



## IJsvorming langs de Betuweroute

*KNMI-onderzoeksrapport t.b.v. Projectorganisatie Betuweroute*



*Geert Groen en Rudmer Jilderda  
KNMI Klimaatdata en -advies  
April 2007*

# **IJsvorming langs de Betuweroute**

*KNMI onderzoeksrapport t.b.v. Projectorganisatie Betuweroute*

Geert Groen en Rudmer Jilderda  
KNMI Klimaatdata en -advies  
April 2007

## **Indeling**

Voorwoord  
Samenvatting  
1. Inleiding  
2. IJsvorming en modellering  
3. Onderzoek ijsdikten  
4. Gevolgen door klimaatverandering  
5. Discussie  
Aanbevolen literatuur

Bijlage: Operationele ijspluim

## **Voorwoord**

Op 28 maart 2007 heeft de heer J.W. Prins (Projectorganisatie Betuweroute) het KNMI, afdeling Klimaatdata en -advies, gevraagd een rapportage op te stellen over ijsvorming langs het traject van de Betuweroute (figuur 2).

Naast de achtergronden en modellering van ijsvorming wordt ingegaan op de klimatologie van ijsvorming en de gevolgen van de mogelijke klimaatveranderingen, zoals deze zijn beschreven in de KNMI'06 klimaatscenario's.



*fig. 2. Traject Betuweroute*

De doorlooptijd voor het opstellen van de rapportage werd noodzakelijk beperkt vanuit de projectorganisatie tot minder dan drie weken, hetgeen ook de mogelijkheden heeft beperkt voor het onderzoek. De rapportage is daarom grotendeels gebaseerd op bestaand materiaal, aangevuld met kortdurend onderzoek en expert-judgement.

In het voorgesprek heeft het KNMI ook gewezen op de operationele beschikbaarheid van de meerdaagse verwachting voor ijsvorming, de zgn. ijspluim. In de bijlage van dit rapport zal deze operationele ijspluim worden toegelicht, maar de beschikbaarstelling ervan is geen onderdeel van de overeenkomst voor deze rapportage.

## **Medewerking**

Dit rapport kwam tot stand met collegiale hulp van Theo Brandsma, Adri Buishand, Jos van Dun, Rob Sluijter en Wim de Rooy. Een groot deel van de informatie is ontleend aan Brandsma (2001) en Wessels (1999). Het ontwerp van en de berekeningen met het KNMI-ijsgroei-model zijn gedaan door Herman Wessels.

Het KNMI heeft toestemming voor plaatsing van figuur 1 op de voorzijde van Tino.

## **Samenvatting**

Het onderzoek van het beschikbare materiaal en aanvullend kortdurend onderzoek geeft voor ijsvorming langs de Betuweroute de volgende resultaten:

### **a. Jaarmaxima van ijsdikte en overschrijdingsduur**

Voor Midden-Nederland zijn, gebaseerd op het ijsgroeimodel voor 2 meter diep stilstaand water en op waarnemingen 1901-2000, voor bepaalde ijsdikten overschrijdingsfrequenties berekend (in jaren) en overschrijdingsduur (in dagen) met bepaalde minimale ijsdikten.

Voor Midden-Nederland wordt bijvoorbeeld berekend dat een ijsdikte van minimaal 15 cm ongeveer 2 maal per 5 winters voorkomt en dan minstens 2 dagen deze dikte heeft. De berekeningen laten zien dat een ijsdikte boven 10 cm dan minstens 13 dagen aanhoudt (tabel 1).

### **b. Regionalisatie**

Op basis van klimatologische verdeling van vorst- en ijsdagen wordt verwacht dat bij "significante" ijsvorming (meer dan 15 cm) de berekeningen voor Midden-Nederland voor vrijwel het hele traject langs de Betuweroute gelden. In het westen kan de situatie gunstiger zijn (dus minder ijsvorming) door de invloed van de grotere wateroppervlakken.

### **c. Veranderingen onder de klimaatscenario's**

Op basis van berekeningen met historische data komen er gemiddeld per 5 winters ongeveer 2 winters voor met ijsdikten van minstens 15 cm.

Bij de toepassing van de onderzoeksresultaten uit de klimaatscenario's zou deze gemiddelde frequentie dalen naar gemiddeld 2 winters per 12 tot 50 jaar bij een eeuw met een wintergemiddelde temperatuur die 1,8 resp. 4,7 °C hoger is dan de wintergemiddelde temperatuur in de 20<sup>e</sup> eeuw. Naar huidige inzichten zal de opwarming in de 21<sup>e</sup> eeuw een geleidelijk proces zijn en zal de afname van deze wintersituaties daardoor waarschijnlijk lineair verlopen.

### **d. Operationele bewakingsmogelijkheid**

Het KNMI maakt dagelijks computerberekeningen voor ijsvorming voor de komende 10 dagen. Deze "ijspluim" is bij uitstek geschikt voor bewaking van ijsvorming langs de Betuweroute (zie bijlage).

## **1. Inleiding**

De bluswateraanvoerende watergangen langs de Betuweroute hebben een diepte van ca. 70 cm en moeten 100 liter per seconde voor een periode van 4 uur kunnen leveren. De langs het traject liggende waterschappen Rijn en IJssel, Rivierenland en Hollandse Delta zijn voor de beschikbaarheid van voldoende bluswater verantwoordelijk. Daarnaast kan de bereikbaarheid van het bluswater tijdens vorst ook een punt van zorg zijn.

Voor de procesmatige besluitvorming dient bekend te zijn wat de regionale kans op ijsvorming in de bluswateraanvoerende watergangen is, tot welke dikte en met welke duur. Aanvullend is de vraag gesteld hoe e.e.a. kan veranderen onder de mogelijke klimaatveranderingen zoals deze worden geschetst in de KNMI-klimaatscenario's voor de 21<sup>e</sup> eeuw. De behoefte aan klimatologie over ijsvorming langs de Betuweroute beslaat de range van ijsdikten van 7 cm tot meer dan 40 cm en ijsdikten van meer dan 15 cm worden "significant" gevonden.

## **2. IJsvorming en modellering**

Het Nederlandse winterweer wordt voor een belangrijk deel bepaald door de ligging aan zee, vooral bij de overheersende westelijke tot zuidwestelijke winden. De warme golfstroom zorgt ervoor dat het Noordzeewater niet veel kouder wordt dan ca. 5 °C (maart). Daardoor zijn de winters in Nederland doorgaans zacht.

Winters met ijs ontstaan pas bij aanvoer van koude lucht uit oostelijke tot noordoostelijke richtingen. Voor een dikke ijsvloer is een lange koudeperiode noodzakelijk. De vorming en aangroei van natuurijs tijdens zo'n koudeperiode is een ingewikkeld proces dat van verscheidene factoren afhangt. Niet alleen de temperatuur, maar ook windsnelheid, bewolking en luchtvochtigheid zijn van invloed. Ook de stroomsnelheid, diepte (bij de eerste ijsvorming) en ligging van het water spelen een belangrijke rol. Op stilstaand water vormt zich eerder ijs dan in een stromende rivier, maar naarmate de waterplas dieper is duurt het langer voordat ijsvorming optreedt. Onder bruggen gaat de ijsvorming langzamer omdat de uitstraling daar minder sterk is.

Bewolking tempert 's nachts de afkoeling, maar beschermt het ijs overdag tegen de zon. Is de lucht droog dan kan verdamping door het onttrekken van warmte bijdragen aan ijsvorming. Geringe windsnelheid zal het bevroeringsproces versnellen omdat de warmte die vrijkomt bij bevroering dan gemakkelijk wordt afgevoerd. Waait het te hard dan wordt de bevroering juist vertraagd omdat het water dan goed mengt. Onder een laag sneeuw groeit het ijs in de regel minder snel aan. Vooral verse sneeuw is een slechte warmtegeleider, waardoor het ondergesneeuwde ijs nauwelijks warmte verliest en bevroering wordt tegengegaan.

Op het KNMI is voor het simuleren van de ijsgroei in de tachtiger jaren van de vorige eeuw een model ontwikkeld, waarvan heden ten dage nog dankbaar gebruik wordt gemaakt. Een ijslaag van meer dan 10 cm komt op basis van berekeningen met dit ijsgroeimodel in verscheidene winters meerdere dagen voor. In de winter van 1991 was dat op 18 dagen het geval, in de zeer strenge winter van 1963 zelfs op 79 dagen. Die winter had het ijs volgens de berekeningen met het ijsgroeimodel een

dikte van ca. 40 cm. Op 11 januari 1997, aan het eind van de eerste vorstperiode, was het ijs in De Bilt aangegroeid tot ongeveer 33 cm en daarmee hadden we de dikste ijslaag sinds de winter van 1963.

### **Modellering van ijsgroei**

Systematische metingen van ijsdikten vinden in Nederland nauwelijks plaats en dan meestal alleen op de belangrijke vaarwegen. IJsvorming hangt nauw samen met de energiebalans van een waterlichaam en deze is zeer goed te berekenen uit meteorologische gegevens. Naast temperatuur zijn dus gegevens van belang over luchtvochtigheid, windsnelheid, bewolking en neerslag. Deze gegevens registreert het KNMI tegenwoordig op zo'n 35 locaties in Nederland op 10-minutenbasis.

Ruim 20 jaar geleden is een zgn. ijsgroeimodel ontwikkeld waarmee op basis van de gemeten (of verwachte) meteorologische gegevens ijsgroei (en watertemperatuur) wordt berekend voor stilstaand water van 2 meter diepte. De ijsdikten die berekend worden met het KNMI-ijsgroeimodel wijken in het algemeen niet meer dan 10% af van gemeten ijsdikten.

Het model doet sinds 1985 naar tevredenheid dienst. Het model is beschreven in het "Journal of Applied Meteorology" (H.A.R.de Bruin en H.R.A.Wessels, 1988). Meer informatie over het watertemperatuur- en ijsgroeimodel is te vinden op de internetsite van het KNMI bij [http://www.knmi.nl/kenniscentrum/watertemperatuur\\_ijsgroei.html](http://www.knmi.nl/kenniscentrum/watertemperatuur_ijsgroei.html)

### **3. Onderzoek ijsdikten**

#### **Verskil in ijsaangroei tussen diep en ondiep water?**

Het ijsgroeimodel is geschikt voor het doorrekenen van een historische klimaatreeks.

Naast het weer zijn ook lokale omstandigheden van invloed op de ijsvorming. Zo blijkt ondiep water sneller af te koelen dan diep water, waardoor zich op ondiep water sneller ijs vormt. Nadat zich eenmaal ijs gevormd heeft vertraagt de isolerende werking van het bovenliggende ijs de verdere ijsgroei.

Met de gegevens van de winter van 1996-1997 is nagegaan welke invloed de waterdiepte heeft op de ijsgroei. Bij ondiep water treedt eerder ijsvorming op, maar smelt het ijs ook sneller bij dooi. Uit berekeningen met het ijsgroeimodel voor twee verschillende dieptes (1 en 2 meter) blijkt uit figuur 3 dat de maximale dikte voor beide waterdieptes hooguit 1,7 cm verschilt en dit treedt met name op tijdens het smeltproces.

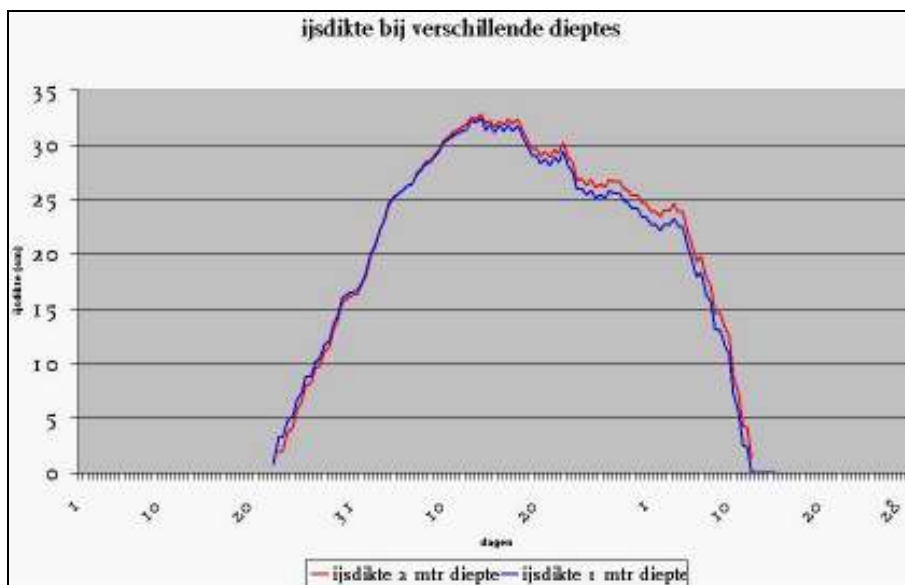


fig. 3. Het ijsgroeimodel voor waterdieptes van 1 en 2 meter

Uit figuur 3 blijkt dat de waterdiepte slechts geringe invloed heeft op de maximale ijsdikte.

*Te verwachten valt dat doorrekening voor waterdiepten van 70 cm nauwelijks andere resultaten oplevert dan berekeningen met het ijsgroeimodel voor waterdiepten van 2 meter. De overschrijdingsduur kan iets korter zijn voor minder diep water.*

### Berekeningen voor De Bilt

Voor De Bilt zijn berekeningen uitgevoerd met het ijsgroeimodel op meteorologische gegevens voor de winters van 1900-1901 tot en met de winter van 1999-2000 (100 winters).

Er blijkt een hoge mate van persistentie in de ijsgang te zijn (d.w.z. een eenmaal gevormde ijsvloer blijft meestal wel enige dagen liggen). De oorzaak ligt in de trage aanpassingen van water aan zijn omgeving vanwege de hoge smelt- en soortelijke warmte van water.

Soms gaat een jaar voorbij zonder enige ijsgang en soms wordt een jaar gekenmerkt door een bijzonder lange duur van bevroren buitenwater, maar ook meerdere perioden afgewisseld met dooi komen voor. Gemiddelden van dagen met ijsgang per jaar doet weinig recht aan het bestaan van persistentie.

Daarom verdient het de voorkeur om de resultaten statistisch samen te vatten in een tabel, waarin de gemiddelde herhalingstijd van winters met een bepaalde maximale ijsdikte wordt weergegeven met daarbij ook de overschrijdingsduur (verblijftijd) van een aantal ijsdikten (zie tabel 1).

	maximale ijsdikte [cm]	duur van overschrijding bepaalde dikte ijsvloer [dagen]					
		7 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	40 cm
1 × per winter	0*	0	0	0	0	0	0
1 × per 2 winters	11	9	4	0	0	0	0
<b>2 x per 5 winters</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
1 × per 5 winters	20	36	29	19	1	0	0
1 × per 10 winters	28	50	46	35	23	0	0
1 × per 20 winters	36	72	67	56	40	21	0
1 × per 50 winters	40	84	82	74	64	42	1
1 × per 100 winters	41**	101	96	85	68	54	20

Tabel 1. Gemiddelde herhalingsduur van winters met een bepaalde maximale ijsdikte (cm) en daaraan gerelateerde overschrijdingsduur (dagen) van bepaalde drempelwaarden van ijsdikten. Voorbeeld: Gemiddeld komt één per 20 winters een ijsvloer met een dikte van maximaal 36 cm voor en kan voor deze herhalingsduur minstens 3 weken een dikte van meer dan 30 cm hebben.

\*:\*\*: Voor een zachte winter (\*) betekent dit vrijwel geen ijsvorming, in de strengste winter (\*\*) werd in de vorige eeuw in Midden-Nederland een maximale ijsdikte van 41 cm berekend door het ijsgroeimodel.

#### Achtergrond van tabel 1:

Uit de van belang zijnde meteorologische gegevens te De Bilt is met het ijsgroeimodel voor de winters van 1900-1901 t/m 1999-2000 de dagelijkse energiebalans bepaald van een willekeurig 2 meter diep water. Voor de dagen met aanhoudende vorst berekent het model tevens de dikte van het ijs, dat zich dan op het water vormt. Per winter zijn de volgende statistieken bepaald:

- Maximale ijsdikte
- Het aantal dagen, dat de ijsvloer de dikten van 7, 10, 15, 20, 30, 40 en 50 cm overschrijdt

De laatstgenoemde dikte ontbreekt in tabel 1, omdat een overschrijding van een 50 cm dikke ijsvloer in alle doorgerekende jaren niet voorkwam. In de berekende reeks van dagelijkse ijsdikten begint de eerste winter eind 1900 en eindigt de laatste begin 2000. Zodoende zijn in de kalenderjaren 1901 t/m 2000 100 winters besloten en omvat iedere statistiek een reeks van 100 getallen.

Voor de berekening van de frequentie is aan iedere ijsdikteberekening in de reeks van 100 jaar een zgn. onderschrijdingsfrequentie toegekend. Hiertoe worden de getallen eerst in een opklimmende volgorde gesorteerd. Aan het eerste getal in deze reeks (de kleinste ijsdikte) wordt de rangorde 1 toegekend, aan de tweede 2 en zo doorgaand tot de laatste, die in dit geval de rangorde 100 krijgt toegewezen.

Door vervolgens te delen door het aantal plus één krijgt men een zuivere schatting van de onderschrijdingsfrequentie. Voor winters met dezelfde ijsdikte-uitkomsten zijn de onderschrijdingsfrequenties gemiddeld.

De onderschrijdingsfrequentie (F) wordt omgezet in een herhalingsduur (T) met de vergelijking:  $T = 1/(1-F)$

Met deze herhalingsduur wordt de gemiddelde tijd (in jaren) aangeduid tussen de perioden met een bepaalde maximale ijsdikte en daarnaast wordt dan ook de duur van een ijslaag voor aan aantal drempelwaarden met een bepaalde dikte weergegeven. In tabel 1 is een selectie van de verkregen resultaten opgenomen.



## Regionalisatie langs de Betuwelijn

Er is onvoldoende klimatologie van ijsdikte om een directe uitspraak te kunnen doen over de regionalisatie van ijsvorming langs de Betuweroute. In de Klimaatatlas van Nederland 1971-2000 van het KNMI (2002) wordt van een groot aantal elementen de klimatologie beschreven. Indirect kan over regionalisatie een relatie worden gelegd door te kijken naar de klimatologie van de vorst- en ijsdagen.

Het gemiddeld aantal ijsdagen (dagen waarop de maximumtemperatuur onder 0 °C blijft) over het tijdvak 1971-2000 varieert langs het traject van de Betuwe-route tussen 6 in het westen en 11 in het oosten (figuur 4).

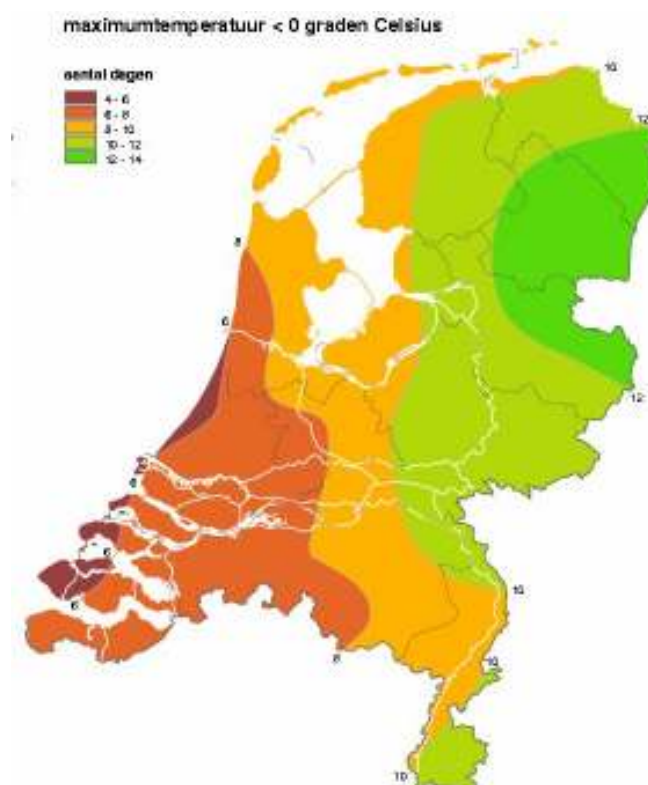


Fig. 4. Gemiddelde aantal ijsdagen 1971-2000

De vergelijking van twee illustraties van het gemiddelde aantal dagen met matige (figuur 5) en strenge (figuur 6) vorst in de periode 1971-2000 (resp. minimumtemperatuur onder -5 resp. onder -10 °C), laat zien dat de verschillen in het aantal dagen van oost naar west langs het traject van de Betuwelijn afnemen met toenemende vorst.

Het gemiddelde aantal dagen met matig en strenge vorst in de periode 1971-2000 varieert langs de Betuwelijn van 2 dagen in het westen tot 15 dagen in het oosten, het aantal dagen met strenge vorst varieerde van 0 dagen in het westen tot 4 dagen in het oosten.

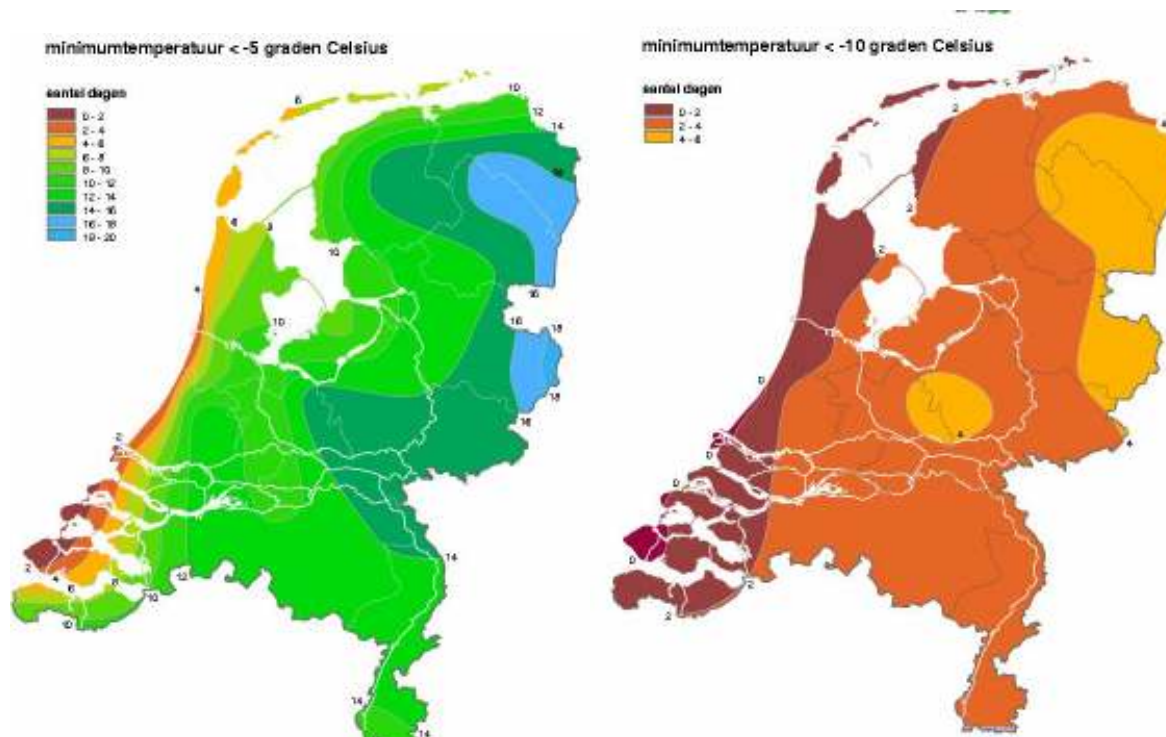


Fig. 5&6. Gemiddelde aantal dagen met matige en strenge vorst 1971-2000

Op basis van deze verdeling kan worden aangenomen dat bij significante ijsvorming langs de Betuweroute met een langere periode van strenge vorst de berekeningen voor Midden-Nederland voor vrijwel het hele traject valide zijn, maar dat in het westen de situatie gunstiger kan zijn door de ligging bij grote oppervlakken en de invloed van de Noordzee. Daarnaast is in eerdere onderzoeken geconstateerd dat de regionale verschillen in ijsdikten minder ruimtelijke variaties vertonen dan bijv. de ruimtelijke verschillen van vorst- en ijsdagen (Wessels 1999).

*Gezien het voorgaande kan worden aangenomen dat de ijsdikteberekeningen voor De Bilt maatgevend zijn voor het overgrote deel van het traject van de Betuweroute.*

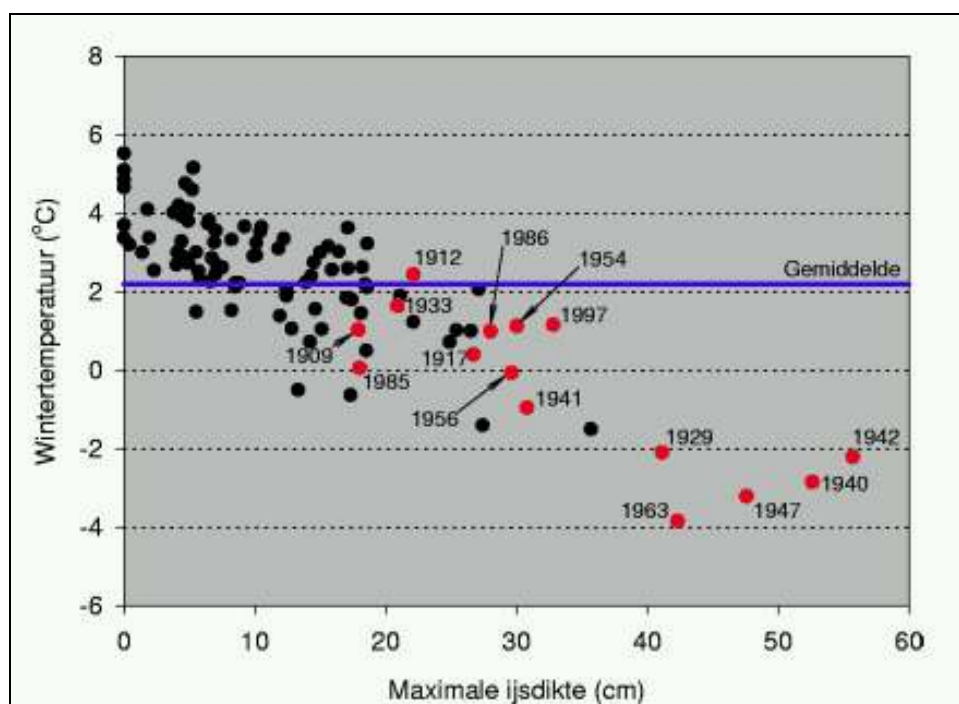
### **De gemiddelde wintertemperatuur en de ijsdikte**

Om de veranderingen van de frequentie voor de komende eeuw te kunnen berekenen is de relatie onderzocht tussen de gemiddelde wintertemperatuur (gemiddeld over de maanden december, januari en februari) en de ijsdikten op basis van berekeningen met het ijsgroeimodel.

In de periode 1971-2000 was de gemiddelde wintertemperatuur (wintermaanden zijn hier de maanden december, januari en februari) in De Bilt 3,3 °C, hetgeen beduidend hoger is dan het langjarig gemiddelde van 2,5 °C over de periode 1881–2000. Voor een belangrijk deel hangen deze hogere wintertemperaturen samen met het frequenter voorkomen van westelijke tot zuidwestelijke winden. Ondanks de gemiddeld hogere wintertemperaturen werden er in de laatste twee decennia van de 20<sup>e</sup> eeuw toch nog drie Elfstedentochten (ijsdikte minstens 15 cm) gereden, maar de laatste is alweer tien jaar geleden.

Een hogere gemiddelde wintertemperatuur hoeft niet automatisch te betekenen dat er géén stevige ijsvloer kan komen. Toch voelt iedereen wel aan dat verhoging van de wintertemperatuur effect moet hebben op ijsgroei. Dat blijkt ook wel wanneer we kijken naar de relatie tussen maximale ijsdikte en gemiddelde wintertemperatuur.

In figuur 7 is de relatie weergegeven tussen de gemiddelde wintertemperatuur (december- januari- februari) en berekende maximale ijsdikte in Friesland (1901-2000). De rode bolletjes geven de winters waarin er een Elfstedentocht verreden werd; de blauwe lijn geeft de gemiddelde wintertemperatuur in Friesland.



*fig. 7. Relatie tussen de gemiddelde wintertemperatuur en de maximale ijsdikte voor Friesland.*

Hoewel 1963 de laagste wintertemperatuur had gaat de eer van de grootste maximale ijsdikte naar de winter van 1942. Ook is duidelijk te zien dat bij een zelfde gemiddelde wintertemperatuur heel verschillende maximale ijsdikten kunnen voorkomen, afhankelijk van het verloop van de winters.

Uit een geschatte lineaire regressie blijkt een maximale ijsdikteverandering van 5,4 cm per graad Celsius. Deze dikteverandering per graad is gebruikt om te berekenen hoe de maximale ijsdikten afnemen in een warmer wordend klimaat (Brandsma 2001). Een kort onderzoek met de berekeningen voor Midden Nederland uit de gegevens van De Bilt levert een vergelijkbaar resultaat.

*De geschatte lineaire regressie van 5,4 cm ijsdikteafname per graad temperatuurstijging (van de wintergemiddelde temperatuur) wordt gehanteerd bij de inschatting van de gevolgen van de klimaatveranderingen voor ijsvorming langs de Betuweroute.*

#### 4. Gevolgen door klimaatveranderingen

##### Introductie klimaatscenario's

In de KNMI'06 klimaatscenario's, gepresenteerd op 30 mei 2006, is weergegeven hoe het klimaat voor Nederland kan veranderen door het versterkte broeikaseffect (KNMI Climate change scenarios 2006 for the Netherlands, WR2006-1 of op internet: <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/index.html> ).

De indeling van de KNMI'06 scenario's (figuur 9) is gebaseerd op de twee belangrijkste factoren voor klimaatverandering in Nederland, nl. stijging van de mondiale temperatuur en mogelijke veranderingen in de luchtstromingspatronen.

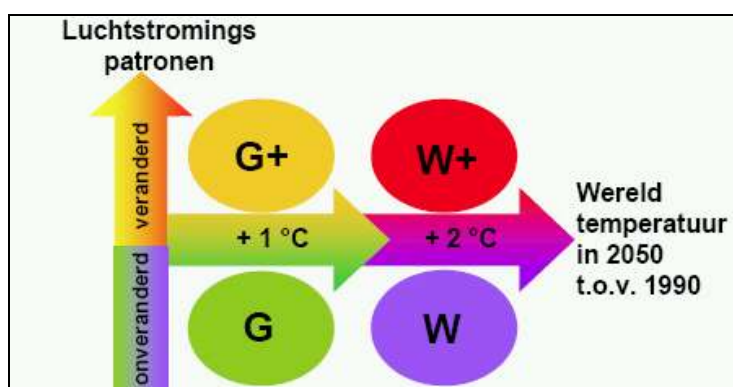


Fig. 9. Basis voor de KNMI'06 klimaatscenario's

De scenario's schetsen verschillende plausibele veranderingen in het klimaat van Nederland voor de 21<sup>e</sup> eeuw, met name voor de gemiddelde veranderingen van temperatuur en neerslag bij een mondiale temperatuurstijging van +1 °C (G en G+) en +2 °C (W en W+) in 2050 t.o.v. 1990. Voor het jaar 2100 wordt rekening gehouden met 2, resp. 4 °C mondiale opwarming. Voor luchtstromingspatronen geldt dat de analyses aangeven dat deze min of meer gelijk kunnen blijven (G en W), danwel in de winter meer westelijk en in de zomer meer oostelijk (G+ en W+) worden.

De mate van de globale opwarming en de mogelijke verandering in de circulatie hebben grote gevolgen voor ons land. Bij een globale temperatuurstijging van 2 tot 4 °C stijgt, zoals te zien is in figuur 10, de gemiddelde wintertemperatuur rond 2100 in Nederland met 1,8 tot 4,7 °C. Daarnaast warmt de koudste winterdag sterker op dan het gemiddelde.

In figuur 11 is te zien dat de koudste winterdag sterker opwarmt dan de gemiddelde wintertemperatuur.

			De Kooy	De Bilt	Eelde	Maastricht
	1976-2005	Jaargemiddelde	9,8	9,7	9,1	10,0
		Winter (DJF)	3,6	2,5	2,4	3,0
		Zomer (JJA)	16,1	16,8	16,0	17,2
<b>G</b>	2100	Winter (DJF)	5,3	4,3	4,1	4,8
		Zomer (JJA)	17,9	18,6	17,8	19,0
<b>G+</b>	2100	Winter (DJF)	5,9	4,9	4,7	5,4
		Zomer (JJA)	19,0	19,6	18,9	20,1
<b>W</b>	2100	Winter (DJF)	7,2	6,2	6,0	6,6
		Zomer (JJA)	19,7	20,4	19,6	20,8
<b>W+</b>	2100	Winter (DJF)	8,1	7,2	6,9	7,6
		Zomer (JJA)	21,9	22,5	21,7	22,9

Fig. 10. Overzicht van gemiddelde winter- en zomertemperaturen in de referentieperiode 1976-2001 met de meest waarschijnlijke veranderingen in de vier klimaatscenario's in 2100. Onder "winter" wordt hier verstaan december, januari en februari.

2050		G	G+	W	W+
Wereldwijde temperatuurstijging		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa		nee	ja	nee	ja
Winter	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,1°C	+1,8°C	+2,3°C
	koudste winterdag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,1°C	+2,9°C

Fig. 11. Verandering van de gemiddelde temperatuur en van de koudste winterdag in Nederland rond 2050 ten opzichte van 1990 in de vier KNMI'06 klimaatscenario's.

### Hoeveel verandert de kans op een ijslaag van minimaal 15 cm?

Er kan een schatting gemaakt worden van het aantal winters met een minimale ijsdikte van 15 cm die we in de 21e eeuw mogen verwachten. De basis hiervoor is het eerder beschreven verband tussen gemiddelde wintertemperatuur en de berekende maximale ijsdikte in de 20e eeuw, toegepast op een trapsgewijs toenemen van de gemiddelde wintertemperatuur (figuur 12).

Door deze gegevens te combineren met de relatieve stijging van de wintertemperatuur in de 21<sup>e</sup> eeuw (variërend tussen 1,8 °C (G scenario) en 4,7 °C (W+ scenario)) is een schatting mogelijk van de veranderingen in het aantal winters met een minimale ijsdikte van 15 cm.

In figuur 7 zijn er 38 winters met ijsdiken groter dan 15 cm (potentiële Elfstedentochten). Figuur 12 laat zien hoe dit aantal daalt wanneer de temperatuur steeds een halve graad stijgt.

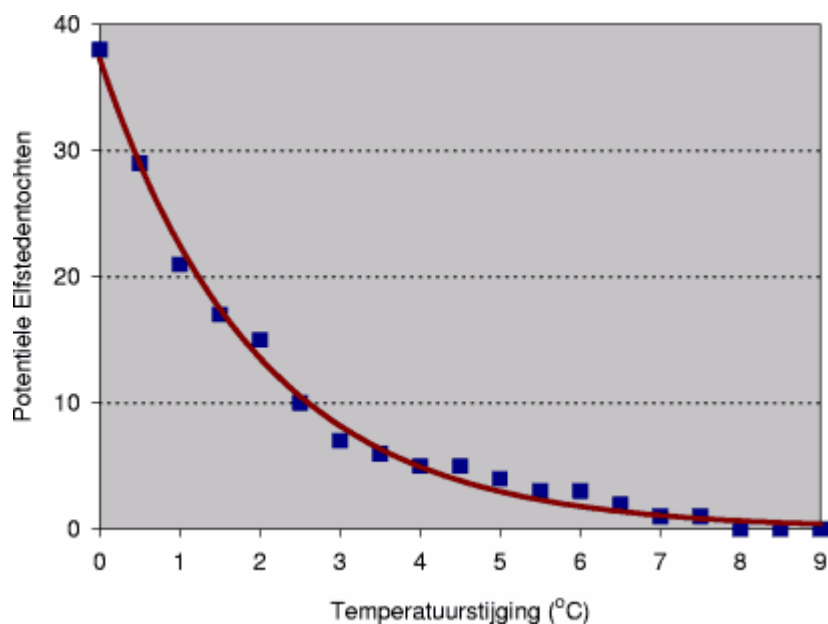


Fig. 12. Afname van het aantal situaties met potentiële ijsdikte boven 15 cm (nodig voor een Elfstedentocht) bij stijgende temperatuur, uitgaande van de 38 situaties in de 20e eeuw. De getrokken lijn geeft de fit met behulp van een niet-lineaire regressie.

Bij een stijging van 1,8 °C tot 2100 is af te lezen dat het aantal potentiële ijsdicken van 38 naar 16 afneemt en bij 4,7 °C naar 4 voor een eeuw met deze temperatuurstoename t.o.v. de wintergemiddelde temperatuur in de 20<sup>e</sup> eeuw.

De huidige herhalingsstijd voor ijsvloer met een dikte van meer dan 15 cm, ongeveer 2,5 jaar (twee per vijf winters), zou dan oplopen naar 6 tot 25 (afhankelijk van het toegepaste klimaatscenario). Naar huidige inzichten zal de opwarming in de 21<sup>e</sup> eeuw een geleidelijk proces zijn en zal de verandering van de herhalingsstijd waarschijnlijk lineair verlopen.

## 5. Discussie

Er is geen “voorkeursscenario”, de klimaatscenario’s van het KNMI beslaan naar huidige inzichten de meest waarschijnlijke oplossingsruimte voor de veranderingen van de seizoengemiddelde temperatuur van de geaccepteerde klimaatmodellen voor Nederland en directe omgeving. Het middelen tussen de verschillende scenario’s wordt afgeraden.

De prognose voor de 21<sup>e</sup> eeuw verdient nog enige relativering. In de eerste plaats is uitgegaan van de gegevens van de 20<sup>e</sup> eeuw, en daarmee ook van de natuurlijke variaties in die eeuw. Natuurlijke variaties kunnen echter van eeuw tot eeuw verschillen. Zo blijkt uit een analyse van de maximale ijsdicken in de 19<sup>e</sup> eeuw dat het aantal potentiële Elfstedentochten toen ca. 30% groter was dan in de 20<sup>e</sup> eeuw.

De geschetste ontwikkeling van ijsvorming langs de Betuweroute in de 21<sup>e</sup> eeuw is gebaseerd op de huidige inzichten in de historische gegevens, het huidige klimaat en de toekomstige klimaatontwikkelingen. Voortschrijdend inzicht, bijvoorbeeld ten aanzien van de aanname dat de opwarming als gevolg van het versterkte broeikaseffect een geleidelijk proces is, kan tot andere resultaten leiden.



## **Aanbevolen literatuur**

- KNMI'06 Klimaatscenario's:  
<http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/index.html>
- H.A.R. de Bruin en H.R.A. Wessels 1988, A model for the formation and melting of ice on surface waters, *Journal of Applied Meteorology*, 27, 164-173.
- De Bruin, H.A.R. en H.R.A. Wessels 1990, IJs in de Lage Landen, *Zenit* 17, 437-444.
- IJs in Friesland, 1901 – 1998, Wessels 1991
- T. Brandsma, 2001, Hoeveel Elfstedentochten in de 21<sup>e</sup> eeuw?, *Zenith*, april 2001
- Klimaatatlas van Nederland 1971-2000, KNMI 2002
- HISKLIM (HIStorisch KLIMaat), T. Brandsma, F. Koek, H. Wallbrink en G.P. Können 2000, (<http://www.knmi.nl/onderzk/hisklim/>).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (<http://www.ipcc.ch/>).

## Bijlage: De operationele ijspluim

Het KNMI maakt dagelijks computerberekeningen voor ijsvorming (of rivierwatertemperatuur). De berekeningen worden dagelijks uitgevoerd op basis van het zgn. EPS, Ensemble Prediction System, een systeem dat de onzekerheden voor de komende 10 dagen zo goed mogelijk doorrekent.

Dit systeem geeft een indicatie voor (de spreiding van) het temperatuurverloop en de ijsvorming (of watertemperatuur) voor de komende 10 dagen voor een aantal locaties en is bij uitstek geschikt voor bewaking van de ijsvorming langs de Betuweroute.

In het operationele taalgebruik van de meteorologische dienst wordt, vanwege de grafische vorm, dit de “ijspluim” genoemd. In de illustratie (figuur 13) wordt de ijspluim van 26 januari 2006 weergegeven.

De bovenste grafiek geeft de ijsdikteontwikkeling aan voor Midden Nederland in de periode van woensdag 25 januari tot en met zaterdag 5 februari 2006, de gemiddelde ijspluim geeft na vier dagen (nacht)vorst een ijslaag van 5 cm.

De koudste oplossingen geven aan het eind van de verwachtingsperiode een ijsdikte van 10 cm, in de warmste oplossingen is het ijs weer gesmolten. In de temperatuurpluim zien we voor dezelfde periode eerst een vrijwel zekere overgang naar kou met lichte tot matige vorst, daarna nemen de vorstkansen weer af.

Met de dagelijks berekende ijspluim is een actieve bewaking van de ijsdikte langs de Betuweroute mogelijk.

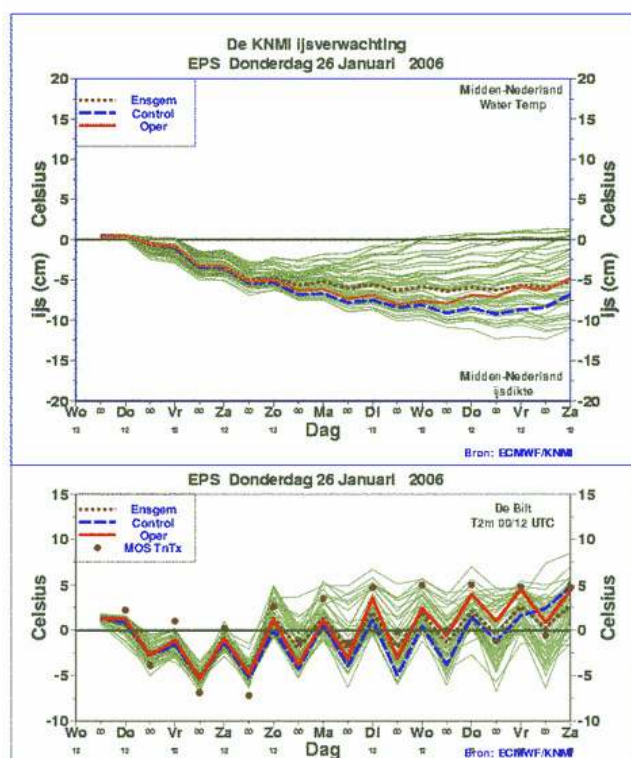


Fig. 13. Voorbeeld van een ijs- en temperatuurpluim