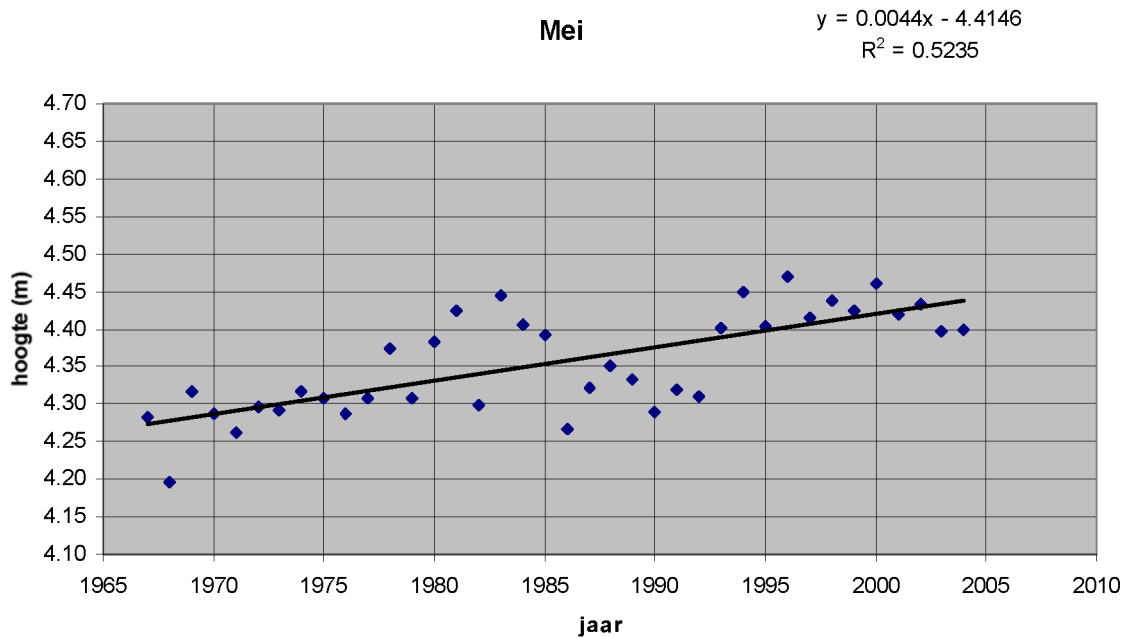
De trendlijn stijgt met 0.48 cm per jaar en  $r = 0.5187$ .



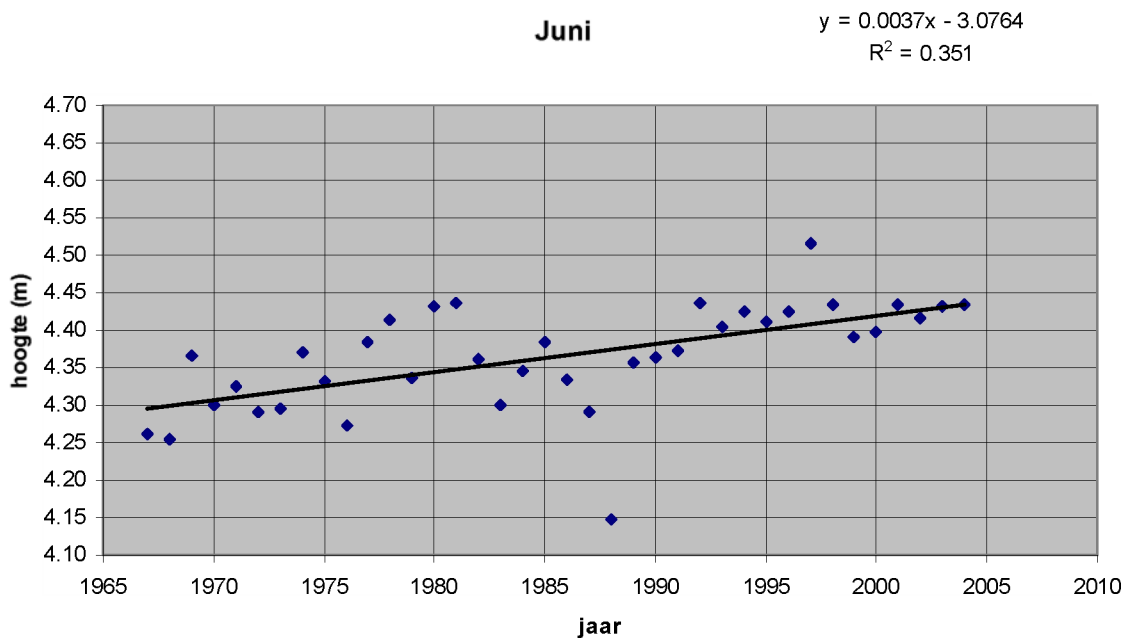
De trendlijn stijgt met 0.34 cm per jaar en  $r = 0.3914$ .



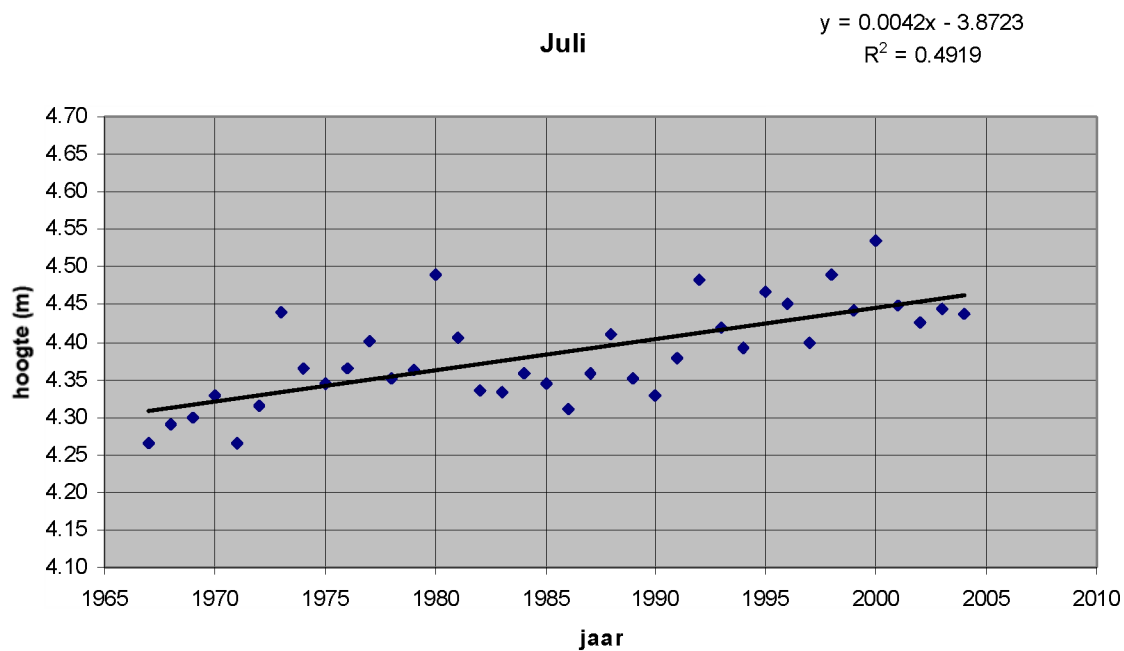
De trendlijn stijgt met 0.33 cm per jaar en  $r = 0.5308$ .



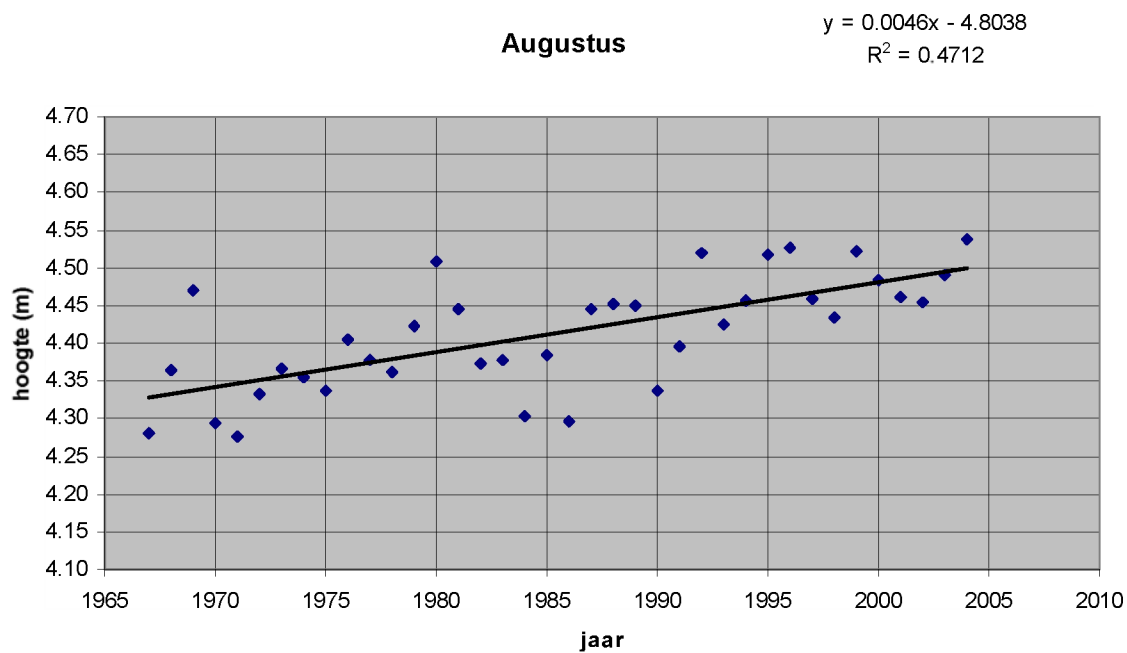
De trendlijn stijgt met 0.44 cm per jaar en  $r = 0.7235$ .



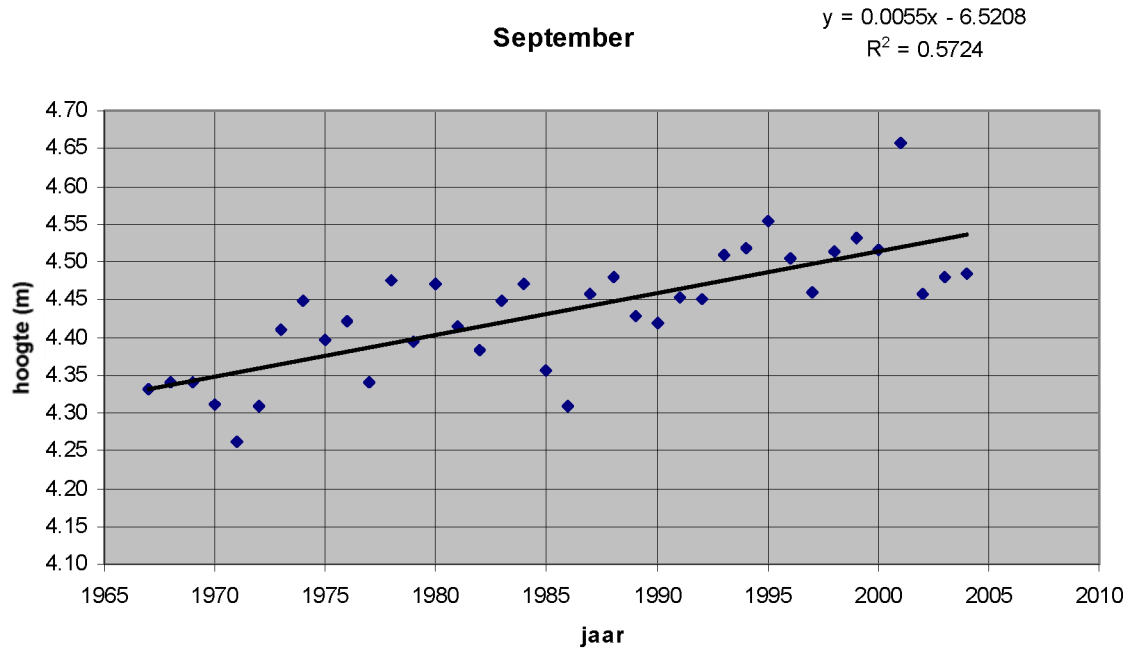
De trendlijn stijgt met 0.37 cm per jaar en  $r = 0.5925$ .



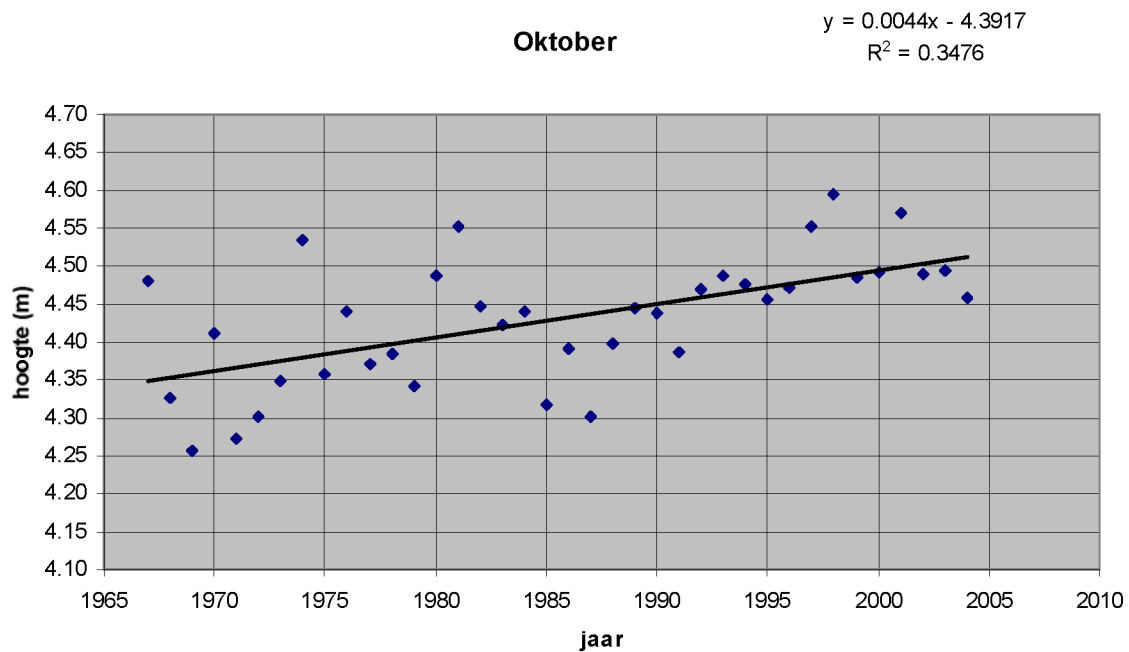
De trendlijn stijgt met 0.42 cm per jaar en  $r = 0.7014$ .



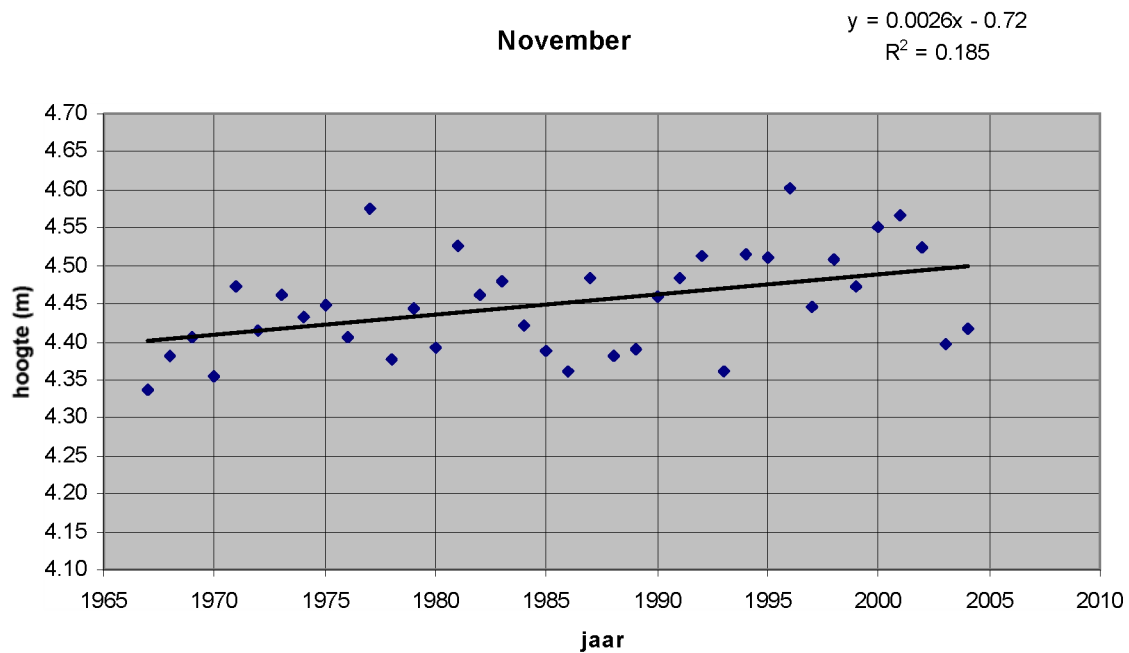
De trendlijn stijgt met 0.46 cm per jaar en  $r = 0.6864$ .



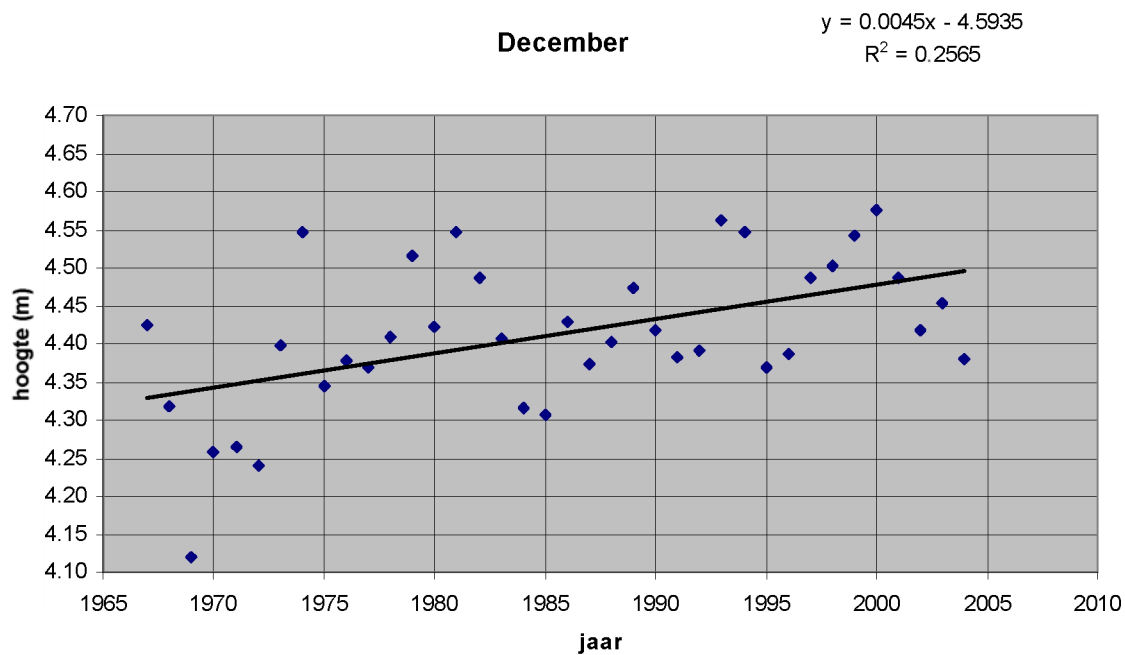
De trendlijn stijgt met 0.55 cm per jaar en  $r = 0.7566$ .



De trendlijn stijgt met 0.44 cm per jaar en  $r = 0.5896$ .

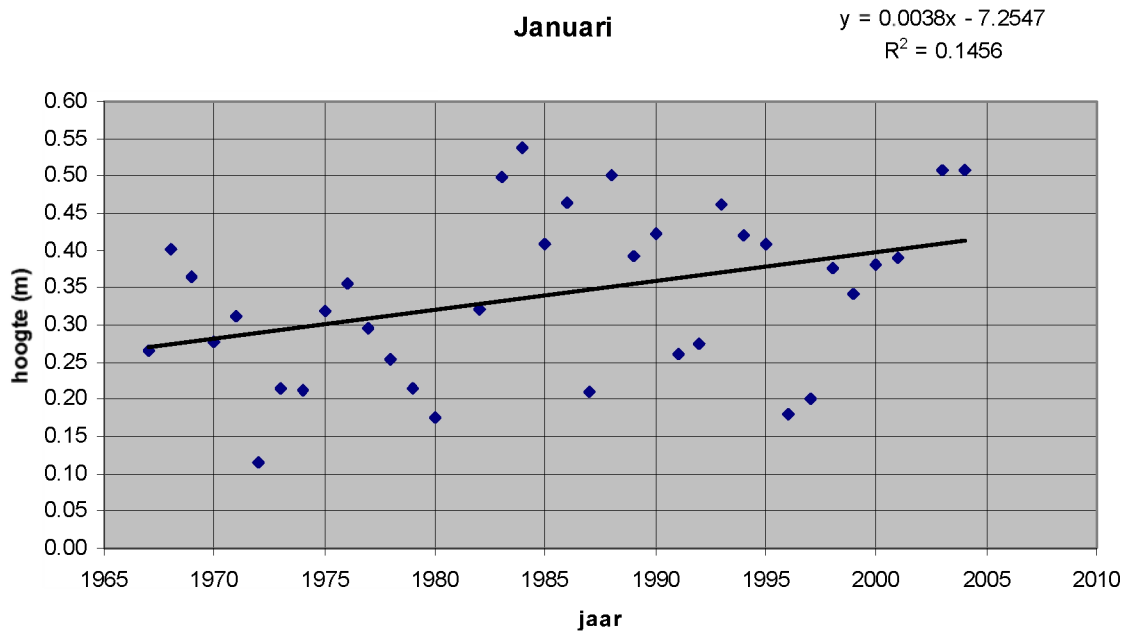


De trendlijn stijgt met 0.26 cm per jaar en  $r = 0.4301$ .

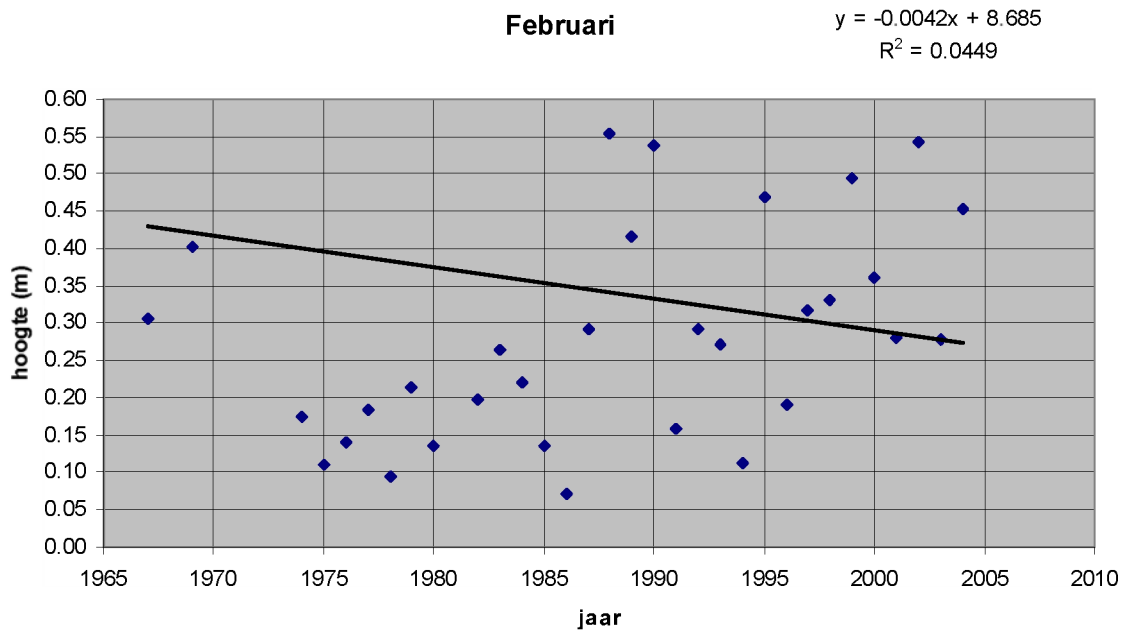


De trendlijn stijgt met 0.45 cm per jaar en  $r = 0.5065$ .

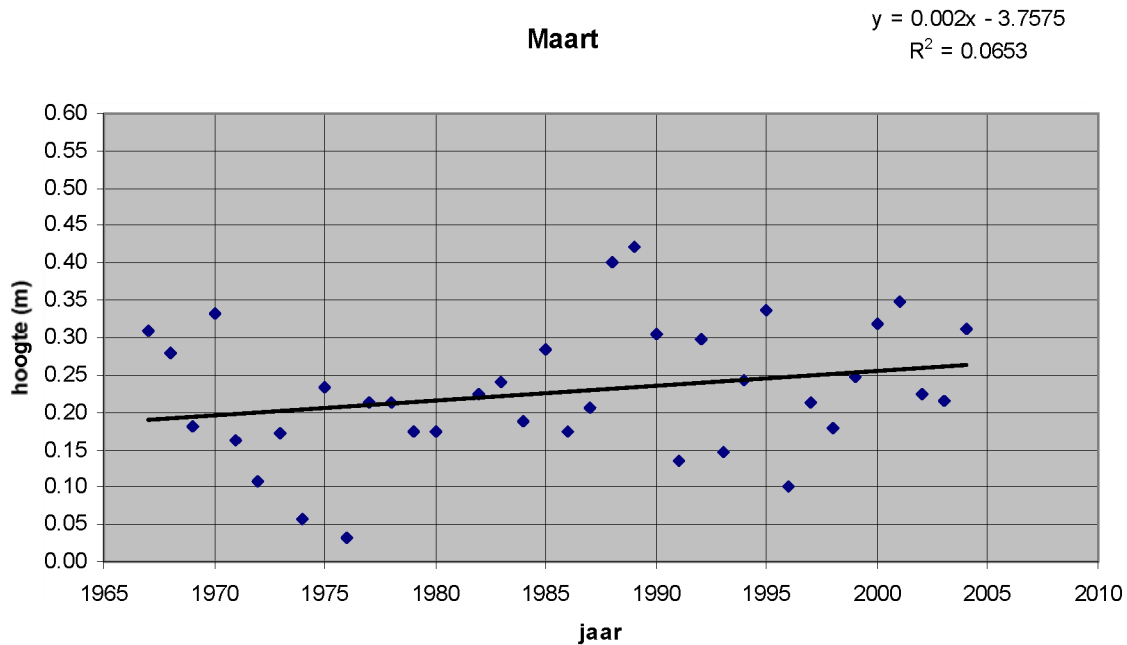
### 3.1.2.2.2 Laagwater



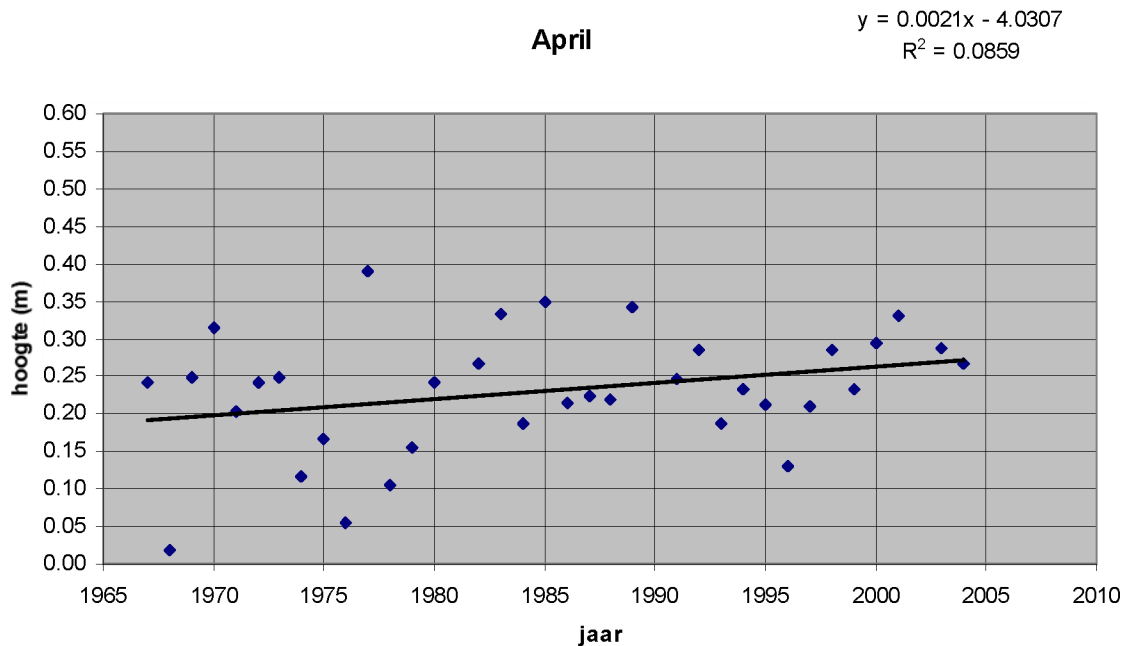
De trendlijn stijgt met 0.38 cm per jaar en  $r = 0.3816$ .



De trendlijn stijgt met 0.42 cm per jaar en  $r = -0.2119$ .

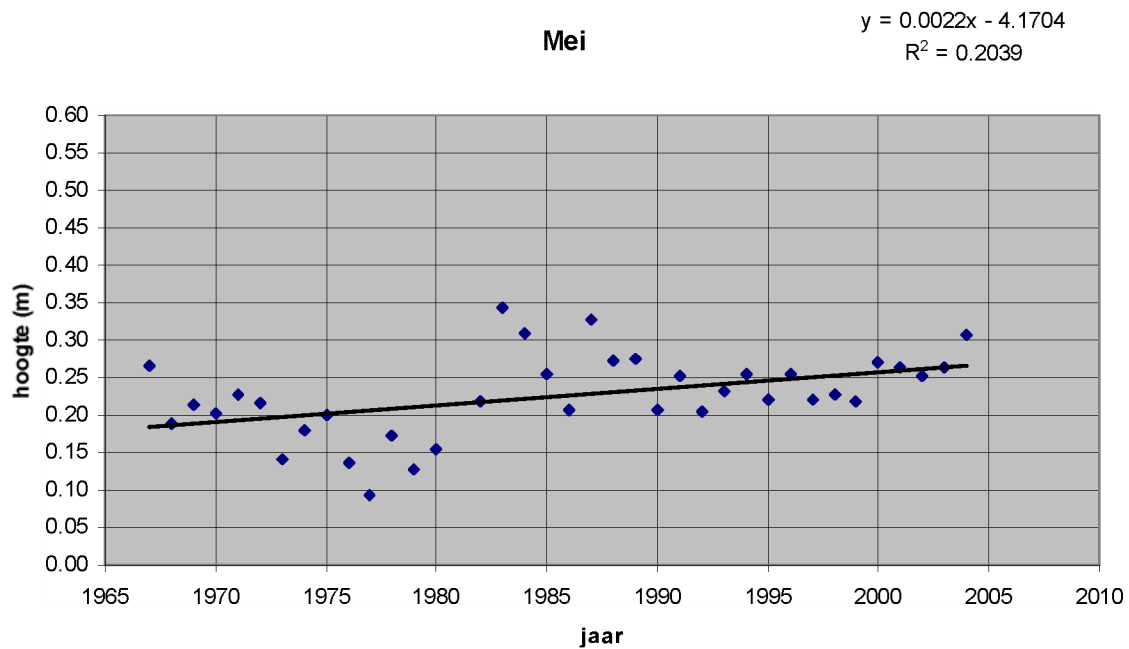


De trendlijn stijgt met 0.20 cm per jaar en  $r = 0.2555$ .

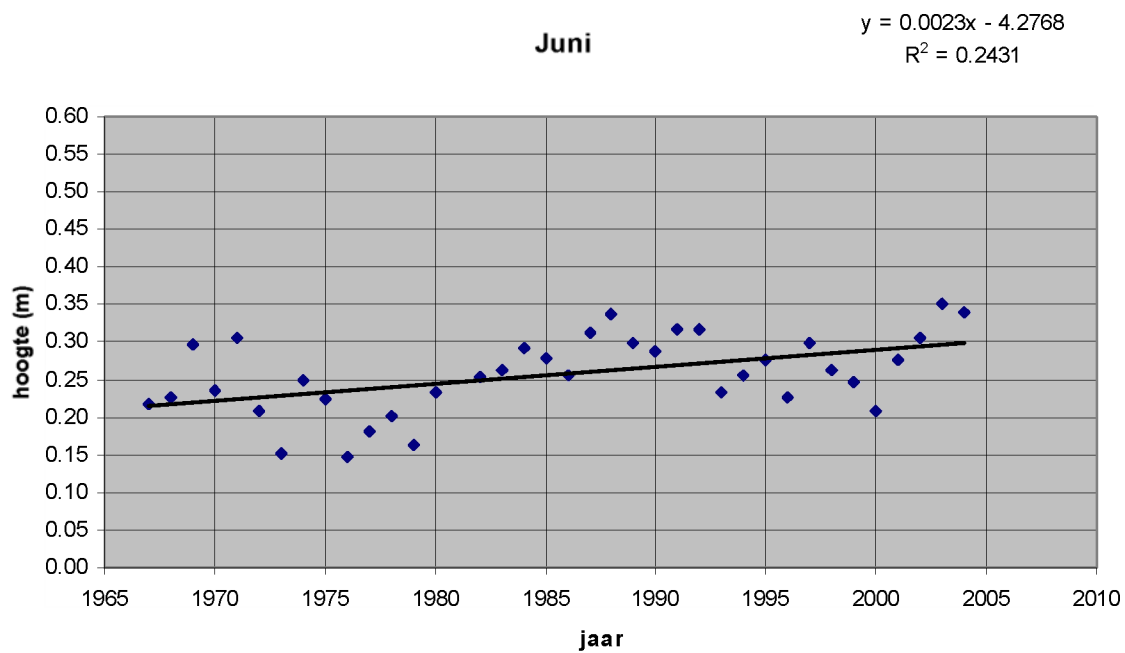


De trendlijn stijgt met 0.21 cm per jaar en  $r = 0.2931$ .

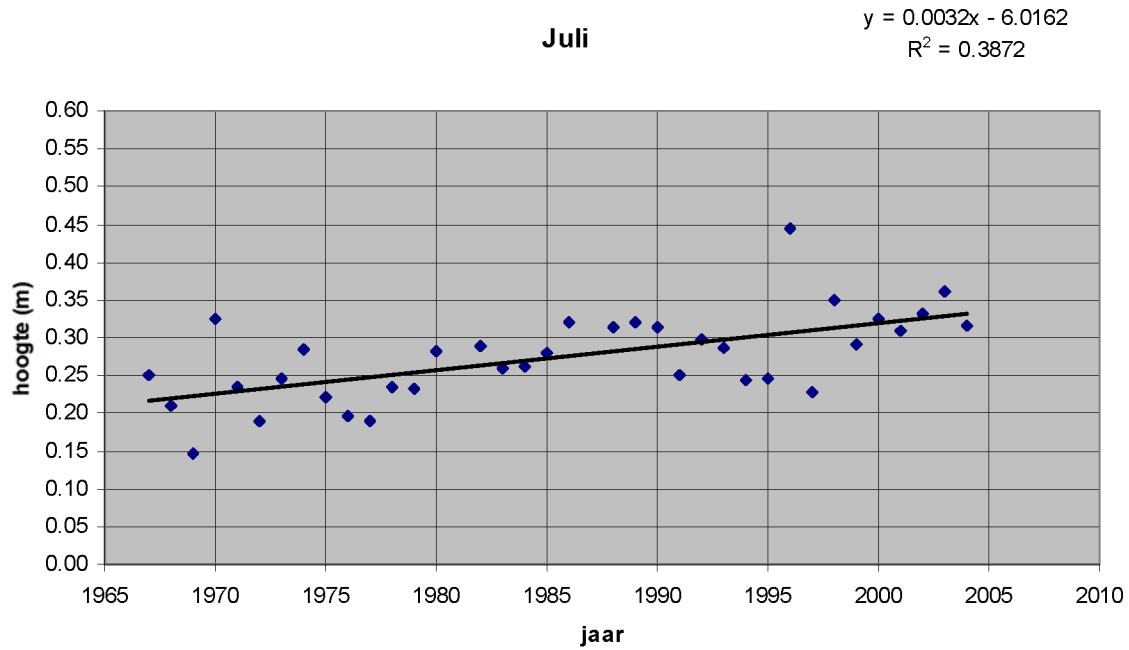




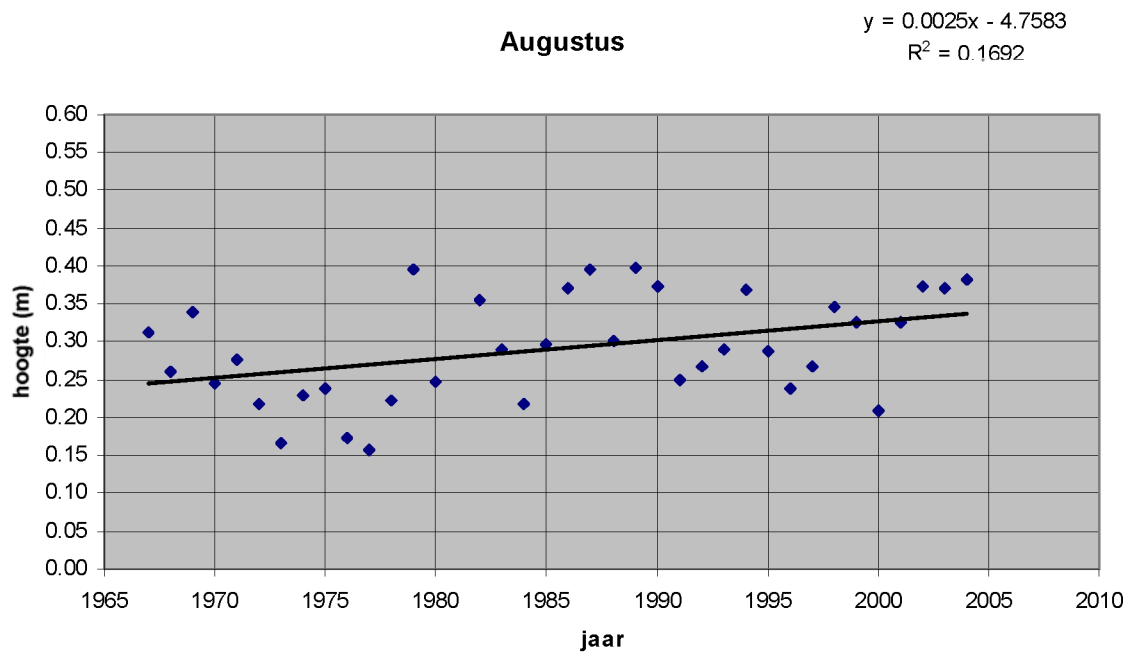
De trendlijn stijgt met 0.22 cm per jaar en  $r = 0.4516$ .



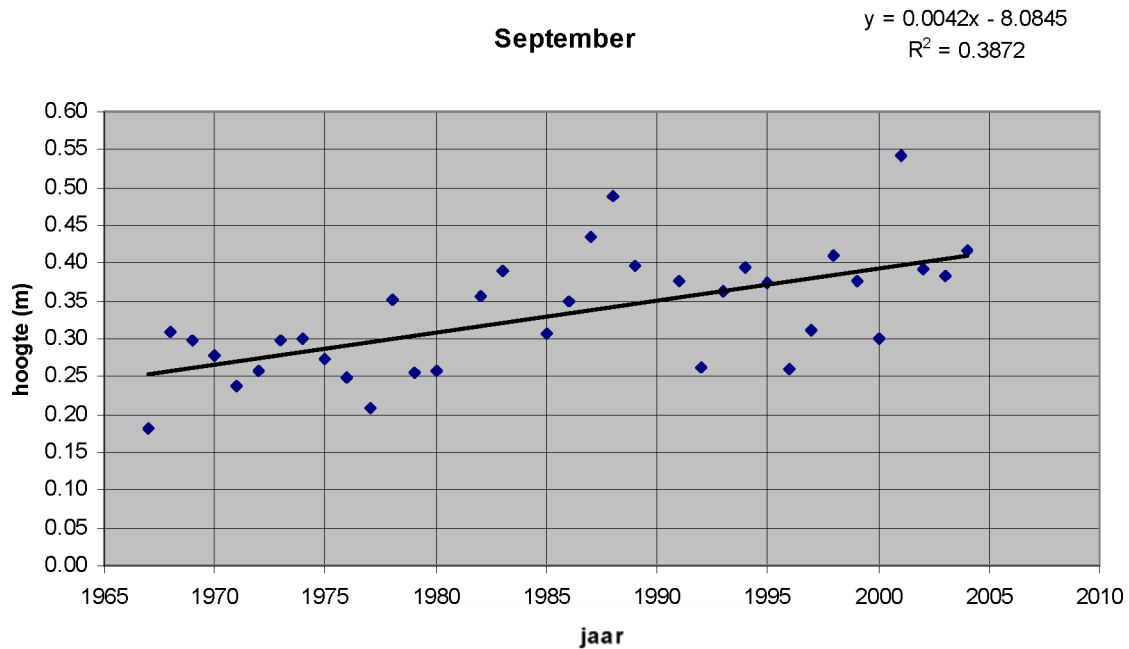
De trendlijn stijgt met 0.23 cm per jaar en  $r = 0.4931$ .



De trendlijn stijgt met 0.32 cm per jaar en  $r = 0.6223$ .

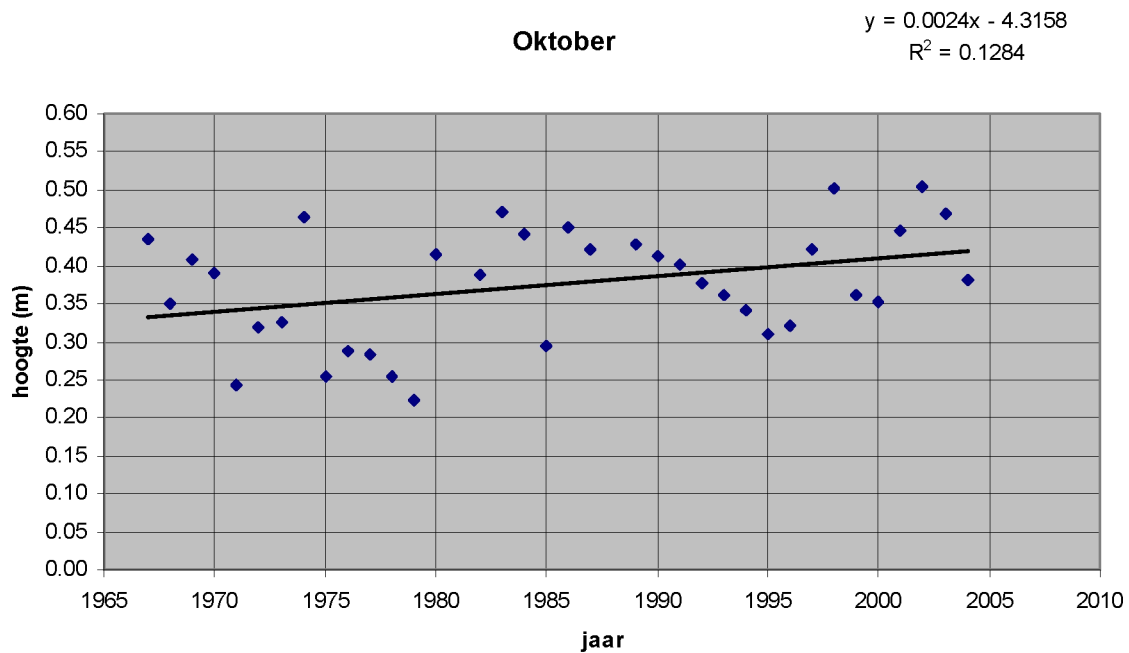


De trendlijn stijgt met 0.25 cm per jaar en  $r = 0.4113$ .

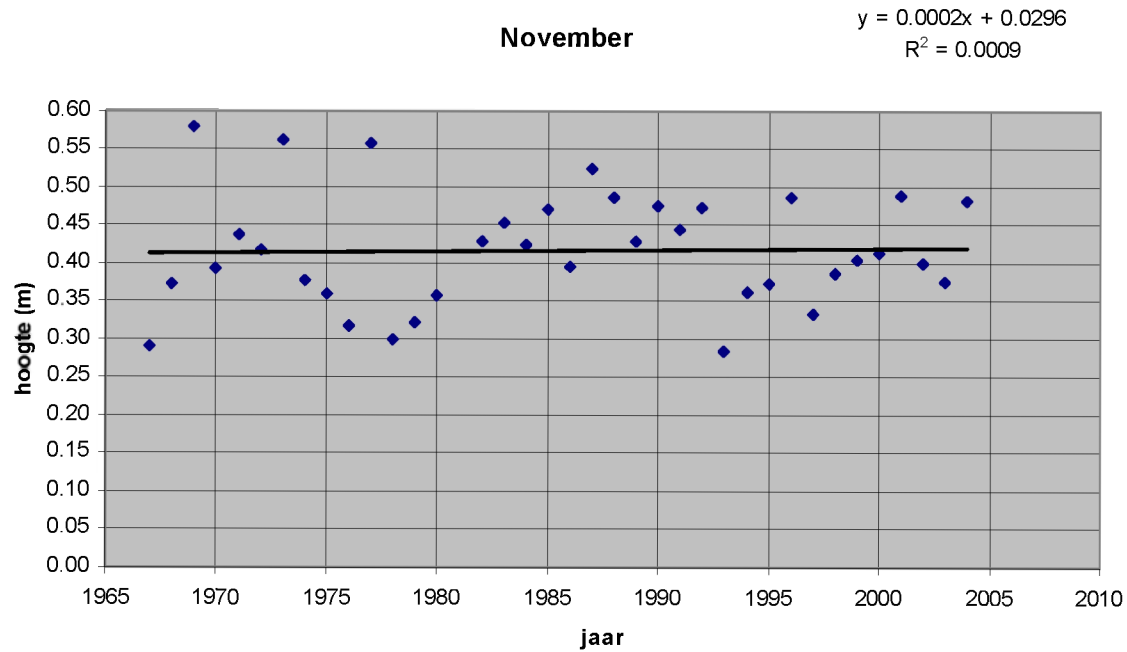


De trendlijn stijgt met 0.42 cm per jaar en  $r = 0.6223$ .

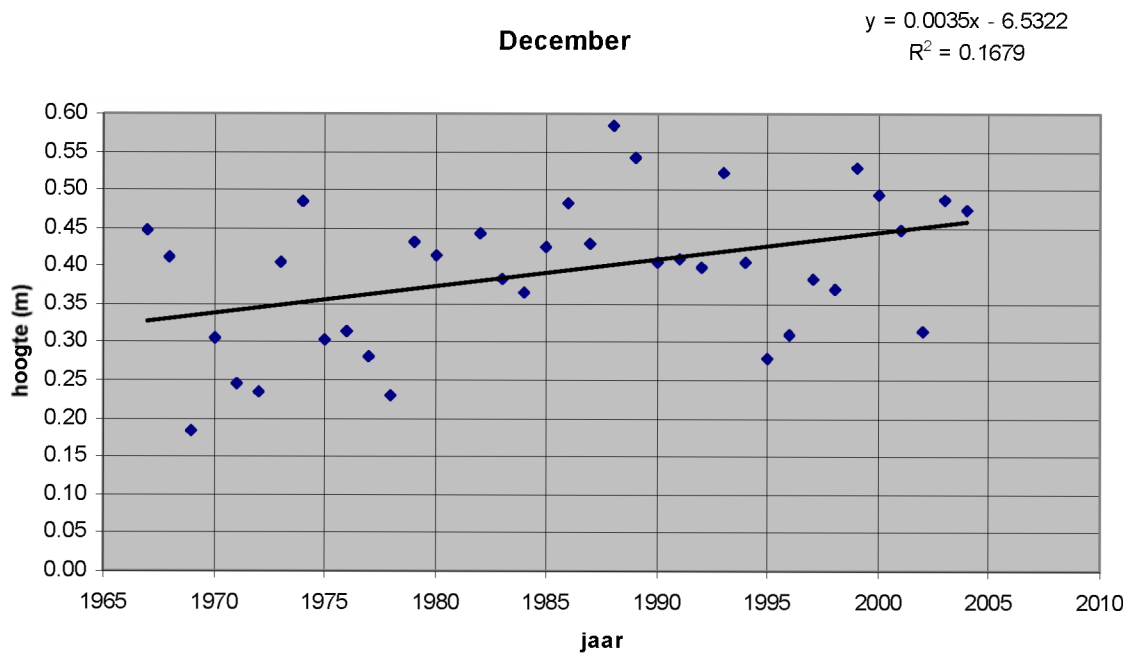
---



De trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.3583$ .

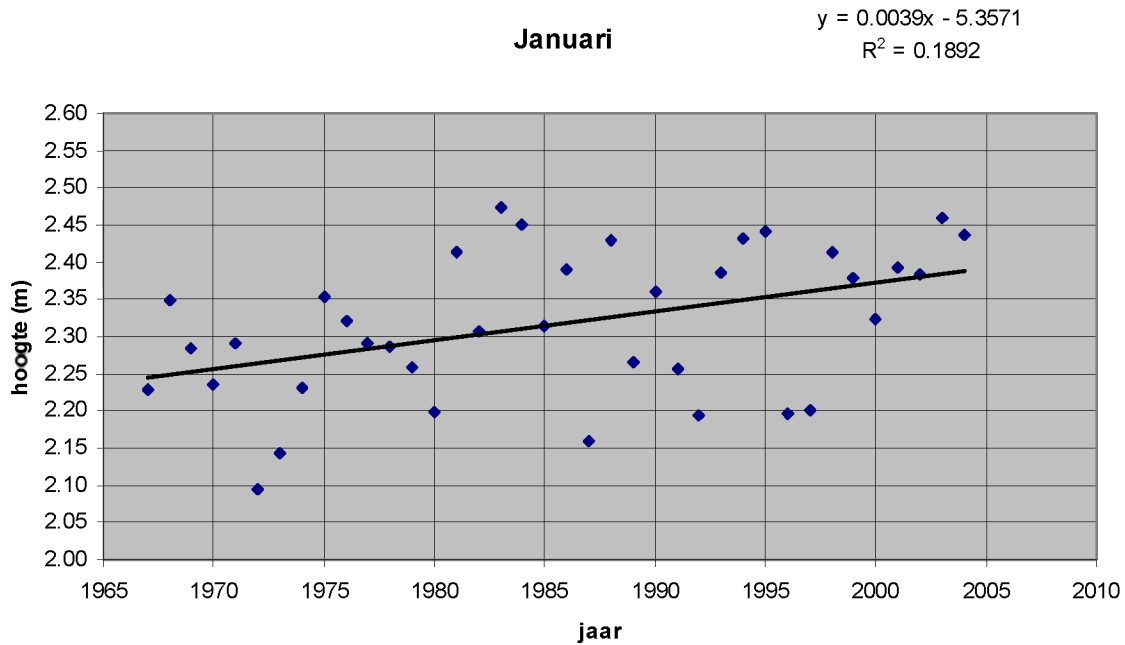


De trendlijn stijgt met 0.02 cm per jaar en  $r = 0.03$ .



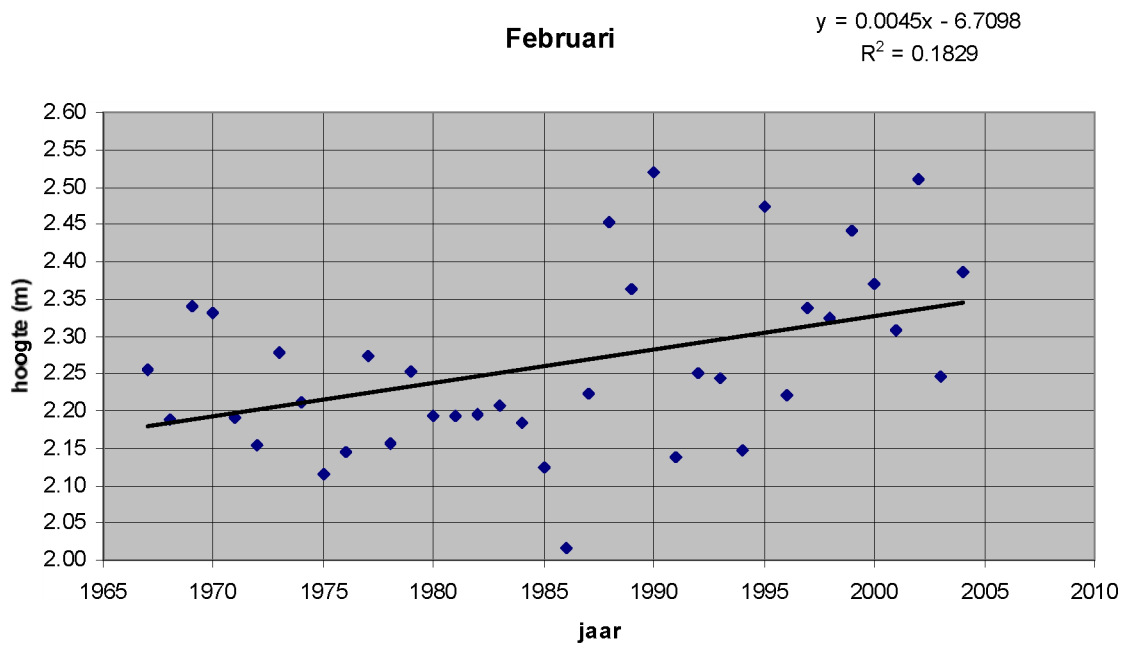
De trendlijn stijgt met 0.35 cm per jaar en  $r = 0.4098$ .

### 3.1.2.2.3 Gemiddeld Zeeniveau (MSL)

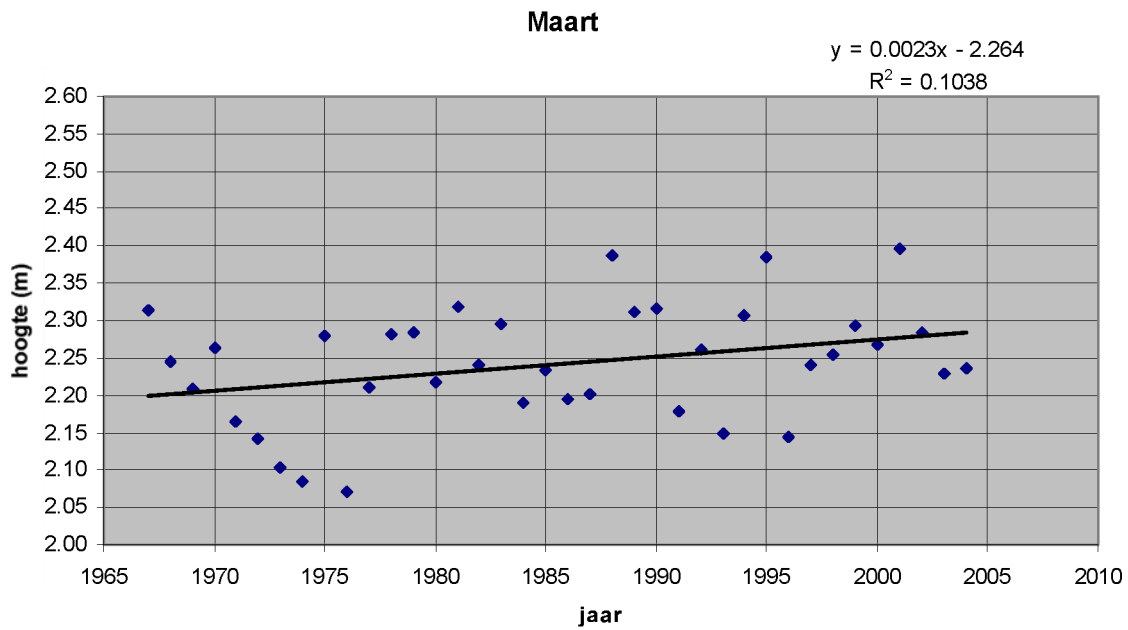


De trendlijn stijgt met 0.39 cm per jaar en  $r = 0.4350$ .

---

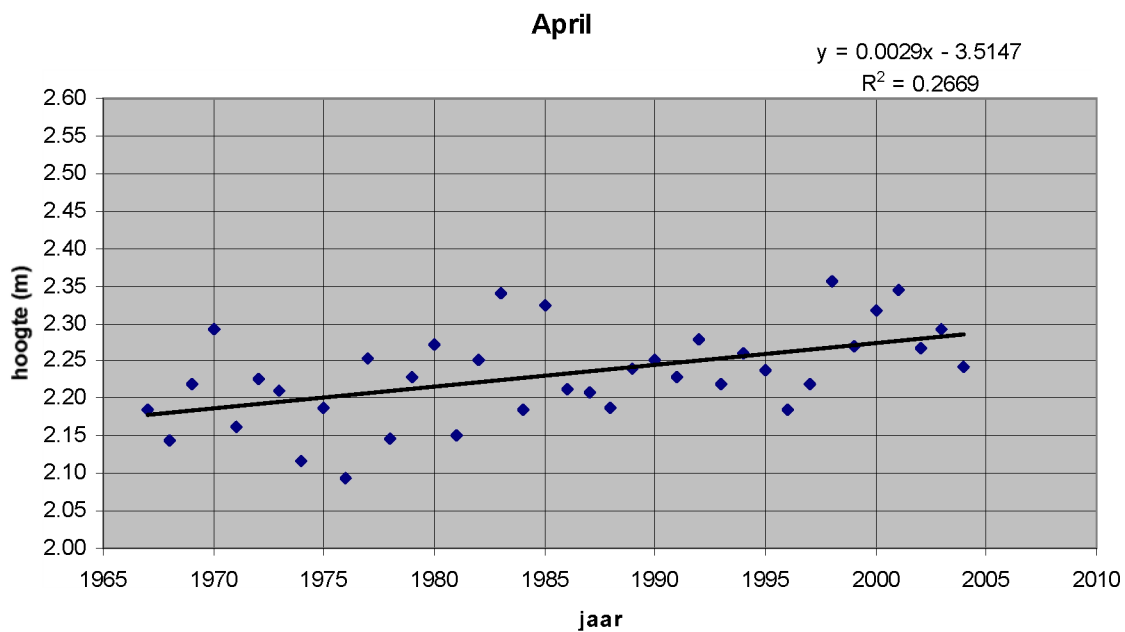


De trendlijn stijgt met 0.45 cm per jaar en  $r = 0.4277$ .

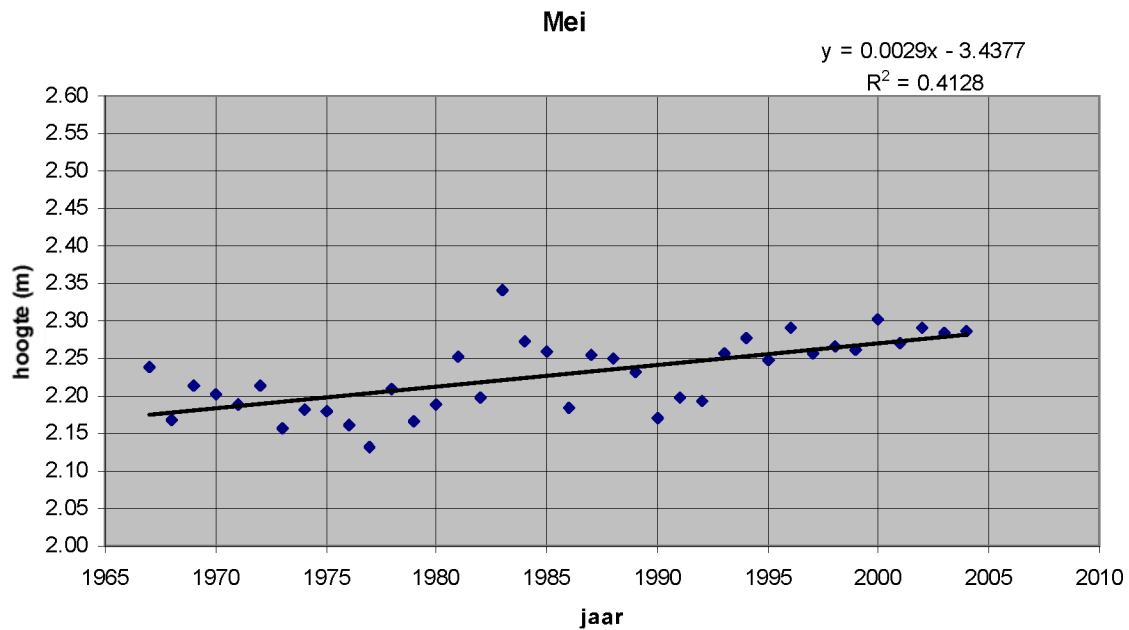


De trendlijn stijgt met 0.23 cm per jaar en  $r = 0.3222$ .

---

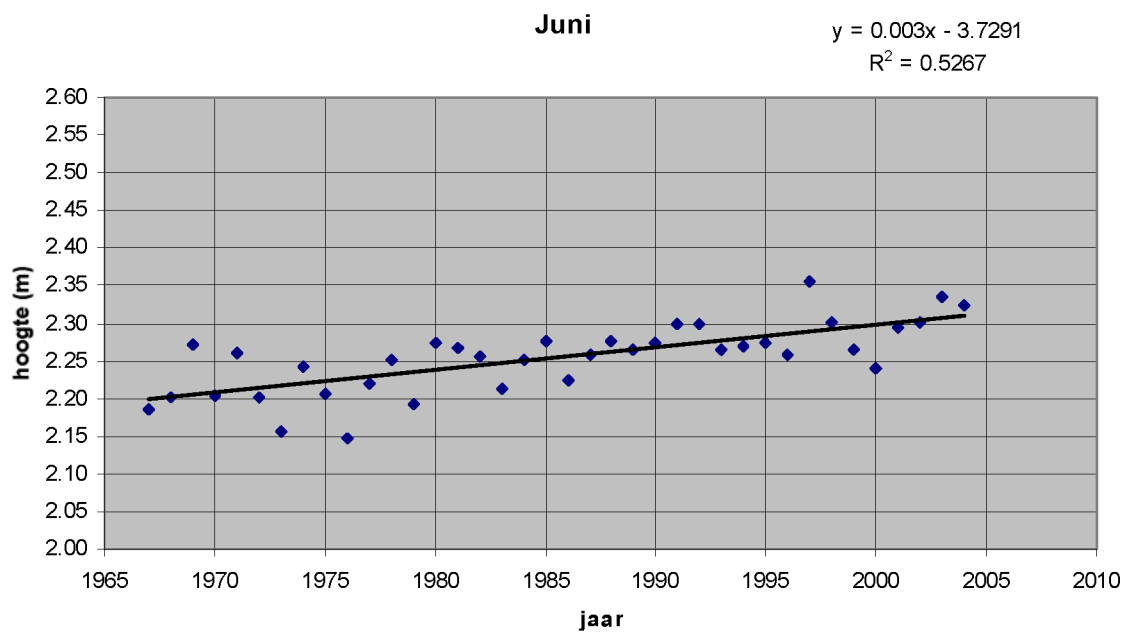


De trendlijn stijgt met 0.29 cm per jaar en  $r = 0.5166$ .

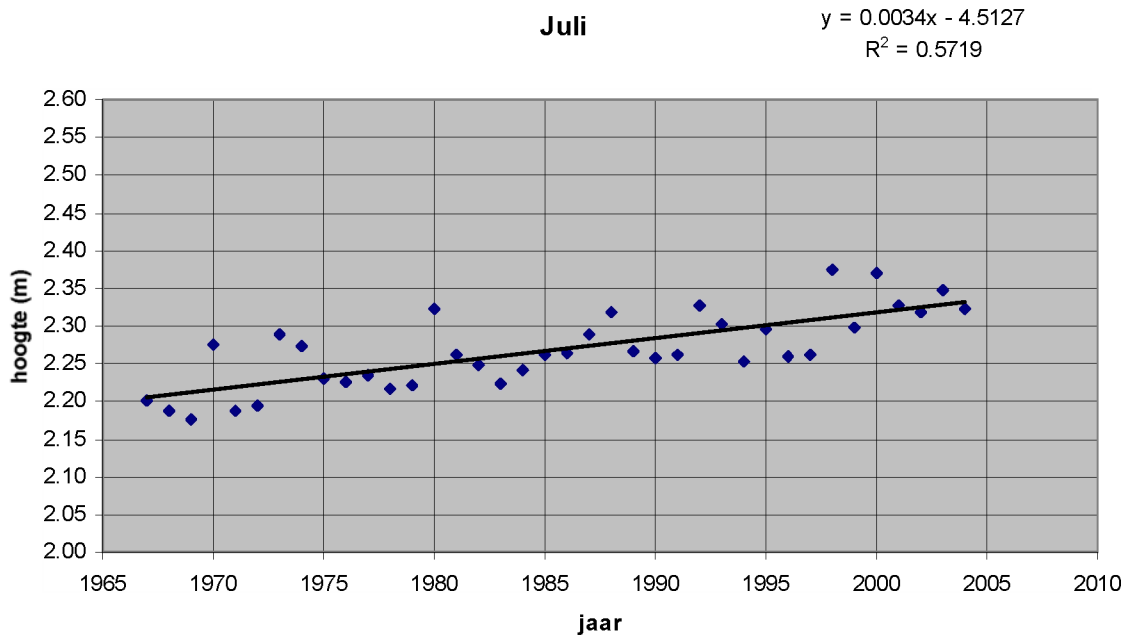


De trendlijn stijgt met 0.29 cm per jaar en  $r = 0.6425$ .

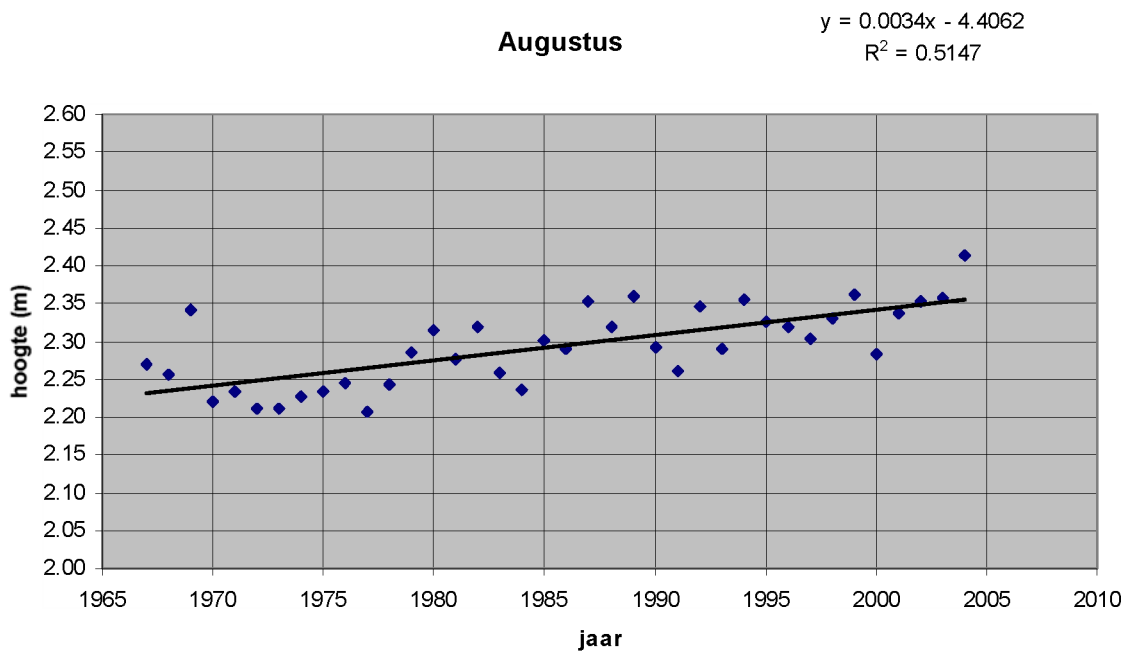
---



De trendlijn stijgt met 0.30 cm per jaar en  $r = 0.7257$ .

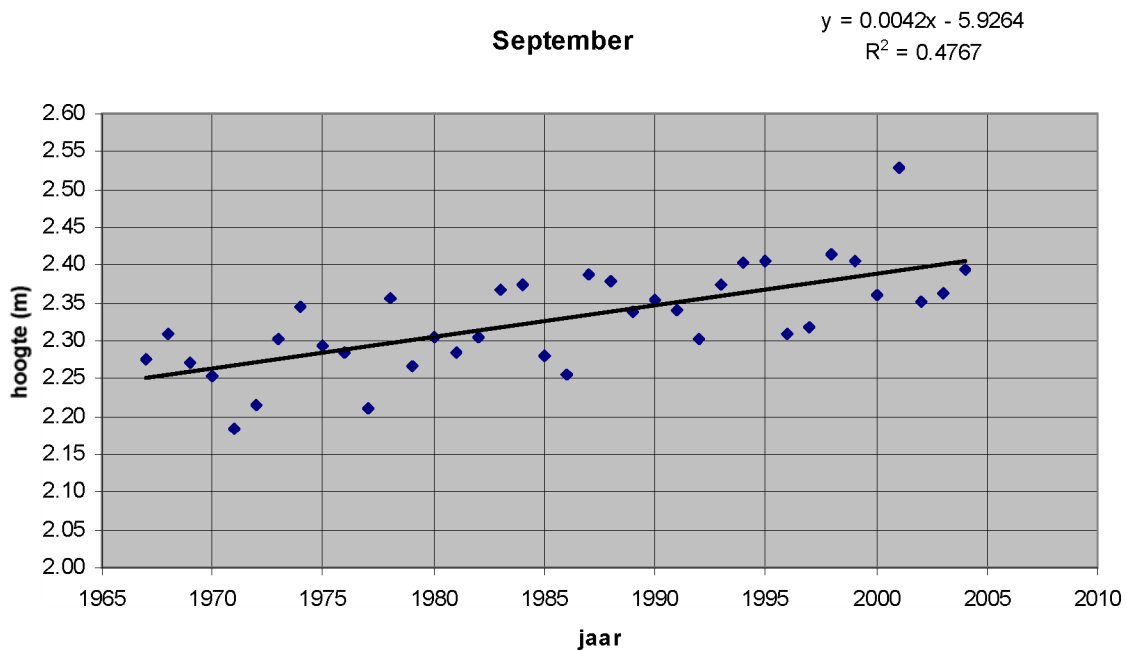


De trendlijn stijgt met 0.34 cm per jaar en  $r = 0.7562$ .

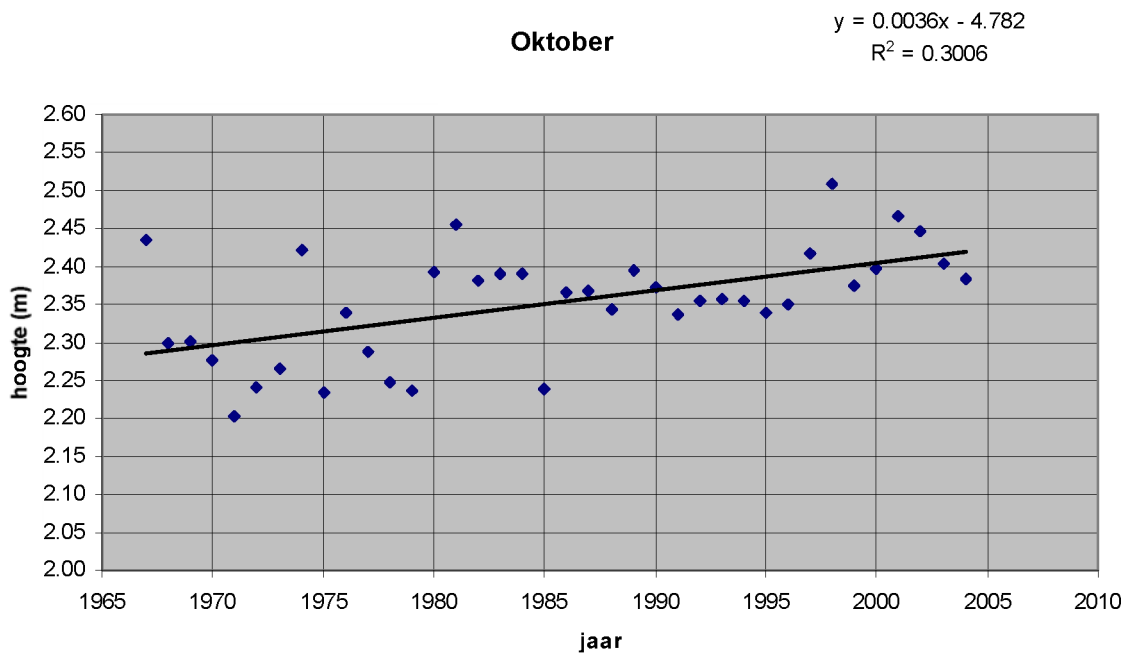


De trendlijn stijgt met 0.34 cm per jaar en  $r = 0.7174$ .

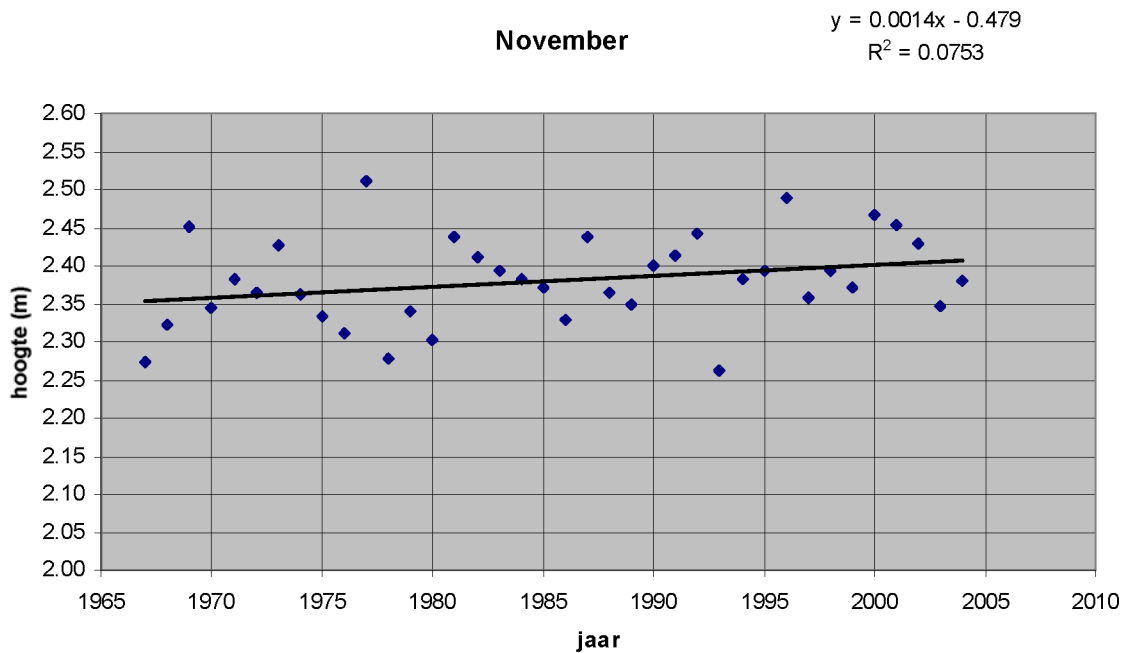




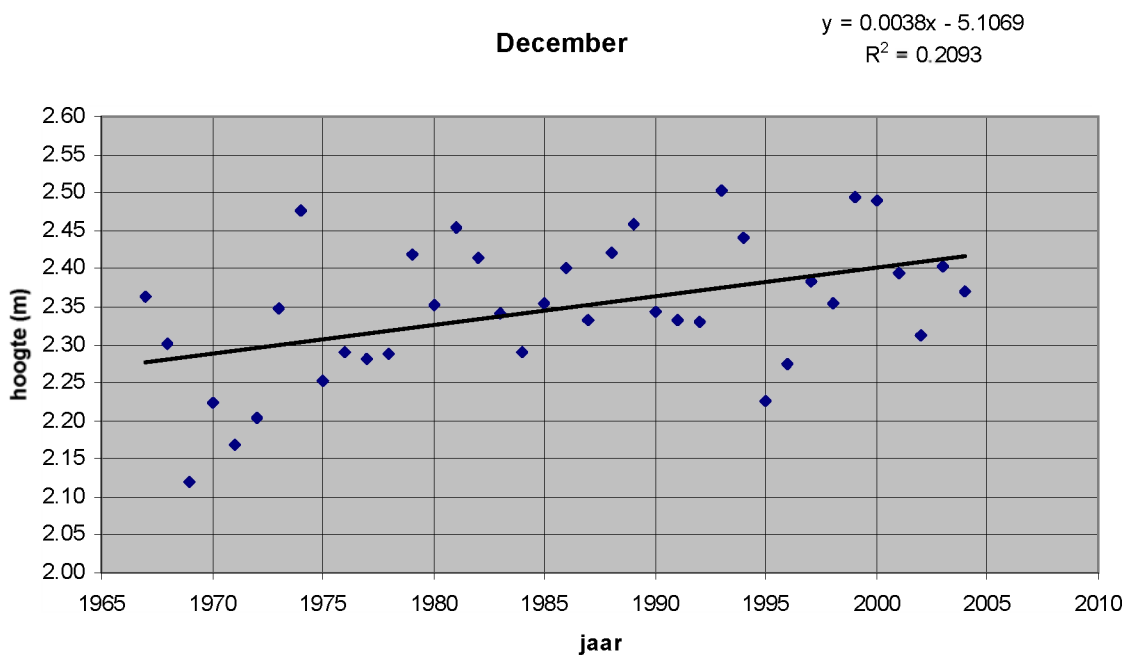
De trendlijn stijgt met 0.42 cm per jaar en  $r = 0.6904$ .



De trendlijn stijgt met 0.36 cm per jaar en  $r = 0.5483$ .



De trendlijn stijgt met 0.14 cm per jaar en  $r = 0.2744$ .



De trendlijn stijgt met 0.38 cm per jaar en  $r = 0.4575$ .

### 3.1.2.2.4 Tabel r-waarden

De r-waarden zijn de correlatiecoëfficiënten.

| r         | Hoogwater | Laagwater | Gemiddeld Zeeniveau |
|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Januari   | 0.5152    | 0.3816    | 0.4350              |
| Februari  | 0.5187    | -0.2119   | 0.4277              |
| Maart     | 0.3914    | 0.2555    | 0.3222              |
| April     | 0.5308    | 0.2931    | 0.5166              |
| Mei       | 0.7235    | 0.4516    | 0.6425              |
| Juni      | 0.5925    | 0.4931    | 0.7257              |
| Juli      | 0.7014    | 0.6223    | 0.7562              |
| Augustus  | 0.6864    | 0.4113    | 0.7174              |
| September | 0.7566    | 0.6223    | 0.6904              |
| Oktober   | 0.5896    | 0.3583    | 0.5483              |
| November  | 0.4301    | 0.03      | 0.2744              |
| December  | 0.5065    | 0.4098    | 0.4575              |

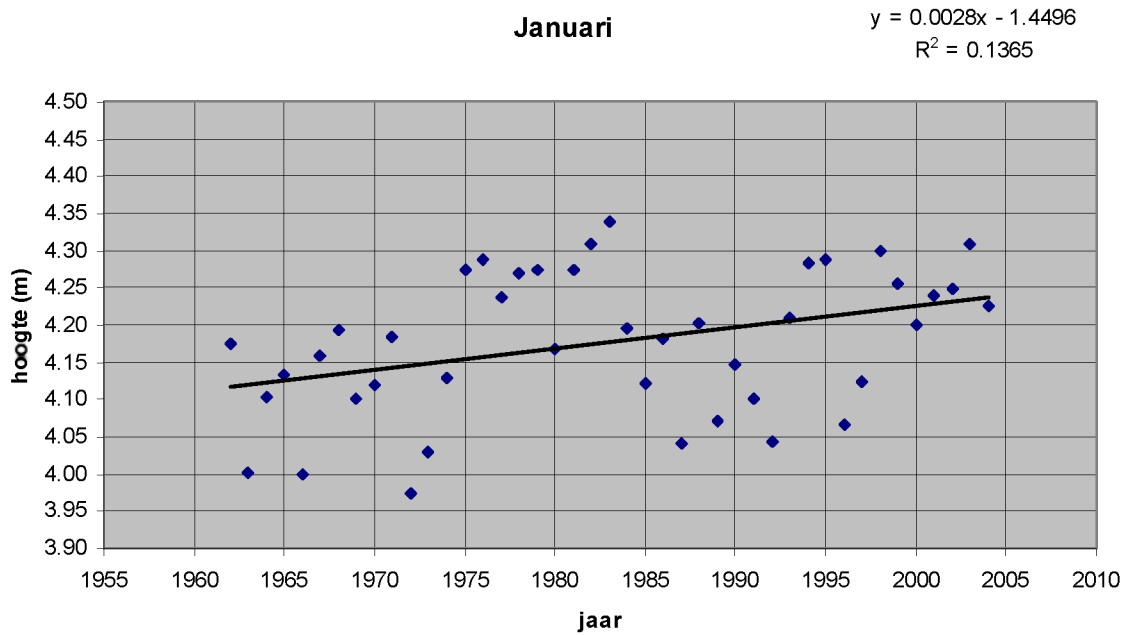
Voor laagwater zijn de r-waarden voor sommige maanden zo laag en in februari zelf negatief dat er geen conclusies getrokken kunnen worden. De r-waarden berekend per maand zijn over het algemeen lager dan de r-waarden bekomen met jaargemiddelden. Dit komt omdat over een heel jaar piekwaarnemingen ten gevolge van b.v. hoge windsnelheden worden uitgemiddeld. Het valt ook op dat de r-waarden voor de periode april-september beduidende hoger liggen dan voor de periode oktober-maart. Tijdens de periode oktober-maart komen er meer stormen voor dan tijdens de periode april-september.

Het gemiddelde van de zeespiegelstijging berekend uit de maandgemiddelden ligt in de buurt van de stijgingswaarden die gevonden werden met gebruik van de jaargemiddelden.

| Stijging in cm/jaar | Gemiddelde van de maandwaarden | Berekend met de jaargemiddelden |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| HW                  | 0.42                           | 0.42                            |
| LW                  | 0.20                           | 0.21                            |
| MSL                 | 0.33                           | 0.33                            |

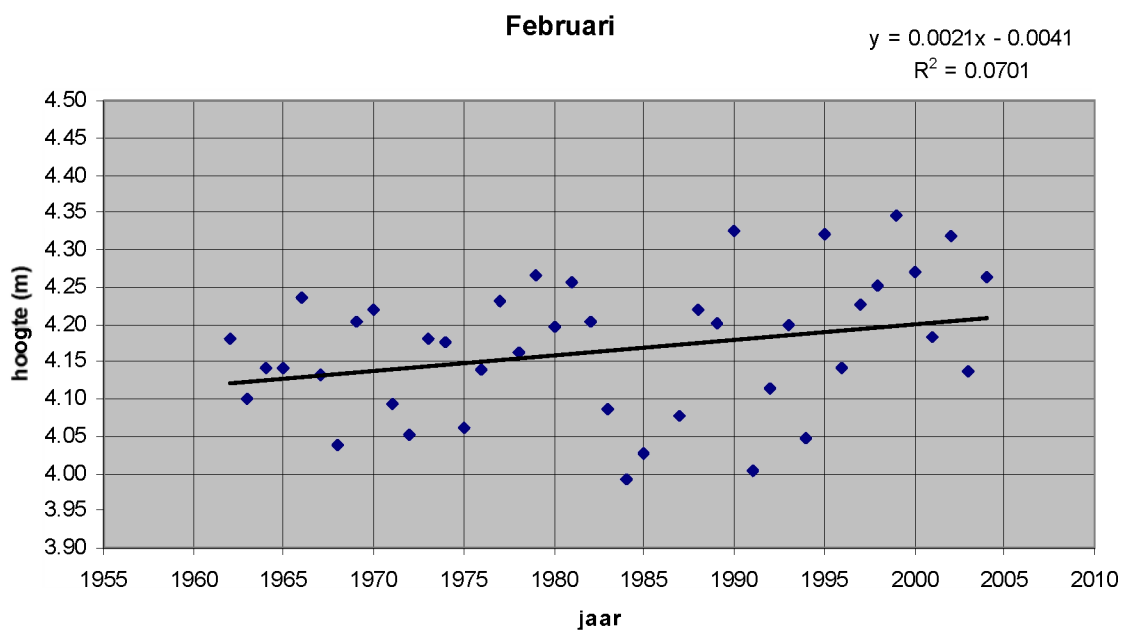
### 3.1.2.3 Zeebrugge

#### 3.1.2.3.1 Hoogwater

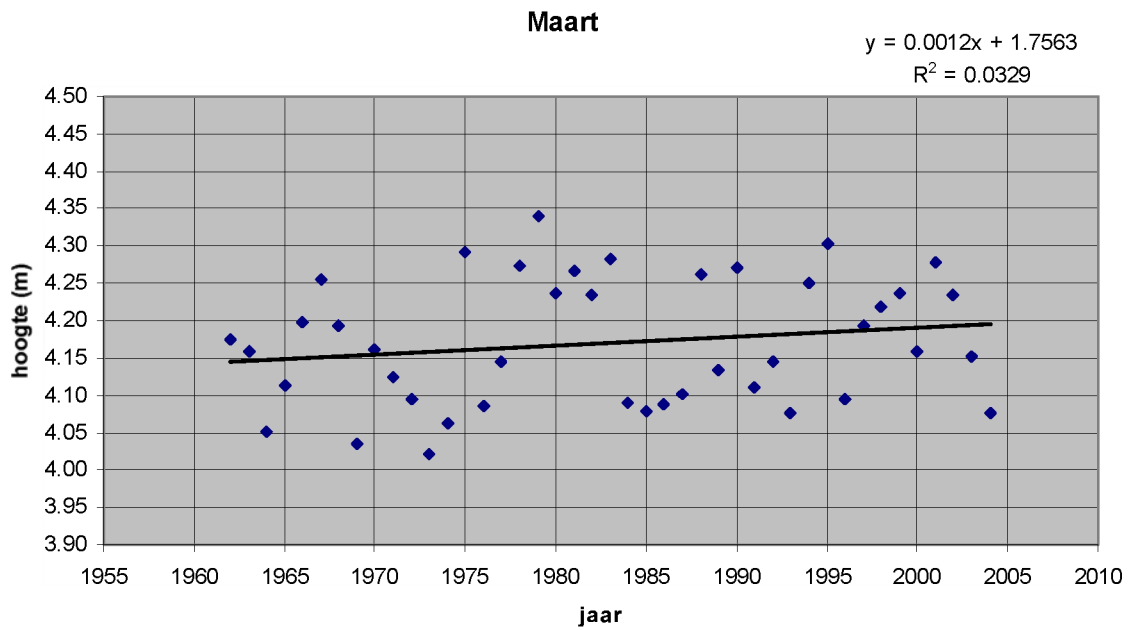


De trendlijn stijgt met 0.28 cm per jaar en  $r = 0.3695$ .

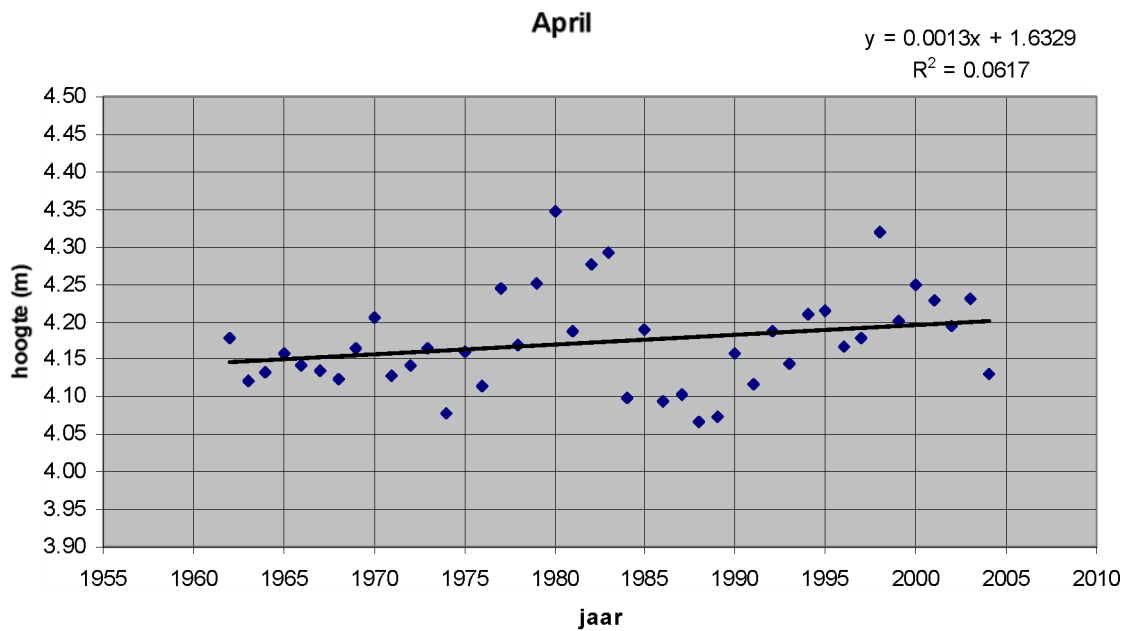
---



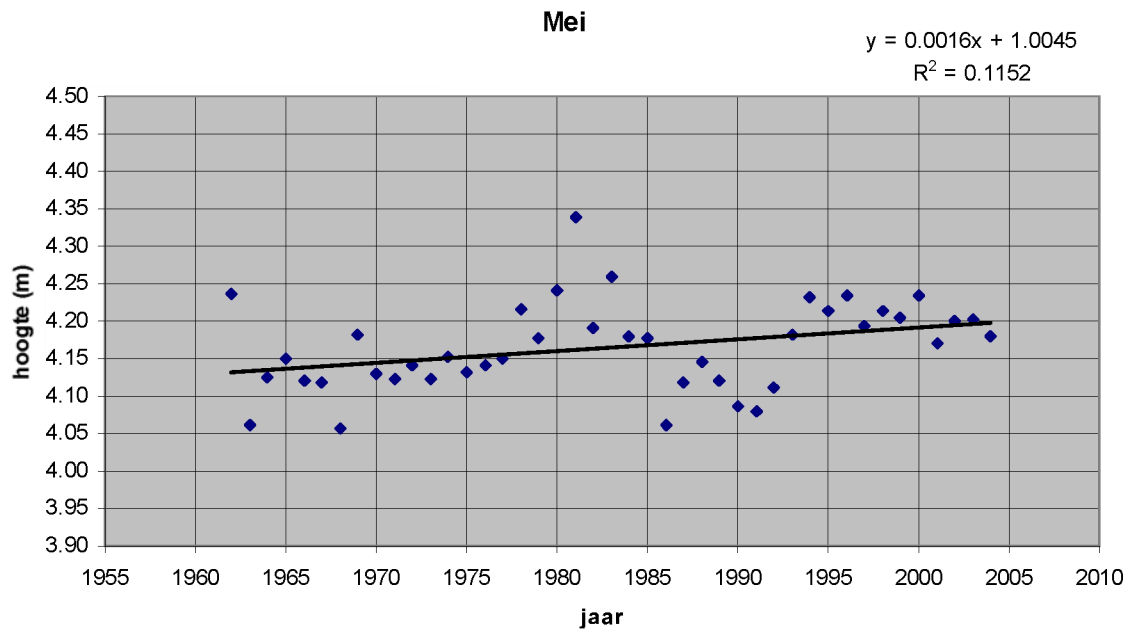
De trendlijn stijgt met 0.21 cm per jaar en  $r = 0.2648$ .



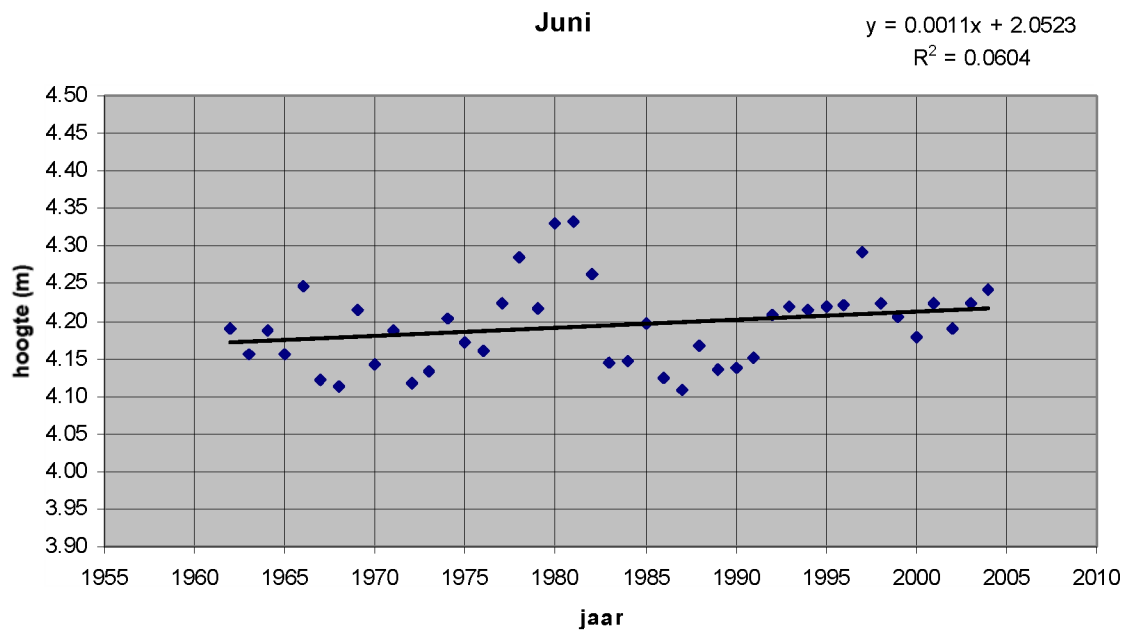
De trendlijn stijgt met 0.12 cm per jaar en  $r = 0.1814$ .



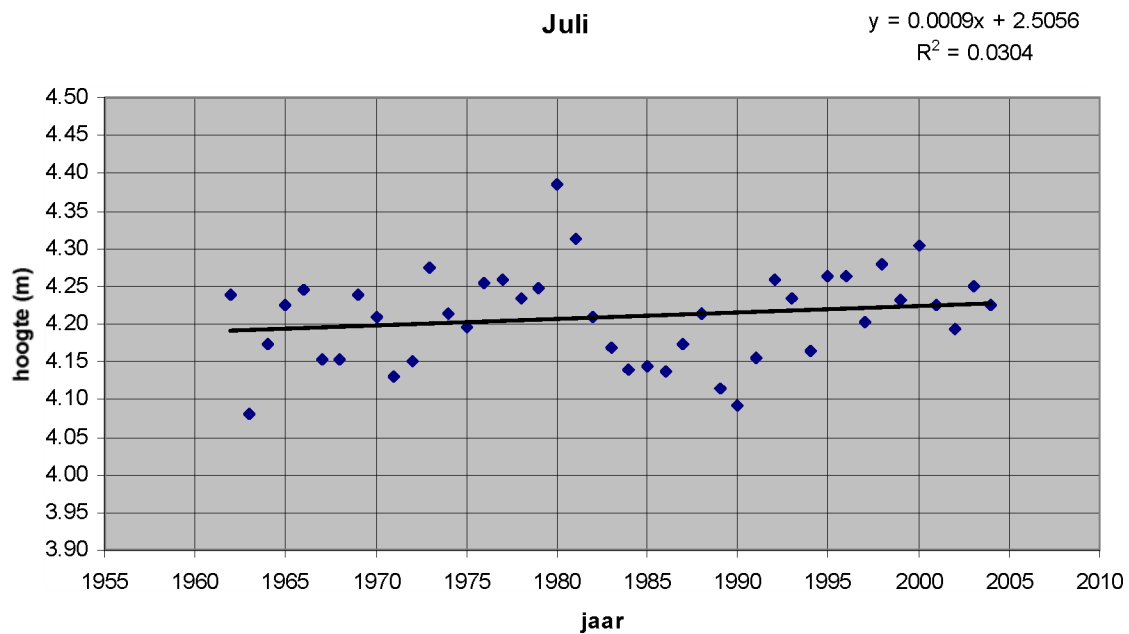
De trendlijn stijgt met 0.13 cm per jaar en  $r = 0.2484$ .



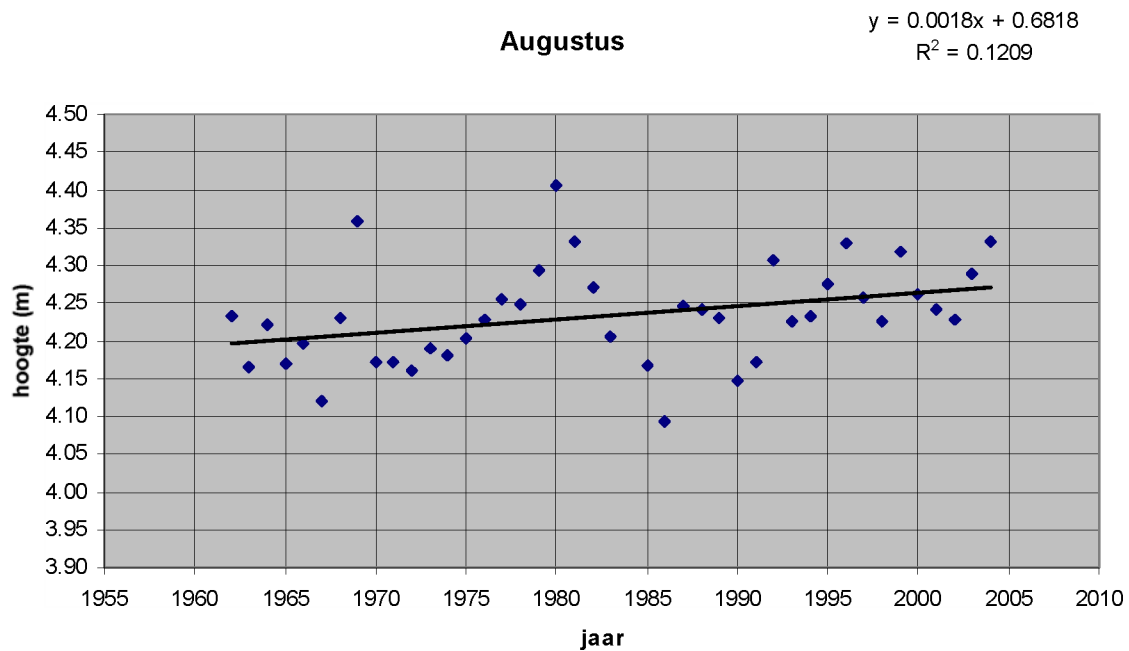
De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.3394$ .



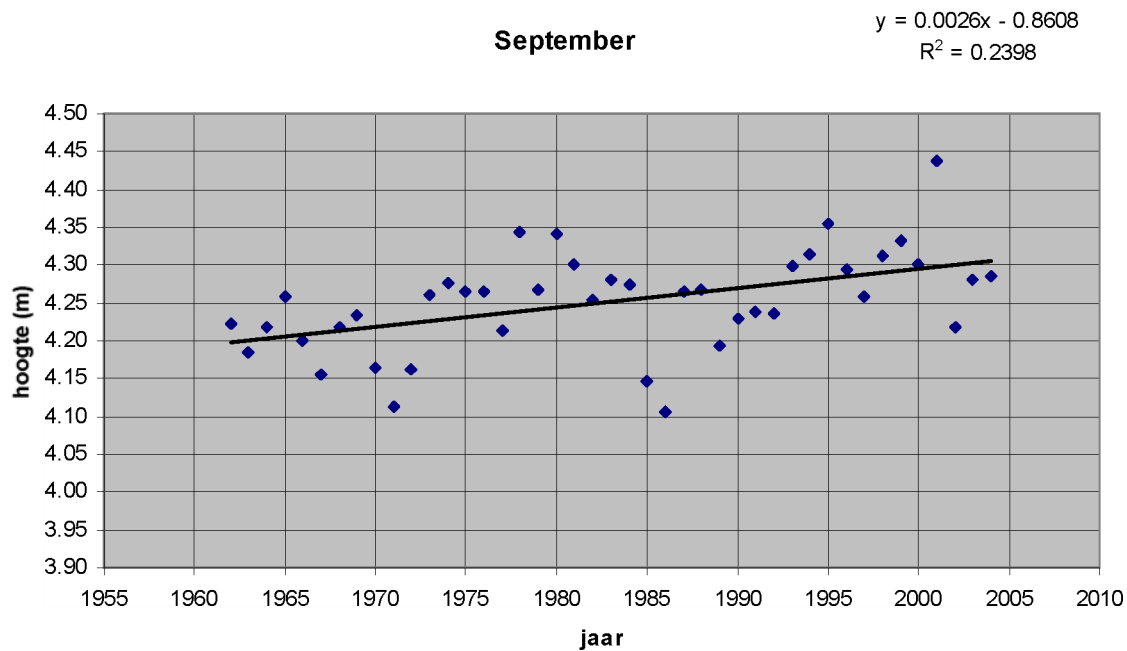
De trendlijn stijgt met 0.11 cm per jaar en  $r = 0.2458$ .



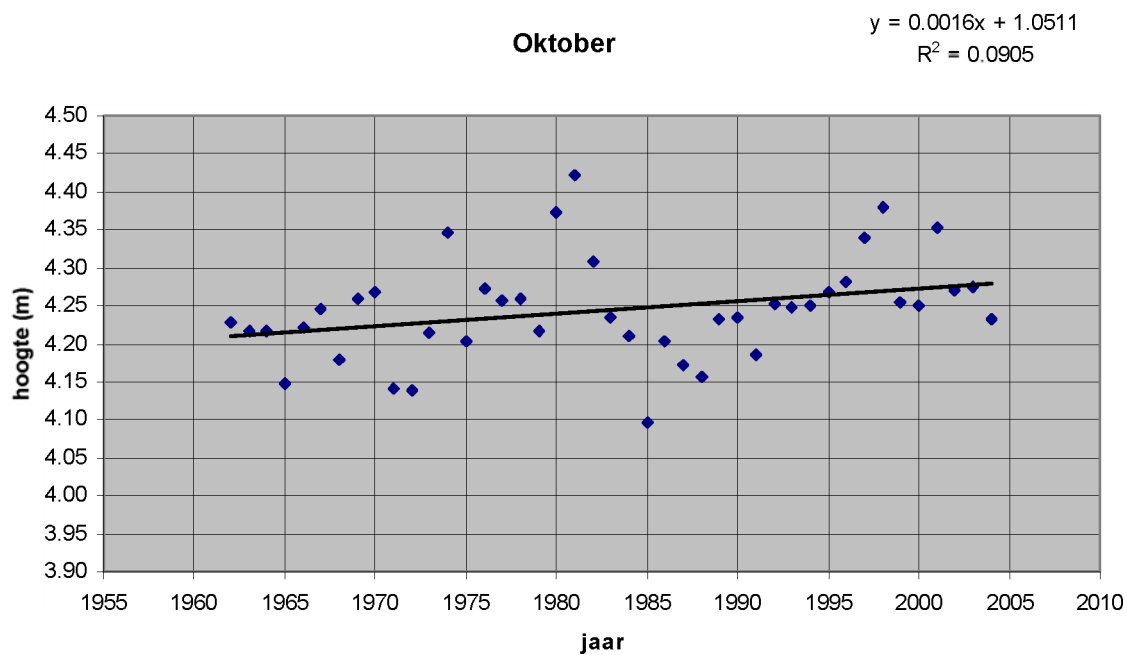
De trendlijn stijgt met 0.09 cm per jaar en  $r = 0.01744$ .



De trendlijn stijgt met 0.18 cm per jaar en  $r = 0.3477$ .

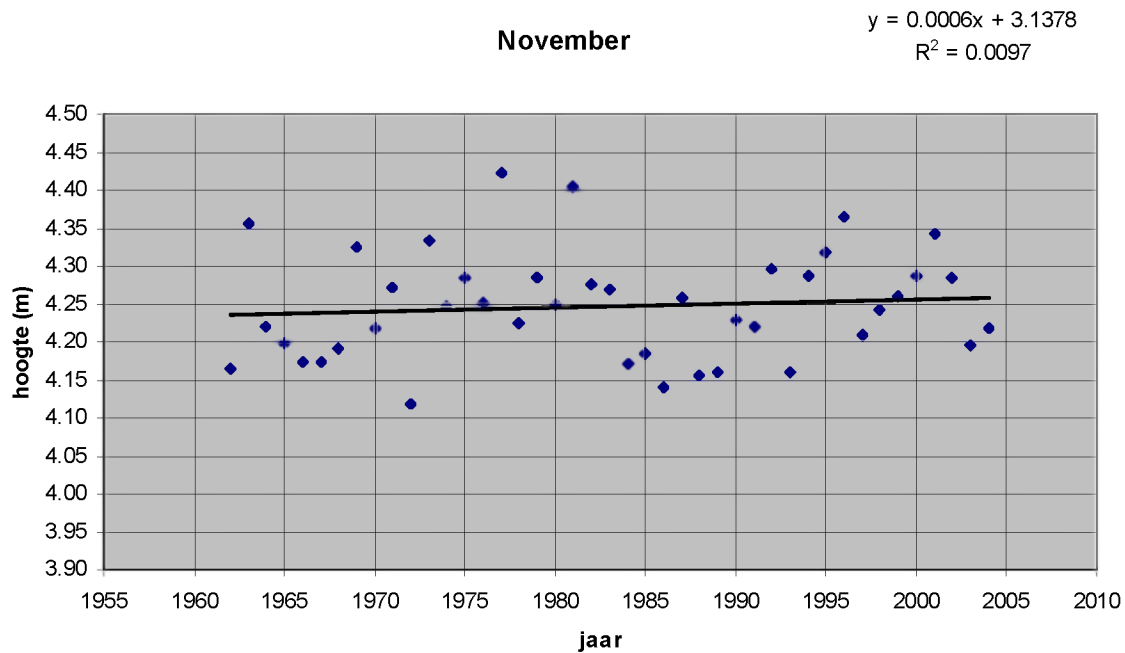


De trendlijn stijgt met 0.26 cm per jaar en  $r = 0.4897$ .

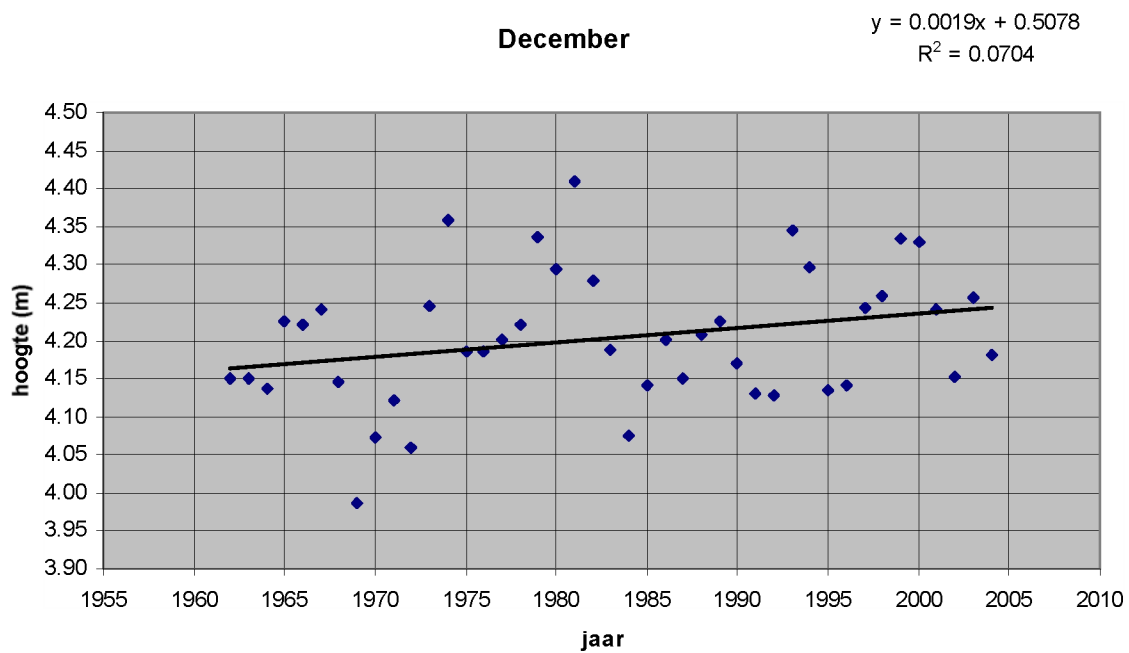


De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.3008$ .



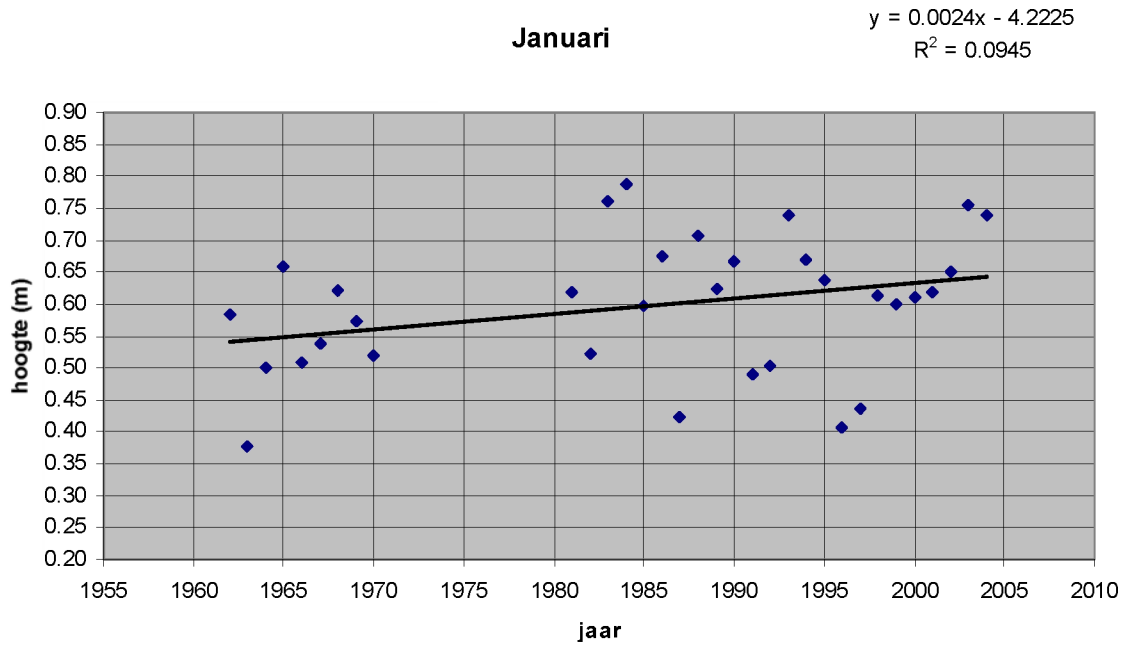


De trendlijn stijgt met 0.06 cm per jaar en  $r = 0.0985$ .



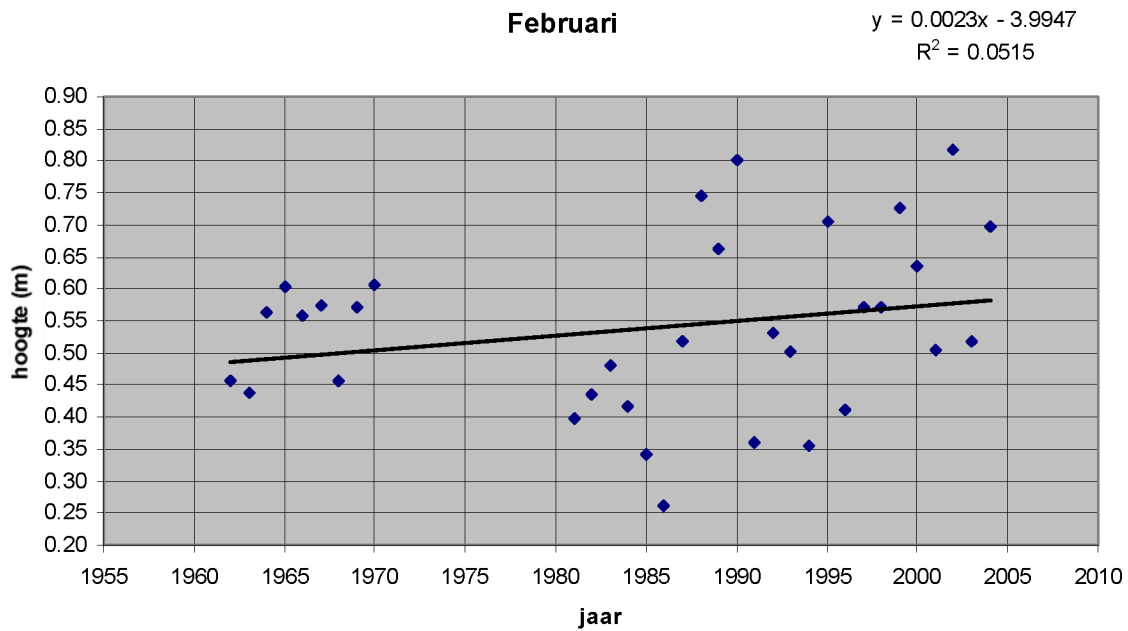
De trendlijn stijgt met 0.19 cm per jaar en  $r = 0.2653$ .

### 3.1.2.3.2 Laagwater

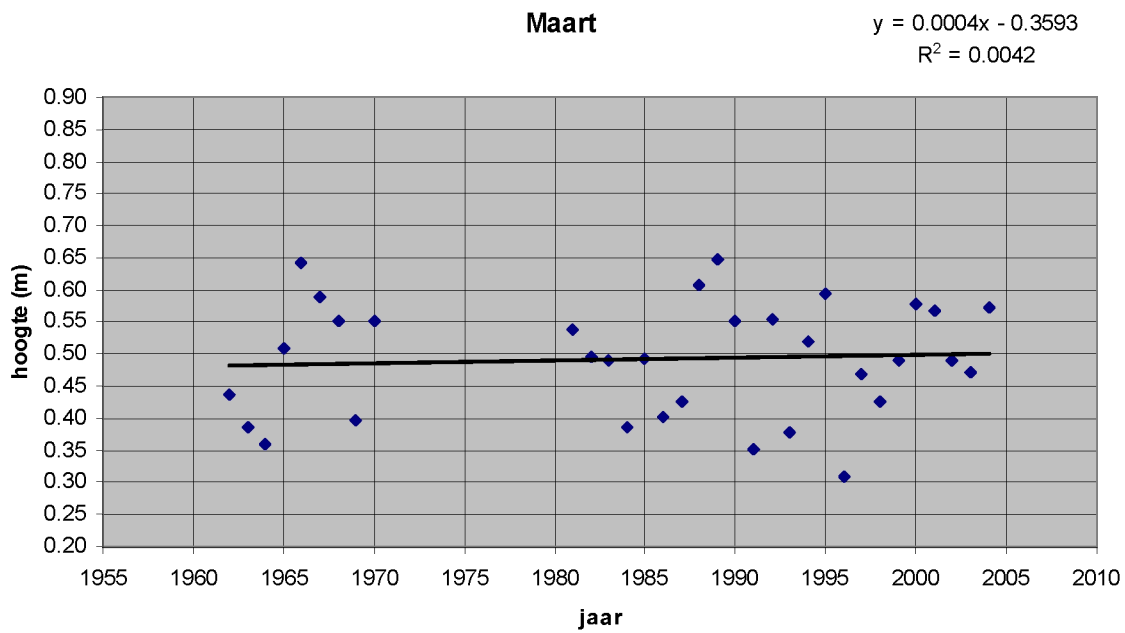


De trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.3074$ .

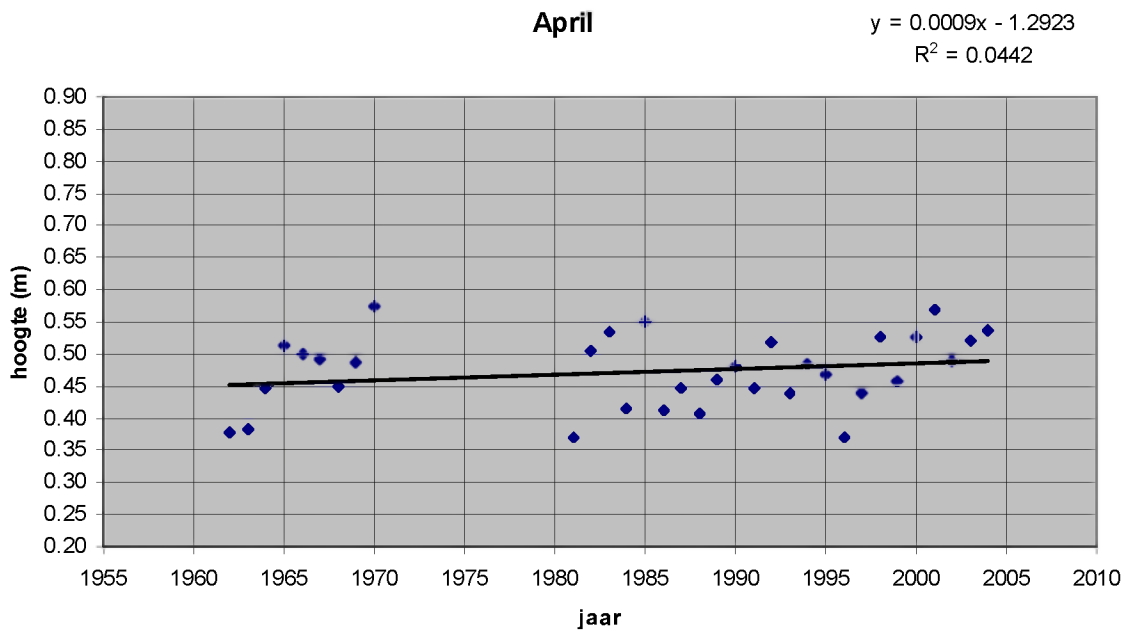
---



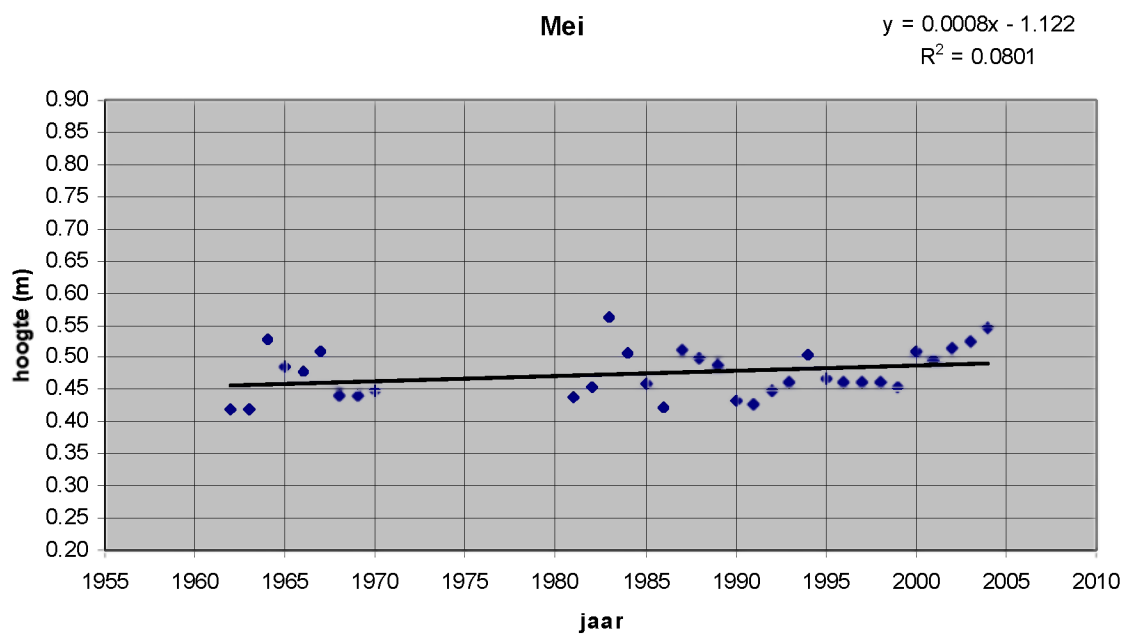
De trendlijn stijgt met 0.23 cm per jaar en  $r = 0.2269$ .



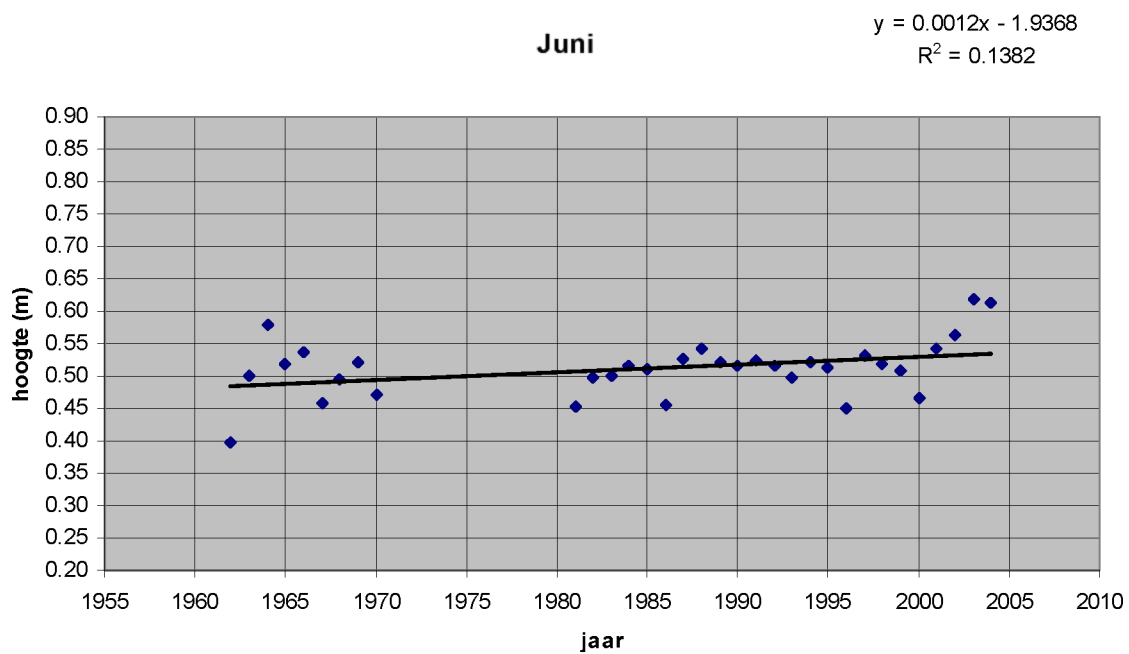
De trendlijn stijgt met 0.04 cm per jaar en  $r = 0.0648$ .



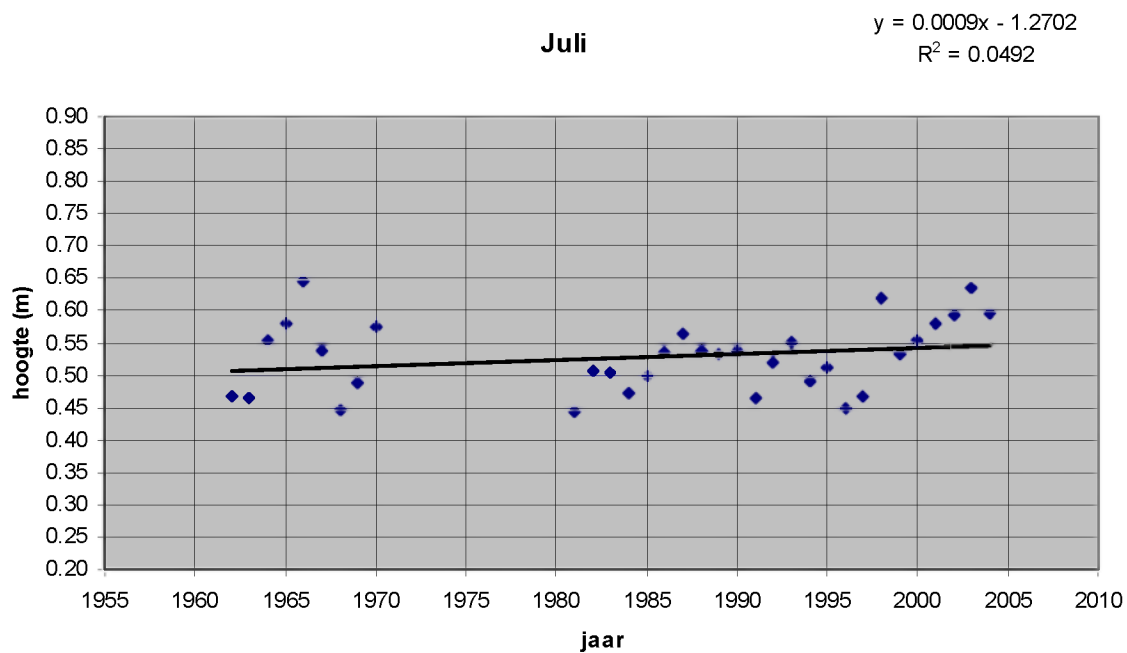
De trendlijn stijgt met 0.09 cm per jaar en  $r = 0.2102$ .



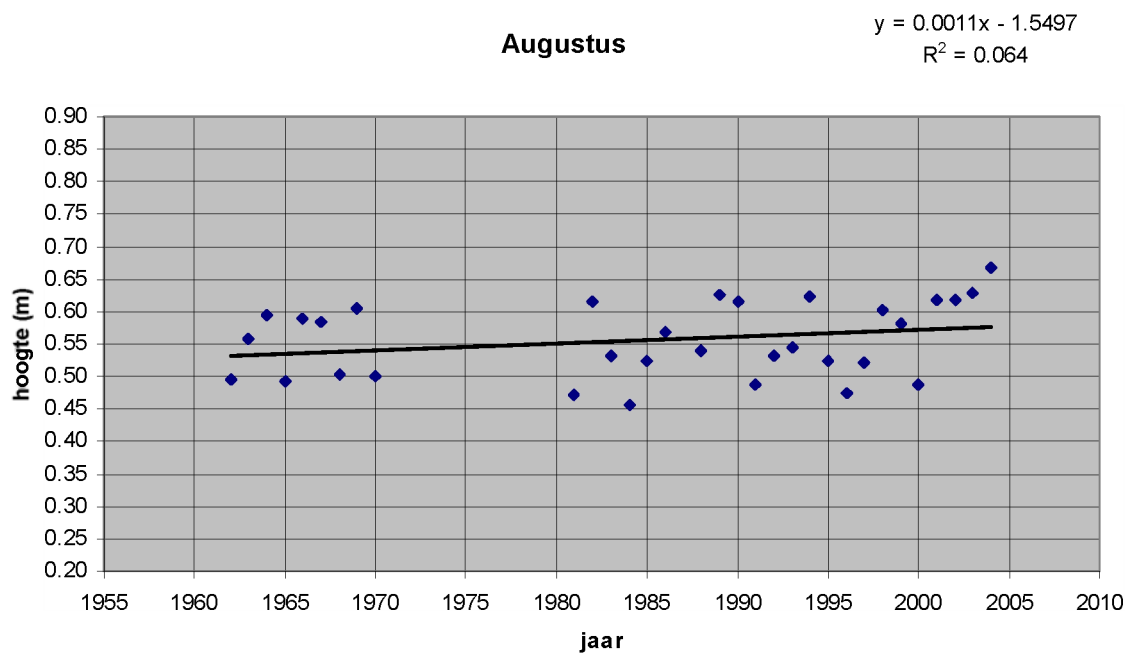
De trendlijn stijgt met 0.08 cm per jaar en  $r = 0.2830$ .



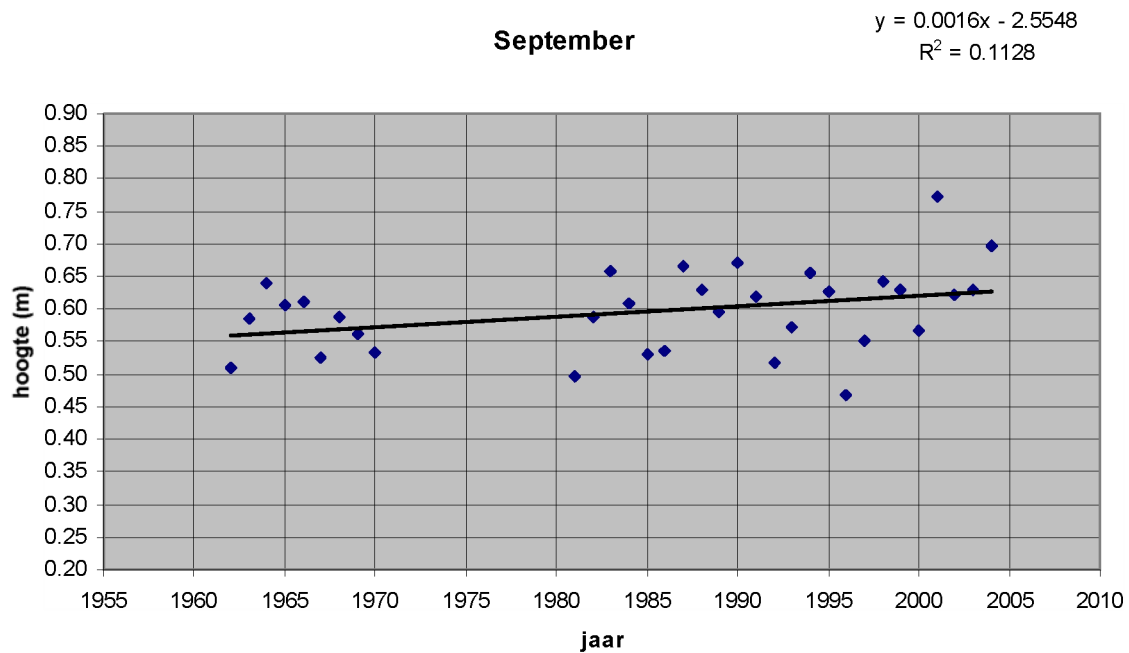
De trendlijn stijgt met 0.12 cm per jaar en  $r = 0.3718$ .



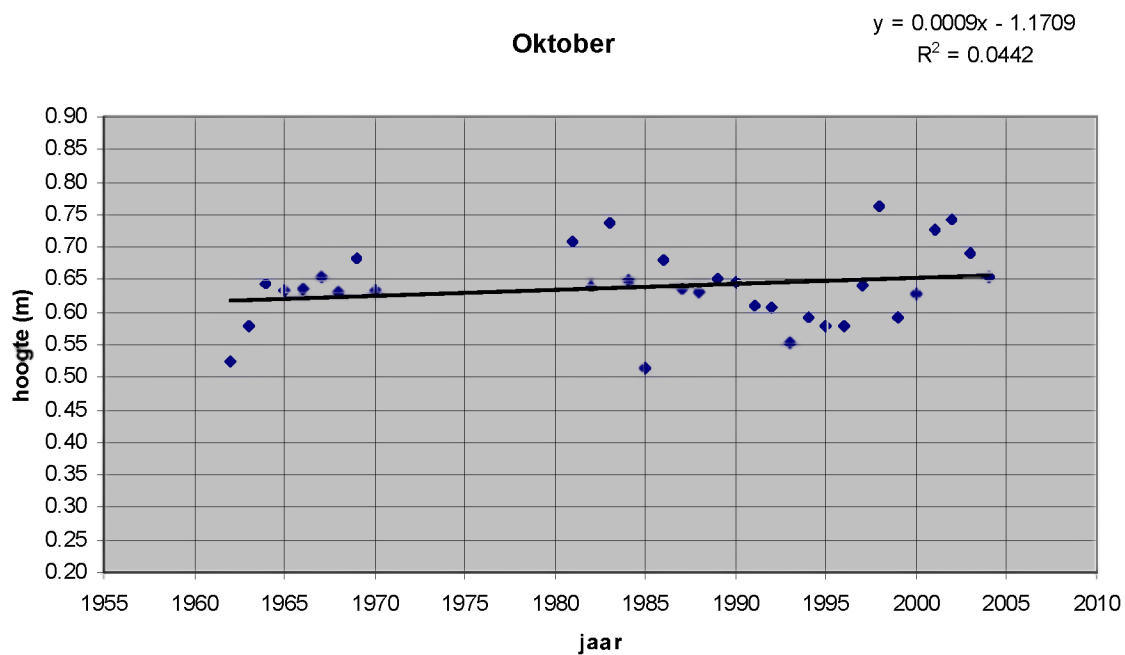
De trendlijn stijgt met 0.09 cm per jaar en  $r = 0.2218$ .



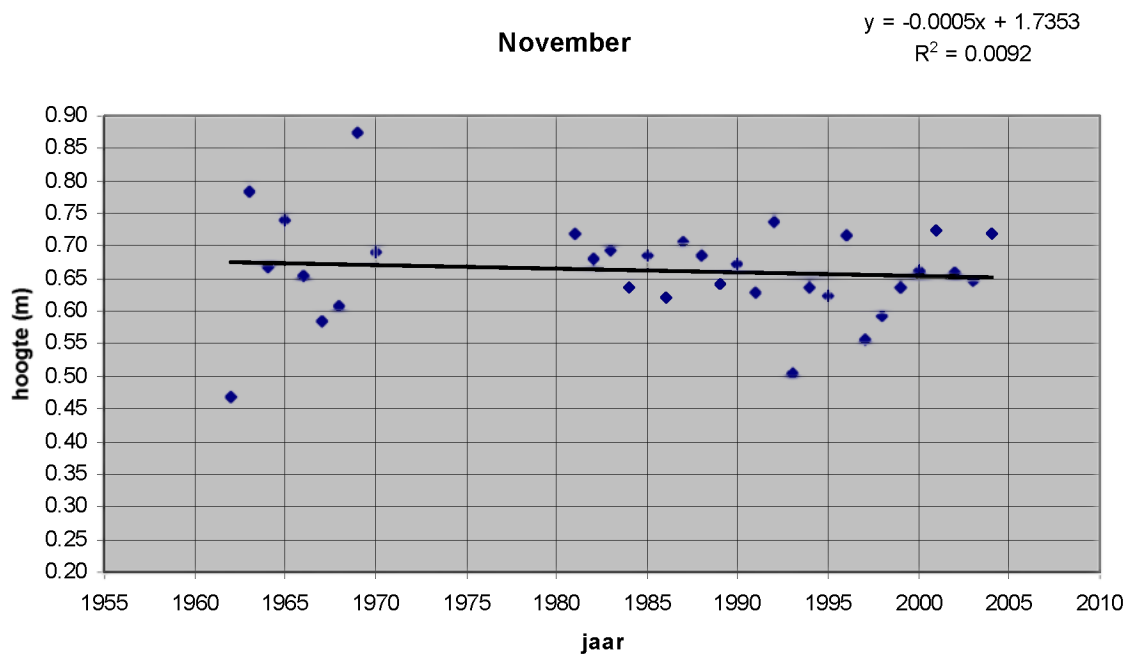
De trendlijn stijgt met 0.11 cm per jaar en  $r = 0.2530$ .



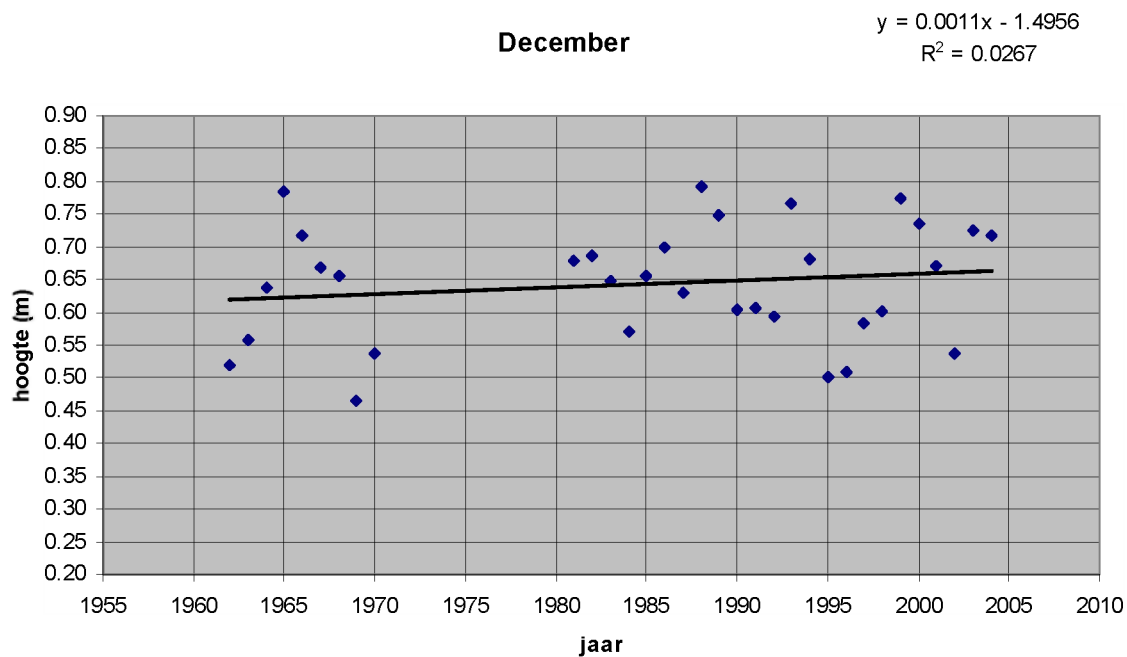
De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.3359$ .



De trendlijn stijgt met 0.09 cm per jaar en  $r = 0.2102$ .

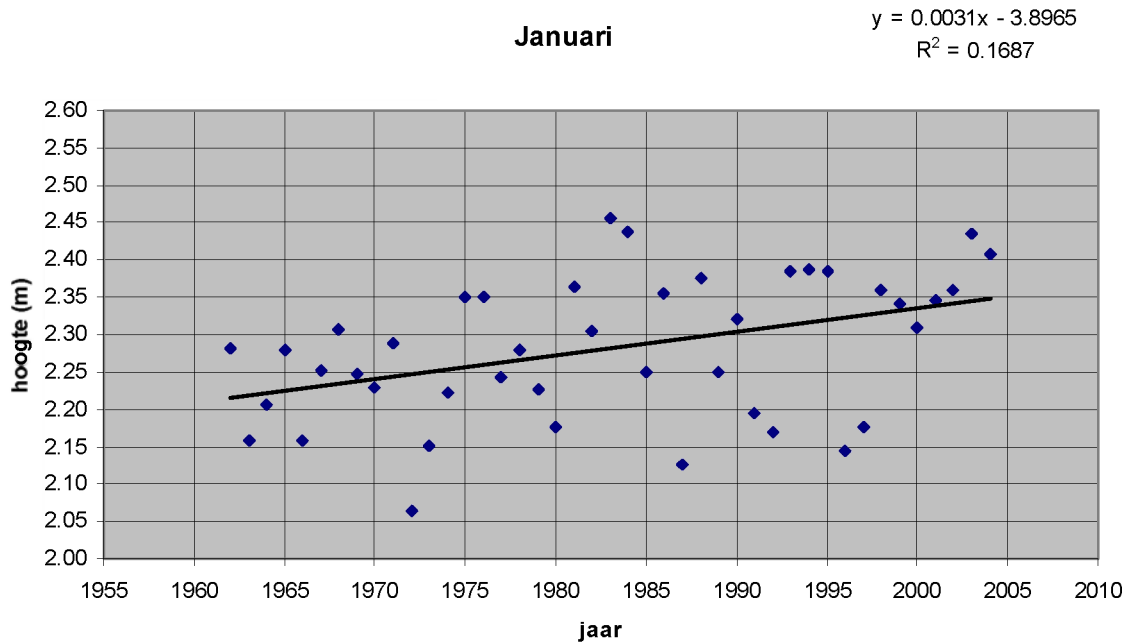


De trendlijn stijgt met -0.05 cm per jaar en  $r = -0.0959$ .



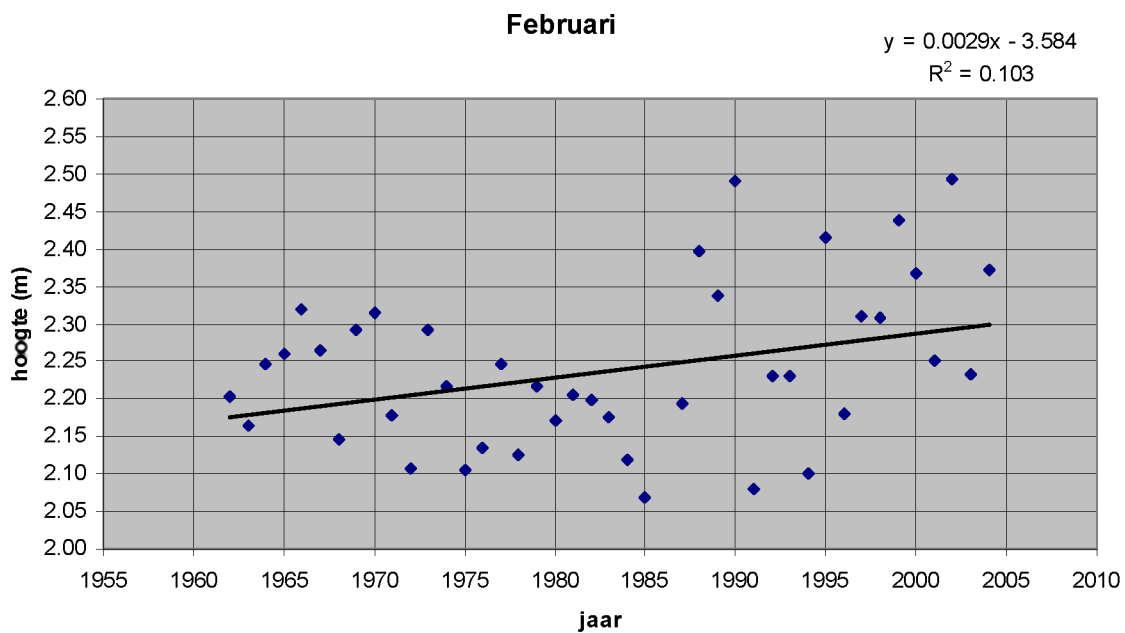
De trendlijn stijgt met 0.11 cm per jaar en  $r = 0.1634$ .

### 3.1.2.3.3 Gemiddeld Zeeniveau (MSL)



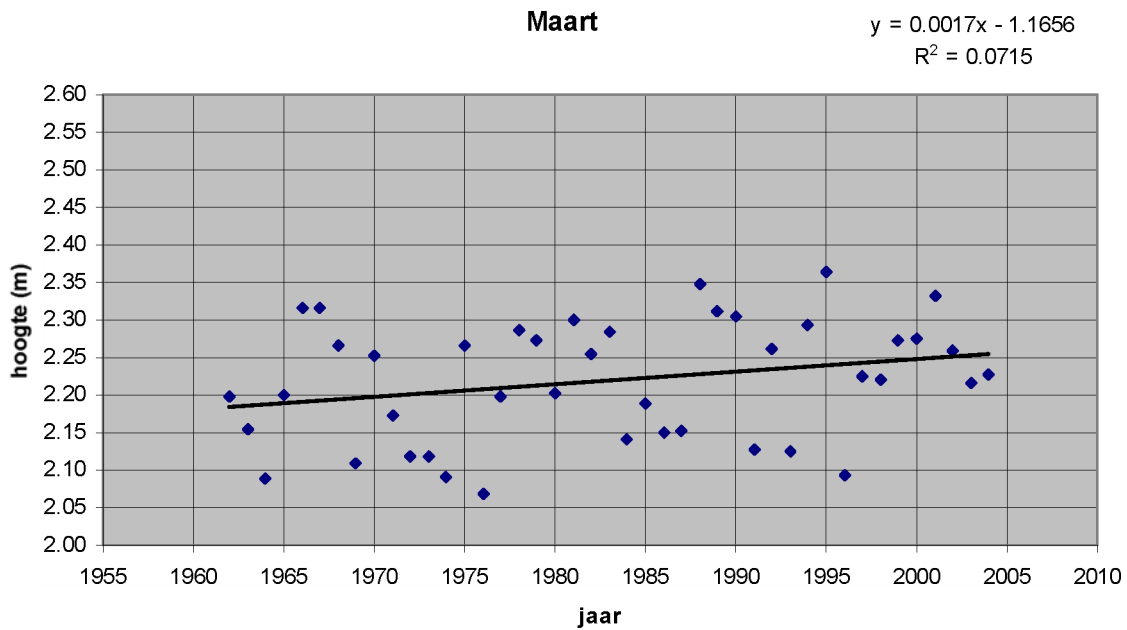
De trendlijn stijgt met 0.31 cm per jaar en  $r = 0.4107$ .

---

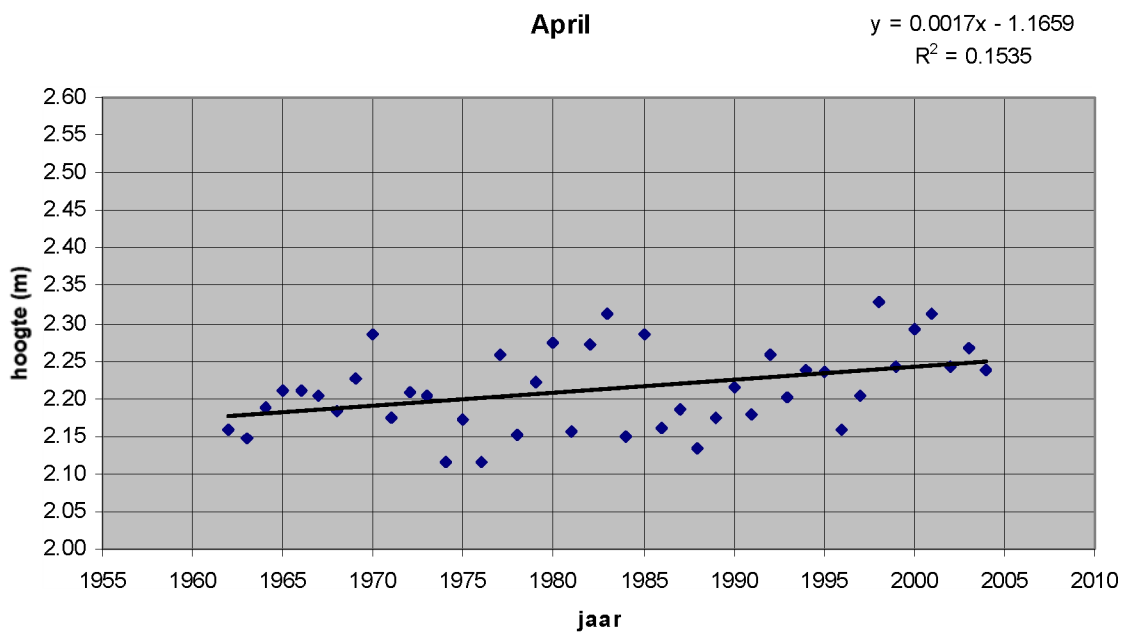


De trendlijn stijgt met 0.29 cm per jaar en  $r = 0.3209$ .

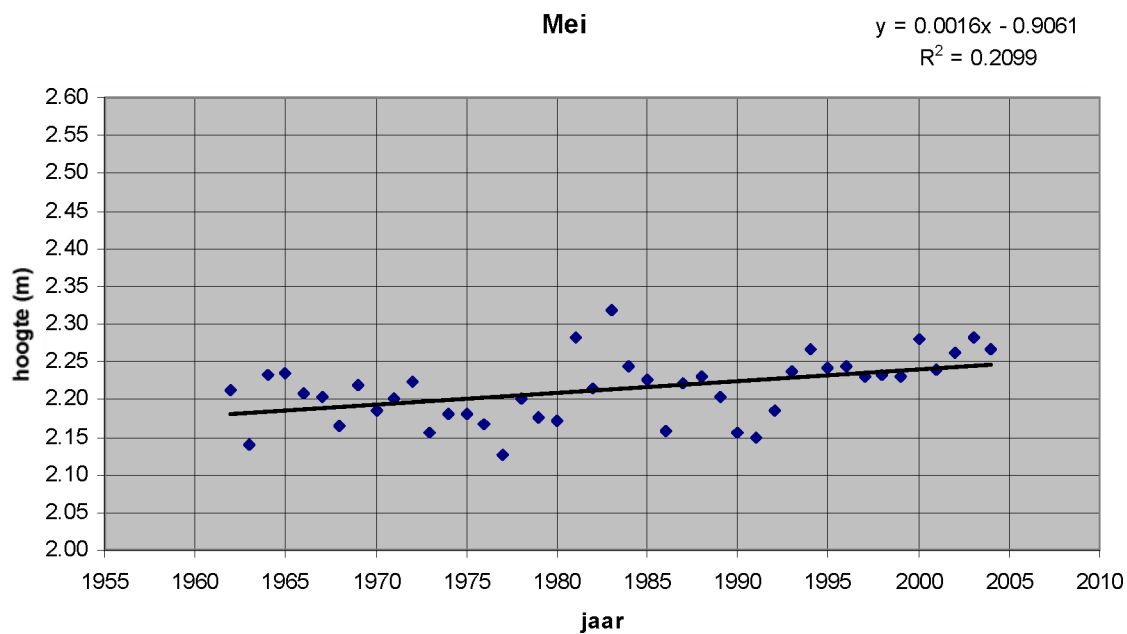




De trendlijn stijgt met 0.17 cm per jaar en  $r = 0.2674$ .

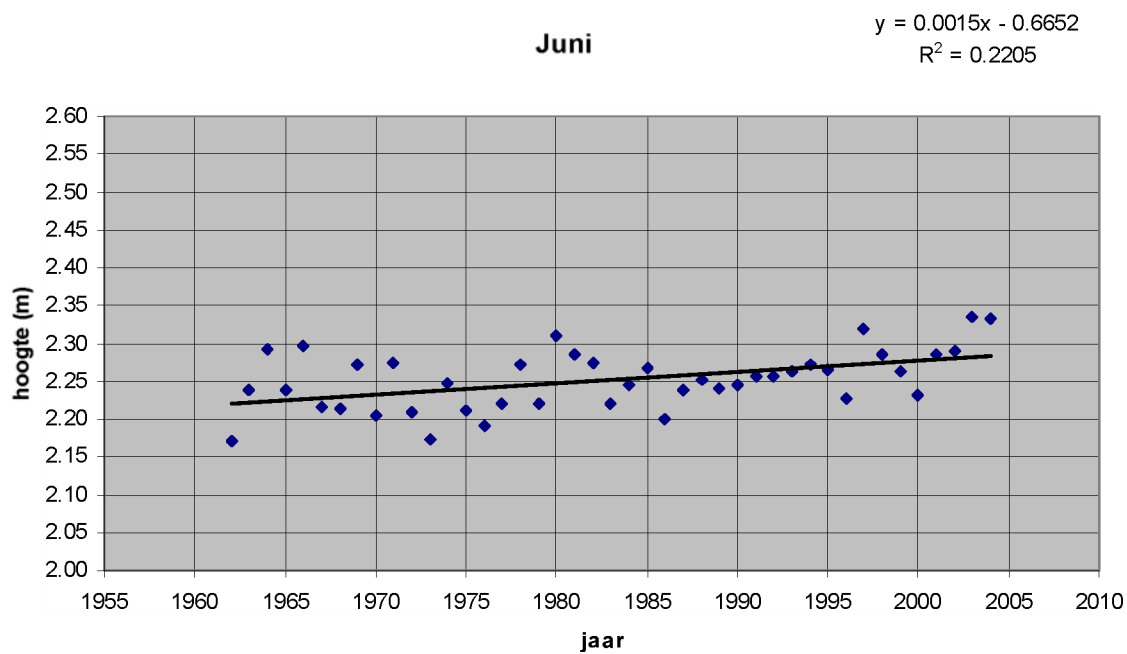


De trendlijn stijgt met 0.17 cm per jaar en  $r = 0.3918$ .

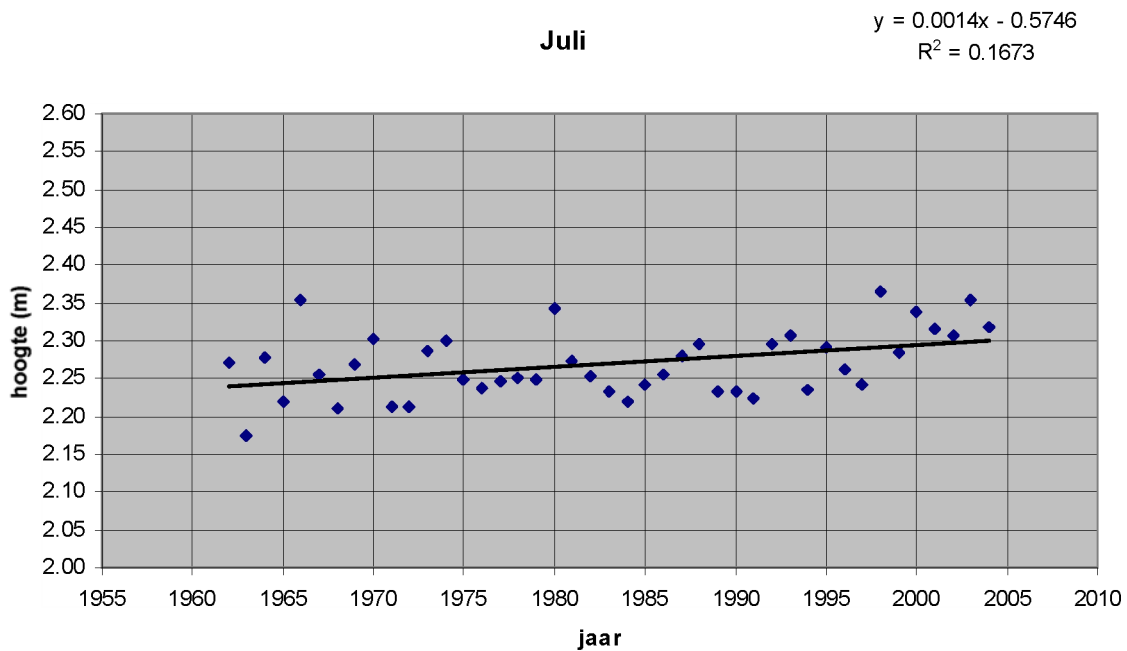


De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.4581$ .

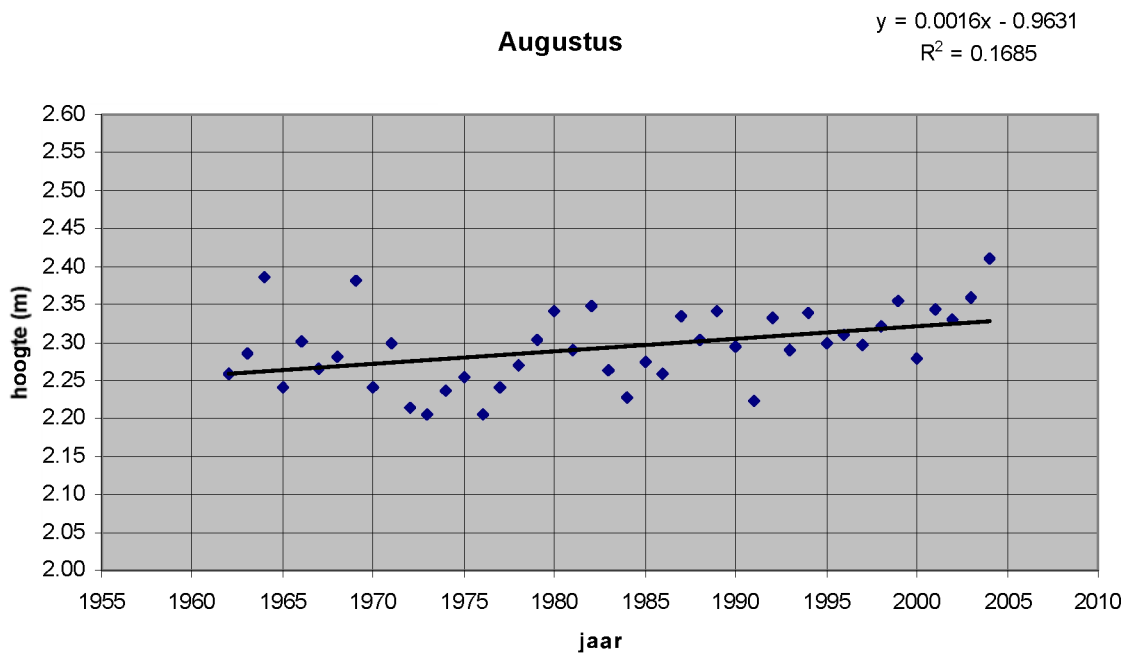
---



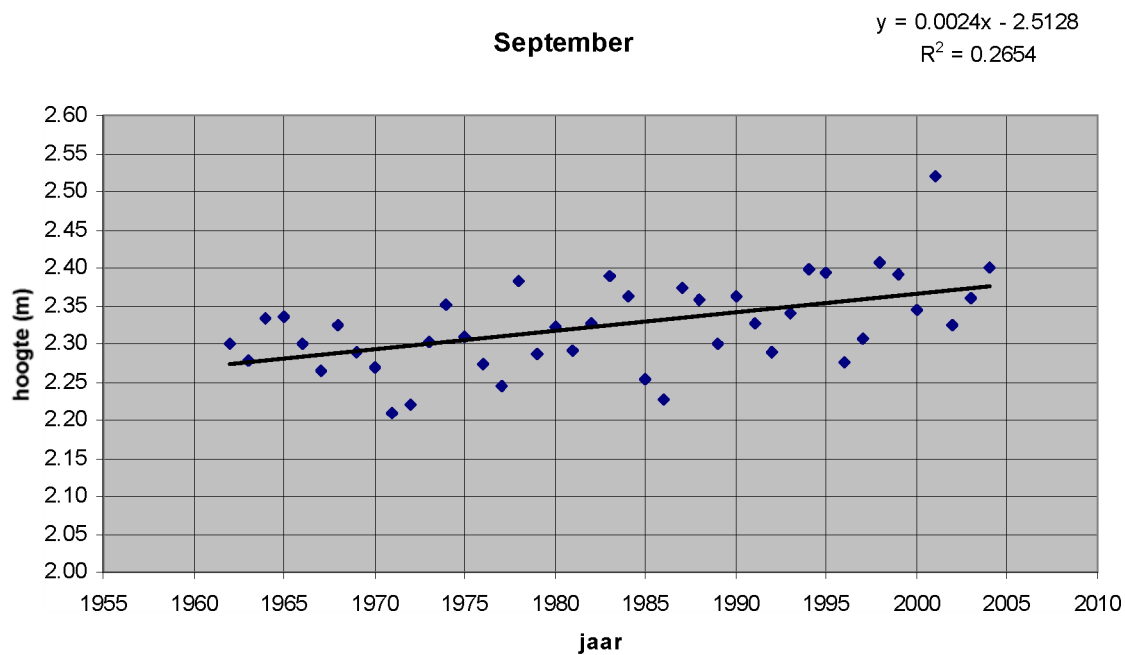
De trendlijn stijgt met 0.15 cm per jaar en  $r = 0.4696$ .



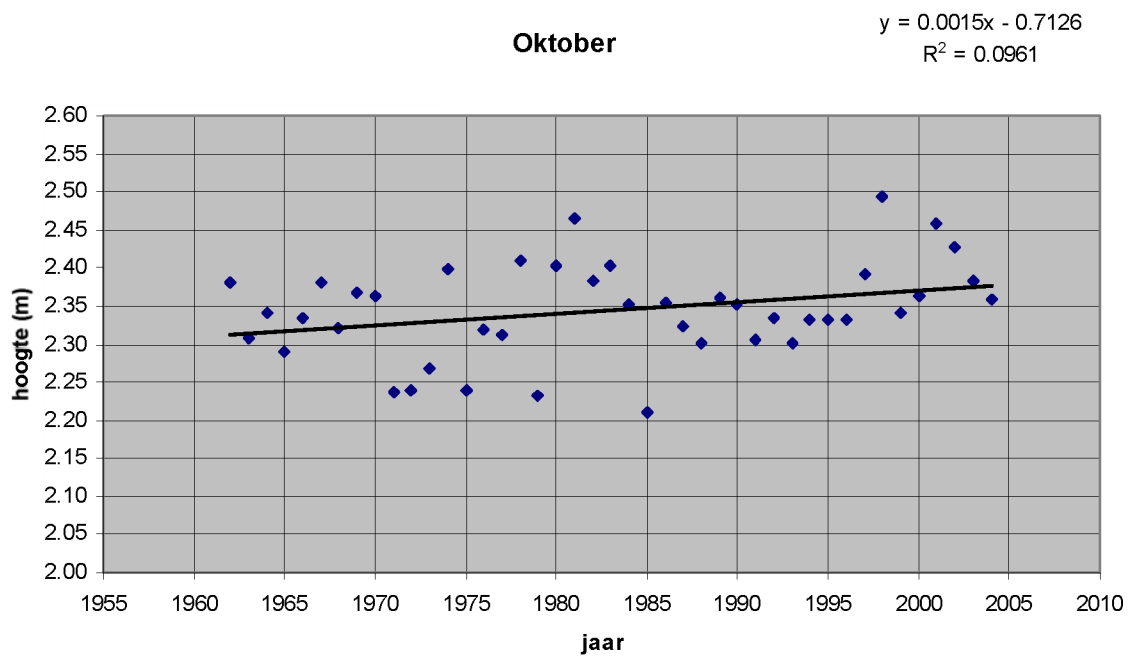
De trendlijn stijgt met 0.14 cm per jaar en  $r = 0.4090$ .



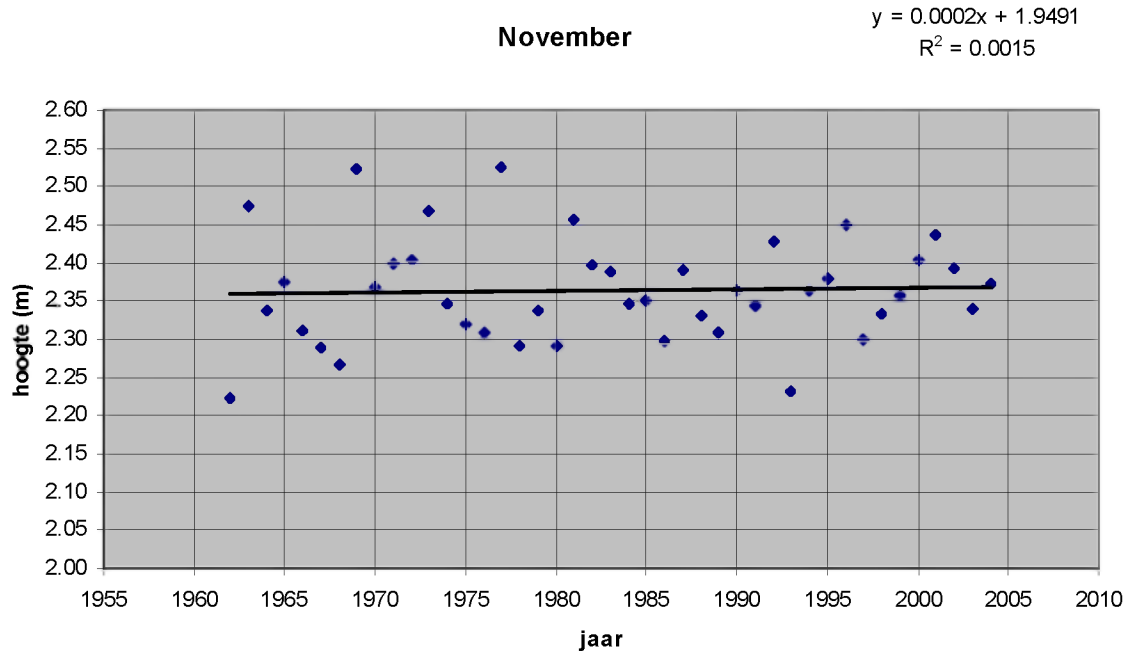
De trendlijn stijgt met 0.16 cm per jaar en  $r = 0.4105$ .



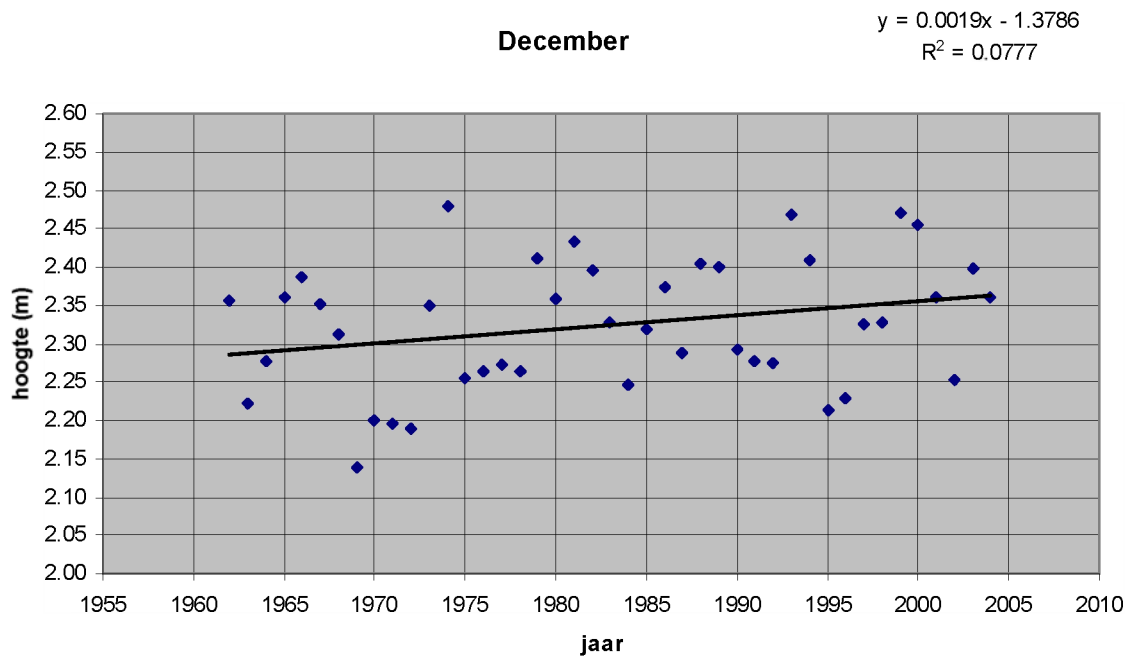
De trendlijn stijgt met 0.24 cm per jaar en  $r = 0.5152$ .



De trendlijn stijgt met 0.15 cm per jaar en  $r = 0.31$ .



De trendlijn stijgt met 0.02 cm per jaar en  $r = 0.0387$ .



De trendlijn stijgt met 0.19 cm per jaar en  $r = 0.2787$ .

### 3.1.2.3.4 Tabel r-waarden

De r-waarden zijn de correlatiecoëfficiënten.

| r         | Hoogwater | Laagwater | Gemiddeld Zeeniveau |
|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Januari   | 0.3695    | 0.3074    | 0.4107              |
| Februari  | 0.2648    | 0.2269    | 0.3209              |
| Maart     | 0.1814    | 0.0648    | 0.2674              |
| April     | 0.2484    | 0.2102    | 0.3918              |
| Mei       | 0.3394    | 0.2830    | 0.4581              |
| Juni      | 0.2458    | 0.3718    | 0.4696              |
| Juli      | 0.1744    | 0.2218    | 0.4090              |
| Augustus  | 0.3477    | 0.2530    | 0.4105              |
| September | 0.4897    | 0.3359    | 0.5152              |
| Oktober   | 0.3008    | 0.2102    | 0.31                |
| November  | 0.0985    | -0.0959   | 0.0387              |
| December  | 0.2653    | 0.1634    | 0.2787              |

Hier zijn de r-waarden voor zowel hoogwater, laagwater als voor het gemiddeld zeeniveau zo laag dat er geen conclusies getrokken kunnen worden. De r-waarden berekend per maand zijn over het algemeen lager dan de r-waarden bekomen met jaargemiddelden. Dit komt omdat over een heel jaar piekwaarnemingen ten gevolge van b.v. hoge windsnelheden worden uitgemiddeld. Het valt ook op dat de r-waarden voor de periode april-september beduidende hoger liggen dan voor de periode oktober-maart. Tijdens de periode oktober-maart komen er meer stormen voor dan tijdens de periode april-september.

Het gemiddelde van de zeespiegelstijging berekend uit de maandgemiddelden ligt in de buurt van de stijgingswaarden die gevonden werden met gebruik van de jaargemiddelden.

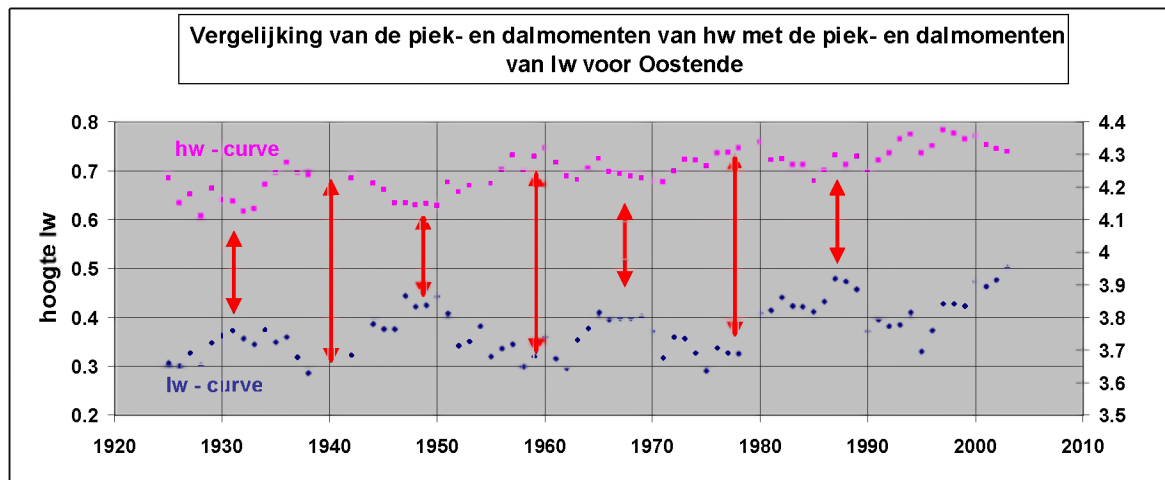
| Stijging in cm/jaar | Gemiddelde van de maandwaarden | Berekend met de jaargemiddelden |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| HW                  | 0.16                           | 0.16                            |
| LW                  | 0.11                           | 0.11                            |
| MSL                 | 0.18                           | 0.18                            |

## 3.2 Invloed van de 18.6-jarige cyclus op de hoogte van de zeespiegel

### 3.2.1 Inleiding

Het getij is onderhevig aan verschillende cycli die worden veroorzaakt door de rotatie van de maan rond aarde en de rotatie van het stelsel maan-aarde rond de zon. Een daarvan is de nodale cyclus van 18.6 jaar. In deze tijd varieert de hoek die de maan maakt met het equatorvlak van de aarde tussen  $18^{\circ}18'$  en  $28^{\circ}36'$  graden. Een andere cyclus is een 8.85-jarige cyclus die wordt veroorzaakt doordat de lange as van de ellips van de maansbaan in deze tijd rond de aarde roteert.

Onderstaande figuur toont duidelijk aan dat er in het verloop van de hoogte van de zeespiegel zowel voor het hoogwater als het laagwater cycli aanwezig is. Wat ook in het oog springt bij onderstaande figuur is dat enerzijds de dalhoogten bij hoogwater overeenstemmen met de piekhoogten bij laagwater en anderzijds de piekhoogten bij hoogwater overeenstemmen met de dalhoogten bij laagwater (zie rode pijlen, komen terug, ruwweg, om de 9 à 10 jaar).



Deze schommelingen maken het meten van de verandering van de hoogte van de zeespiegel er niet gemakkelijker op. In principe moet men de vergelijking maken tussen twee punten die zich op het zelfde moment in een cyclus bevinden. Dit is niet steeds even gemakkelijk en kan tot afwijkende resultaten leiden.

Bij het verloop van de hoogte van de zeespiegel volgens het MSL zijn deze schommelingen minder uitgesproken aanwezig. Vanuit deze vastelling kan men besluiten dat het meten van de verandering van de hoogte van de zeespiegel het best gebeurt aan de hand van het MSL.

### 3.2.2 Zeespiegelverandering in cm per jaar voor de drie locaties

Zoals eerder in dit verslag vermeld onder 3.1.1.4 bedraagt de toename van het MSL voor Oostende 0.19 cm per jaar, voor Nieuwpoort 0.33 cm per jaar en voor Zeebrugge 0.18 cm per jaar. De datareeksen voor Nieuwpoort (1967-2004) en Zeebrugge (1964-2004) zijn wel aanzienlijk korter dan voor Oostende (1926-2004). De resultaten voor Oostende kunnen dan ook als de belangrijkste worden beschouwd;

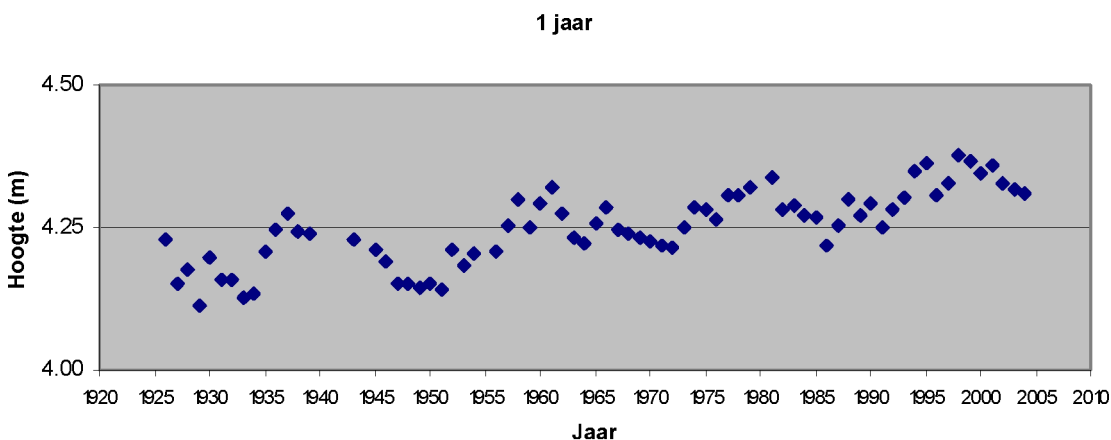
#### Opmerking

Omdat het gemiddelde beginpunt van de MSL-curve van Nieuwpoort vooral bepaald wordt door de relatieve dalhoogten van de periode volgend op het begin van de waarnemingsperiode (1967 – 1973) en het eindpunt door de piekhoogten van de periode voorafgaand aan het einde van de waarnemingsperiode, is de toename van de zeespiegel volgens deze curve hoger dan deze voor Oostende en Zeebrugge.

### 3.2.3 Moving averages

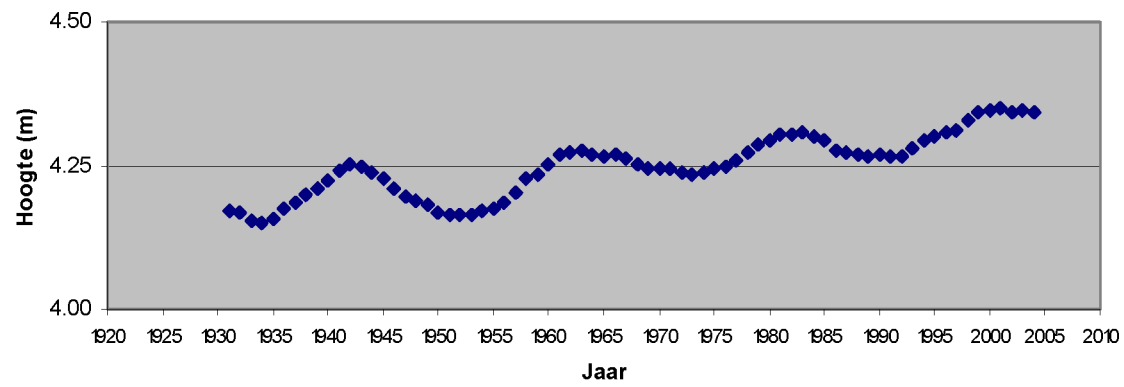
Door gebruik van de methode ‘moving averages’ (voortschrijdende gemiddelden) kunnen de oscillaties geëlimineerd worden. Bovendien kan een eventuele versnelling in het stijgen van het gemiddelde hoogwater, het gemiddelde laagwater of het gemiddeld zeeniveau gedetecteerd worden. De methode wordt enkel voor Oostende toegepast waarvoor er een langere datareeks beschikbaar is. Deze methode werd ook toegepast in de studie van ingenieur C. Van Cauwenberghe vermeld in 1.13. De moving averages werden berekend voor de intervallen 7, 13 en 19 jaar zoals in de studie van ing. C. Van Cauwenberghe.

#### 3.2.3.1 *Hoogwater Oostende*

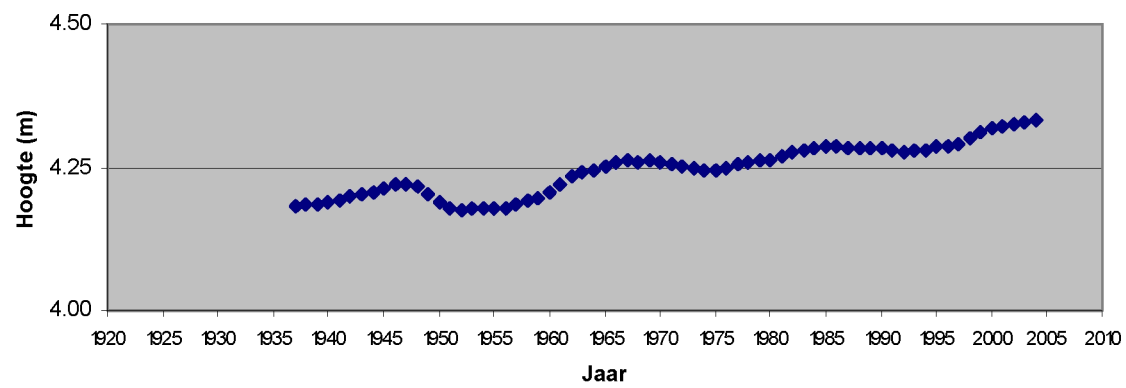




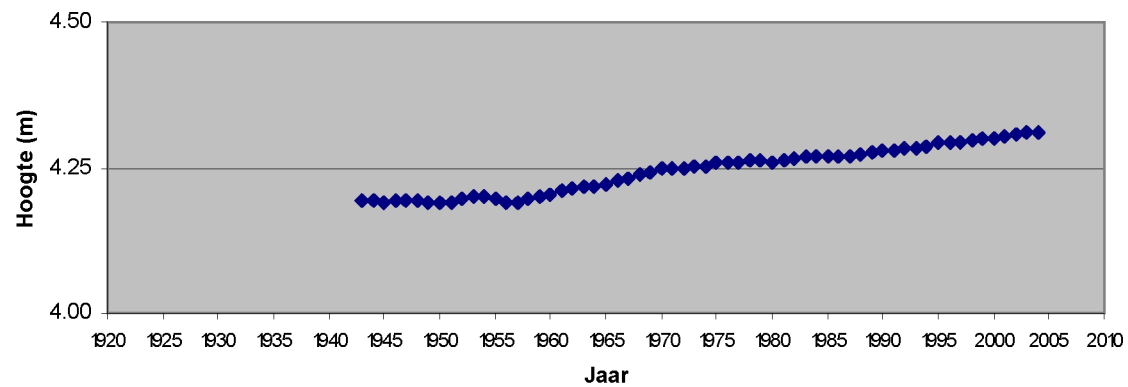
7 jaar



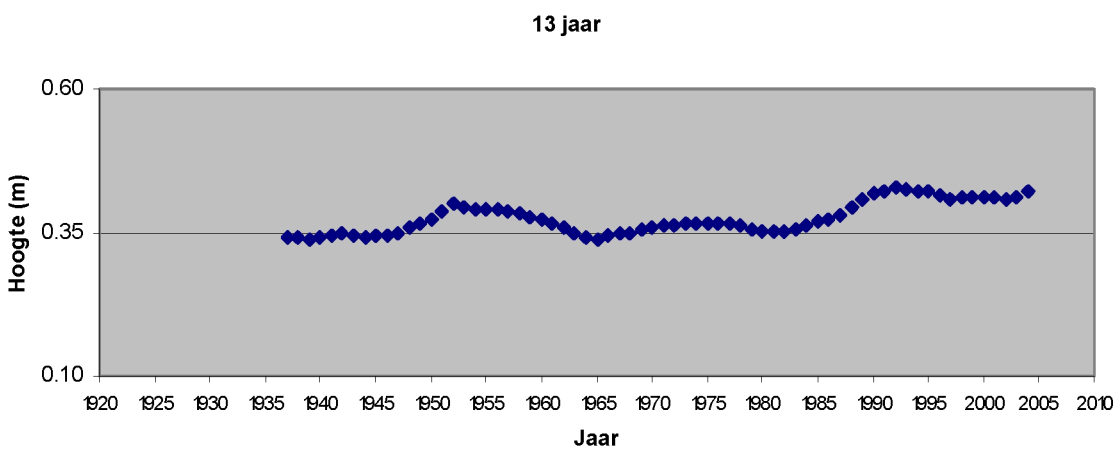
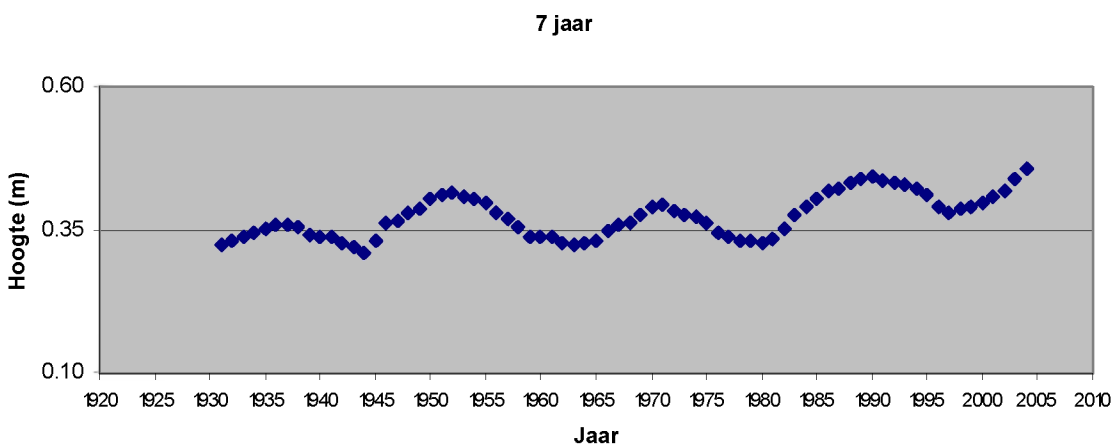
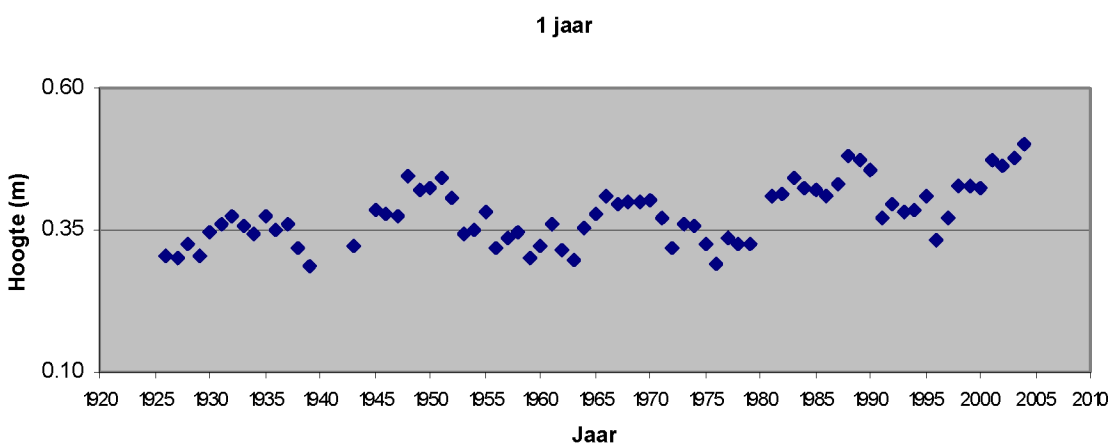
13 jaar



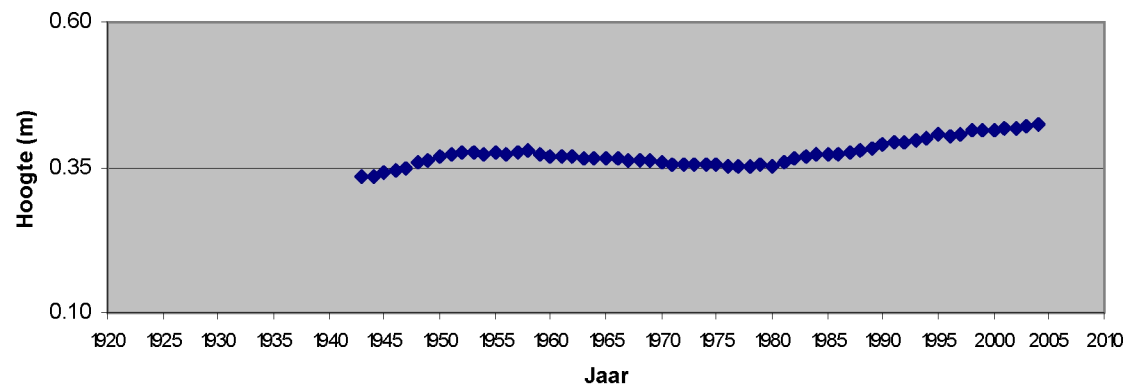
19 jaar



### 3.2.3.2 Laagwater Oostende

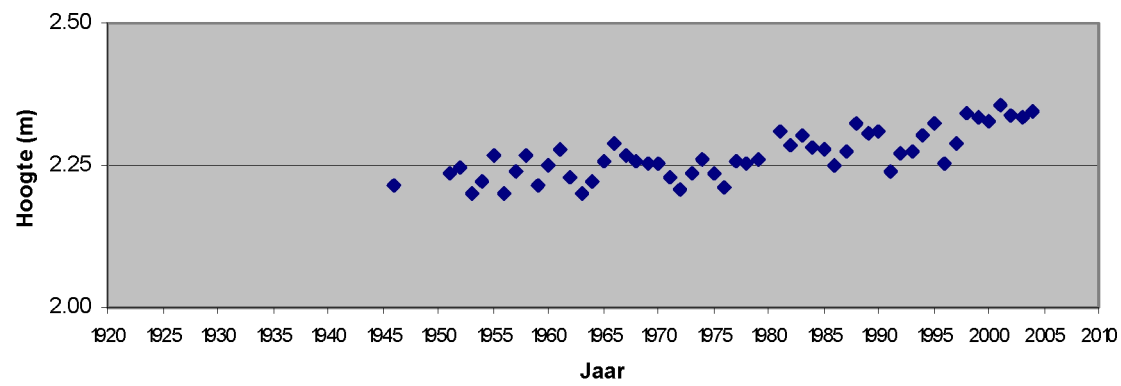


19 jaar

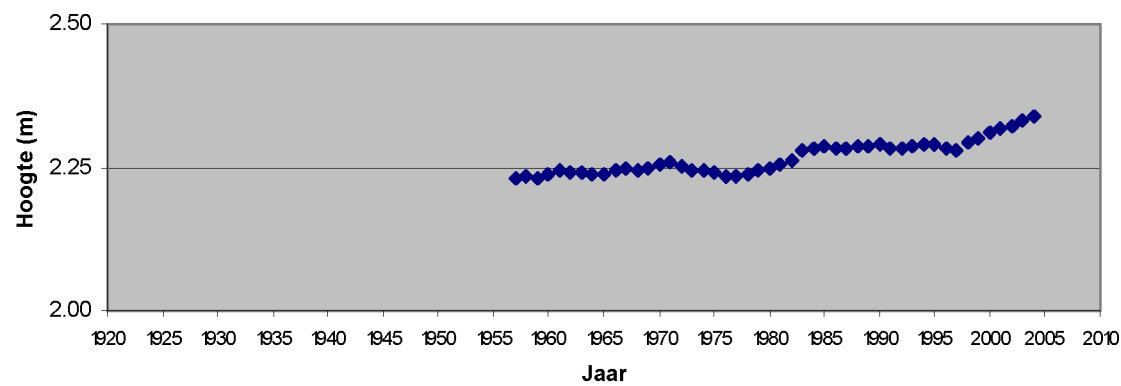


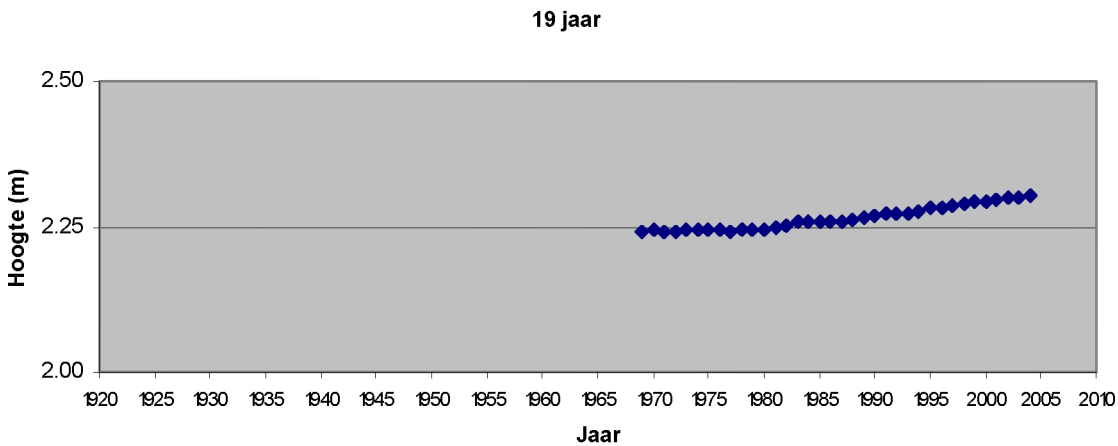
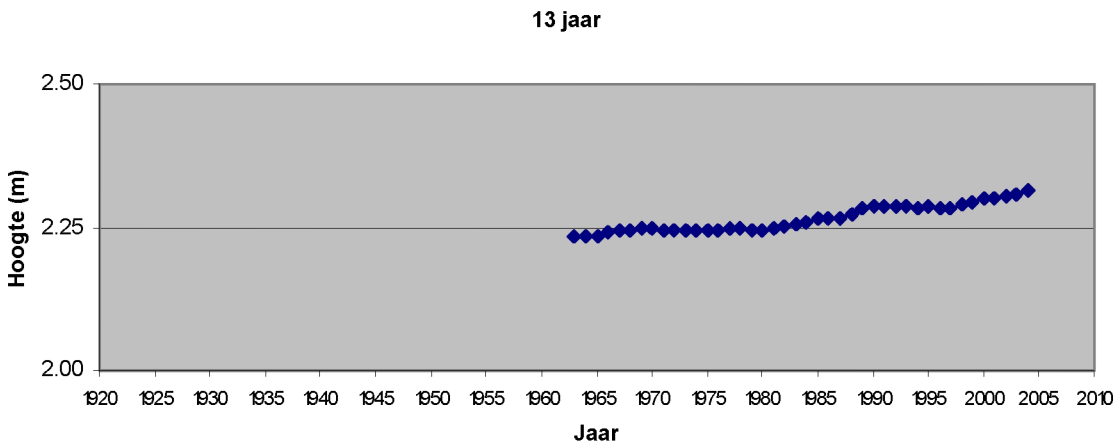
### 3.2.3.3 Gemiddeld zeeniveau Oostende

1 jaar



7 jaar





#### **3.2.3.4 Conclusie**

De moving averages berekend met een interval van 19 jaar elimineren ongeveer alle oscillaties. Dit interval van 19 jaar komt overeen met de nodale cyclus van 18.6 jaar. Ing. C. Vancauwenberghe gebruikte voor de berekening van de moving averages data van de periode 1927-1991. Hij zag een significante indicatie van een versnelling van de stijghoogte. Op basis van de moving averages die hier berekend zijn voor de periode 1926-2004 is er een lichte versnelling van de toename in stijghoogte te zien sinds 1989. Dit is best te zien op de figuur bij MSL.

#### **4 IPCC – RAPPORT VAN 2 FEBRUARI 2007**

Volgende tabel geeft de bijdrage van de verschillende elementen die de verandering van de zeespiegel bepalen maar ook de uiteindelijke stijging van de zeespiegel (volgens het IPCC-rapport van 2 februari 2007)

| <b>Stijging van de zeespiegel (mm per jaar)</b><br><b>Bron van zeespiegelstijging</b> | <b>1961 – 2003</b> | <b>1993 – 2003</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Thermische expansie van het oceaanwater                                               | $0.42 \pm 0.12$    | $1.6 \pm 0.5$      |
| Gletsjers en ijskappen                                                                | $0.50 \pm 0.18$    | $0.77 \pm 0.22$    |
| Groenlandse ijsmassa                                                                  | $0.05 \pm 0.12$    | $0.21 \pm 0.07$    |
| Antarctische ijsmassa                                                                 | $0.14 \pm 0.41$    | $0.21 \pm 0.35$    |
| Som van de individuele bijdrage tot de zeespiegelstijging                             | $1.1 \pm 0.5$      | $2.8 \pm 0.7$      |
| Waargenomen totale zeespiegelstijging                                                 | $1.8 \pm 0.5$      | $3.1 \pm 0.7a$     |
| Vershil (Waargenomen min som van geschatte klimaatbijdragen)                          | $0.7 \pm 0.7$      | $0.3 \pm 1.0$      |

De gemiddelde globale zeespiegel steeg tijdens de periode 1961 – 2003 met een gemiddelde waarde van 1,8 (1,3 tot 2,3) mm per jaar. Verhoudingsgewijs steeg de zeespiegel in de periode 1993 – 2003 sneller, met 3,1 (2,4 – 3,8) mm per jaar. De gemiddelde stijging over de gehele 20<sup>ste</sup> eeuw wordt geschat op 0,17 (0,12 – 0,22) m.

Uit (Climate Change 2007: the Physical science basis - A summary for policymakers, blz 6 en 7)

#### **5 BESLUIT**

Bij het bepalen van de verandering van de zeespiegel komen er verscheidene moeilijkheden op de proppen. Eerst en vooral moet men rekening houden met hiaten en onzekerheden in de metingen. Ten tweede zijn er meerdere mogelijkheden om tot een bepaald eindresultaat te komen. Na het uitproberen van verscheidene berekeningsmethodes blijkt dat de methodes volgens de jaar- en maandgemiddelden de meest overeenstemmende resultaten geven. Ten derde moet men rekening houden met een 18,6-jarige cyclus die vooral bij het hoog- en laagwaterverloop uitgesproken verschillen vertonen. Bij het verloop volgens het MSL zijn die schommelingen meer uitgevlakt maar toch moet men trachten om twee punten op hetzelfde moment van de cyclus te vergelijken. Dit is niet vanzelfsprekend omdat op die hoogten en laagten nog schommelingen zitten.

Het meest verantwoorde eindresultaat wordt dus bekomen door de verandering van de zeespiegel volgens het MSL te bepalen. Uiteindelijk kunnen de resultaten van deze studie de vergelijking met de resultaten van het IPCC-rapport doorstaan: volgens het rapport steeg de zeespiegel in de periode 1961 – 2003 met een gemiddelde waarde van 0,18 cm (0,13 cm

– 0,23 cm) per jaar. Deze studie geeft de volgende gemiddelde stijgingen per jaar: Oostende: 0,19 cm, Nieuwpoort 0,33 cm en Zeebrugge 0,18. Dus enkel Nieuwpoort valt buiten deze grenzen maar de oorzaak hiervan werd eerder reeds uitgelegd. Uit de methode van moving averages valt af te leiden de toename van de stijghoogte sinds 1989 lijkt toe te nemen. Dat komt ook overeen met de studie van het IPCC waarin een snellere stijging van de zeespiegel werd waargenomen sinds 1993.

## **6 BIJLAGE: THEORIE LINEAIRE REGRESSIE**

Bij lineaire regressie worden via de kleinste kwadratenmethode, de coëfficiënten van de rechte die best aansluit bij de data, berekend. De gekwadraterde afwijkingen ten opzichte van de rechte moeten minimaal zijn.

De vergelijking van de rechte is  $y = mx + b$  (enkelvoudige regressie)

of  $y = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n + b$  (meervoudige regressie) waarbij de afhankelijke veranderlijke  $y$  functie is van de onafhankelijke veranderlijke(n)  $x$ .,  $m$  de richtingscoëfficiënt en  $b$  het snijpunt met de  $y$ -as.

$R^2$  : dit is de meervoudige correlatiecoëfficiënt en ligt tussen 0 en 1; een lage waarde betekent dat er weinig relevantie is tussen de afhankelijke en onafhankelijke veranderlijke (of het kwadraat van  $r$ )

|                   |                                                                                  |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $ r  = 1$         | de meetpunten liggen perfect op een rechte                                       |
| $0.9 <  r  < 1$   | sterk lineair verband (sterke correlatie)                                        |
| $0.7 <  r  < 0.9$ | matige correlatie, meetpunten liggen in een sigaarwolk rond de rechte            |
| $ r  < 0.7$       | zwakke correlatie, de meetpunten liggen in een ellipsvormige wolk rond de rechte |
| $r \approx 0$     | geen correlatie, de meetpunten liggen in een cirkel rond de rechte               |